



Почвы и окружающая среда

Научный журнал

Том 8. Выпуск 4

2025

<https://soils-journal.ru>

The Journal of Soils and Environment

Scientific Journal

Volume 8. Issue 4

2025



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

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Главный редактор:

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

Заместители главного редактора:

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

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

Члены редколлегии:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Заведующая редакцией:

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

Ответственный секретарь:

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

Научный редактор:

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

Выпускающий редактор:

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

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

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

© 2025 ФГБУН Институт почвоведения и агрохимии СО РАН

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

EDITORIAL BOARD

Editor-in-Chief:

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

Editors:

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

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

Members of the Editorial Board:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Head of the Editorial Board:

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

Executive Secretary:

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

Scientific Editor:

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

Commissioning Editor:

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

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

© 2025 Institute of Soil Science and Agrochemistry of SB RAS

Содержание

Органическое вещество и биохимия почв

- Русских И.В., Стрельникова Е.Б., Серебренникова О.В., Харанжевская Ю.А.** Сравнение состава органических соединений в торфах и водах разных типов болот южно-таёжной подзоны Западной Сибири e326
- Соколова И.В., Федорова А.А.** Спектральные и флуоресцентные свойства гуминовых кислот различных образцов торфа e331
- Мальцев А.Е., Прейс Ю.И., Леонова Г.А., Ломова, А.А.** Геохимия болотных вод голоценового разреза Большого Убинского рьяма (Барабинская лесостепь) e332
- Головацкая Е.А., Никонова Л.Г.** Изменение химического состава растительного опада в процессе разложения в условиях олиготрофного болота e344

Генезис, экология и география почв

- Рычкова И.В., Самофалова И.А.** Особенности торфяных залежей горных болот на западном макросклоне Среднего Урала (хребет Басеги) e314
- Голубец Д.И., Дюкарев Е.А.** Дешифрирование болот Томской области методом кластеризации e323

Взаимодействие почва – растение – микробиом в экосистемах

- Минаева О.М., Зюбанова Т.И., Акимова Е.Е., Синюткина А.А.** Изменение численности копитрофной и олиготрофной микрофлоры верхового Усть-Бакчарского болота в процессе постпирогенного восстановления e333

Поведение почв и экосистем в пространстве и во времени

- Ничипорович З.А., Заневская Л.А., Гаврилюк Л.Н.** Опыт исследования балансовых потоков парниковых газов с торфяников Беларуси, используемых для промышленной добычи торфа e324

Обзоры, дискуссии, памятные даты

- Харанжевская Ю.А.** История проведения научной конференции «Торфяные болота Сибири: функционирование, ресурсы, восстановление» в 2009–2025 гг. e342
- Смоленцев Б.А., Смоленцева Е.Н.** К 90-летию со дня рождения члена-корреспондента РАН Гаджиева И.М. e343
- Тимохин А.Ю., Чекусов М.С.** Памяти Василия Сергеевича Бойко e345

Contents

Soil Organic Matter and Biochemistry

- Russkikh I.V., Strelnikova E.B., Serebrennikova O.V., Kharanzhevskaya Y.A.** Comparison of organic compounds content in peat deposits and water of different mire types in the southern taiga subzone of West Siberia e326
- Sokolova I.V., Fedorova A.A.** Spectral and fluorescent properties of humic acids from various peat samples e331
- Maltsev A.E., Preis Y.I., Leonova G.A., Lomova A.A.** Geochemistry of peatland water in the holocene sequence of the Bolshoy Ubinsky ryam (Baraba forest-steppe) e332
- Golovatskaya E.A., Nikonova L.G.** Changes in the chemical composition of plant litter during decomposition in an oligotrophic peatland e344

Soil Genesis, Ecology and Geography

- Rychkova I.V., Samofalova I.A.** Characteristic features of peat deposits of mountain mires on the western macroslope of the Middle Urals (Basegi Ridge) e314
- Golubets D.I., Dyukarev E.A.** Mapping of mires of the Tomsk region by the clustering method e323

Interaction Soil – Plant – Microbiome in Bioecosystems

- Minaeva O.M., Zyubanova T.I., Akimova E.E., Sinyutkina A.A.** Changes in the abundance of copiotrophic and oligotrophic microorganisms in the Ust-Bakchar raised bog during post-fire restoration e333

Soil and Ecosystem Behaviour in Time and Space

- Nichiporovich Z.A., Zanevskaya L.A., Gavrilyuk L.N.** Balance greenhouse gas fluxes from the Belarus peat deposits used for industrial peat extraction e324

Reviews, Discussions and Memoria

- Kharanzhevskaya Y.A.** International conference "Peatlands of Siberia: functioning, resources, restoration"(the history of its organization in 2009–2025) e342
- Smolentsev B.A., Smolentseva E.N.** Ninety years since the birthday of the Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences I.M. Gadzhiev e343
- Timokhin A.Y., Chekusov M.S.** In memory of Vasily Sergeevich Boiko e345



Сравнение состава органических соединений в торфах и водах разных типов болот южно-таёжной подзоны Западной Сибири

© 2025 И. В. Русских ¹, Е. Б. Стрельникова ¹, О. В. Серебренникова ¹,
Ю. А. Харанжевская ^{2,3}

¹ФГБУН Институт химии нефти СО РАН, Академический проспект, 4, г. Томск, 634055, Россия.

E-mail: rus@ipc.tsc.ru

²Сибирский научно-исследовательский институт сельского хозяйства и торфа – филиал ФГБУН Сибирского федерального научного центра агробиотехнологий РАН, ул. Гагарина, 3, г. Томск, 634050, Россия. E-mail: kharan@yandex.ru

³ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский государственный университет», проспект Ленина, 36, г. Томск, 634050, Россия.

Цель исследования. Определение особенностей состава органических соединений в воде разных типов болот Томской области в зависимости от их содержания в торфяной залежи.

Место и время проведения. Отбор проб болотных вод и соответствующих торфов проводили в июле–августе 2016 года на верховых, переходном и низинных болотах южно-таёжной подзоны Западной Сибири в границах Томской области. Пробы торфа были отобраны на глубине 30–60 см.

Методы. Экстракцию органических соединений из болотных вод осуществляли раствором 10% гексана в хлороформе. Образцы торфа были высушены и измельчены, органические соединения из торфа сконцентрированы путем экстракции 7% раствором метанола в хлороформе при 60 °С. Исследование индивидуального и компонентного состава органических соединений в воде и торфе проводили методом хроматомасс-спектрометрии с использованием магнитного хроматомасс-спектрометра.

Основные результаты. Исследован состав органических соединений торфов и вод в разных типах болот Томской области. Установлено, что в ряду торфа – болотные воды отдельные группы биомолекул распределены неравномерно. Среди ациклических структур в древесно-пушицевом и сфагновых торфах доминируют *n*-алканы (28–65%), в осоковых и гипновых торфах их доля не превышает 30%. В болотных водах преобладают *n*-алканы (38–54%), за исключением переходного болота Тисанское и низинного Ишколь, где доминируют длинноцепочечные эфиры жирных кислот. В осоковом и осоково-гипновом низинных торфах преобладают карбонильные структуры – *n*-алкан-2-оны, в некоторых торфах обнаружены также дикетоны – дионы. В водах доля карбонильных структур существенно ниже, в них распространены соединения с гидроксильной группой – *n*-алканола. Древесно-пушицевый, осоковый и осоково-гипновый торфа обогащены ациклическими соединениями. В верховых торфах и одном из переходных преобладают циклические структуры. Показано, что в составе циклических соединений в сфагновых верховых торфах преобладают пентациклические тритерпеноиды, в моховом переходном – дитерпеноиды, а в древесно-пушицевом и осоково-гипновом – стероиды. Соотношение содержания отдельных групп циклических соединений в водах большинства болот близко к таковому в соответствующих торфах. Только в двух болотах соотношение групп циклических структур в водах и торфе отличается.

Заключение. Анализ состава органических соединений показал, что в торфах и водах среди ациклических соединений, наряду с преобладанием *n*-алканов, в большом количестве присутствуют соединения с карбонильной группой – *n*-алкан-2-оны, дикетоны и *n*-альдегиды, а в водах – длинноцепочечные эфиры. В составе циклических соединений верховых торфов доминируют пентациклические тритерпеноиды; в осоково-гипновом низинном и древесно-пушицевом переходном торфах – стероиды, а в моховом переходном – дитерпеноиды. Болотные воды в большинстве наследуют циклические соединения соответствующих торфов.

Ключевые слова: верховые, переходные и низинные болота; торф; болотная вода; торф; распределение органических, ациклических и циклических соединений.

Цитирование: Русских И.В., Стрельникова Е.Б. Серебренникова О.В., Харанжевская Ю.А. Сравнение состава органических соединений в торфах и водах разных типов болот южно-таёжной подзоны Западной Сибири // Почвы и окружающая среда. 2025. Том 8. № 4. e326. DOI: [10.31251/pos.v8i4.326](https://doi.org/10.31251/pos.v8i4.326)

ВВЕДЕНИЕ

Территория Западной Сибири характеризуется высокой заболоченностью, достигающей на отдельных участках 50% и более. Для болот характерны избыточное увлажнение почв, присутствие

специфической гидрофильной растительности и процессы торфонакопления. Совокупность взаимосвязанных компонентов болот – болотной растительности и отложений торфа формирует особый состав болотных вод (Савичев, 2015). Болотные воды для всех типов торфяной залежи (верхового, переходного и низинного) содержат большое количество органических веществ (80–120 мгС/дм³), поступающих в них в процессе трансформации растительных остатков. В составе органических веществ обнаружены фульвокислоты, гуминовые кислоты, фенолы, ароматические и парафиновые углеводороды, карбоновые кислоты и ряд других соединений (Шварцев и др., 2012). В настоящее время проводятся исследования органических веществ в торфах, посвященные распространению отдельных соединений, например, полиароматических (Tfaily et al., 2018; Prijas, 2022), *n*-алканов (Габов и др., 2022; Pastukhov et al., 2025), но мало работ, в которых проводится анализ всего комплекса органических соединений и сопоставление его с болотными водами.

В работе (Серебренникова и др., 2019а) показана сезонная динамика состава органических соединений в воде верхового участка, типичного для южной тайги Бакcharского болота, который формируется за счёт соединений, образовавшихся в торфяной залежи, попадающих с атмосферными осадками, а также компонентов болотных растений. Данная работа посвящена исследованию особенностей состава органических соединений в водах разных типов болот Томской области в зависимости от их содержания в торфяной залежи.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Отбор проб болотных вод и соответствующих торфов проводили в июле–августе 2016 года на верховых, переходном и низинных болотах южно-таёжной подзоны Западной Сибири в границах Томской области (табл. 1).

Таблица 1

Характеристика исследуемых болот Томской области

Болото	Координаты	Геоморфологическое положение	Ботанический состав торфа	Степень разложения торфа, %	pH воды, ед.
Верховое Большое	58°47'51,7" 81°11'50,8"	3-я надпойменная терраса р. Обь	Верховой фускум-торф: <i>S. fuscum</i> – 95%, <i>S. divinum</i> , кустарнички – 5%.	10	4,0
Верховое Бакcharское ПЗ (отроги Большого Васюганского болота)	56°58'24,3" 82°36'41,2"	Междуречье рек Бакchar и Икса	Верховой фускум-торф: <i>S. fuscum</i> – 85%, <i>S. divinum</i> – 5%, <i>S. angustifolium</i> – 5%, ерниковые кустарнички – 5%	5	4,2
Верховое Бакcharское П5 (отроги Большого Васюганского болота)	56°58'17,3" 82°37'04,5"	Междуречье рек Бакchar и Икса	Верховой пушицево-сфагновый торф: <i>S. divinum</i> – 55%, <i>S. balticum</i> – 10%, ерниковые кустарнички – 5%, пушица – 25%, <i>S. majus</i> – 5%	10	4,5
Верховое Центральное	58°18'57,7" 84°55'59,5"	3-я надпойменная терраса р. Кеть	Верховой фускум-торф: <i>S. fuscum</i> – 90%, пушица – 5%, кустарнички – 5 %	5	4,3
Верховое Иксинское (северо-восточные отроги Большого Васюганского болота), выгоревшее в 1998 г.	56°51'30,6" 83°04'06"	Междуречье рек Иксы и Шегарки (бассейн реки Чая) в Бакcharском районе	Древесно-пушицевый переходный торф: <i>Carex rostrata</i> – 5%, <i>S. balticum</i> , <i>S. divinum</i> – 10 %, <i>Pinus sylvestris</i> – 10%, <i>Carex lasiocarpa</i> – 5%, пушица – 60%, <i>Betula pubescens</i> – 10%	20	5,4
Переходное Тисанское	58°25'26,0" 83°44'34,9"	Пойма реки Кеть	Моховой переходный торф: <i>S. divinum</i> – 40%, <i>Bryopsida</i> – 35%, <i>Carex lasiocarpa</i> – 10%, <i>Carex diandra</i> – 5%, древесные остатки – 10%.	15	4,9
Низинное Самара	56°55'30,1" 82°30'41,1"	1-я надпойменная терраса р. Бакchar	Осоковый низинный торф: <i>Carex rostrata</i> – 40%, <i>Carex lasiocarpa</i> – 15%, <i>Carex diandra</i> – 5%, <i>Drepanocladus aduncus</i> – 10%, пушица – 10%, <i>Meesia triquetra</i> , <i>Carex appropinquata</i> – 5%, <i>Betula nana</i> – 10%, вахта – 5%.	20	6,7
Низинное Ишколь	57°11'51,4" 85°54'8,2"	Пойма р. Чулым	Осоково-гипновый низинный торф: <i>Drepanocladus aduncus</i> – 40%, <i>Carex rostrata</i> – 30%, вахта – 10%, <i>Carex diandra</i> , <i>Hamatocaulis vernicosus</i> – 20%.	30	6,8

Для отбора проб выбирался наиболее типичный участок, пробы торфа были отобраны на глубине 30–60 см. Отбор проб торфа проводился в однократной повторности, непосредственно в месте отбора проб болотных вод. Пробы болотных вод отбирали из специально организованной скважины. В пределах верхового болота Большое отбор проб осуществляли в пределах сосново-кустарничково-сфагнового фитоценоза с низкой сосной. Отбор проб в пределах верхового Бакчарского болота проводился в сосново-кустарничково-сфагновом фитоценозе с низкой сосной (Пункт 3, ПЗ), а также в осоково-сфагновой топи (Пункт 5, П5). На Иксинском верховом болоте отбор проб проводили в сосново-кустарничково-сфагновом фитоценозе с высокой сосной. В пределах Центрального болота отбор проб осуществляли в мочажине в пределах грядово-мочажинного комплекса. Пробы в пределах Тисанского болота отбирали в сосново-кустарничковом травяно-сфагновом фитоценозе. В пределах болота Самара отбор проб проводили в березово-сосново-травяно-сфагновом фитоценозе. На болоте Ишколь пробы отбирали в пределах лиственнично-осокового кустарничково-гипнового фитоценоза. Более подробная характеристика болот приведена в работе (Серебренникова и др., 2023).

Органические соединения из болотных вод экстрагировали раствором 10% гексана в хлороформе. Образцы торфа были высушены и измельчены, липиды из торфа сконцентрированы путем экстракции 7% раствором метанола в хлороформе при 60°C. Исследование индивидуального и компонентного состава органических соединений проводили методом хроматомасс-спектрометрии с использованием магнитного хроматомасс-спектрометра DFS, предоставленного центром коллективного пользования ТомЦКП СО РАН (Серебренникова и др., 2019а; Серебренникова и др., 2023), аттестованного с погрешностью определения не более 5%. Режим работы хроматографа: кварцевая капиллярная хроматографическая колонка фирмы “Agilent” с внутренним диаметром 0.25 мм, длиной 30 м, толщина фазы 0,25 мкм, неподвижная фаза – TR-5MS; газ-носитель – гелий, температура испарителя 250°C, температура интерфейса 250°C. Индивидуальные соединения идентифицировали по масс-фрагментограммам в программе X-Calibur 10 с использованием компьютерной библиотеки масс-спектров NIST.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В образцах торфа и воде исследованных болот идентифицированы ациклические и циклические органические соединения (табл. 2, 3).

Таблица 2

Содержание ациклических и циклических соединений в торфах (мкг/г) и водах (мкг/л) верховых болот

Соединения	Большое		Бакчарское ПЗ		Бакчарское П5		Центральное	
	Торф	Вода	Торф	Вода	Торф	Вода	Торф	Вода
Ациклические								
<i>n</i> -Алканы	14,2	23,7	19,1	9,8	22,0	42,0	24,5	20,1
Длинноцепочечные эфиры	0	16,4	0	6,1	0,0	23,0	0	6,6
<i>n</i> -Альдегиды	10,9	5,5	8,6	1,3	1,6	16,3	7,9	2,2
<i>n</i> -Алкан-2-оны	10,7	2,8	9,3	2,9	4,2	7,2	8,3	1,5
Дикетоны	8,1	1,5	1,1	0,2	0,8	6,6	5,8	0,1
<i>n</i> -Алканола	7,5	8,6	6,6	5,5	5,1	0	3,1	6,7
10-Нонакозанол	0	0,1	0	0,2	0	0	0	0,2
Сумма	51,4	58,5	44,7	26,0	33,6	95,1	49,7	37,4
Циклические								
Дитерпеноиды	0,7	2,2	2,1	0	1,7	0,03	1,0	0,0
ПЦТ	278,9	11,6	63,6	1,4	34,8	86,5	196,0	0,8
Стероиды	48,0	6,2	14,6	0,8	32,3	3,2	46,1	21,1
Токоферолы	8,8	0,4	5,4	0,1	0,4	0,4	9,8	0,3
Сумма	336,5	20,3	84,7	2,3	69,3	90,2	252,9	22,4

Среди ациклических соединений идентифицированы: *n*-алканы, *n*-алкан-2-оны, *n*-алканола, *n*-альдегиды, дионы, длинноцепочечные эфиры жирных кислот (ДЦЭ). В ряду циклических соединений обнаружены бициклические токоферолы (ТФ), трициклические дитерпеноиды (ДТ), тетрациклические стероиды (СТ) и пентациклические тритерпеноиды (ПЦТ).

Таблица 3

Содержание ациклических и циклических соединений в переходных и низинных торфах (мкг/г) и болотных водах (мкг/л)

Соединения	Переходные				Низинные			
	Тисанское		Иксинское		Ишколь		Самара	
	Торф	Вода	Торф	Вода	Торф	Вода	Торф	Вода
Ациклические								
<i>n</i> -Алканы	8,0	5,8	31,1	1,9	5,6	1,1	34,7	4,2
Длинноцепочечные эфиры	25,4	9,4	0	0,2	0	5,1	0,0	0,7
<i>n</i> -Альдегиды	3,3	0,8	15,9	0,1	2,0	0,3	2,8	0,2
<i>n</i> -Алкан-2-оны	7,2	2,1	9,8	0,7	13,7	0,1	47,5	0,3
Дикетоны	0	0,5	0,4	0,0	3,7	0,0	17,6	0,0
<i>n</i> -Алконолы	0	4,8	0	0,7	2,8	1,0	15,6	2,8
10-Нонакозанол	0	0,2	0	0	0	0	0	0
Сумма	43,9	23,6	57,2	3,7	27,8	7,6	118,2	8,3
Циклические								
Дитерпеноиды	92,2	43,8	6,6	0,1	0	0,1	0	0
ПЦТ	22,3	2,5	9,4	0,4	3,2	0,7	34,1	2,0
Стероиды	34,6	6,1	16,0	0,9	6,1	2,7	11,2	2,2
Токоферолы	2,7	0,1	0,3	0,0	0,7	0,4	4,0	0,3
Сумма	151,8	52,4	32,4	1,4	9,9	3,9	49,6	4,5

Болотная вода, являясь огромным резервуаром, должна отражать состав компонентов торфов и растений. Одной из представительных групп ациклических органических соединений большинства исследованных болот являются *n*-алканы. Присутствие *n*-алканов в объектах окружающей среды объясняется биопродуктивностью растений, животных, микроорганизмов, либо наличием нефтепродуктов, о чем свидетельствует характер распределения *n*-алканов (Peters et al., 2007). Для биологических систем характерно преобладание *n*-алканов с нечетным числом атомов углерода в молекуле над четным количеством; в нефтепродуктах распределение *n*-алканов сглажено (Hunt, 1979). В данной работе обнаружено преобладание *n*-алканов с нечетным числом атомов углерода над четным количеством в водах и торфах всех болот, что свидетельствует о преимущественно биогенном происхождении этих соединений.

Анализ распределения *n*-алканов в торфах и водах исследованных болот (рис. 1) показал доминирование высокомолекулярных нечетных гомологов C₂₁–C₃₁. В фускум-торфе болота Большое, состоящем в основном из остатков мхов *Sphagnum fuscum* (табл. 1), доминирующим является алкан C₂₅ и характерный для *Sphagnum divinum* C₂₃ (Серебренникова и др., 2019б), тогда как в воде в максимальном количестве присутствуют C₂₉ и C₃₁. Наличие C₂₉ характерно для хамедафны (*Chamaedaphne calyculata*), а C₃₁ – для пушицы (Серебренникова и др., 2014).

В фускум-торфе болота Центральное преобладает C₂₅, кроме этого присутствует C₃₁, характерный для пушицы, в воде в максимальном количестве обнаружены C₂₃ и C₂₇. В торфе, отобранном на участке осоково-сфагнуовой топи Бакчарского П5 болота доминирующим алканом является C₂₃, который преобладает в торфах, в составе которых преобладают остатки мхов *Sphagnum divinum*, *Sphagnum balticum* (Стрельникова и др., 2021); в воде доминируют алканы C₂₇ и C₂₉. В фускум-торфе на участке рья Бакчарского ПЗ болота, наряду с высоким содержанием C₂₅–C₂₉, обнаружено максимальное количество C₃₁; похожее распределение алканов в воде. В древесно-пушицевом переходном торфе Иксинского болота преобладают C₂₇ (*Scheuchzeria*) (Стрельникова и др., 2021), C₂₅ и C₁₆ (наличие C₁₆ характерно для микроорганизмов (Pancost et al., 2002; Hunt, 1979)). В воде Иксинского болота, как и в воде болота Большое, в максимальном количестве присутствуют C₂₉ и C₃₁, что определяется наличием кустарничков и пушицы в растительном покрове. В моховом торфе переходного Тисанского болота доминируют гомологи C₂₅–C₂₉. Такое распределение встречается в некоторых сфагновых торфах (Naafs et al., 2019).

В низинных торфах (осоково-гипновом (Ишколь) и осоковом (Самара)) доминируют алканы C₂₃–C₂₇ и C₂₇, соответственно, в воде преобладают гомологи C₂₇ и C₂₉, а в воде переходного Тисанского и низинных болот доминирует C₂₇. Подобное распределение *n*-алканов в различных сфагновых торфах и мхах показано в работах (Серебренникова и др., 2018; Стрельникова и др., 2021; Серебренникова и др., 2019а; Pancost et al., 2002; Bingham et al., 2010).

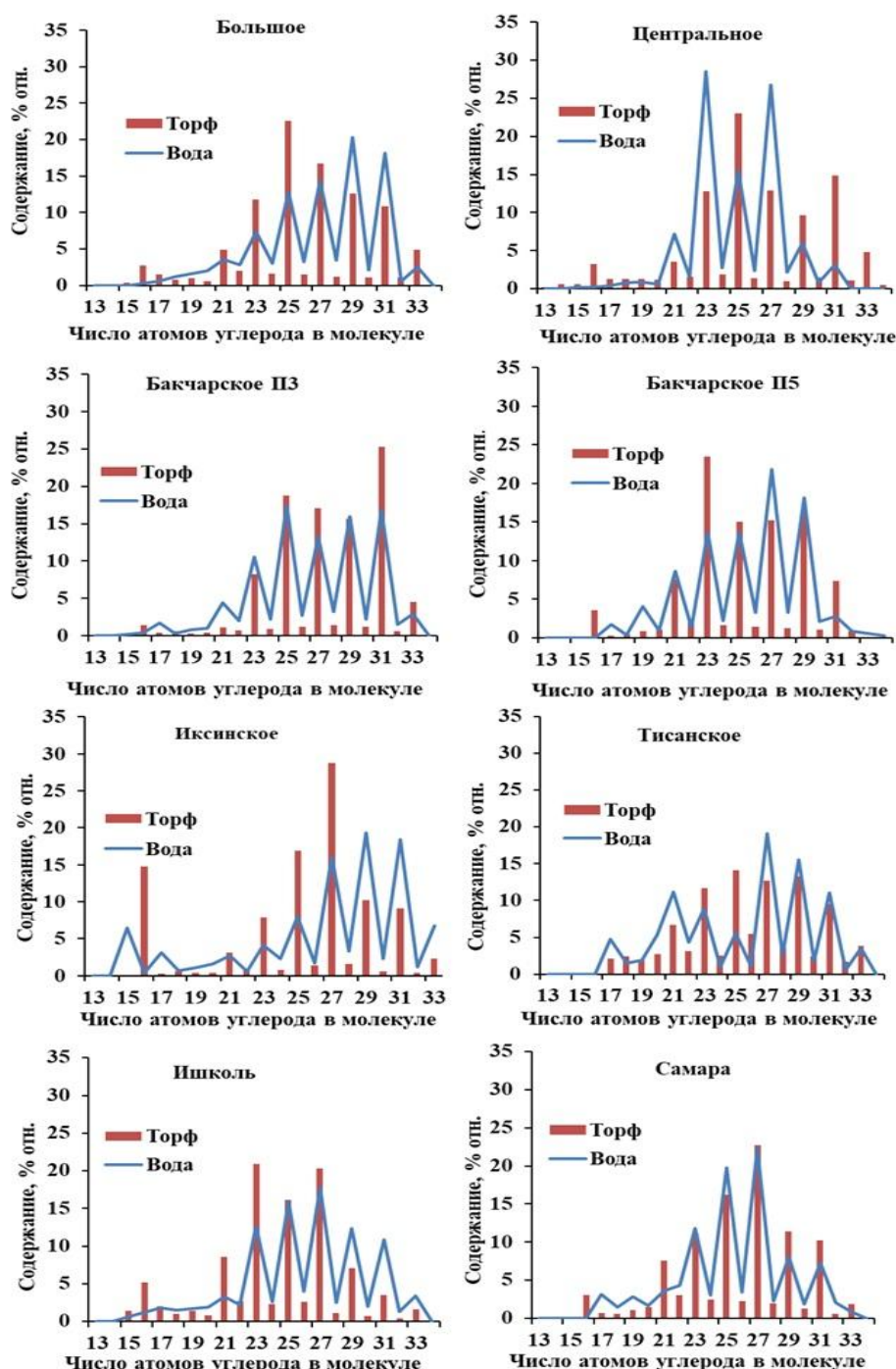


Рисунок 1. Распределение *n*-алканов в торфах и водах верховых (Большое, Бакcharское, Центральное, Иксинское), низинных (Самара, Ишколь) и переходного (Тисанское) болот.

В торфах и водах обнаружены *n*-алкан-2-оны C_{19} – C_{33} с доминированием нечетных структур. В образцах с преобладанием сфагновых мхов (верховые болота) преобладает гомолог C_{27} , как и в большинстве сфагновых мхов (Стрельникова и др., 2021). В низинных торфах, образованных преимущественно осокой и гипновыми мхами, в равных количествах с C_{27} присутствует гомолог C_{25} . В водах низинных болот максимум распределения алканов приходится на гомологи C_{27} , C_{29} , C_{31} . Кроме того, в составе *n*-алкан-2-онов низинных и переходных торфов и болотных вод заметны гомологи C_{19} и C_{21} , а в болоте Иксинское гомолог C_{21} доминирует над остальными. В большинстве торфов и вод обнаружены также нечетные β -дикетоны C_{21} – C_{33} . Известно, что дикетоны 14,16-гептатриаконтандион и 16,18-триатриаконтандион распространены во многих растениях, в том числе в злаковых травах (Tulloch, 1976). В состав идентифицированных в торфах и водах болот Томской области ациклических карбонильных структур входят также преимущественно четные *n*-альдегиды ряда C_{20} – C_{32} , среди которых преобладают гомологи C_{24} – C_{28} .

В большинстве торфов и вод идентифицированы четные *n*-алканола C_{14} – C_{30} . В водах преобладают гомологи C_{22} – C_{26} , в торфах доля гомологов C_{14} – C_{18} сопоставима, а в некоторых случаях даже превышает основную моду. Подобно *n*-алканам, четные *n*-алканола C_{14} – C_{18} могут являться продуктами деятельности микроорганизмов. В большинстве болотных вод, за исключением участка осоково-сфагнутой топи, обнаружен длинноцепочечный спирт – 10-нонакозанол, который содержится, например, в восках листьев рябины и составляет до 60% от общего количества воска хвойных пород деревьев (Русских, Стрельникова, 2024; Matas et al., 2003); при этом в исследованных торфах этот спирт не зафиксирован.

Длинноцепочечные эфиры одноатомных спиртов и жирных кислот с 26–34 атомами углерода в молекуле широко распространены в болотных водах. Это компоненты растительного воска, вырабатываемого растениями для защиты от неблагоприятных факторов внешней среды. Максимальное содержание ДЦЭ зафиксировано в водах переходного Тисанского болота, в торфяной залежи которого эти соединения также обнаружены.

В ряду торфа–болотные воды отдельные группы биомолекул распределены неравномерно. В сфагновых торфах и древесно-пушицевом торфе доминируют углеводороды – *n*-алканы (рис. 2); их доля в составе ациклических структур составляет 28–65% и не превышает 30% в осоковых и гипновых торфах. В большинстве вод преобладают *n*-алканы (38–54%), за исключением переходного болота Тисанское и низинного Ишколь, где доминируют ДЦЭ. Высокое содержание последних отмечается и в водах верховых болот.

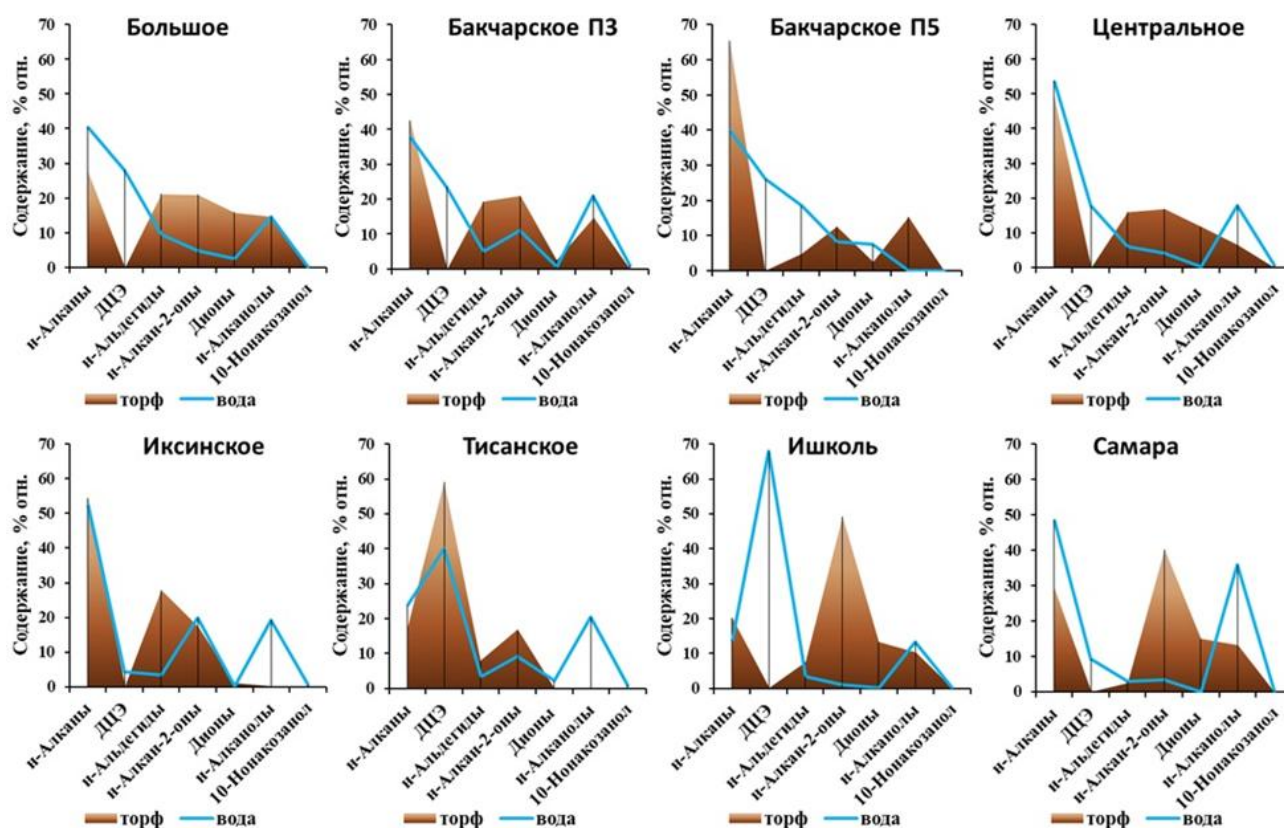


Рисунок 2. Относительное содержание ациклических структур в торфяных залежах и водах верховых (Большое, Бакcharское, Центральное, Иксинское), низинных (Самара, Ишколь) и переходного (Тисанское) болот.

В осоковом и осоково-гипновом низинных торфах преобладают карбонильные структуры – *n*-алкан-2-оны. Другие соединения с карбонильной группой – *n*-альдегиды – присутствуют в древесно-пушицевом и большинстве сфагновых торфах, в некоторых торфах обнаружены также дикетоны – дионы. В водах роль карбонильных структур существенно ниже, на третьем месте по распространенности после углеводородов (*n*-алканов) и сложных эфиров (ДЦЭ) находятся спирты – *n*-алканола, за исключением участка осоково-сфагнутой топи Бакcharского болота (П5), где эти соединения отсутствуют.

Содержание циклических соединений в исследованных торфах варьирует от 9,9 до 336,5 мкг/г сухого торфа (табл. 2, 3). Максимальные значения присущи моховому переходному (Тисанское болото)

и сфагновым верховым (Большое, Бакcharское и Центральное болота) торфам, содержание в которых циклических структур в среднем в 4 раза выше, чем ациклических. При этом в составе циклических структур сфагновых торфов преобладают ПЦТ, в моховом – дитерпеноиды. Древесно-пушицевый (Иксинское болото), осоковый и осоково-гипновый торфа (болота Самара и Ишколь, соответственно), наоборот, обогащены ациклическими соединениями, концентрация которых в 1,8–2,8 раза выше суммы циклических; в составе же циклических соединений, в отличие от сфагновых торфов, преобладают (за исключением осокового торфа) стероиды (рис. 3).

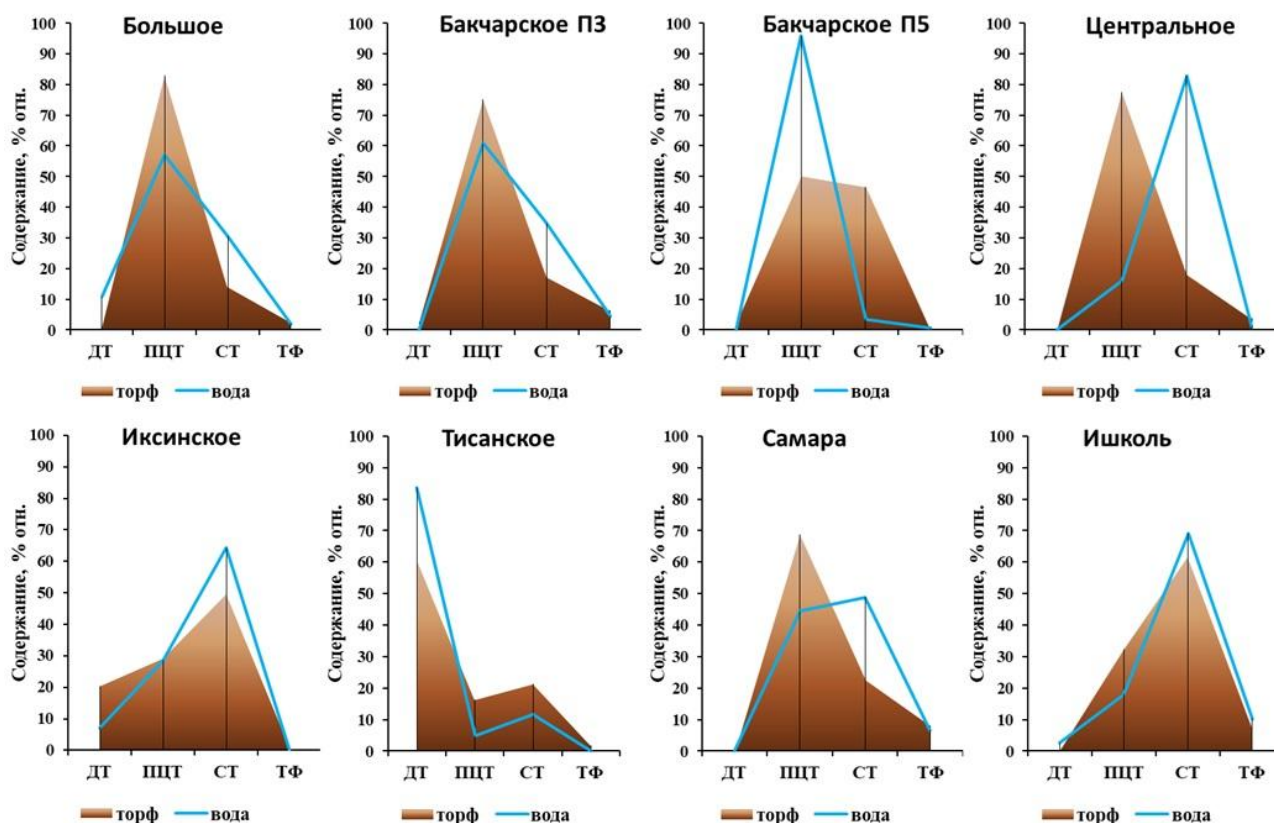


Рисунок 3. Относительное содержание отдельных групп соединений в составе циклических структур в торфах и водах верховых (Большое, Бакcharское, Центральное, Иксинское), низинных (Самара, Ишколь) и переходного (Тисанское) болот.

В водах большинства исследованных болот, независимо от ботанического состава торфа, содержание циклических соединений в 1,5–11,3 раза ниже суммы ациклических. Только в воде осоково-сфагновой топи Бакcharского болота (П5) содержание ациклических и циклических структур близко, а в воде Тисанского болота концентрация циклических соединений в 2 раза больше ациклических.

Соотношение содержания отдельных групп циклических соединений в водах большинства исследованных болот близко к таковому, наблюдаемому в соответствующих торфах (рис. 3). Только в водах болот Центральное и Самара, в отличие от торфов, преобладают стероиды, доля которых несколько повышена в водах Большого, Бакcharского ПЗ и Иксинского болот, а в воде Бакcharского П5 болота увеличено относительное содержание ПЦТ. Вклад в состав циклических структур дитерпеноидов несколько выше, чем в торфе, в воде Тисанского и Большого болот, а в воде Иксинского их доля понижена.

Отличаются от остальных болот Центральное, осоково-сфагновая топь Бакcharского болота (П5) и, в меньшей степени, болото Самара. В воде болота Центральное наблюдается аномально высокая доля стероидов на фоне пониженной концентрации ПЦТ. Низкая концентрация ПЦТ в воде этого болота обусловлена отсутствием в их составе, в отличие от соответствующего торфа, углеводородных составляющих, занимающих в торфе значительное место. В осоково-сфагновой топи Бакcharского болота при переходе от торфа к воде отмечено резкое возрастание в составе циклических соединений доли ПЦТ за счет увеличения содержания D-фриедеолеан-14-ена (тараксерена) и снижение вклада группы стероидов. Последнее связано с отсутствием в воде стероидов с гидроксильным заместителем, доминирующих в торфе. Это, в свою очередь, может быть обусловлено особенностями распределения

стероидов с гидроксильным и кетонным заместителем в системе торф – вода на этом участке болота. Повышенная доля стероидов в воде болота Самара связана с наличием среди них отсутствовавшего в торфе холестерина, продуцируемого фитопланктоном.

Незначительное увеличение относительного содержания токоферола в воде по сравнению с соответствующим торфом отмечено в болотах Тисанское и Ишколь, а дитерпеноидов – в болоте Большое.

ВЫВОДЫ

Различия состава липидов торфов и соответствующих болотных вод выражаются главным образом в соотношении тех или иных групп идентифицированных соединений (биомолекул). В большинстве торфов и вод в составе ациклических органических соединений преобладают *n*-алканы, в торфах высока роль соединений с карбонильной группой – *n*-алкан-2-онов, дикетонов и *n*-альдегидов, а в водах концентрируются длинноцепочечные эфиры и *n*-алканола. В составе циклических соединений большинства исследованных верховых торфов доминируют пентациклические тритерпеноиды. Только в осоково-гипновом низинном и древесно-пушицевом переходном торфах преобладают стероиды, а в моховом переходном – дитерпеноиды. Болотные воды в большинстве своем наследуют основные черты группового состава циклических соединений соответствующих торфов. То же относится и к индивидуальному составу ациклических соединений, таких как *n*-алканы, *n*-алкан-2-оны, *n*-алканола, *n*-альдегиды.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящее время исследование трансформации химического состава болотных вод под влиянием осушения и последующей деградации болот, природных пожаров, роста атмосферных выпадений и современных тенденций изменения климата является актуальным. Региональные особенности состава болотных вод зависят от типа торфяной залежи и водно-минерального питания болот, климатических и гидрогеологических условий территории. Разные типы болот могут содержать верховые, переходные и низинные торфяные залежи, ботанический состав которых разнообразен. В водах болот присутствуют биогенные соединения, образующиеся в процессе разложения и трансформации остатков растительности, которые формируют разные типы болотных залежей; в этой связи необходимы подробные исследования химического состава болотных растений. Проведенные исследования показали, что в торфах и водах среди ациклических соединений, наряду с преобладанием *n*-алканов, в большом количестве присутствуют соединения с карбонильной группой – *n*-алкан-2-оны, дикетоны и *n*-альдегиды, а в водах – длинноцепочечные эфиры. Болотные воды наследуют, в основном, циклические соединения соответствующих торфов. Полученные данные могут быть использованы для мониторинга состояния болот, а также для выбора направлений рационального применения торфяного сырья, поскольку некоторые идентифицированные органические соединения являются биологически активными веществами.

ФИНАНСОВАЯ ПОДДЕРЖКА

Работа выполнена в рамках государственного задания Института химии нефти СО РАН (НИОКТР 121031500046-7), финансируемого Министерством науки и высшего образования Российской Федерации и Сибирским НИИ сельского хозяйства и торфа – филиалом ФГБУН Сибирского федерального научного центра агробιοтехнологий РАН (№ FNUU-2024-0002).

ЛИТЕРАТУРА

- Габов Д.Н., Яковлева Е.В., Василевич Р.С., Груздев И.В. Распределение *n*-алканов в бугристых торфяниках крайнесеверной тайги европейского северо-востока России и их значение для палеоклиматической реконструкции // Почвоведение. 2022. № 7. С. 808–824. <https://doi.org/10.31857/S0032180X22070048>
- Русских И.В., Стрельникова Е.Б. Динамика двухлетнего постпирогенного восстановления состава биомолекул кустарников южной тайги Томской области // Химия в интересах устойчивого развития. 2024. Том 32. № 2. С. 188–194. <https://doi.org/10.15372/KhUR2024547>
- Савичев О.Г. Геохимические показатели болотных вод в таежной зоне Западной Сибири // Известия Российской академии наук. Серия географическая. 2015. № 4. С. 47–57. <https://doi.org/10.15356/0373-2444-2015-4-47-57>
- Серебренникова О.В., Гулая Е.В., Стрельникова Е.Б., Кадычагов П.Б., Прейс Ю.И., Дучко М.А. Химический состав липидов типичных растений-торфообразователей олиготрофных болот лесной зоны Западной Сибири // Химия растительного сырья. 2014. № 1. С. 257–262. <https://doi.org/10.14258/jcprm.1401257>

- Серебренникова О.В., Дучко М.А., Коронатова Н.Г., Стрельникова Е.Б. Содержание и состав липидов сфагнового торфа в зависимости от температуры природно-климатических зон Западной Сибири // Химия твердого топлива. 2018. № 1. С. 38–45. <https://doi.org/10.7868/S0023117718010085>
- Серебренникова О.В., Стрельникова Е.Б., Русских И.В., Харанжевская Ю.А., Воистинова Е.С. Сезонная динамика распределения органических соединений в болотных водах южной тайги (Западная Сибирь) // Химия в интересах устойчивого развития. 2019а. Том 27. № 1. С. 65–72. <https://doi.org/10.15372/KhUR20190110>
- Серебренникова О.В., Стрельникова Е.Б., Русских И.В. Особенности состава липидов сфагновых и бриевых мхов из различных природно-климатических зон // Химия растительного сырья. 2019б. № 3. С. 225–234. <https://doi.org/10.14258/jcprm.2019034558>
- Серебренникова О.В., Русских И.В., Стрельникова Е.Б., Харанжевская Ю.А., Федоров Д.В. Состав органических соединений торфов разного типа южно-таежной подзоны Западной Сибири // Химия твердого топлива. 2023. № 2–3. С. 26–34. <https://doi.org/10.31857/S0023117723020135>
- Стрельникова Е.Б., Русских И.В., Преис Ю.И. Н-алканы и н-алкан-2-оны – липидные биомаркеры верховых торфов и болотных растений Западной Сибири // Химия твердого топлива. 2021. № 5. С. 56–66. <https://doi.org/10.31857/S0023117721050066>
- Шварцев С.Л., Серебренникова О.В., Здвижков М.А., Савичев О.Г., Наймушина О.С. Геохимия болотных вод нижней части бассейна томи (юг Томской области) // Геохимия. 2012. № 4. С. 403.
- Bingham E.M., McClymont E.L., Valiranta M., Mauquoy D., Roberts Z., Chambers F.M., Pancost R.D., Evershed R.P. Conservative composition of n-alkane biomarkers in sphagnum species: implications for palaeoclimate reconstruction in ombrotrophic peat bogs // Organic Geochemistry. 2010. Vol. 41. No. 2. P. 214–220. <https://doi.org/10.1016/j.orggeochem.2009.06.010>
- Hunt J.M. Petroleum Geochemistry and Geology. San Francisco: Freeman, 1979. 617 p.
- Matas A.J., Sanz M.J., Heredia A. Studies on the structure of the plant wax nonacosan-10-ol, the main component of epicuticular wax conifers // International Journal of Biological Macromolecules. 2003. Vol. 33. No. 1–3. P. 31–35. [https://doi.org/10.1016/S0141-8130\(03\)00061-8](https://doi.org/10.1016/S0141-8130(03)00061-8)
- Naafs B.D.A., Inglis G.N., Blewett J., McClymont E.L., Lauretano V., Xied S., Evershed R.P., Pancost R.D. The potential of biomarker proxies to trace climate, vegetation, and biogeochemical processes in peat: A review // Global and Planetary Change. 2019. Vol. 179. P. 57–79. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2019.05.006>
- Pancost R.D., Baas M., van Geel B., Sinninghe Damste J.S. Biomarkers as proxies for plant inputs to peats: an example from a sub-boreal ombrotrophic bog // Organic Geochemistry. 2002. Vol. 33. P. 675–690. [https://doi.org/10.1016/S0146-6380\(02\)00048-7](https://doi.org/10.1016/S0146-6380(02)00048-7)
- Pastukhov A., Kaverin D., Loiko S. N-Alkanes in Permafrost Peatlands // Plants. 2025. Vol. 14. No. 3. P. 449–470. <https://doi.org/10.3390/plants14030449>
- Peters K.E., Walters C.C., Moldowan J.M. The Biomarker Guide: Biomarkers and Isotopes in Petroleum Systems and Earth History. Cambridge University Press, 2007. Vol. 2. 704 p.
- Priac A., Gandois L., Jeanneau L., Taillardat P., and Garneau M. Dissolved organic matter concentration and composition discontinuity at the peat-pool interface in a boreal peatland // Biogeosciences. 2022. Vol. 19. No. 18. P. 4571–4588. <https://doi.org/10.5194/bg-19-4571-2022>
- Tfaily M.M., Wilson R.M., Cooper W.T., Kostka J.E., Hanson P., Chanton J.P. Vertical Stratification of Peat Pore Water Dissolved Organic Matter Composition in a Peat Bog in Northern Minnesota // Journal of Geophysical Research: Biogeosciences. 2018. Vol. 123. No. 2. P. 479–494. <https://doi.org/10.1002/2017JG004007>
- Tulloch A.P. Chemistry of waxes of higher plants. In chemistry and biochemistry of natural waxes / P.E. Kolattukudy (ed.). Amsterdam: Elsevier, 1976. P. 235–287.

Поступила в редакцию 05.08.2025

Принята 03.10.2025

Опубликована 31.10.2025

Сведения об авторах:

Русских Ирина Владимировна – кандидат химических наук, старший научный сотрудник ФГБУН Институт химии нефти СО РАН (г. Томск, Россия); rus@ipc.tsc.ru; <https://orcid.org/0000-0001-9882-1365>

Стрельникова Евгения Борисовна – кандидат химических наук, старший научный сотрудник ФГБУН Институт химии нефти СО РАН (г. Томск, Россия); seb@ipc.tsc.ru; <https://orcid.org/0000-0002-7248-9437>

Серебrenникова Ольга Викторовна – доктор химических наук, зав. лабораторией природных превращений нефти ФГБУН Институт химии нефти СО РАН (г. Томск, Россия); ovs49@yahoo.com; <https://orcid.org/0000-0003-4085-0598>

Харанжевская Юлия Александровна – кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник Сибирского НИИ сельского хозяйства и торфа – филиал ФГБУН Сибирского федерального научного центра агробιοтехнологий РАН, доцент ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский государственный университет» (г. Томск, Россия); kharan@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-9945-0129>

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.



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

Comparison of organic compounds content in peat deposits and water of different mire types in the southern taiga subzone of West Siberia

© 2025 I. V. Russkikh ¹, E. B. Strelnikova ¹, O. V. Serebrennikova ¹,
Yu. A. Kharanzhevskaya ^{2,3}

¹Institute of Petroleum Chemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Akademicheskoy Avenue, 4, Tomsk, Russia. E-mail: rus@ipc.tsc.ru

²Siberian Research Institute of Agriculture and Peat – Branch of the Siberian Federal Scientific Centre of Agro-Bio Technologies of the Russian Academy of Sciences, Gagarin street, 3, Tomsk, Russia. E-mail: kharan@yandex.ru

³National Research Tomsk State University, Lenin Avenue, 36, Tomsk, Russia.

The aim of the study was to examine the composition of organic compounds in the water of different mire types in the Tomsk region, depending on the compounds' content in peat deposits.

Location and time of the study. Water and the corresponding peat were sampled in July–August 2016 in the raised bogs, transitional mires and fens of the southern taiga subzone of West Siberia within the boundaries of the Tomsk region. Peat samples were taken at a depth of 30–60 cm.

Methods. Extraction of organic compounds from the water samples was carried out with 10% hexane solution in chloroform. Peat samples were dried and crushed, and organic compounds from peat were concentrated by extraction with 7% of methanol solution in chloroform at 60 °C. The individual and component composition of organic compounds in water and peat was studied by chromatomass spectrometry using a magnetic chromatomass spectrometer.

Results. In the peat–water series, individual groups of biomolecules were found to be unevenly distributed. Among the acyclic structures in mesotrophic peat with wood and cotton grass and Sphagnum peat, n-alkanes dominated (28–65%), whereas in sedge and hypnum eutrophic peat n-alkanes accounted for no more than 30%. N-alkanes also predominated in water (38–54%), with the exception of the Tisanskoe transitional mire and the Ishkol fen, where low-chain ethers of fatty acids were dominant. A high content of the latter was also observed in the water of the raised bogs. Carbonyl structures, n-alkane–2-ones, predominated in sedge and sedge-gypsum eutrophic peat. Carbonyl structures, n-alkane–2-ones, predominated in sedge and sedge-gypsum lowland peat, and diketones-diones were also found in some peat samples. The proportion of carbonyl structures in water was significantly lower, and compounds with a hydroxyl group, n-alkanol were common in them. Wood-fluff, sedge and sedge-hypnum peat were enriched with acyclic compounds. Cyclic structures prevailed in the upper peat and one of the transitional peats. It was shown that the composition of cyclic compounds in sphagnum bog peat was dominated by pentacyclic triterpenoids, whereas in transitional mire moss it was dominated by diterpenoids, and in wood-fluff and sedge-hypnum by steroids. The ratio of the individual groups of cyclic compounds in the water of most mires was close to that in the corresponding peat. Only in two mires the ratio between the groups of cyclic structures in water and peat differed.

Conclusions. The analysis of the organic compounds composition showed that acyclic compounds in peat and water, along with the n-alkanes prevalence, contained in large quantities compounds with a carbonyl group, such as n-alkane-2-ones, diketones and n-aldehydes, and long-chain esters in water. The composition of cyclic

compounds of raised peats was dominated by pentacyclic triterpenoids; whereas steroids dominated in the sediment-hypnum lowland and wood-fluff transitional peat, diterpenoids prevailing in the moss transitional peat. Bog waters mostly inheriyyclic compounds of the corresponding peats.

Keywords: raised, transitional and lowland mires; fens; bog water; peat; distribution of organic, acyclic and cyclic compounds.

How to cite: Russkikh I.V., Strelnikova, E.B. Serebrennikova O.V., Kharanzhevskaya Yu.A. Comparison of organic compounds content in peat deposits and water of different mire types in the southern taiga subzone of West Siberia. *The Journal of Soils and Environment*. 2025. Vol. 8(4). e326. DOI: [10.31251/pos.v8i4.326](https://doi.org/10.31251/pos.v8i4.326) (in Russian with English abstract).

FUNDING

The study was financially supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (projects Nos.121031500046-7 and No.FNUU-2024-0002).

REFERENCES

- Gabov D.N., Yakovleva E.V., Vasilevich R.S., Gruzdev I.V. Distribution of n-alkanes in hummocky peatlands of the extreme northern taiga of the European northeast of Russia and their role in paleoclimate reconstruction. *Eurasian Soil Sciences*. 2022. Vol. 55. No. 7. P. 879–894. <https://doi.org/10.1134/s1064229322070043>
- Russkikh I.V., Strelnikova E.B. Dynamics of Two-Year Post-Pyrogenic Restoration of the Composition of Biomolecules in Shrubs in the Southern Taiga of the Tomsk Region. *Chemistry for Sustainable Development*. 2024. Vol. 32. No. 2. P. 183–189. <https://doi.org/10.15372/CSD2024547>
- Savichev O.G. Geochemical parameters of bog waters in the taiga zone of the Western Siberia. *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Seriya geograficheskaya*. 2015. No. 4. P. 47–57. (in Russian). <https://doi.org/10.15356/0373-2444-2015-4-47-57>
- Serebrennikova O.V., Gulaya E.V., Strelnikova E.B., Kadychagov P.B., Preis Y.I., Duchko M.A. The chemical composition of typical peat-forming plants lipids of Western Siberia forest zone oligotrophy bogs. *Khimija rastitel'nogo syr'ja*. 2014. No. 1. C. 257–262. (in Russian). <https://doi.org/10.14258/jcprm.1401257>
- Serebrennikova O.V., Duchko M.A., Strelnikova E.B., Koronatova N.G. Concentrations and composition of sphagnum peat lipids depending on temperature in the climatic zones of Western Siberia / O. V. Serebrennikova, M. A. Duchko, N. G. Koronatova, E. B. Strelnikova // *Solid Fuel Chemistry*. 2018. Vol. 52. No. 1. P. 36–43. <https://doi.org/10.3103/S0361521918010081>
- Serebrennikova O.V., Strelnikova E.B., Russkikh I.V., Kharanzhevskaya Yu.A., Voistinova E.S. Seasonal dynamics of distribution of organic compounds in bog waters of the southern taiga (Western Siberia). *Khimiya v interesakh ustoichivogo razvitiya*. 2019a. Vol. 27. No. 1. P. 65–72. (in Russian). <https://doi.org/10.15372/KhUR20190110>
- Serebrennikova O.V., Strelnikova E.B., Russkikh I.V. Features of the composition of lipids of sphagnum and brie mosses from various natural and climatic zones. *Khimija rastitel'nogo syr'ja*. 2019b. No. 3. P. 225–234. (in Russian). <https://doi.org/10.14258/jcprm.2019034558>
- Serebrennikova O.V., Strelnikova E.B., Russkikh I.V., Kharanzhevskaya Yu.A., Fedorov D.V. Composition of the organic compounds of different peat types from the southern taiga subzone of Western Siberia. *Solid Fuel Chemistry*. 2023. Vol. 57. No. 1. P. 21–28. <https://doi.org/10.3103/S0361521923020131>
- Strel'nikova E.B., Russkikh I.V., Preis Yu.I. n-Alkanes and n-Alkan-2-ones as lipid biomarkers of high-moor peats and marsh plants in Western Siberia. *Solid Fuel Chemistry*. 2021. Vol. 55. No. 5. P. 321–331. <https://doi.org/10.3103/S0361521921050062>
- Shvartsev S.L., Zdvizhkov M.A., Serebrennikova O.V., Savichev O.G., Naimushina O.S. Geochemistry of wetland waters from the lower Tom basin, Southern Tomsk oblast. *Geochemistry International*. 2012. Vol. 50. No. 4. P. 367–380. <https://doi.org/10.1134/S0016702912040076>
- Bingham E.M., McClymont E.L., Valiranta M., Mauquoy D., Roberts Z., Chambers F.M., Pancost R.D., Evershed R.P. Conservative composition of n-alkane biomarkers in sphagnum species: implications for palaeoclimate reconstruction in ombrotrophic peat bogs. *Organic Geochemistry*. 2010. Vol. 41. No. 2. P. 214–220. <https://doi.org/10.1016/j.orggeochem.2009.06.010>
- Hunt J.M. *Petroleum Geochemistry and Geology*. San Francisco: Freeman, 1979. 617 p.
- Matas A.J., Sanz M.J., Heredia A. Studies on the structure of the plant wax nonacosan-10-ol, the main component of epicuticular wax conifers. *International Journal of Biological Macromolecules*. 2003. Vol. 33. No. 1–3. P. 31–35. [https://doi.org/10.1016/S0141-8130\(03\)00061-8](https://doi.org/10.1016/S0141-8130(03)00061-8)

- Naafs B.D.A., Inglis G.N., Blewett J., McClymont E.L., Lauretano V., Xied S., Evershed R.P., Pancost R.D. The potential of biomarker proxies to trace climate, vegetation, and biogeochemical processes in peat: A review. *Global and Planetary Change*. 2019. Vol. 179. P. 57–79. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2019.05.006>
- Pancost R.D., Baas M., van Geel B., Sinninghe Damste J.S. Biomarkers as proxies for plant inputs to peats: an example from a sub-boreal ombrotrophic bog. *Organic Geochemistry*. 2002. Vol. 33. P. 675–690. [https://doi.org/10.1016/S0146-6380\(02\)00048-7](https://doi.org/10.1016/S0146-6380(02)00048-7)
- Pastukhov A., Kaverin D., Loiko S. N-Alkanes in Permafrost Peatlands. *Plants*. 2025. Vol. 14. No. 3. P. 449–470. <https://doi.org/10.3390/plants14030449>
- Peters K.E., Walters C.C., Moldovan J.M. *The Biomarker Guide: Biomarkers and Isotopes in Petroleum Systems and Earth History*. Cambridge University Press, 2007. Vol. 2. 704 p.
- Prija A., Gandois L., Jeanneau L., Taillardat P., and Garneau M. Dissolved organic matter concentration and composition discontinuity at the peat-pool interface in a boreal peatland. *Biogeosciences*. 2022. Vol. 19. No. 18. P. 4571–4588. <https://doi.org/10.5194/bg-19-4571-2022>
- Tfaily M.M., Wilson R.M., Cooper W.T., Kostka J.E., Hanson P., Chanton J.P. Vertical Stratification of Peat Pore Water Dissolved Organic Matter Composition in a Peat Bog in Northern Minnesota. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*. 2018. Vol. 123. No. 2. P. 479–494. <https://doi.org/10.1002/2017JG004007>
- Tulloch A.P. Chemistry of waxes of higher plants. In *chemistry and biochemistry of natural waxes* / P.E. Kolattukudy (ed.). Amsterdam: Elsevier, 1976. P. 235–287.

Received 05 August 2025

Accepted 03 October 2025

Published 31 October 2025

About the authors:

Irina V. Russkikh – Candidate of Chemical Sciences, Senior Researcher in the Institute of Petroleum Chemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Tomsk, Russia); rus@ipc.tsc.ru; <https://orcid.org/0000-0001-9882-1365>

Eugenia B. Strelnikova – Candidate of Chemical Sciences, Senior Researcher in the Institute of Petroleum Chemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Tomsk, Russia); seb@ipc.tsc.ru; <https://orcid.org/0000-0002-7248-9437>

Olga V. Serebrennikova – Doctor of Chemical Sciences, Head of the Laboratory of Natural Transformations of Oil in the Institute of Petroleum Chemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Tomsk, Russia); ovs49@yahoo.com; <https://orcid.org/0000-0003-4085-0598>

Yulia A. Kharanzhevskaya – Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Leading Researcher in the Siberian Research Institute of Agriculture and Peat – Branch of the Siberian Federal Scientific Centre of Agro-Bio Technologies of the Russian Academy of Sciences; Associate Professor at the National Research Tomsk State University (Tomsk, Russia); kharan@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-9945-0129>

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/)



Спектральные и флуоресцентные свойства гуминовых кислот различных образцов торфа

© 2025 И. В. Соколова , А. А. Федорова

ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский государственный университет», проспект Ленина, 36, г. Томск, 634050, Россия. E-mail: irsokol783@gmail.com

Цель исследования. Выявить различия в спектрах поглощения и флуоресценции водных растворов гуминовых кислот торфа разных условий формирования.

Место и время проведения. Исследования спектров поглощения и флуоресценции проводили на водных растворах образцов, выделенных из проб обезбитуминированного верхового торфа с различной глубиной залегания и влажностью олиготрофного болотного комплекса в Мезенском районе Архангельской области.

Методы. Спектры поглощения и флуоресценции регистрировали на спектрофлуориметре СМ2203 (фирма «Solar», Беларусь) в стандартных кварцевых кюветах для флуориметрии. Флуоресценция регистрировалась при длинах волн возбуждения 260, 310 и 360 нм.

Основные результаты. В процессе гумификации и с продолжительностью высушивания торфа интенсивность флуоресценции исследованных образцов возрастала. Длина волны максимума флуоресценции и его интенсивность зависят от длины волны возбуждающего света. Зафиксирован «синий сдвиг» максимума флуоресценции при увеличении длины волны возбуждения от 260 до 310 нм для объектов исследования, полученных из верхового торфа.

Заключение. Изучение спектров флуоресценции изученных образцов установлены особенности их спектров поглощения и излучательных характеристик. Обнаруженный «синий сдвиг» максимума флуоресценции при увеличении длины волны возбуждения от 260 до 310 нм для образцов, выделенных из верхового торфа Мезенского района Архангельской области, согласуется с подобными сдвигами, полученными для растворенного органического вещества в поверхностном слое вод Карского моря и заливах Новой Земли, водных вытяжек засоленных почв Северного Дагестана, промышленных гуминовых препаратов из торфа и сапропеля. Флуоресцентные свойства гуминовых кислот чувствительны к происхождению органического сырья, из которого они выделены, и могут быть полезны как для выяснения влияния окружающей среды, так и для оценки систем под антропогенной нагрузкой.

Ключевые слова: спектры флуоресценции; гуминовые кислоты; торф; бурый уголь; максимум спектра флуоресценции.

Цитирование: Соколова И.В., Федорова А.А. Спектральные и флуоресцентные свойства гуминовых кислот различных образцов торфа // Почвы и окружающая среда. 2025. Том 8. № 4. e331. DOI: [10.31251/pos.v8i4.331](https://doi.org/10.31251/pos.v8i4.331)

ВВЕДЕНИЕ

Болота – важная часть биосферы, окружающей человека природной среды. Торф является наиболее специфичным и широко используемым ресурсом болот. Важнейшим является наличие в торфяных залежах органических веществ – **гуминовых кислот (ГК)**, фульвокислот, лигнина и других, содержащих функциональные группы (карбоксильные, карбонильные, фенольные гидроксилы, аминогруппы и т.п.). Особенностью таких структур является случайный характер образования их молекул из продуктов разложения растительных остатков. Образующиеся молекулы индивидуальны по своей природе, имеют разный размер и молекулярную массу. Невозможно, например, выделить набор гуминовых кислот, молекулы которых были бы относительно однородны по составу и имели молекулярные массы в сравнительно узком интервале значений (Чайковская, Нечаев, 2017). В растворах дело осложняется образованием агрегатов за счет межмолекулярных взаимодействий. Образование гуминовых веществ в природных источниках – торфе, почве или буром угле – идет по принципу естественного отбора, в результате чего формируются термодинамически наиболее стабильные системы, остаются самые устойчивые к биоразложению структуры. В мировой научной литературе продолжают споры о том, что же представляют из себя гуминовые вещества и гуминовые кислоты (Perminova, 2019). Предполагается, что сложное строение природных систем гуминовых веществ определяется существованием супрамолекулярных ансамблей (Лен, 1998). Особое внимание гуминовым веществам почв как супрамолекулярным системам уделяет А. Пикколо (Piccolo, 2001).

Все более важным становится применение этих экологически чистых и безопасных природных веществ в сельском хозяйстве и промышленности в связи со снижением плодородия почв, нарастанием проблемы загрязнения окружающей среды и климатическими катаклизмами. Для изучения гуминовых кислот широко используются спектральные методы, а среди них все активнее применяется флуоресцентная спектроскопия. Сочетание высокой чувствительности и подходящего временного диапазона позволяет с помощью флуоресцентной спектроскопии получать необходимые сведения о свойствах таких систем. Наиболее полно возможности флуоресцентной спектроскопии для выявления особенностей гуминовых кислот почв разных условий формирования описаны в работе Н.Л. Бажиной и М.И. Дергачевой (2021). Проведенный авторами анализ флуоресцентных спектров испускания при одной длине волны возбуждения (330 нм) широкого набора гуминовых кислот почв Сибири показал, что слабогумифицированные ГК почв, сформированных во влажных и холодных условиях имеют положение максимума флуоресценции в синей области спектра, а у ГК степных почв, имеющих в структуре значительную ароматическую часть, такие максимумы сдвинуты в красную область спектра.

Торф является компонентом многих почв, но сам по себе не почва. Однако существуют почвы, которые образовались в процессе торфообразования и имеют высокий процент торфа; характерным для этих почв является формирование в условиях избыточного увлажнения. В связи с увеличением применения в различных отраслях экологически чистых и безопасных природных веществ, растёт производство гуминовых препаратов, в том числе и из торфа. Согласно литературным данным (Гостева и др., 2011), спектрально-люминесцентные характеристики водных растворов гуминовых препаратов из растительного сырья ближе по свойствам к гуминовым веществам природной воды или почвы, чем гуминовых препаратов из углефицированных материалов. В настоящее время работ по исследованию спектрально-люминесцентных свойств ГК торфов ещё явно недостаточно (Соколова и др., 2021; Соколова, Федорова, 2024).

В связи с этим, цель данного сообщения состоит в выявлении различий в спектрах поглощения и флуоресценции водных растворов гуминовых кислот торфа разных условий формирования.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В данной работе мы продолжаем исследовать спектрально-люминесцентные свойства образцов гуминовых кислот торфа, получение которых было подробно описано в нашей совместной работе с архангельскими учёными (Селянина и др., 2024). В предыдущей работе были рассмотрены образцы верхового торфа, отобранные в районе п. Каменка Архангельской области (65°53'20,5" с.ш.; 44°05'30,1" в.д.) на участке, подверженном влиянию осушения. В этой статье мы исследуем только спектрально-люминесцентные свойства для ГК, выделенных из проб обезбитуминированного верхового торфа с различной влажностью олиготрофного болотного комплекса в Мезенском районе Архангельской области (65°52,222' с.ш.; 44°14,534' в.д.), который не подвергали осушению. Образцы отбирали с разной глубины, с последующим различным временем высушивания, так как влияние мелиорационных мероприятий на свойства торфа и ГК изучено ещё недостаточно. Проба 3-1 отобрана с наименьшей глубины (0–15 см) и соответствовала степени разложения торфа 15%, проба 3-3 – с глубины 25–45 см и со степенью разложения 25–30%, а проба 3-9 – с глубины 143–150 см со степенью разложения торфа 35–40%. Проводили лабораторное моделирование процесса дегидратации торфа на характеристики ГК. Ступенчатое обезвоживание образцов торфа с естественной влажностью осуществляли путем механического отжима влаги, конвективной сушки при комнатной температуре с последующим кондиционированием в лизиметрах. Из полученных образцов с различной степенью гидратации выделяли препараты по следующей схеме. Из образцов торфа этоксиэтаном экстрагировали битумы, обезбитуминированный торф заливали 0,1 н. NaOH (в соотношении 1 : 50) и настаивали в течение 24 ч без нагревания при постоянном перемешивании. Полученные растворы в натриевой форме (гуматы) отделяли от твердого остатка фильтрованием и очищали от избытка NaOH методом диализа на целлофановых мембранах до pH 7,5–8,0. Более подробно процесс подготовки образцов изложен в работе (Селянина и др., 2024). Спектры поглощения и флуоресценции регистрировали на спектрофлуориметре CM2203 (фирма «Solar», Беларусь) в стандартных кварцевых кюветах для флуорометрии. Для спектральных исследований использовались водные растворы ГК с различным остаточным содержанием NaOH для каждого образца. Далее приводили к одинаковой концентрации щелочи во всех образцах, делая одномолярный раствор для стандартизации условий. Концентрацию рабочих растворов доводили до 1,25 мг/л разбавлением дистиллированной водой. В таких условиях оптическая плотность изучаемых образцов была невелика и, кроме того, наблюдение флуоресценции проводили под прямым углом к

середине центрально освещённой кюветы. Флуоресценцию регистрировали при длинах волн возбуждения 260, 310 и 360 нм.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Электронные спектры поглощения исследуемых образцов ГК, наблюдаемые в диапазоне от 240–260 до 650 нм, не имеют четко выраженных полос или максимумов поглощения. В координатах $D - \lambda$ (оптическая плотность – длина волны) спектры выглядят как пологие кривые с постепенным уменьшением оптической плотности по мере увеличения длины волны (рис. 1). Наблюдаемое на рисунке 1 отчетливое плечо в области 250–300 нм может быть связано с поглощением фенольных соединений торфов. Похожее плечо с разными значениями оптической плотности наблюдалось в работе О.М. Горшковой с соавторами (2009) в спектрах поглощения проб соленой воды из озёр Беломорского региона, из проб воды оз. Байкал и р. Ангары.

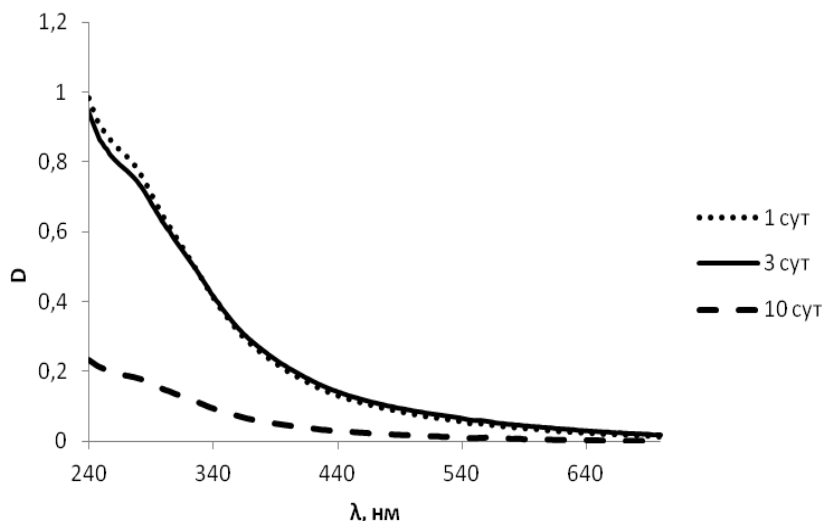


Рисунок 1. Спектры поглощения образца 3-1 с разной продолжительностью высушивания.

Снижение оптической плотности с длительностью высушивания образцов торфа наблюдается для всех выбранных горизонтов (табл. 1). Вероятно, данный факт связан с применяемой методикой лабораторного моделирования процесса дегидратации торфа.

Таблица 1

Характеристика спектров поглощения образцов торфа

Проба	Время высушивания торфа, сут.	Глубина, см залегания (см)	Оптическая плотность (D)
1-3-1	1	0–15	0,670
1-3-3	3	0–15	0,699
1-3-9	10	0–15	0,128
3-3-1	1	25–45	0,753
3-3-3	3	25–45	0,685
3-3-9	10	25–45	0,166
10-3-1	1	143–150	0,872
10-3-3	3	143–150	0,742
10-3-9	10	143–150	0,269

В изучаемых нами образцах ГК достаточно сильно развита цепь сопряженных двойных углерод-углеродных связей. Разрушение этой цепи при фотохимических процессах постепенно приводит к потере окраски. Часть цепи сопряжения представлена циклическими системами, часть – алифатическими цепочками или мостиками, связывающими циклические структуры. Алифатические

боковые цепи, не несущие двойных связей, такие, как цепочки полипептидов, насыщенных углеводов, практически не окрашены. На характер спектра поглощения и интенсивность окраски, кроме цепи сопряжения, влияют электронодонорные (аминогруппа, оксигруппа) и электрофильные (карбонильная группа) заместители, присоединенные к сопряженной системе. Они изменяют подвижность π -электронов системы, что увеличивает вероятность электронных переходов. Гуминовые кислоты различного происхождения неодинаковы по степени окисленности и, поэтому, изменение интенсивности окраски можно рассматривать как суммарное влияние длины сопряжения и кислородсодержащих заместителей. Интенсивно окрашены, например, ГК черноземов (Орлов, 1992), которым свойственна как развитая цепь сопряжённых двойных связей, так и значительная степень окисленности. Ранее было показано, что на спектры поглощения и флуоресценции гуминовых кислот слабо влияет УФ-облучение, как в стационарном варианте (Соколова, Чайковская, 2006; Соколова, Федорова, 2024), так и при использовании проточного фотореактора (Чайковская, Соколова, 2014), то есть изучаемые системы достаточно фотостабильны.

Что касается спектров флуоресценции исследуемых объектов, то здесь, в отличие от спектров поглощения, наблюдается вид спектров с выраженным максимумом (рис. 2). Спектры флуоресценции обнаруживают свечение в области от 400 до 600 нм. Установлено, что спектры флуоресценции ГК различаются более существенно, чем их спектры поглощения.

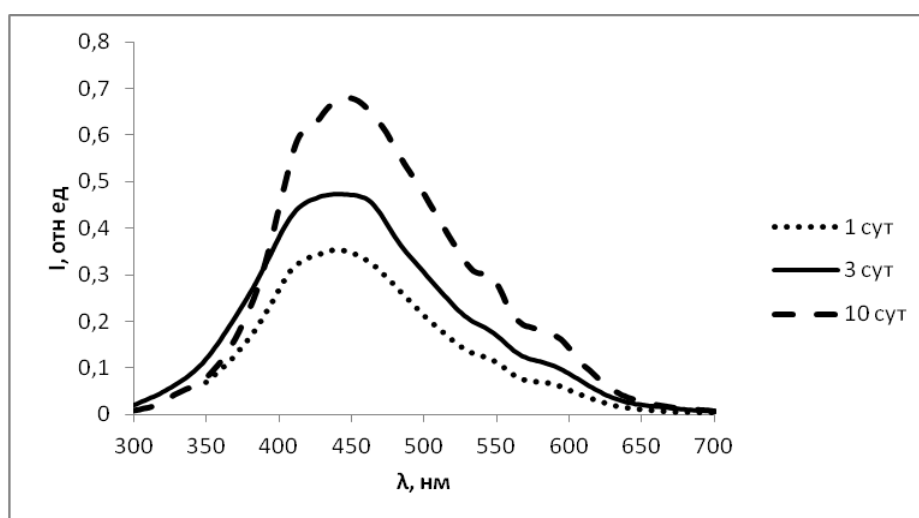


Рисунок 2. Спектры флуоресценции образца 3-1 с разной продолжительностью высушивания, I – интенсивность излучения, $\lambda_{\text{возб}} = 260$ нм.

С ростом глубины залегания торфа интенсивность флуоресценции образцов увеличивается (табл. 2), область флуоресценции существенно не изменяется.

Таблица 2

Характеристики флуоресценции образцов, $\lambda_{\text{возб}} = 260$ нм

Время высушивания торфа, сут.	Проба	Глубина, см	Длина волны максимума флуоресценции, нм	I , интенсивность, отн. ед.
1	1-3-1	0–15	458	0,381
	1-3-3	25–45	456	0,391
	1-3-9	143–150	458	0,485
3	3-3-1	0–15	456	0,456
	3-3-3	25–45	454	0,464
	3-3-9	143–150	454	0,554
10	10-3-1	0–15	460	0,702
	10-3-3	25–45	482	1,840
	10-3-9	143–150	504	1,859

ОБСУЖДЕНИЕ

Спектры флуоресценции изученных образцов, полученных из торфа верхового болота, представляют собой широкую полосу; при этом наблюдается зависимость интенсивности спектров от глубины залегания. Происходит увеличение интенсивности флуоресценции с ростом глубины залегания торфа, что может быть связано с ростом гумификации, причем это наблюдается для всех трех типов проб. Установлен факт увеличения интенсивности флуоресценции со временем высушивания торфа (причем тоже для всех трех типов проб). Участок, с которого были взяты пробы, не подвергался осушению и имеет уровень грунтовых вод – 30 см. Важной особенностью гуминовых веществ торфа является зависимость их состава и свойств от химического состава растений-торфообразователей. Флуоресцентный метод, таким образом, отреагировал на высушивание наших объектов исследования. Кроме возрастания интенсивности флуоресценции с ростом глубины залегания торфа (см. табл. 2, первая цифра в обозначении пробы обозначает время высушивания в сутках) обнаружена зависимость спектров флуоресценции исследованных архангельских образцов от длины волны возбуждения флуоресценции. При ее увеличении от 260 до 310 нм возрастает интенсивность спектра и происходит сдвиг максимума флуоресценции (табл. 3).

Таблица 3

Зависимость спектров флуоресценции водных растворов гуминовых кислот торфа от длины волны возбуждения

$\lambda_{\text{возб. флуор.}} \text{ нм}$	$\lambda_{\text{макс. флуор.}} \text{ нм}$	Интенсивность флуоресценции
260	453	0,48
310	435	0,74
360	465	0,84

Наблюдаемая сложная и необычная (нарушающая правило Каша) зависимость спектра испускания от длины волны возбуждающего света (Лакович, 1986) объясняется тем, что источники флуоресценции представляют из себя не индивидуальные молекулы, а сложные гетерогенные смеси флуорофоров, которые, несмотря на химические и структурные различия, проявляют общность оптических свойств, механизмы формирования которых остаются ещё недостаточно изученными. Сложная зависимость максимума флуоресценции от длины волны возбуждения наблюдается и для растворенного органического вещества в поверхностном слое вод Карского моря и заливах Новой Земли (Дроздова и др., 2017). Авторы наблюдали, что максимум флуоресценции при изменении длины возбуждения от 270 до 310 нм сдвигается, как и в нашем случае, в сторону более коротких длин волн. На основании полученных результатов по флуоресценции они предлагают метод оценки распространения пресных вод, выносимых стоками рек Обь и Енисей в Карское море. «Синий сдвиг» максимума флуоресценции наблюдается для природного растворенного вещества различного происхождения из-за наличия гуминовых соединений (Горшкова и др., 2009). Такое спектральное поведение отличает изучаемые объекты от других органических люминофоров. В большинстве случаев спектр испускания не зависит от длины волны возбуждения. Однако такое исключение из правил повышает интерес к оптическим свойствам гуминовых соединений как уникальному объекту спектральных исследований. Дальнейшее увеличение длины волны возбуждения приводит к смещению максимума флуоресценции уже в длинноволновую область. Дж. Лакович (1986) предполагает, что возбуждение на длинноволновом краю спектра происходит для тех флуорофоров, которые избирательно взаимодействуют с растворителем, в результате чего наблюдается уже батохромный сдвиг. Гуминовые соединения являются гетерогенным веществом с различными группами флуорофоров, что и приводит к зависимости испускания от длины волны возбуждения. При смене длины волны возбуждения с 270 на 310 нм наблюдался гипсохромный сдвиг максимума спектра флуоресценции и для водных вытяжек засоленных почв Северного Дагестана (Маммаев и др., 2020). Авторы подчеркивают высокую чувствительность флуоресцентных исследований почв и считают, что рассматривая параметры флуоресценции почвы можно оценивать и прогнозировать изменения в почвенно-растительных системах в условиях эволюции почвенного покрова под влиянием климатических изменений. Зафиксирован «синий сдвиг» флуоресценции при увеличении длины волны возбуждения от 270 до 310 нм и для промышленных гуминовых препаратов из торфа и сапропеля (Шубина и др., 2010). Для всех гуминовых препаратов из угля (кроме одного препарата из леонардита) положение максимума флуоресценции не изменяется или увеличивается при изменении

длины волны возбуждения в данном диапазоне. Авторы работы (Зыкова и др., 2023) также наблюдали зависимость максимумов флуоресценции от длины волны возбуждения флуоресценции для гуминовых веществ, выделенных из бурого угля Канско-Ачинского угольного бассейна, месторождение Переясловское. Различное положение максимумов в спектре свидетельствует о гетерогенности флуорофорных заместителей в структуре гуминовых веществ угля, но «синего сдвига» в случае угольного происхождения исследованных объектов не наблюдалось. Можно предположить, что такое отличие в проявлении сдвигов спектров флуоресценции обусловлено разным соотношением ароматических структур, а также различием в функциональных группах различных образцов гуминовых кислот. Бурые угли состоят из продуктов разложения целлюлозы, лигнина, растительного белка. В них значительное содержание кислорода, что ограничивает их использование в качестве топлива, однако в результате их переработки получают полезные и важные гуминовые препараты (Гостева и др., 2011). Уголь находится в недрах Земли миллионы лет, торф – десятки тысяч лет.

ВЫВОДЫ

1. С ростом глубины залегания, процесса гумификации и продолжительности высушивания торфа интенсивность флуоресценции ГК возрастает. Чем дольше продолжительность высушивания образцов, тем меньше оптическая плотность спектров поглощения.
2. Длина волны максимума флуоресценции изученных образцов гуминовых кислот и его интенсивность зависят от длины волны возбуждающего света. Максимум флуоресценции может испытывать как гипсохромный, так и батохромный сдвиг в зависимости от характеристик возбуждения, а его интенсивность увеличивается с ростом длины волны возбуждающего света.
3. Зафиксирован «синий сдвиг» максимума флуоресценции при увеличении длины волны возбуждения от 260 до 310 нм для объектов исследования, полученных из верхового торфа.
4. Высокая чувствительность флуоресцентной спектроскопии позволяет сделать выводы как о происхождении органического сырья (почва, торф, сапропель, растворенное органическое вещество или бурый уголь), так и об изменении свойств гуминовых веществ и их кислот при изменении условий окружающей среды (влагосодержание, трансформация при осушении).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, с помощью изучения спектров флуоресценции исследованных объектов установлены особенности их излучательных характеристик. Различия в проявлении влияния высушивания в спектрах поглощения и флуоресценции изученных гуминовых кислот связаны, на наш взгляд, с тем, что спектры флуоресценции отражают структуру и свойства возбужденных электронных состояний исследуемых объектов, а спектры поглощения – основного состояния. Вероятно, роль окружения, прежде всего, молекул воды и соответствующих водородных связей, отличается в этих случаях. Обнаруженный нами «синий сдвиг» максимума флуоресценции при увеличении длины волны возбуждения от 260 до 310 нм для образцов, выделенных из верхового торфа Мезенского района Архангельской области, согласуется с такими же сдвигами, полученными для растворенного органического вещества в поверхностном слое вод Карского моря и заливах Новой Земли, водных вытяжек засоленных почв Северного Дагестана, промышленных гуминовых препаратов из торфа и сапропеля. Флуоресцентные свойства гуминовых кислот чувствительны к происхождению органического сырья, из которого они выделены, и могут быть полезны как для выяснения влияния окружающей среды, так и для оценки систем под антропогенной нагрузкой. Знание свойств гуминовых веществ позволит использовать их для интенсификации естественных процессов восстановления компонентов окружающей среды.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы признательны С.Б. Селяниной за предоставленные образцы для исследования спектров поглощения и флуоресценции.

ФИНАНСОВАЯ ПОДДЕРЖКА

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № FSWM-2025-0007).

ЛИТЕРАТУРА

Бажина Н.Л., Дергачева М.И. Флуоресцентные свойства гуминовых кислот почв разных условий формирования // Почвы и окружающая среда. 2021. Том 4. № 4. e167. <https://doi.org/10.31251/pos.v4i4.167>

- Горшкова О.М., Пацаева С.В., Федосеева Е.В., Шубина Д.М., Южаков В.И. Флуоресценция растворенного органического вещества природной воды // Вода: химия и экология. 2009. № 11(17). С. 31–37.
- Гостева О.Ю., Изосимов А.А., Пацаева С.В., Южаков В.И., Якименко О.С. Флуоресценция водных растворов промышленных гуминовых препаратов // Журнал прикладной спектроскопии. 2011. Том 78. № 6. С. 943–950.
- Дроздова А.Н., Пацаева С.В., Хунджуа Д.А. Флуоресценция растворенного органического вещества как маркер распространения пресных вод в Карском море и заливах архипелага Новая Земля // Океанология. 2017. Том 57. № 1. С. 49–56. <https://doi.org/10.7868/S0030157417010038>
- Зыкова М.В., Братишко К.А., Логвинова Л.А., Иванов В.В., Буйко Е.Е., Данилец М.Г., Трофимова Е.С., Лигачева А.А., Зима А.П., Рабцевич Е.С., Уфандеев А.А., Михалёв Д.А., Першина А.В., Константинов А.И., Перминова И.В., Белоусов М.В. Химико-фармакологическое исследование субстанции гуминовых веществ угля для целей применения в пищевой и фармацевтической промышленности // Химия в интересах устойчивого развития. 2023. Том 31. № 4. С. 379–389. <https://doi.org/10.15372/KhUR2023480>
- Лакович Дж. Основы флуоресцентной спектроскопии. Москва: Мир, 1986. 496 с.
- Лен Ж.-М. Супрамолекулярная химия. Концепции и перспективы. Новосибирск: Наука, 1998. 334 с.
- Маммаев А.Т., Магомедова М.Х.-М., Алиева М.Ю., Пиняскина Е.В., Биарсланов А.Б. Флуоресцентные исследования гумусированности засоленных почв Северного Дагестана // Вестник Дагестанского научного центра РАН. 2020. № 76. С. 12–17. <https://doi.org/10.31029/vestdnc76/2>
- Орлов Д.С. Химия почв. 2-е изд., перераб. и доп. Москва: Издательство МГУ, 1992. 399 с.
- Селянина С.Б., Зубов И.Н., Орлов А.С., Пономарева Т.И., Скрыбина А.О., Шпанов Д.А., Соколова И.В., Чайковская О.Н., Федорова А.А. Изменение свойств гуминовых веществ верхового торфа в процессе дегидратации // Успехи современного естествознания. 2024. № 1. С. 41–46. <https://doi.org/10.17513/use.38205>
- Соколова И.В., Чайковская О.Н. Флуоресцентные и фотохимические свойства гуминовых кислот // Оптика атмосферы и океана. 2006. Том 19. № 2–3. С. 244–247.
- Соколова И.В., Федорова А.А. Флуоресценция гуминовых кислот, отличающихся генезисом органического сырья // Природа гуминовых веществ и их применение в различных отраслях народного хозяйства: Сборник трудов Всероссийской (национальной) научно-практической конференции с международным участием, посвященная памяти д.б.н., профессора Игоря Дисановича Комиссарова в честь 95-летия со дня рождения (Тюмень, 27 ноября 2024 г.). Тюмень: Государственный аграрный университет Северного Зауралья, 2024. С. 26–29.
- Соколова И.В., Солоха А.А., Скобцова К.А., Селянина С.Б. Флуоресценция водных растворов гуминовых кислот торфа и гуминовых препаратов // Торфяные болота Сибири: функционирование, ресурсы, восстановление: Материалы Четвертой международной научной конференции (Томск, 01–08 октября 2021 г.) / Сибирский научно-исследовательский институт сельского хозяйства и торфа-филиал Сибирского федерального научного центра агробиотехнологий РАН; Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН; Nature and Biodiversity Conservation Union. Томск: Издательство Ипполитова, 2021. С. 116–117.
- Чайковская О.Н., Соколова И.В. Фотореакторы для решения задач, связанных с загрязнением окружающей среды // Известия вузов. Физика. 2014. Том 57. № 12. С. 97–102.
- Чайковская О.Н., Нечаев Л.В. Взаимодействие полициклических ароматических углеводородов с органическим веществом почв и водных осадков. Томск: Томский государственный университет, 2017. 124 с. URL: <https://ibooks.ru/bookshelf/380692/reading> (дата обращения: 10.08.2025).
- Шубина Д.М., Якименко О.С., Пацаева С.В., Федосеева Е.В., Южаков В.И. Спектральные свойства водных растворов промышленных гуминовых препаратов // Вода: химия и экология. 2010. № 3(21). С. 21–25.
- Perminova I.V. From green chemistry and nature-like technologies towards ecoadaptive chemistry and technology // Pure and Applied Chemistry. 2019. Vol. 91. No 5. P. 851–864. <https://doi.org/10.1515/pac-2018-1110>
- Piccolo A. The supramolecular structure of humic substances // Soil Science. 2001. Vol. 166. No. 11. P. 810–832.

Поступила в редакцию 25.08.2025

Принята 06.11.2025

Опубликована 18.11.2025

Сведения об авторах:

Соколова Ирина Владимировна – доктор физико-математических наук, профессор, ведущий научный сотрудник лаборатории фотофизики и фотохимии молекул ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский государственный университет» (г. Томск, Россия); irsokol783@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0001-6515-7461>

Федорова Анастасия Андреевна – аспирант ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский государственный университет» (г. Томск, Россия); stasy_fedorova@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/)

Spectral and fluorescent properties of humic acids from various peat samples

© 2025 I. V. Sokolova , A. A. Fedorova

National Research Tomsk State University, Lenin Avenue, 36, Tomsk, Russia. E-mail: irsokol783@gmail.com

The aim of the study. To identify differences in absorption spectra and the fluorescent properties of humic acids under different formation conditions.

Location and time of the study. Fluorescence studies were carried out for aqueous solutions of peat aliquots isolated from samples of debitumenized high-moor peat, located at different depths and hence of humidity of the oligotrophic bog complex in the Mezensky district of the Arkhangelsk region.

Methods. Absorption and fluorescence spectra were recorded using a CM2203 spectrofluorimeter (Solar, Belarus) in standard quartz cuvettes for fluorometry. Fluorescence was recorded at excitation wavelengths of 260, 310, 360 nm.

Results. During the humification process and with the increasing duration of peat drying, the fluorescence intensity of the studied samples increased. The wavelength of the fluorescence maximum and its intensity depend on the wavelength of the excitation light. A "blue shift" of the fluorescence maximum was recorded with an increase in the excitation wavelength from 260 to 310 nm for the studied samples obtained from high-moor peat.

Conclusions. This study of the fluorescence spectra of the water extracts from peat enabled to reveal the properties of their emission characteristics. The "blue shift" of the fluorescence maximum that we discovered with an increase in the excitation wavelength from 260 to 310 nm for samples isolated from high-moor peat in the Mezensky District of the Arkhangelsk Region is consistent with similar shifts obtained for the dissolved organic matter in the surface layer of the Kara Sea and the bays of Novaya Zemlya, for aqueous extracts of saline soils in Northern Dagestan, and for industrial humic preparations from peat and sapropel. The fluorescent properties of humic acids are sensitive to the origin of the organic raw materials from which they are isolated and can be useful both for determining the influence of the environment and for assessing systems under anthropogenic pressure.

Keywords: fluorescence spectra; humic acids; peat; brown coal; fluorescence spectrum maximum.

How to cite: Sokolova I.V., Fedorova A.A. Spectral and fluorescent properties of humic acids of various peat samples. The Journal of Soils and Environment. 2025. 8(4). e331. DOI: [10.31251/pos.v8i4.331](https://doi.org/10.31251/pos.v8i4.331) (in Russian with English abstract).

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors are very thankful to S.B. Selyanina for samples provided for fluorescent studies.

FUNDING

The study was financially supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project No. FSWM-2025-0007).

REFERENCES

- Bazhina N.L., Dergacheva M.I. Fluorescent properties of soil humic acids of different formation conditions. The Journal of Soils and Environment. 2021. Vol. 4. No. 4. e167. (in Russian). <https://doi.org/10.31251/pos.v4i4.167>
- Gorshkova O.M., Patsaeva S.V., Fedoseeva E.V., Shubina D.M., Juzhakov V.I. Fluorescence of organic matter dissolved in natural water. Water: Chemistry and Ecology. 2009. No.11(17). P. 31–37. (in Russian).
- Gosteva O.Yu., Isosimov A.A., Patsaeva S.V., Yuzhakov V.I., Yakimenko O.S. Fluorescence of industrial humic substances in water. Zurnal Prikladnoj Spektroskopii. 2011. Vol. 78. No. 6. P. 943–950. (in Russian).
- Drozdova A.N., Patsaeva S.V., Khundzhua D.A. Fluorescence of dissolved organic matter as a marker for distribution of desalinated waters in the Kara sea and bays of Novaya Zemlya archipelago. Oceanology. 2017. Vol. 57. No. 1. C. 41–47. <https://doi.org/10.1134/S0001437017010039>
- Zykova M.V., Bratishko K.A., Logvinova L.A., Ivanov V.V., Buyko E.E., Danilets M.G., Trofimova E.S., Ligacheva A.A., Zima A.P., Rabtsevich E.S., Ufandeev A.A., Mikhalev D.A., Pershina A.V., Konstantinov A.I., Perminova I.V., Belousov M.V. Chemical-pharmacological study of coal humic substances for application in food and pharmaceutical

- industries. Chemistry for Sustainable Development. 2023. Vol. 31. No. 4. P. 367–377. <https://doi.org/10.15372/CSD2023480>
- Lakowicz J.R. Principles of Fluorescence Spectroscopy. Moscow: Mir Publ., 1986. 496 p. (in Russian).
- Lehn J.-M. Supramolecular Chemistry. Concept and perspectives. Novosibirsk: Nauka Publ., 1998. 334 p. (in Russian).
- Mammaev A.T., Magomedova M.H.-M., Alieva M.Ju., Pinjaskina E.V., Biarslanov A.B. Fluorescent studies of humus content of saline soils of Northern Dagestan. Herald of Daghestan Scientific Center. 2020. No. 76. P. 12–17. (in Russian). <https://doi.org/10.31029/vestdnc76/2>
- Orlov D.S. Soil Chemistry. Rotterdam; Brookfield: A.A. Balkema, 1992. 390 p.
- Selyanina S.B., Zubov I.N., Orlov A.S., Ponomareva T.I., Skryabina A.O., Shpanov D.A., Sokolova I.V., Chaykovskaya O.N., Fedorova A.A. Changes in the properties of humic substances of high-moor peat during dehydration. Advances in Current Natural Sciences. 2024. No. 1. P. 41–46. (in Russian). <https://doi.org/10.17513/use.38205>
- Sokolova I.V., Tchaikovskaya O.N. Fluorescent and photochemical properties of humic acids. Optika atmosfery i okeana. 2006. No. 2–3. P. 244–247. (in Russian).
- Sokolova I.V., Fedorova A.A. Fluorescence of humic acids differing in the genesis of organic raw materials. In book: The nature of humic substances and their application in various sectors of the national economy. Collection of works of the All-Russian (national) scientific and practical conference with international participation, dedicated to the memory of Doctor of Biological Sciences, Professor Igor Disanovich Komissarov in honor of the 95th anniversary of his birth (Tyumen, 27 November, 2024). Tyumen: State Agrarian University of the Northern Trans-Urals, 2024. P. 26–29. (in Russian).
- Sokolova I.V., Solokha A.A., Skobtsova K.A., Selyanina S.B. Fluorescence of aqueous solutions of humic acids of peat and humic preparations. In book: Peat bogs of Siberia: functioning, resources, restoration. Proceedings of the Fourth international scientific conference (Tomsk, October 1–8, 2021) / Siberian Research Institute of Agriculture and Peat, branch of the Siberian Federal Scientific Center for Agrobiotechnology, Russian Academy of Sciences; Institute for Monitoring of Climatic and Ecological Systems, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences; Nature and Biodiversity Conservation Union. Tomsk: Ippolitov Publishing House, 2021. P. 116–117. (in Russian).
- Tchaikovskaya O.N., Sokolova I.V. Photoreactors for solving problems of environmental pollution. Russian Physics Journal. 2015. Vol. 57. No. 12. P. 1725–1731. <https://doi.org/10.1007/s11182-015-0444-6>
- Tchaikovskaya O.N., Nechaev L.V. Interaction of polycyclic aromatic hydrocarbons with organic matter of soils and sediments. Tomsk: Tomsk State University, 2017. 124 p. URL: <https://ibooks.ru/bookshelf/380692/reading> (accessed on 10.08.2025). (in Russian).
- Shubina D.M., Yakimenko O.S., Patsaeva S.V., Izosimov A.A., Terekhova V.A., Fedoseeva E.V., Yuzhakov V.I. Spectral properties of humic water solutions. Water: Chemistry and Ecology. 2010. No. 3(21). P. 21–25. (in Russian).
- Perminova I.V. From green chemistry and nature-like technologies towards ecoadaptive chemistry and technology. Pure and Applied Chemistry. 2019. Vol. 91. No. 5. P. 851–864. <https://doi.org/10.1515/pac-2018-1110>
- Piccolo A. The supramolecular structure of humic substances. Soil Science. 2001. Vol. 166. No. 11. P. 810–832.

Received 25 August 2025

Accepted 06 November 2025

Published 18 November 2025

About the authors:

Irina V. Sokolova – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Leading Researcher, Laboratory of Photophysics and Photochemistry of Molecules, National Research Tomsk State University (Tomsk, Russia); irsokol783@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0001-6515-7461>

Anastasia A. Fedorova – Postgraduate Student, National Research Tomsk State University (Tomsk, Russia); stasy_fedorova@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/)



Геохимия болотных вод голоценового разреза Большого Убинского рьяма (Барабинская лесостепь)

© 2025 А. Е. Мальцев ¹, Ю. И. Пре́йс ², Г. А. Леонова ¹, А. А. Ломова ¹

¹ФГБУН Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, проспект Академика Коптюга, 3, г. Новосибирск, 630090, Россия. E-mail: maltsev@igm.nsc.ru

²ФГБУН Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Академический проспект, 10, г. Томск, 634055, Россия. E-mail: preisyyi@rambler.ru

Цель исследования. Изучить химический состав и закономерности формирования болотных вод Большого Убинского рьяма в голоцене.

Место и время проведения. Объектом исследования стали болотные воды Большого Убинского рьяма, расположенного в лесостепной зоне Западной Сибири, на южной границе Барабинской низменности, отобранные в сентябре 2024 г.

Методы. Титриметрический, капиллярный электрофорез, фотометрический методы для определения ионного состава болотных вод. Метод атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой (ИСП-АЭС) для определения Ca, Mg, Na, K, Al, Fe, Si, As, Cr, Cu, Pb, Zn, B, Mn, Sr, Sb. Содержание растворенных органического и неорганического углерода определены на анализаторе Multi N/C 2100S. Аутигенные минералы Fe детектированы с помощью сканирующего электронного микроскопа TESCAN MIRA 3 LMU с системами микроанализа.

Основные результаты. Впервые для Большого Убинского рьяма был получен химический состав болотных вод по всему разрезу торфяных отложений. Концентрация большинства основных ионов и химических элементов в болотных водах уменьшается от торфов низинного типа к переходным и верховым, т.к. в последних водно-минеральное питание осуществляется лишь за счет атмосферных аэрозолей и зольной части минерализующейся растительной биомассы. Близость залегания подстилающих пород, восстановительные условия среды, а также разрушение ряда минералов и фильтрация грунтовых вод через подошвенный горизонт торфяной залежи обуславливают повышение в болотных водах низинных торфов концентраций Cl^- , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Si, B, Mn, Sr. В сравнении с низинными и переходными торфами, в болотных водах верхового торфа отмечается более высокое содержание Al, Fe, Sb. Вниз по разрезу наблюдается смена ассоциаций аутигенных минеральных фаз железа: верховые торфа характеризуются развитием оксидов и гидроксидов, а низинная часть торфяной залежи характеризуется присутствием сульфидов Fe (пирит).

Заключение. Полученные данные убедительно демонстрируют, что вертикальная геохимическая зональность болотных вод напрямую обусловлена генетическим типом торфа и литологией подстилающих минеральных отложений.

Ключевые слова: болотные воды; рьям; геохимия; растворенное органическое вещество; микроэлементы; аутигенные минералы Fe; Барабинская лесостепь.

Цитирование: Мальцев А.Е., Пре́йс Ю.И., Леонова Г.А., Ломова А.А. Геохимия болотных вод голоценового разреза Большого Убинского рьяма (Барабинская лесостепь) // Почвы и окружающая среда. 2025. Том 8. № 4. е332. DOI: [10.31251/pos.v8i4.332](https://doi.org/10.31251/pos.v8i4.332)

ВВЕДЕНИЕ

Изучение химического состава болотных вод имеет важное значение для понимания процессов истории развития и формирования торфяников, преобразования органического вещества торфа, перераспределения химических элементов и реконструкции климатических обстановок голоцена. Многие проблемы в исследовании биогеохимии болот, газового режима, функционирования торфяно-болотных экосистем, микробиологических процессов не могут быть в полной мере решены без изучения болотных вод, пронизывающих толщу торфяных отложений (Савичев, 2009, 2015; Савичев и др., 2013). В мире достаточно большое внимание уделяется изучению как биогеохимии торфяных отложений, так и геохимии болотных вод торфяников (Helmer et al., 1990; Steinmann, Shotyk, 1997; Shotyk et al., 2001; Malawskaand, Wilkomirski, 2004; Gorham, Janssens, 2005; Stanton et al., 2007; Kempter et al., 2017; Griffiths et al., 2019; и др.). Подобные исследования активно проводятся для болот лесной и лесостепной зон Западной Сибири. Например, можно привести ряд работ по геохимии разрезов торфяников (Ефремова и др., 2003; Архипов, Бернатонис, 2013; Бобров и др., 2013; Веретенникова 2013; Харанжевская и др., 2017; Савичев и др., 2019а, 2019б; Водяницкий и др., 2019; Веретенникова

и др., 2021; Леонова и др., 2022а; Stepanova et al., 2015; Rudmin et al., 2018; и др.) и геохимии болотных вод (Савичев, 2009; Савичев, Шмаков, 2012; Савичев и др., 2013; Шварцев и др., 2012; Скороходова, Савичев, 2013; Савичев, 2015; Иванова и др., 2017; и др.), а также основополагающие работы В.К. Бахнова (1971, 1972, 1986), изучавшего как химический состав болотных вод, так и торфа рямов южной границы Барабинской лесостепи.

Болотные воды являются объектом обширного изучения; исследуется водообмен и водный баланс болотных ландшафтов, химический состав болотных вод, биогеохимические аспекты и т.д. (Инишева, Инишев, 2000, 2001; Шварцев, 2002). Тем не менее, и нерешенных проблем остается немало: в частности, состав органических соединений, которые доминируют в болотных водах, связи между составом болотных и подземных вод, выявление закономерностей изменения химического состава болотных вод по территории, типу болота и глубине торфяной залежи, распределение и миграция химических элементов, влияние микроорганизмов на химический состав болотных вод, изменение состава болотных вод под влиянием хозяйственной деятельности и многое другое (Шварцев и др., 2012; Бобров и др., 2013; Скороходова, Савичев, 2013; Савичев, 2015; Савичев и др., 2019а; Иванова и др., 2017). Помимо этого, большое количество исследований химического состава болотных вод проводится не по всему разрезу торфяника, а только по его верхнему деятельному слою (до 1 м) и/или по одиночным точкам отбора проб (4–8), исключающих непрерывное опробование торфяной залежи (Архипов, Бернатонис, 2013; Скороходова, Савичев, 2013; Савичев и др., 2019а, 2019б; Иванова и др., 2017). Довольно мало работ по изучению закономерностей изменения химического состава болотных вод по глубине торфяной залежи (Савичев, Шмаков, 2012; Шварцев и др., 2012). Еще менее изучены механизмы трансформации химического состава болотных вод в процессе раннего диагенеза болотных отложений. Это ставит проблему биогеохимических исследований болотных вод и их трансформации по всему разрезу торфяной залежи в ряд чрезвычайно актуальных как в теоретическом, так и практическом аспектах.

Цель работы – изучить химический состав и закономерности формирования болотных вод Большого Убинского яма в голоцене.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В пределах юга Западной Сибири весьма отчетливо выражены ландшафтные зоны – лесная, лесостепная и степная. В лесостепной зоне Барабинской аккумулятивной равнины распространены верховые сосново-кустарничково-сфагновые болота – рямы. Они располагаются на южной границе ареала распространения верховых болот (Валуцкий, 1991). Эти рямы сформировались в конце суббореального периода в условиях похолодания и повышения влажности климата (Лисс и др., 2001) или в период последующего потепления (Прейс и др., 2022). В первом случае происходила постепенная олиготрофизация болот, во втором – катастрофическая, при деградации многолетнемерзлого водоупора, сформировавшегося в торфяной залежи в период предшествующего похолодания. Объектом исследования стали болотные воды Большого Убинского яма, расположенного в лесостепной зоне Западной Сибири, на южной границе Барабинской низменности (рис. 1).

На выбранном участке яма выполнено геоботаническое обследование с описанием растительного покрова и микрорельефа. В сентябре 2024 г. проведен отбор оцёса (верхний слой живого мха) и бурение торфяной залежи до подстилающих грунтов торфяным буром БТГ-1 в 3-х параллельных скважинах в юго-восточной части болота с координатами: 55°18'40" с.ш., 79°42'25" в.д. Зольность (А, %), влажность (W, %), степень разложения (R, %) и плотность абсолютно сухого торфа ($P_{аст}$, г/дм³) определялись согласно стандартной методике (Лиштван, Король, 1975).

Болотную воду (свободную и связанную) получали из 10- и 20-сантиметровых фрагментов торфа путем отжима в пресс-форме с помощью гидравлического пресса *Отес PI.88.00* с минимальным давлением (<1 psi) в герметичные пробирки, чтобы ограничить доступ кислорода. Воду из органо-минеральных отложений и глин получали при давлении ~3000 psi. В отобранной болотной воде сразу измеряли неустойчивые физико-химические параметры – водородный показатель (рН) и окислительно-восстановительный потенциал (Eh) с помощью рН-метра *Анион 4100*. Затем болотную воду фильтровали через мембранный фильтр с порами диаметром 0,45 мкм для микроэлементного анализа и определения растворенного углерода. Далее воду на микроэлементный анализ консервировали добавлением концентрированной азотной кислоты марки особо чистая (ОСЧ) в соотношении 1:100; воду на гидрохимический анализ (ионы) не консервировали и не фильтровали.

Определение содержания анионов в болотных водах проводили титриметрическим методом (HCO_3^-) и методом капиллярного электрофореза (Cl^- , NO_3^- , NO_2^- , SO_4^{2-} , PO_4^{3-} , F^-) с использованием системы *Agilent 7100*. Содержание NH_4^+ измеряли фотометрическим методом с реактивом Несслера.

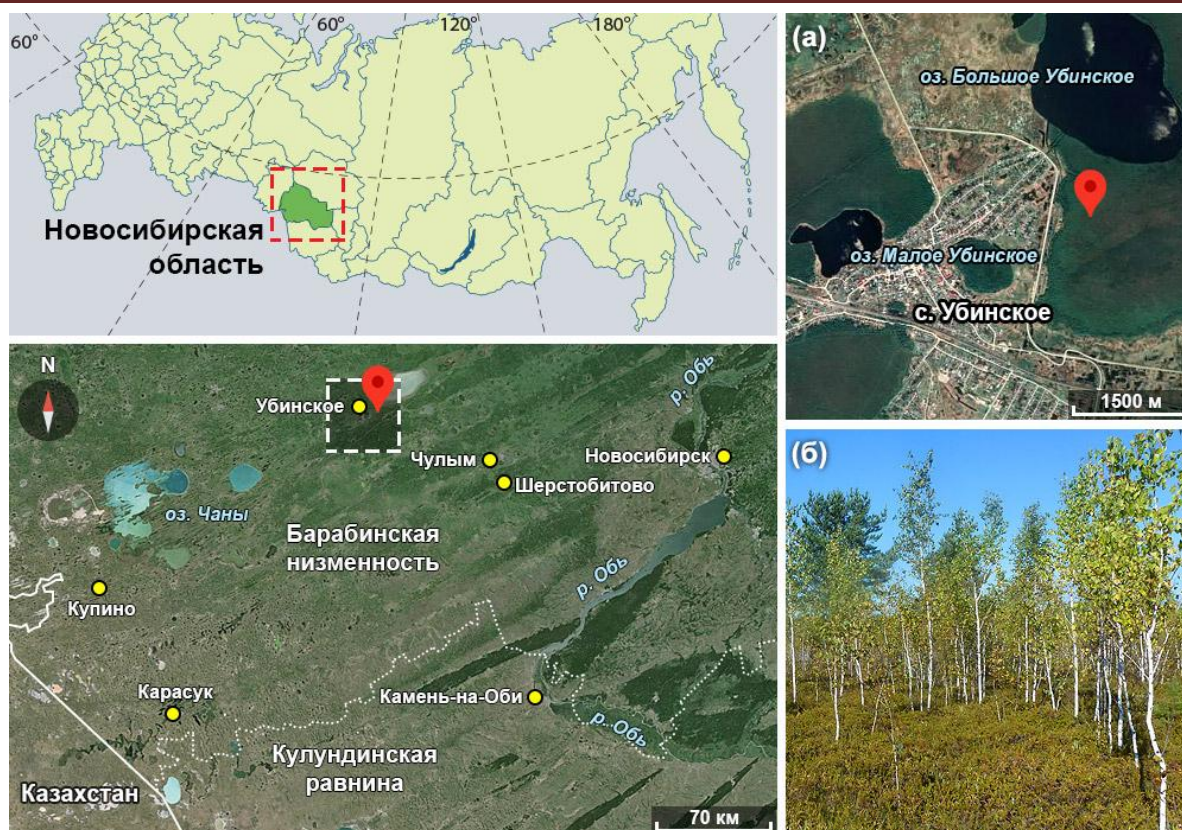


Рисунок 1. Расположение района исследования (а) и общий вид растительных сообществ, микрорельеф и строение нижних ярусов рья (б).

Концентрацию растворенного H_2S в болотных водах определяли по стандартной методике (Волков, Жабина, 1980) фотометрическим методом с N,N-диметил-п-фенилендиаминном с предварительной консервацией пробы. Методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой (ИСП-АЭС) в отфильтрованных и подкисленных пробах болотной воды установлены концентрации макро- и микроэлементов: Ca, Mg, Na, K, Al, Fe, Si, As, Cr, Cu, Pb, Zn, B, Mn, Sr, Sb. Определение содержания растворенных органического и неорганического углерода в отфильтрованных болотных водах проводилось на анализаторе *Multi N/C 2100S*.

Сканирующую электронную микроскопию (СЭМ) применяли для изучения микроморфологии, вещественного состава образцов торфа и содержащихся в них минеральных фаз с использованием сканирующего электронного микроскопа *TESCAN MIRA 3 LMU* с системами микроанализа *Aztec Energy XMax 50+* и *INCA Wave 500* (Oxford Instruments Nanoanalysis). Использовали различные режимы детектирования: режим вторичных электронов, позволяющий получить данные о морфологии рельефа; режим отраженных электронов или режим фазового контраста, который дает возможность получить картину распределения электронной плотности в исследуемой пробе; режим характеристического рентгеновского излучения, позволяющий провести рентгеноспектральный микроанализ и получить данные по элементному составу образца, которая способствует идентификации минерала (Goldstein et al., 1981).

Для количественной оценки силы и направления линейной связи между парами ионов и микроэлементов был рассчитан коэффициент корреляции Пирсона (r) на основе объединенного набора данных. Обработка проводилась с использованием статистического ПО (*Python* с библиотеками *pandas*, *scipy.stats* и *matplotlib*).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Общая характеристика рья. Торфяной разрез на Большом Убинском рье заложен в юго-восточной части болота (рис. 1 А). В настоящее время здесь представлен постпирогенный мезоолиготрофный березово-кустарничково-сфагновый фитоценоз (рис. 1 Б). Разреженный древесный ярус образован березой (*Betula pubescens* Ehrh.) высотой (h) от 1,5 до 4,5 м, диаметром (d) – 1,0–3,5 см, с сомкнутостью крон (P) – 0,2 и единичными соснами (h – до 2,5 м). Густой травяно-кустарничковый ярус (h – до 40 см, с суммарным проективным покрытием (пп) – до 80%) образован багульником (*Ledum*

palustre L.) – 60%, кассандрой (*Chamaedaphne calyculata* (L.) Moench) – 60%, андромедой (*Andromeda polyfolia* L.) – 5%, клюквой мелкоплодной (*Oxycoccus microcarpus* Turcz. ex Rupr.) – 5%, брусникой (*Vaccinium vitis-idae* L.) – 5%, пушицей влагалищной (*Eriophorum vaginatum* L.) – 5%; морошка (*Rubus chamaemorus* L.) – встречается единично. Напочвенный моховой покров из *Sphagnum fuscum* (Schimp.) Klinggr. и *S. divinum* Flatberg & K. Hassel сплошной, хорошо развит, межкочечные понижения, занимающие всего 5% площади, заняты *S. angustifolium* (C.E.O.Jensen ex Russow) C.E.O.Jensen. Микрорельеф представлен сфагновыми кочками и подушками (h – 15–25 см, d – 0,25–1,0 м, P – 95%).

Стратиграфия торфяных отложений и свойства торфа. Проведены детальные (с шагом 3–5 см) исследования стратиграфии и свойств торфяных отложений Большого Убинского яра (рис. 2).

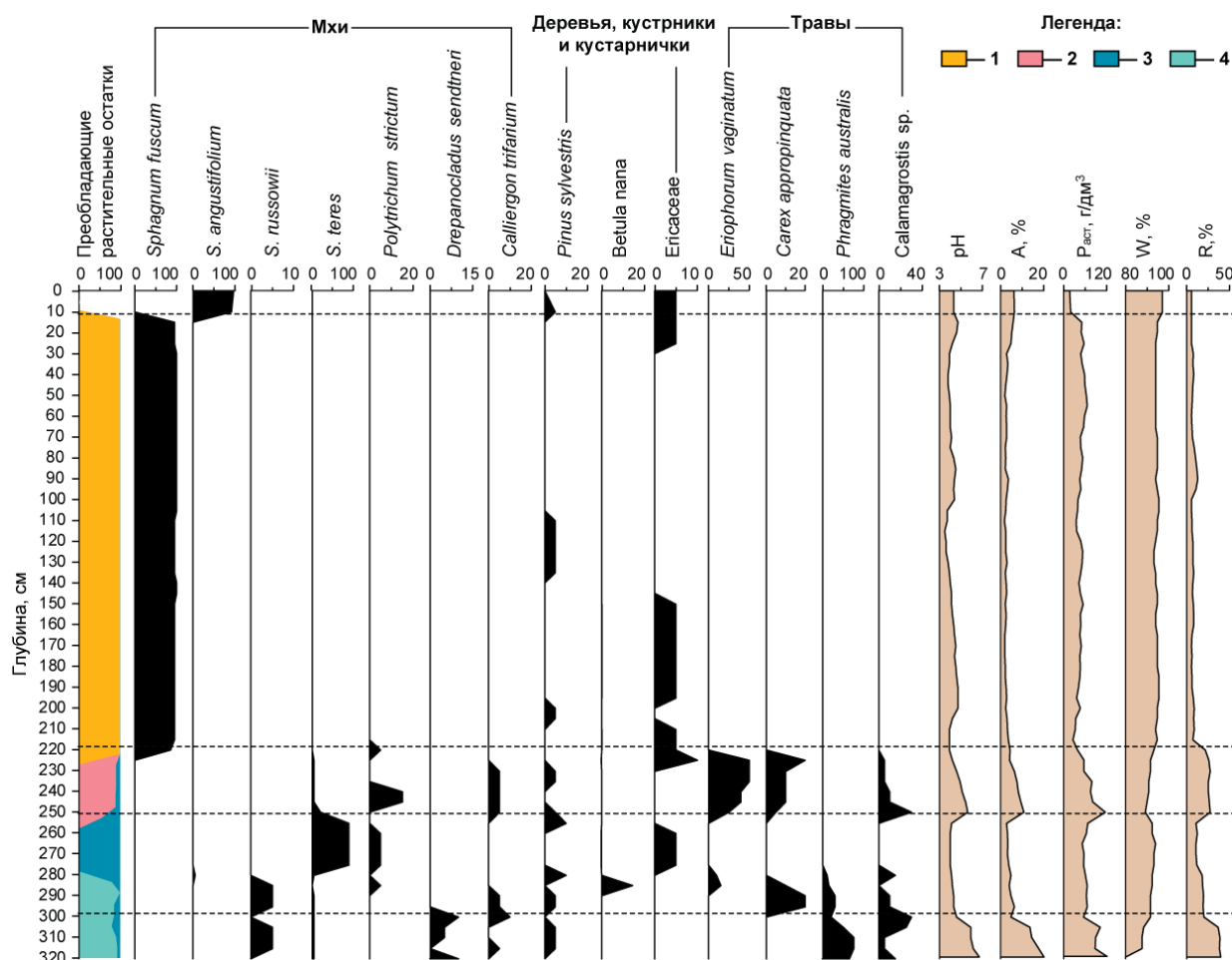


Рисунок 2. Стратиграфическая колонка и свойства торфа. А – зольность (%), $P_{аст}$ – плотность абсолютно сухого торфа (г/дм³), W – влажность (%), R – степень разложения (%). Преобладающие растительные остатки: 1) *Sphagnum fuscum*, 2) *Eriophorum vaginatum*, 3) *Sphagnum teres*, 4) *Phragmites australis*.

На ключевом участке яра торфяная залежь имеет мощность 3,2 м. Очёс состоит из сфагнового мха (*Sphagnum angustifolium*). Верхние 10 см разреза представлены ангустифолиум торфом. Ниже торфяная залежь состоит из двух слоев: 1) светлый, слаборазложившийся ($R = 5,8–8,8\%$), очень однородный, низкзольный ($A = 1,80–5,17\%$), «кислый» ($pH = 3,5–4,7$) – верховой фускум торф, залегающий в интервале 10–220 см; 2) более темный торф в интервале 220–320 см. Слой 220–250 см представлен переходным, черным пушицево-гипновым торфом – это горелый слой с повышенными значениями зольности ($A = 6,32–10,67\%$), плотности ($P_{аст} = 56–116$ г/дм³), пониженной влажностью ($W = 88,3–90,5\%$) и средней степени разложения – 21,8–27,5% (рис. 2). В слое 250–300 см залегают низинные низкзольные ($A = 2,76–6,39\%$) терес и осоково-тростниковый торфа с более высокими значениями $pH = 4,2–5,6$ и $4,0–4,6$, соответственно. Для данного горизонта характерны более низкие показатели $P_{аст} = 52–67$ г/дм³ и повышенная влажность ($W = 91,0–93,4\%$). Судя по наличию угольков и повышенным значениям зольности ($A = 4,71–6,39\%$) в слоях 275–280 и 285–295 см Большой Убинский яр неоднократно горел и на эвтрофной стадии развития. Ниже 300 см залегают более высокзольный

($A = 4,71\text{--}18,07\%$) и более плотный ($P_{\text{аст}} = 87\text{--}144 \text{ г/дм}^3$), но менее влажный ($W = 86,8\text{--}91,1\%$) тростниковый торф с $pH = 5,9\text{--}6,7$. Интервал 320–325 см является переходным между торфяником и подстилающими породами, которые в интервале 325–340 см представлены органо-минеральными отложениями (ОМО), сменяющимися затем глинами (340–370 см). Радиоуглеродный возраст (^{14}C) всей торфяной залежи составляет 4350 ± 70 л. н., согласно датированию придонного образца торфа с глубины 310 см (Лисс и др., 2001).

Общая характеристика болотных вод. Проведенный анализ проб болотных вод из разреза торфяной залежи Большого Убинского рья выявил четкую вертикальную зональность в распределении физико-химических параметров, форм растворенного углерода и общей минерализации (табл. 1).

Таблица 1

Физико-химические параметры, содержание углерода и минерализация болотных вод

Глубина, см	pH	Eh, мВ	РНУ, мг/л	РОУ, мг/л	Σ и, мг/л
Очѐс (мох)	4,30	+281	5,6	61,4	52,41
0–10	3,57	+410	<0,1	81,0	27,21
30–40	3,59	+374	<0,1	76,4	24,82
60–70	3,64	+317	<0,1	92,5	24,74
110–120	3,82	+312	<0,1	88,8	23,49
170–180	3,95	+301	<0,1	104,4	41,20
220–230	4,27	+249	<0,1	105,0	145,29
260–270	5,53	–176	<0,1	124,2	143,65
280–290	5,71	–224	3,1	86,3	162,74
325–335	6,51	–347	1,3	74,4	256,36
340–350	6,64	–126	9,1	21,3	406,84

Примечание.

Eh – окислительно-восстановительный потенциал, РНУ – растворенный неорганический углерод, РОУ – растворенный органический углерод, Σ и – сумма главных ионов, <0,1 – значения меньше предела обнаружения метода.

Наблюдается ярко выраженный тренд изменения окислительно-восстановительного потенциала (Eh) и кислотности (pH) болотных вод с глубиной. Верхняя часть разреза (0–220 см) характеризуется крайне кислой средой ($pH = 3,57\text{--}3,95$) и положительными значениями Eh (от +390 до +301 мВ). Это указывает на интенсивную окислительную обстановку, типичную для аэрируемой (кислородной) зоны торфяника, где протекают процессы окисления органического вещества (ОВ). Глубина ~220–260 см является переходной зоной, где значение pH повышается (4,27), а Eh резко падает (+249 мВ), что свидетельствует об исчерпании свободного кислорода. Нижняя часть разреза (глубже 260 см) характеризуется слабокислыми ($pH = 5,53\text{--}5,71$) условиями среды и резко восстановительной обстановкой, где значения Eh становятся отрицательными (от –176 до –224 мВ), что является признаком активных анаэробных процессов. Подстилающие торф ОМО и глины (325–350 см) уже имеют близкие к нейтральным значения pH (6,51–6,64), а для первых характерна еще и сильно восстановительная обстановка (–347 мВ на глубине 325–335 см).

Концентрация **растворенного органического углерода (РОУ)** высока на всем протяжении разреза торфа (76,4–124,2 мг/л), что типично для болотных вод, богатых гуминовыми веществами (Шварцев и др., 2012). В окислительной зоне (0–220 см) наблюдается общая тенденция увеличения содержания РОУ с глубиной – от 81,0 до 104,4 мг/л. В восстановительной зоне торфяника (220–320 см) наблюдается некоторое увеличение значений РОУ с максимумом 124,2 мг/л на глубине 260–270 см. Подстилающие торф минеральные отложения характеризуются заметным снижением РОУ до 21,3–74,4 мг/л. В окислительной зоне концентрация **растворенного неорганического углерода (РНУ)** меньше предела обнаружения метода. В восстановительной зоне РНУ детектируется и его концентрации составляют 1,3–9,1 мг/л, при этом максимальные значения РНУ установлены у подошвы разреза.

Общая минерализация болотных вод, рассчитанная как сумма главных ионов (Σ и), демонстрирует четкий аккумулятивный тренд с глубиной. В верхней части разреза (0–120 см) минерализация болотных вод самая низкая (23,49–27,21 мг/л), без значительных колебаний, что, в целом, характерно для атмосферного типа питания верхового торфяника (Бобров и др., 2013). Глубже

по разрезу отмечается некоторое увеличение минерализации болотных вод до 41,2 мг/л, а при переходе к низинному типу торфа (220–290 см) происходит резкий скачок минерализации – до 143,65–162,74 мг/л. Для подстилающих торф ОМО значения минерализации достигают 256,36 мг/л, с максимумом у подошвы – 406,84 мг/л.

Отдельно стоит выделить моховой очёс, отобранный с поверхности торфяника. Несмотря на то, что его среда окислительная (+281 мВ), значение Eh в очёсе существенно ниже, чем в деятельном слое торфа на глубине 0–10 см (+390 мВ). Значение pH в болотной воде, полученной из очёса, составляет 4,30, что значительно выше, чем в непосредственно подстилающем его торфе (pH = 3,57). Принципиальным отличием является наличие РНУ в болотной воде очёса (5,6 мг/л), в то время как в нижележащих горизонтах торфа (до глубины 260 см) его концентрация ниже предела обнаружения. При этом концентрация РОУ в очёсе (61,4 мг/л) ниже, чем в болотных водах торфяной залежи, включая приповерхностный горизонт (81 мг/л). Общая минерализация в болотной воде очёса (52,41 мг/л) почти в два раза выше, чем в поверхностном горизонте торфа 0–10 см (27,21 мг/л).

Основной ионный состав. Проведенные гидрохимические исследования болотных вод выявили закономерности в распределении концентраций основных ионов по глубине торфяной залежи Большого Убинского р-на, которые совпадают со сменой типа торфа (рис. 3).

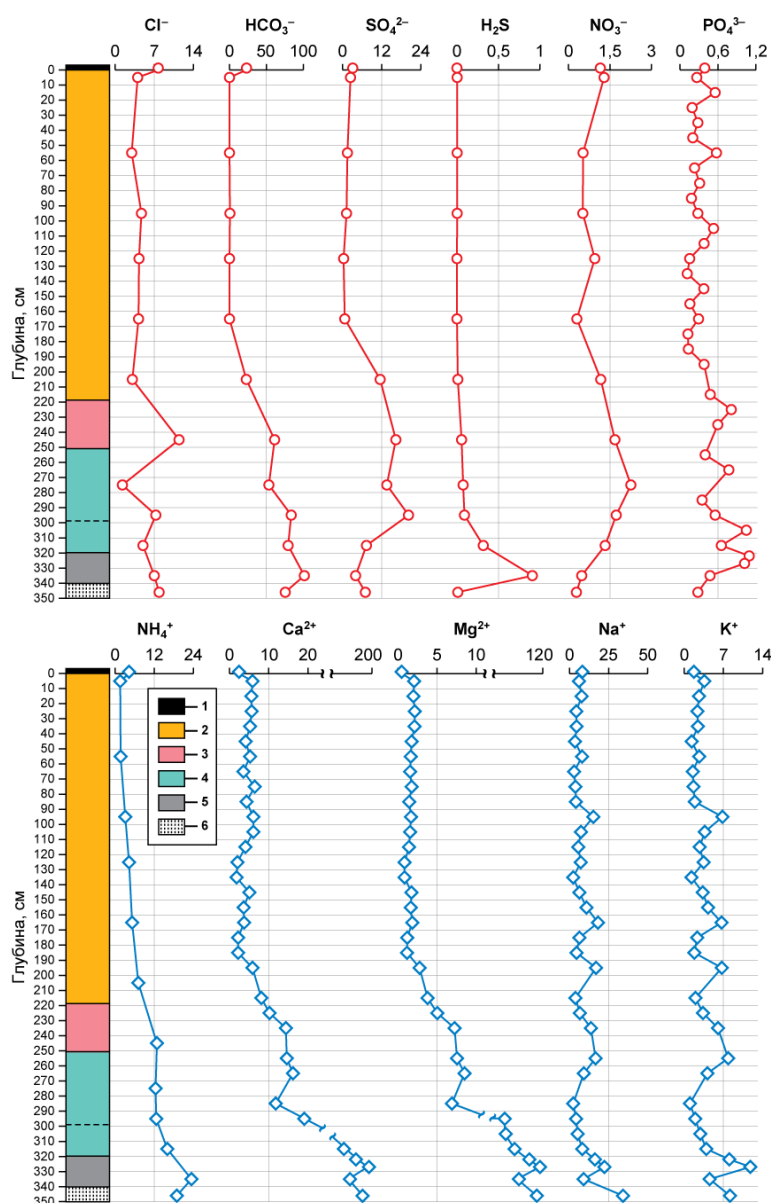


Рисунок 3. Распределение основных ионов (мг/л) и растворенного H_2S (мг/л) по профилю торфа. Стратиграфическая колонка: 1) очёс (живой мох), 2) верховой торф, 3) переходный торф, 4) низинный торф (пунктиром отделен высокозольный торф), 5) органо-минеральные отложения, 6) подстилающие глины.

Для верхового торфа (до 200 см) концентрации гидрокарбонатов ниже предела обнаружения метода, за исключением пробы с глубины 90–100 см (0,6 мг/л). Значимые концентрации HCO_3^- наблюдаются только с глубины 200–210 см (22,9 мг/л) и затем резко возрастают, достигая значений 61,0–83,9 мг/л в интервале 240–350 см. Стоит отметить, что несмотря на отсутствие гидрокарбонат-иона в верхних горизонтах торфа, в болотных водах отчёса содержание HCO_3^- составляют 23 мг/л. Концентрация хлоридов во всем разрезе торфа относительно стабильна и колеблется в пределах 3,0–4,7 мг/л, без выраженного тренда по глубине. Отмечаются несколько пиков Cl^- : в болотных водах отчёса (7,7 мг/л), на глубинах 240–250 см (11,4 мг/л – самый значимый) и 290–300 см (7,3 мг/л), а также в ОМО и подстилающих глинах (7,0–7,9 мг/л). Стоит также отметить интервал 270–280 см с резким падением концентраций хлорид-иона до 1,3 мг/л.

В распределении сульфатов наблюдается тенденция роста их концентрации с глубиной. Так, отчёт и верхняя часть торфяного разреза (0–100 см) характеризуется значениями SO_4^{2-} на уровне 1,24–3,10 мг/л. В интервале 120–170 см наблюдается минимальная концентрация сульфат-иона (0,30–0,68 мг/л), а ниже, в интервале 200–290 см, содержание SO_4^{2-} значительно возрастает (11,5–16,36 мг/л), достигая локального максимума 20,24 мг/л на глубине 290–300 см. С глубины 300 см концентрация SO_4^{2-} вновь снижается до 4,0–7,3 мг/л. Содержание растворенного сероводорода демонстрирует противоположный характер распределения. Для верхней части торфяника (0–170 см) оно не превышает 0,0007–0,0031 мг/л, но начиная с глубины 200–250 см концентрация H_2S последовательно увеличивается на порядки величин: от 0,0115–0,0902 мг/л до абсолютного максимума 0,3173–0,9740 мг/л на глубине 310–340 см. Для подстилающих глин характерно снижение концентрации растворенного сероводорода до 0,0096 мг/л.

Наблюдается выраженная тенденция к увеличению концентрации ионов NH_4^+ с глубиной. Так, в верхних слоях торфа (0–60 см) содержание аммония минимально и составляет 1,56–1,71 мг/л. В интервале 60–200 см его концентрация возрастает до 3,1–7,1 мг/л, а с глубины 210 см наблюдается значительный рост содержания NH_4^+ – до 12,44–12,80 мг/л, достигая абсолютного максимума (18,9–23,4 мг/л) в органо-минеральных отложениях и глинах (330–350 см). В болотных водах отчёса концентрация NH_4^+ составляет 4,3 мг/л. Противоположный тренд характеризует распределение нитрат-иона: максимальная концентрация зафиксирована в отчёсе (1,15 мг/л) и самой верхней части разреза (1,29 мг/л). На глубине 20–170 см содержание NO_3^- снижается примерно в 2 раза и составляет 0,3–0,95 мг/л. Глубже по разрезу (до 320 см) концентрация нитратов значительно возрастает – до 1,17–2,26 мг/л, резко снижаясь в ОМО и глинах (до 0,29–0,48 мг/л).

Распределение фосфат-иона не демонстрирует четкой зависимости с глубиной: концентрация PO_4^{3-} варьируют в широком диапазоне от 0,116 до 1,092 мг/л. Наибольшие значения фосфатов зафиксированы на глубинах 280–290 см (1,047 мг/л) и 325–330 см (1,019 мг/л), а наименьшие – в интервале 130–150 см (0,12 мг/л). Значения концентраций анионов NO_2^- и F^- в болотных водах были ниже пределов обнаружения метода.

В интервале 0–220 см концентрация ионов кальция варьирует в диапазоне 1,78–8,13 мг/л, без четкой динамики. На глубине 220–240 см фиксируется увеличение Ca^{2+} (10,17–14,4 мг/л), за которым следует его стремительный рост (низинный торф) до абсолютного максимума 177,22 мг/л в органо-минеральных отложениях (325–330 см). В составе подстилающих глин (340–350 см) содержание Ca^{2+} остается высоким – 152,11 мг/л. Характер распределения ионов магния полностью повторяет динамику кальция – данная пара ионов имеет сильную положительную корреляцию ($r = 0,98$). Концентрация Mg^{2+} в верхней и средней (переходный торф) части разреза не превышает 2,78 мг/л. В низинном высокозольном торфе с глубины 300–310 см (13,29 мг/л) начинается резкое увеличение содержания Mg^{2+} , достигая максимума 111,11 мг/л в ОМО (325–330 см) и снижаясь до 102,46 мг/л в подстилающих глинах (340–370 см).

Распределение ионов натрия и калия сходно между собой, что подтверждает сильная прямая корреляция (0,96). В интервале 0–300 см концентрации Na^+ и K^+ колеблются в диапазонах 2,37–18,28 мг/л и 1,29–6,81 мг/л, соответственно, с отдельными пиками на глубинах 160–170 см и 190–200 см. На глубине 300–310 см в высокозольном низинном торфе наблюдается резкое увеличение их концентраций со значительным ростом содержания натрия (до 34,17 мг/л) в минеральных отложениях (340–370 см).

Элементный состав болотных вод. Характер распределения Al, Fe, Si, As, Cr, Cu, Pb, Zn, B, Mn, Sr, Sb показал, что поведение растворённых компонентов в болотных водах разреза торфа Большого Убинского рья принципиально неоднородно (рис. 4). По характеру распределения химические элементы разделяются на три условные группы.

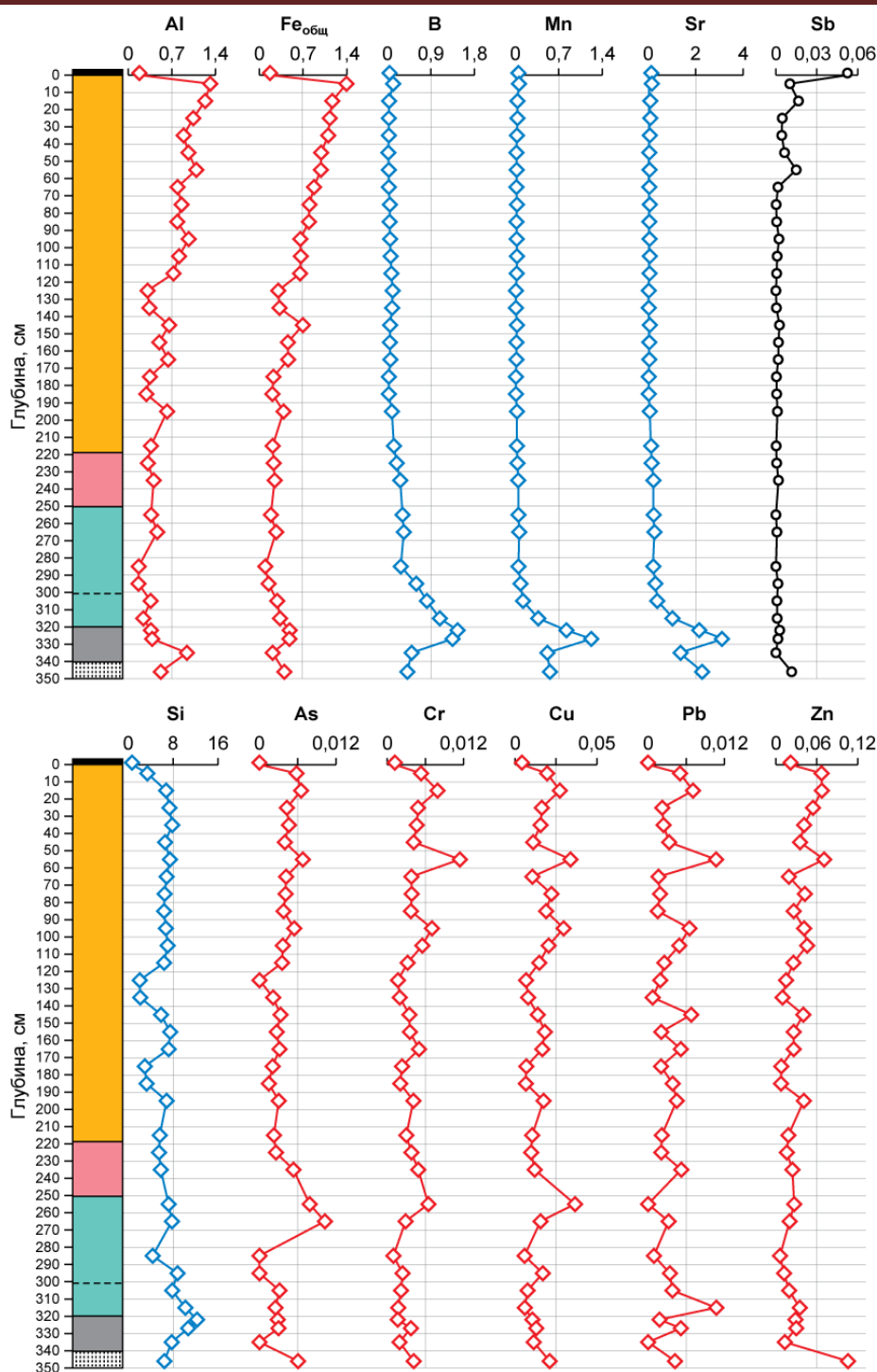


Рисунок 4. Распределение растворенных химических элементов (мг/л) по профилю торфа. Стратиграфическая колонка – см. рис. 3.

Группа Al и Fe_{общ} характеризуется высокими концентрациями в верховом торфе и тенденцией снижения в более глубоких слоях торфяника, что подтверждается их сильной положительной корреляцией ($r = 0,89$; $p\text{-value} < 0,05$ – здесь и далее). Для Al характерна низкая концентрация (0,18 мг/л) в болотных водах оёса, которая резко возрастает в верховом торфе (5–220 см), где среднее значение составляет 0,74 мг/л (максимум 1,32 мг/л на глубине 5 см). В переходном торфе (220–250 см) средняя концентрация падает до 0,39 мг/л, в низинном (285–315 см) – до 0,23 мг/л, с небольшим увеличением в минеральных отложениях (322–350 см) до среднего 0,55 мг/л (максимум 0,94 мг/л на глубине 335 см). Аналогично Al, для Fe_{общ} минимальная концентрация установлена в оёсе (0,17 мг/л) с пиком в верховом торфе (среднее 0,69 мг/л, максимум 1,40 мг/л на 5 см). Далее следует снижение: в переходном торфе – 0,23 мг/л, в низинном – 0,21 мг/л с умеренным ростом в минеральных отложениях (среднее 0,39 мг/л, максимум 0,48 мг/л на глубине 327 см). Таким образом, для Fe_{общ} и Al максимальные их

концентрации установлены в самом верхнем, приповерхностном слое торфяника, так называемом деятельном слое.

Элементы В, Мп и Sr, демонстрирующие заметное увеличение с глубиной образуют вторую группу. Элементы этой группы показывают прогрессивный рост концентраций от поверхности к минеральным отложениям с сильными положительными корреляциями между В, Мп и Sr ($r = 0,83-0,98$), а также умеренной с Si ($0,55-0,66$). Так, минимальные значения В установлены в оёсе ($0,05$ мг/л) и в верховом торфе (среднее – $0,06$ мг/л) с заметным ростом в переходном торфе ($0,28$ мг/л, максимум $0,34$ мг/л на глубине 255 см). В низинном торфе отмечается резкое увеличение концентраций, где средние значения составили $0,69$ мг/л с максимумом $1,08$ мг/л в высокозольном слое на глубине 315 см, а в минеральных отложениях еще больше – $0,93$ мг/л (максимум $1,45$ мг/л на глубине 322 см). Марганец имеет следующие концентрации: оёс – $0,05$ мг/л, верховой торф – $0,02$, переходный торф – $0,05$ мг/л. Значительное увеличение концентраций Мп наблюдается в низинном торфе – $0,16$ мг/л (максимум $0,37$ мг/л на глубине 315 см) и минеральных отложениях – $0,78$ мг/л (максимум $1,22$ мг/л на глубине 327 см). Для Sr также установлены низкие средние концентрации в оёсе ($0,01$ мг/л) и в верховом торфе ($0,04$ мг/л), с последующим ростом в переходном торфе ($0,22$ мг/л, максимум $0,27$ мг/л на глубине 255 см). В низинном торфе средние значения Sr составляют $0,50$ мг/л (максимум $1,07$ мг/л на глубине 315 см), а в минеральных отложениях – $2,24$ мг/л (максимум $3,16$ мг/л на глубине 327 см).

Кремний имеет некоторую схожесть по распределению с группой 2, однако в характере поведения Si менее выражен тренд на резкое увеличение в нижних интервалах торфа и минеральных отложениях. Низкая концентрация Si наблюдается в болотных водах оёса ($0,69$ мг/л), с ростом в верховом торфе (среднее $5,82$ мг/л, максимум $7,81$ мг/л на глубине 35 см). Глубже по разрезу установлено дальнейшее увеличение: переходный торф – $6,55$ мг/л, низинный торф – $7,78$ (максимум $10,19$ мг/л на глубине 315 см), минеральные отложения – $9,26$ мг/л (максимум $12,24$ мг/л на глубине 322 см).

Третья группа элементов с неоднозначным или слабо выраженным трендом распределения – As, Cr, Cu, Pb, Zn (частично сюда можно отнести и Si). Эти элементы имеют низкие концентрации (часто $<0,01$ мг/л), с умеренными корреляциями между собой ($0,3-0,7$) и с первой группой (Al, Fe). Мышьяк не обнаружен в болотных водах оёса, в верховом торфе среднее содержание составляет $0,004$ мг/л (максимум $0,007$ мг/л на глубине 55 см), а пик As наблюдается в переходном торфе ($0,006$ мг/л, максимум $0,01$ мг/л на глубине 255 см). Глубже по разрезу концентрация As снижается до $0,001$ мг/л в низинном торфе и $0,003$ мг/л в минеральных отложениях. Для Cr установлены низкие концентрации в оёсе ($0,001$ мг/л), средние ($0,004$ мг/л) – в верховом и переходном торфе (максимум $0,011$ мг/л на глубине 55 см). Далее наблюдается снижение концентраций Cr в низинном торфе ($0,002$ мг/л) и минеральных отложениях ($0,003$ мг/л). В распределении Cu установлены низкие концентрации в оёсе ($0,004$ мг/л), средние ($0,016-0,018$ мг/л) – в верховом и переходном торфе (максимум $0,037$ мг/л на глубине 255 см). Далее наблюдается снижение концентрации Cu в низинном торфе ($0,009$ мг/л) и умеренное содержание в минеральных отложениях ($0,014$ мг/л). Свинец не обнаружен в болотных водах оёса, в верховом и низинном торфе его средняя концентрация составляет $0,004$ мг/л (максимум $0,011$ мг/л на глубине 315 см), с некоторым снижением в переходном торфе ($0,003$ мг/л) и минеральных отложениях ($0,003$ мг/л). Для Zn среднее содержание в оёсе и верховом торфе составляет $0,02-0,03$ мг/л, с максимумом $0,07$ мг/л на глубине 55 см, при дальнейшем снижении концентрации в переходном и низинном торфе ($0,02-0,018$ мг/л) и ее росте в минеральных отложениях ($0,04$ мг/л, максимум $0,11$ мг/л на глубине 350 см).

Сурьма демонстрирует уникальный, самостоятельный тренд, отличный от всех других изученных элементов. Так, для Sb наблюдается четкий максимум концентрации ($0,053$ мг/л) в болотных водах оёса и приповерхностных слоях верхового торфа ($0,010-0,017$ мг/л). Глубже по разрезу концентрация Sb резко падает (на порядок) и остается довольно низкой.

Аутигенные минералы железа. Методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) в материале торфа был обнаружен ряд аутигенных минералов Fe, сменяющих друг друга вниз по разрезу (рис. 5). Так, в самых верхних интервалах торфяника ($10-15$ см) были установлены псевдоморфозы окси-гидроксидов Fe на поверхности оторфованных частей растений, а в нижних интервалах торфа ($300-305$ см) – единичные находки скоплений кристаллов и отдельных фрамбоидов пирита. Спектр рассеивания энергии первого образца (рис. 5 А) показывает присутствие в его составе Fe ($60,31$), O ($34,54$ мас. %) и небольшое количества Mn ($1,04$ мас. %), который согласно (Mineralogy Database) близок по составу к гётиту: Fe ($62,85$), H ($1,13$), O ($36,01$ мас. %). Спектр рассеивания энергии второго образца (рис. 5 Б) показывает присутствие в его составе Fe ($44,36$), S ($48,92$ мас. %), что согласно (Mineralogy Database) близко по составу к пириту: Fe ($46,55$), S ($53,45$ мас. %).

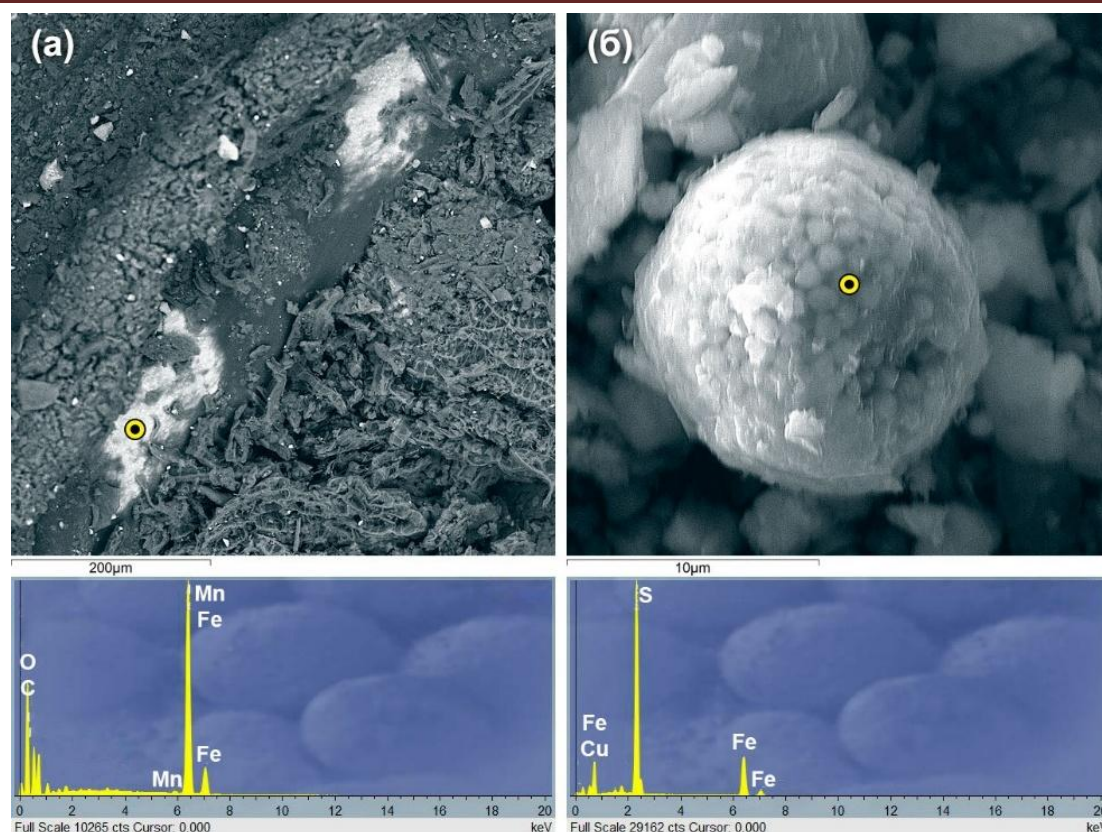


Рисунок 5. Микрофотографии аутигенных минералов железа и их энергодисперсионные спектры: а) гидроксиды Fe (III) из интервала 10–15 см, б) фрамбоидальный пирит из интервала 300–305 см.

ОБСУЖДЕНИЕ

В характере распределения ряда гидрохимических показателей (pH, Eh, РНУ, HCO_3^- и др.) и растворенных химических элементов по разрезу Большого Убинского яра можно выделить закономерности, связанные со сменой источников водного питания в процессе торфонакопления и, соответственно, сменой типа торфа. Рост содержания в болотных водах низинного торфа суммы растворенных солей (Σ и), концентраций Cl^- , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Si и ряда микроэлементов (B, Mn, Sr), а также значений pH – является следствием формирования болота в условиях богатого минерального питания (табл. 1, рис. 3, 4). Близость залегания подстилающих пород, разрушение ряда минералов и фильтрация грунтовых вод через подошвенный горизонт залежи приводит к повышению значений pH, концентрации, как основных катионов, так и микроэлементов. В низинном торфе наблюдается резкое увеличение концентраций Ca^{2+} и Mg^{2+} (до 177,22 и 111,11 мг/л, соответственно), что свидетельствует о влиянии минерализованных грунтовых вод. Чрезвычайно сильная положительная корреляция между парой этих ионов указывает на их общий источник поступления в болотные воды, скорее всего, за счет выщелачивания минералов грунтовыми водами из подстилающих пород. Концентрации Na^+ и K^+ также возрастают, достигая 34,17 и 11,81 мг/л, соответственно, что подтверждает влияние минерального питания на формирование химического состава болотных вод низинных торфов.

Заметный рост концентраций Sr, Mn и B на границе высокозольного низинного торфа и ОМО является следствием контакта торфа с минеральным дном болота. Марганец активно переходит в раствор в восстановительных условиях среды, характерных для низинного минерализованного торфа и подстилающих пород, которая определяет поведение данного элемента в профиле торфяника, т.к. марганец наиболее чувствительный к смене значений Eh (Ефремова и др., 2003). Высокие концентрации бора и стронция являются «классическим» маркером поступления высокоминерализованных грунтовых вод, а также отражением процессов выщелачивания алевритово-глинистых минералов, слагающих ложе болота. Помимо этого, увеличение содержания растворенных Sr, Mn и B (на фоне роста Ca^{2+} и Mg^{2+}), по-видимому, связано с карбонатным геохимическим барьером: растворением и/или разрушением карбонатных минералов. Присутствие аутигенных карбонатов на этих глубинах подтверждают данные СЭМ. В этой зоне также фиксируются максимальные значения содержания сероводорода при одновременном снижении содержания сульфатов и РОУ, что может

указывать на протекание процессов бактериальной сульфатредукции, которая подтверждается сильной обратной корреляцией $r = -0,72$ (табл. 2): сульфаты потребляются микроорганизмами с образованием сероводорода и сульфидов железа. Активные процессы бактериальной сульфатредукции существенно влияют на изменение карбонатно-кальциевого равновесия (Гранина, 2008; Леонова и др., 2022б).

Таблица 2

Матрица корреляции ключевых пар ионов / параметров со статистически значимыми коэффициентами ($p\text{-value} < 0,05$) и их геохимическая интерпретация

Пара ионов / параметров	Коэффициент корреляции (r)	Геохимическая интерпретация
$\text{NH}_4^+ - \text{H}_2\text{S}$	+0,92	Продукты анаэробного разложения органического вещества; их совместное накопление в восстановительной зоне подтверждается очень сильной положительной корреляцией.
$\text{NH}_4^+ - \text{HCO}_3^-$	+0,88	Данная группа ионов является маркером изменения значений pH, а также изменения окислительно-восстановительных условий (частично).
$\text{Ca}^{2+} - \text{Mg}^{2+}$	+0,98	Подтверждает общий источник поступления, скорее всего, за счет выщелачивания из минеральных отложений грунтовыми водами в нижней части разреза и/или растворения карбонатных минералов.
$\text{SO}_4^{2-} - \text{H}_2\text{S}$	-0,72	Сильная обратная корреляция подтверждает наличие процесса бактериальной сульфатредукции.
$\text{SO}_4^{2-} - \text{PO}_4$	+0,74	Показывает потребление PO_4 в процессе сульфатредукции.
$\text{Ca}^{2+} - \text{SO}_4^{2-}$	+0,65	Может косвенно указывать на совместный источник поступления с минерализованными грунтовыми водами из подстилающих пород.
$\text{NO}_3^- - \text{Глубина}$	-0,55	Подтверждает наличие окислительно-восстановительного геохимического барьера: содержание нитратов падает с глубиной по мере снижения окислительных условий среды.
$\text{NO}_3^- - \text{PO}_4$	+0,85	Указывает на процессы деструкции OB ; в частности, подтверждает рост степени минерализации органики в низинном торфе.
$\text{K}^+ - \text{PO}_4$	+0,78	Калий и фосфат часто являются биогенными элементами, высвобождающимися при разложении растительных остатков; их сильная положительная корреляция указывает на общий механизм поступления в болотные воды.
$\text{Na}^+ - \text{Cl}^-$	+0,81	Сильная прямая корреляция указывает на приток минерализованных грунтовых вод в нижних интервалах торфяника.
$\text{H}_2\text{S} - \text{Глубина}$	+0,85	Показывает, что концентрация сероводорода достоверно увеличивается с глубиной и является ключевым индикатором формирования восстановительной обстановки.

По мере торфонакопления связь с подстилающими породами постепенно ослабевает и происходит некоторое снижение минерализации, концентраций HCO_3^- , Ca^{2+} , Mg^{2+} и ряда химических элементов, со значительными изменениями в ионном составе болотных вод. Высокие концентрации аммония (до 12 мг/л) свидетельствуют о развитии восстановительных условий среды, а рост содержания сульфатов (до 20,24 мг/л) и PO_4 (до 124,2 мг/л), отражает снижение (или полное прекращение) интенсивности процессов бактериальной сульфатредукции. Резкое изменение Eh, РНУ, Ca^{2+} , Mg^{2+} , NH_4^+ , As, Cr и Cu наблюдается на глубине 260–280 см, что, по-видимому, маркирует положение постоянного стояния уровня грунтовых вод и границу между «активной», окислительной и «инертной», восстановительной частями торфяной залежи. Заметное увеличение концентраций Cl^- (до 11,44 мг/л) в слое переходного пушицево-гипнового торфа (220–250 см), который неоднократно горел в прошлом, возможно, как-то связано с влиянием палеопожаров. В то же время, поскольку аномалия не сопровождается значимым ростом других ионов и микроэлементов, это предположение требует дополнительных исследований.

Переход болота на олиготрофную стадию приводит к полному исчезновению в составе болотных вод HCO_3^- и РНУ на фоне заметного снижения значений pH и роста Eh, со значительными изменениями в ионном составе болотных вод; это выражается в закономерном снижении минерализации и концентраций Cl^- , SO_4^{2-} , PO_4^{3-} , NO_3^- , NH_4^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , что характерно для верховых болот и их естественного развития. Происходит смена восстановительно-щелочного геохимического барьера низинного торфа на кислотный (pH = 3,57–3,95), окислительный (Eh = +301...+410 мВ), который также влияет на характер распределения ионов и элементов. Помимо этого, переход болота на олиготрофную

стадию развития привел к продолжительному минимуму зольности в диапазоне от 20 до 220 см (рис. 2), что связано с питанием болота лишь слабоминерализованными атмосферными водами. Особенностью рямов Барабы является резкий переход на олиготрофную сфагновую стадию развития, что свидетельствует о влиянии мощного внешнего фактора – температурного (Прейс и др., 2022). Данный фактор обусловил сначала, в период похолодания климата, формирование **многолетнемерзлого (ММ)** водоупора, изолирующего влияние богатых грунтовых вод, а после прекращения его влияния, в период последующего потепления, наличие слабоминерализованной верховодки над деградирующим ММ слоем торфа, что способствовало активной трансгрессии олиготрофных сфагновых мхов. Судя по блоковой стратиграфии, резкой границе между торфяными отложениями олиготрофных рямов и окружающих их эвтрофных осоково-тростниковых займищ, этот фактор был кратковременным и очаговым. Поэтому олиготрофизация происходила лишь на этих очагах и, в связи с отсутствием условий для распространения олиготрофных сфагновых мхов на окружающей площади, рямы, по мере отложения торфов, быстро приобрели выпуклую форму, что исключило влияние других источников водного питания, кроме атмосферного.

В иной геохимической обстановке происходит формирование верхового торфа у кровли. В условиях существенного снижения минерального питания, указывающего на естественный ход торфонакопления в позднем голоцене, отмечаются относительно низкие концентрации большинства ионов. Концентрации основных катионов (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+) в этом интервале варьируют в пределах 1,35–8,13 мг/л без выраженного тренда, демонстрируя доминирующее влияние атмосферного питания на характер формирования болотных вод. Рост вклада атмосферного питания подтверждает увеличение доли Cr, Cu, Pb, Zn в составе болотных вод. Для верхового торфа характерны повышенные содержания нитратов (до 1,29 мг/л) при минимальных значениях растворенного сероводорода ($<0,031$ мг/л), что является следствием окислительных условий среды и прекращения процессов сульфатредукции.

Резкая смена окислительно-восстановительных условий и pH приводит к заметному росту концентрации растворенных Fe и Al. Так, в условиях повышенной кислотности верховых торфов Fe и Al становятся подвижными и способны легко переходить в состав болотных вод из твердой фазы. Сильная положительная корреляция между Al и Fe может указывать на их совместную мобилизацию при участии фульвокислот и гуминовых веществ, которые образуют растворимые металлоорганические комплексы (Шварцев и др., 2012; Леонова и др., 2022б). Также органическое вещество играет большую роль в разрушении структур алюмосиликатных минералов и выносе алюминия (Helmer et al., 1990). Изменение окислительно-восстановительных условий среды вниз по разрезу залежи торфа приводит к смене ассоциаций минеральных новообразований Fe (рис. 5). Верховые торфа характеризуются развитием оксидов и гидроксидов железа, в то время как в низинной части залежи их доля снижается и появляются сульфиды Fe (пирит), что характерно для низинного торфа (Лукашев и др., 1971).

Болотные воды, пронизывающие живой сфагновый мох (очёс), имеют максимальные концентрации Sb (на фоне снижения ряда химических элементов), что может быть обусловлено фактором воздушной миграции, т.е. данный элемент связан с антропогенным воздействием на болотную экосистему в XX и XXI веках. Высокое содержание Sb на фоне снижения концентраций ряда других «антропогенных» элементов (As, Cr, Cu, Pb) может свидетельствовать об активном выщелачивании Sb из торфа в болотную воду очёса. Такое распределение позволяет предположить биофильность сурьмы и ее активное поглощение живой растительностью (мхом) из атмосферных выпадений с последующим выщелачиванием при отмирании сфагнума.

В целом, болотная вода, отобранная непосредственно из очёса, демонстрирует принципиально иной характер распределения ряда растворенных элементов по сравнению с нижележащими горизонтами верхового торфа (5–25 см), что позволяет выделить его в самостоятельную зону. Эта зона работает как «буферный» геохимический барьер, который регулирует поступление химических элементов в нижележащую торфяную толщу. Заметное различие концентрации большинства ионов (Cl^- , HCO_3^- , NH_4^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+}) и элементов (Al, Fe, Si, Zn) между очесом и деятельным слоем торфа маркирует границу между «современной» биогеохимической системой и собственно торфяной залежью, где ведущую роль играют процессы раннего диагенеза и выщелачивания.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные данные свидетельствуют о формировании в торфяной залежи Большого Убинского рьяма двух контрастных геохимических барьеров: 1) кислотно-окислительного в верхней части разреза и 2) восстановительно-щелочного в нижней части. Резкое изменение всех параметров на глубине 260–

280 см, по-видимому, маркирует положение постоянного стояния уровня грунтовых вод и границу между «активной» окислительной и «инертной» восстановительной частями торфяной залежи.

Наблюдается ярко выраженное увеличение общей минерализации с глубиной, что является следствием смены типа болотных вод от слабоминерализованных в активном слое торфа к минерализованным грунтовым водам в низинной части болотной залежи. Резкий скачок минерализации ниже отметки 200 см является важной гидрохимической границей в разрезе Большого Убинского рьяма.

Выявлены четкие закономерности в распределении основных ионов по глубине торфяной залежи, которые демонстрируют выраженную вертикальную зональность, отражающую изменение физико-химических условий. Для очёса и верхового торфа отмечаются относительно низкие концентрации большинства ионов (что связано с преимущественно атмосферным питанием рьяма), а в зоне высокозольного низинного торфа и ОМО фиксируются максимальные значения сероводорода при одновременном снижении содержания сульфатов и РОУ, что может указывать на активное протекание процессов бактериальной сульфатредукции.

Распределение макро- и микроэлементов в болотных водах формируется под влиянием двух основных факторов: 1) градиента окислительно-восстановительных и кислотно-щелочных условий по глубине торфяной залежи и 2) литологического состава подстилающих отложений, выступающего как дополнительный источник химических элементов. Выделенные геохимические группы (1. Al, Fe_{общ}; 2. B, Mn, Si, Sr; 3. As, Cr, Cu, Pb, Zn) наглядно отражают разные миграционные способности элементов и их отклик на изменение условий торфонакопления в голоцене, что подчеркивает переход от олиготрофных к эвтрофным условиям.

Вниз по разрезу торфяника происходит смена ассоциаций аутигенных минеральных фаз железа, что связано с изменением окислительно-восстановительных условий среды. Олиготрофная толща характеризуется развитием оксидов и гидроксидов Fe, а эвтрофная часть торфяной залежи – присутствием сульфидов Fe (пирит).

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы признательны сотрудникам ИГМ СО РАН: канд. геол.-минерал. наук М.С. Мельгунову и В.А. Ходько за помощь в отборе образцов торфа. Авторы выражают благодарность анонимным рецензентам за ценные замечания и уточнения.

ФИНАНСОВАЯ ПОДДЕРЖКА

Исследование выполнено при финансовой поддержке РНФ в рамках научного проекта № 24-27-00061.

ЛИТЕРАТУРА

- Архипов В.С., Бернатонис В.К. Распределение кальция и железа в вертикальном профиле торфяных залежей таёжной зоны Западной Сибири // Известия Томского политехнического университета. 2013. Том 323. № 1. С. 173–178.
- Бахнов В.К. Содержание микроэлементов меди и марганца в торфяных почвах Барабинской низменности. Микроэлементы в почвах, растениях и водах южной части Западной Сибири. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1971. С. 17–27.
- Бахнов В.К. Медь и марганец в болотных почвах Барабы и влияние микроудобрений на урожай зерновых культур, возделываемых на этих почвах. Генетические особенности и вопросы плодородия почв Западной Сибири. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1972. С. 194–211.
- Бахнов В.К. Биогеохимические аспекты болотообразовательного процесса. Новосибирск: Наука Сиб. отд-ние, 1986. 193 с.
- Бобров В.А., Прейс Ю.И., Будашкина В.В. Оценка потоков минерального вещества из атмосферы на основе микроэлементного состава торфяной залежи верхового болота Бакчар-1 (южная тайга Западной Сибири) // Проблемы биогеохимии и геохимической экологии. 2013. Том 22. № 1. С. 20–29.
- Валуцкий В.И. Лесостепные рьямы Восточной Барабы как объекты охраны природы. Москва: Деп. в ВИНТИ № 2448-B91, 1991. 23 с.
- Веретенникова Е.Э. Содержание и распределение химических элементов в торфах южно-таежной подзоны Западной Сибири // География и природные ресурсы. 2013. № 2. С. 89–95.

- Веретенникова Е.Э., Курьина И.В., Дюкарев Е.А., Головацкая Е.А., Смирнов С.В. Геохимические особенности торфяных залежей олиготрофных болот южно-таежной зоны Западной Сибири // Геохимия. 2021. Том 66. № 6. С. 562–576. <https://doi.org/10.31857/S0016752521050095>
- Водяницкий Ю.Н., Гребенкин Н.А., Манахов Д.В., Сащенко А.В., Тюленева В.М. Положительные аномалии содержания урана в торфяниках гумидной зоны (обзор) // Почвоведение. 2019. № 12. С. 1492–1501. <https://doi.org/10.1134/S0032180X1912013X>
- Волков И.И., Жабина Н.Н. Методы определения различных соединений серы в морских осадках. Химический анализ морских осадков. Москва: Наука, 1980. С. 5–27.
- Гранина Л.З. Ранний диагенез донных осадков озера Байкал. Новосибирск: Академическое изд-во «Гео», 2008. 156 с.
- Ефремова Т.Т., Ефремов С.П., Куценогий К.П., Онучин А.А., Переседов В.Ф. Биогеохимия Fe, Mn, Cr, Ni, Co, Ti, V, Mo, Ta, W, U в низинном торфянике на междуречье Оби и Томи // Почвоведение. 2003. № 5. С. 557–567.
- Иванова Е.С., Харанжевская Ю.А., Миронов А.А. Латеральное распределение и миграция химических элементов в водах болот бассейнов рек Бакчар и Икса (Западная Сибирь) // Вестник Московского университета. Серия 5: География. 2017. № 4. С. 55–64.
- Инишева Л.И., Инишев Н.Г. Водная миграция химических элементов в системе геохимически сопряженных олиготрофных ландшафтов с потоком поверхностно-болотных вод // Фундаментальные проблемы воды и водных ресурсов на рубеже третьего тысячелетия: материалы Всероссийской конференции. Томск: Изд. НТЛ, 2000. С. 204–208.
- Инишева Л.И., Инишев Н.Г. Элементы водного баланса и гидрохимическая характеристика олиготрофных болот южнотаежной подзоны Западной Сибири // Водные ресурсы. 2001. Том 28. № 4. С. 410–417.
- Леонова Г.А., Мальцев А.Е., Прейс Ю.И., Бобров В.А. Геоэкологическая оценка современного состояния верховых болот (рямов) Барабинской лесостепи в условиях антропогенного воздействия // Геосферные исследования. 2022а. № 4. С. 76–95. <https://doi.org/10.17223/25421379/25/5>
- Леонова Г.А., Мальцев А.Е., Айсуева Т.С., Бобров В.А., Меленевский В.Н., Бычинский В.А., Мирошниченко Л.В. Геохимия раннего диагенеза болотных отложений на примере голоценового разреза торфяника Дулиха (Восточное Прибайкалье) // Геология и геофизика. 2022б. Том 63. № 6. С. 830–850. <https://doi.org/10.15372/GiG2021114>
- Лисс О.Л., Абрамова Л.И., Аветов Н.А., Березина Н.А., Инишева Л.И., Курнишкова Т.В., Слукa З.А., Толпышева Т.Ю., Шведчикова Н.К. Болотные системы Западной Сибири и их природоохранное значение. Гриф и Ко: Тула, 2001. 584 с.
- Лиштван И.И., Король Н.Т. Основные свойства торфа и методы их определения. Минск: Наука и техника, 1975. 318 с.
- Лукашев К.И., Ковалев В.А., Жуховицкая А.Л., Хомич А.А., Генералова В.А. Геохимия озерно-болотного литогенеза. Минск: Наука и техника, 1971. 280 с.
- Прейс Ю.И., Леонова Г.А., Мальцев А.Е. Стратиграфия и динамика аккумуляции торфа и углерода на рьях Барабинской лесостепи в голоцене (Западная Сибирь) // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. 2022. Том 49. № 1. С. 36–48. <https://doi.org/10.20403/2078-0575-2022-1-36-47>
- Савичев О.Г. Химический состав болотных вод территории Томской области (Западная Сибирь) и их взаимодействие с минеральными и органоминеральными соединениями // Известия Томского политехнического университета. 2009. Том 314. № 1. С. 72–77.
- Савичев О.Г. Распространение неорганических загрязняющих веществ по глубине верховой торфяной залежи // Сибирский экологический журнал. 2015. Том. 22. № 1. С. 145–153.
- Савичев О.Г., Шмаков А.В. Вертикальная зональность и внутригодовые изменения химического состава вод Тимирязевского болота (Томск, Западная Сибирь) // Известия Томского политехнического университета. 2012. Том 320. № 1. С. 156–161.
- Савичев О.Г., Гусева Н.В., Куприянова Е.А., Скороходова А.А., Ахмед-Оглы К.В. Химический состав вод Обского болота (Западная Сибирь) и его пространственные изменения под влиянием сбросов загрязняющих веществ // Известия Томского политехнического университета. 2013. Том. 323. № 1. С. 168–172.
- Савичев О.Г., Мазуров А.К., Рудмин М.А., Шахова Н.Е., Сергиенко В.И., Семилетов И.П. Механизмы концентрирования химических элементов в торфяной залежи в восточной части Васюганского болота (Западная Сибирь) // Доклады Академии наук. 2019а. Том. 486. № 3. С. 350–353. <https://doi.org/10.31857/S0869-56524863350-353>

- Савичев О.Г., Наливайко Н.Г., Рудмин М.А., Мазуров А.К. Микробиологические условия распределения химических элементов по глубине торфяной залежи в экосистемах восточной части Васюганского болота (Западная Сибирь) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2019б. Том 330. № 9. С. 184–194. <https://doi.org/10.18799/24131830/2019/9/2272>
- Скороходова А.А., Савичев О.Г. Содержания и формы миграции меди и цинка в природных водах Васюганского болота // Вестник Томского государственного университета. 2013. № 368. С. 166–172.
- Харанжевская Ю.А., Иванова Е.С., Воистинова Е.С. Многолетняя динамика содержания гуминовых веществ в водах осушенного верхового болота в Западной Сибири // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2017. № 1. С. 19–36. <https://doi.org/10.35567/1999-4508-2017-1-2>
- Шварцев С.Л. Геохимия природных вод района Большого Васюганского болота // Большое Васюганское болото. Современное состояние и процессы развития / Под общ. ред. М.В. Кабанова. Томск: Изд. Института оптики атмосферы, 2002. С. 139–149.
- Шварцев С.Л., Серебrenникова О.В., Здвижков М.А., Савичев О.Г., Наймушина О.С. Геохимия болотных вод нижней части бассейна Томи (юг Томской области) // Геохимия. 2012. № 4. С. 403–417.
- Goldstein G.I., Newbury D.E., Echlin P., Joy D.C., Fiori C., Lifshin E. Scanning electron microscopy and x-ray microanalysis. New York: Plenum Press, 1981. 235 p.
- Gorham E., Janssens J.A. The distribution and accumulation of chemical elements in five peat cores from the mid-continent to the eastern coast of North America // Wetlands. 2005. Vol. 25. № 2. P. 259–278. <https://doi.org/10.1672/3>
- Griffiths N.A., Sebestyen S.D., Oleheiser K.C. Variation in peatland porewater chemistry over time and space along a bog to fen gradient // Science of the Total Environment. 2019. Vol. 697. P. 134152. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134152>
- Helmer E.H., Urban N.R., Eisenreich S.J. Aluminum geochemistry in peatland waters // Biogeochemistry. 1990. Vol. 9. No. 3. P. 247–276. <https://doi.org/10.1007/BF00000601>
- Kempton H., Krachlera M., Shotyk W., Zaccane C. Major and trace elements in Sphagnum moss from four southern German bogs, and comparison with available moss monitoring data // Ecological Indicators. 2017. Vol. 78. P. 19–25. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.02.029>
- Malawska M., Wilkomirski B. Geochemistry and geochemical differentiation on major elements in selected peat bog profiles (south-east of Poland) // Soil science and plant nutrition. 2004. Vol. 50. No. 6. P. 925–930. <https://doi.org/10.1080/00380768.2004.10408555>
- Mineralogy Database [Электронный ресурс]. URL: <https://www.webmineral.com> (дата обращения 27.08.2025).
- Rudmin M., Ruban A., Savichev O., Mazurov A., Dauletova A., Savinova O. Authigenic and Detrital Minerals in Peat Environment of Vasyugan Swamp, Western Siberia // Minerals. 2018. Vol. 8. No. 11. P. 500. <https://doi.org/10.3390/min8110500>
- Shotyk W., Weiss D., Kramers J.D., Frei R., Cheburkin A.K., Gloor M., Reese S. Geochemistry of the peat bog at Etang de la Gruère, Jura Mountains, Switzerland, and its record of atmospheric Pb and lithogenic trace metals (Sc, Ti, Y, Zr, and REE) since 12,370 14C yr BP // Geochimica et Cosmochimica Acta. 2001. Vol. 65. No. 14. P. 2337–2360. [https://doi.org/10.1016/S0016-7037\(01\)00586-5](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(01)00586-5)
- Stanton M.R., Yager D.B., Fey D.L., Wright W.G. Formation and Geochemical Significance of Iron Bog Deposits. Formation and Geochemical Significance of Iron Bog Deposits (Eds. Church S.E., Guerard P., Finger S.E.). San Juan County, Colorado: U.S. Geological Survey Professional Paper 1651, 2007. P. 689–720.
- Steinmann P., Shotyk W. Geochemistry, mineralogy, and geochemical mass balance on major elements in two peat bog profiles (Jura Mountains, Switzerland) // Chemical Geology. 1997. Vol. 138. № 1-2. P. 25–53. [https://doi.org/10.1016/S0009-2541\(96\)00171-4](https://doi.org/10.1016/S0009-2541(96)00171-4)
- Stepanova V.A., Pokrovsky O.S., Viers J., Mironycheva-Tokareva N.P., Kosykh N.P., Vishnyakova E.K. Elemental composition of peat profiles in western Siberia: Effect of the micro-landscape, latitude position and permafrost coverage // Applied Geochemistry. 2015. Vol. 53. P. 53–70. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2014.12.004>

Поступила в редакцию 31.08.2025

Принята 14.10.2025

Опубликована 31.10.2025

Сведения об авторах:

Мальцев Антон Евгеньевич – кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник лаборатории геохимии радиоактивных элементов и экогеохимии ФГБУН Институт

геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН (г. Новосибирск, Россия); maltsev@igm.nsc.ru; <https://orcid.org/0000-0002-5847-3180>

Прейс Юлия Ивановна – кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории геоинформационных технологий ФГБУН Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН (г. Томск, Россия); preisyui53@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0005-8524-8797>

Леонова Галина Александровна – доктор геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории геохимии радиоактивных элементов и экогеохимии ФГБУН Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН (г. Новосибирск, Россия); leonova@igm.nsc.ru; <https://orcid.org/0000-0001-5127-7083>

Ломова Александра Андреевна – инженер-исследователь лаборатории геохимии радиоактивных элементов и экогеохимии ФГБУН Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН (г. Новосибирск, Россия); lomovaaa@igm.nsc.ru; <https://orcid.org/0009-0006-1461-2755>

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.



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

Geochemistry of peatland water in the holocene sequence of the Bolshoy Ubinsky ryam (Baraba forest-steppe)

© 2025 A. E. Maltsev ¹, Yu. I. Preis ², G. A. Leonova ¹, A. A. Lomova ¹

¹V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Akademika Koptyuga Ave., 3, Novosibirsk, Russia. E-mail: maltsev@igm.nsc.ru

²Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Akademicheskoy Ave., 10, Tomsk, Russia. E-mail: preisyui@rambler.ru

The aim of the study was to investigate the chemical composition and formation patterns of peatland water in the Bolshoy Ubinsky Ryam during the Holocene.

Location and time of the study. The study focused on peatland water from the Bolshoy Ubinsky Ryam, located in the forest-steppe zone in the south of West Siberia, at the southern boundary of the Baraba Lowland. Water sampling was conducted in September 2024.

Methods. The ionic composition of peatland water was determined using titrimetry, capillary electrophoresis, and photometry. Concentrations of Ca, Mg, Na, K, Al, Fe, Si, As, Cr, Cu, Pb, Zn, B, Mn, Sr, and Sb were measured by inductively coupled plasma atomic emission spectrometry (ICP-AES). Concentrations of dissolved organic carbon (DOC) and dissolved nitrogen (DN) were determined using a Multi N/C 2100S analyzer. Authigenic iron minerals were detected using a TESCAN MIRA 3 LMU scanning electron microscope equipped with microanalysis systems.

Results. For the first time, the chemical composition of peatland water throughout the sequence of peat deposits was obtained for the Bolshoy Ubinsky Ryam. The concentration of most major ions and chemical elements decreased from the fen peat types to transitional and bog peats, the latter receiving their hydro-mineral nutrition solely by atmospheric aerosols and the ash fraction after mineralization of plant biomass. The proximity of the underlying bedrock, reducing environmental conditions, as well as the dissolution of certain minerals and filtration of groundwater through the basal horizon of the peat deposit, led to the increased concentrations of Cl^- , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Si, B, Mn, and Sr in the waters of fen peats. Compared to fen and transitional peats, the water of bog peats exhibited higher contents of Al, Fe, and Sb. A down-profile shift in the associations of authigenic iron mineral phases was observed: bog peats were characterized by the prevalence of oxides and hydroxides, whereas the fen part of the peat deposit was characterized by the presence of Fe sulfides (pyrite).

Conclusions. The obtained data convincingly demonstrate that the vertical geochemical zonation of peatland waters is directly determined by the genetic type of peat and the lithology of the underlying mineral deposits.

Keywords: peatland waters; ryam; geochemistry; dissolved organic matter; microelements; authigenic Fe minerals; Baraba forest-steppe.

How to cite: Maltsev A.E., Preis Yu.I., Leonova G.A., Lomova A.A. Geochemistry of peatland waters in the holocene sequence of the Bolshoy Ubinsky ryam (Baraba forest-steppe). The Journal of Soils and Environment. 2025. 8(4). e332. DOI: [10.31251/pos.v8i4.332](https://doi.org/10.31251/pos.v8i4.332) (in Russian with English abstract).

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors are grateful to the staff of the IGM SB RAS: Cand. Sci. (Geol.-Min.) Melgunov M.S. and Khodko V.A. for their assistance in peat samples collection.

FUNDING

This work was supported by the Russian Science Foundation (RSF), project no. 24-27-00061.

REFERENCES

- Arkhipov V.S., Bernatonis V.K. Distribution of calcium and iron in the vertical profile of peat deposits in the taiga zone of Western Siberia. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*. 2013. Vol. 323. No. 1. P. 173–178. (in Russian).
- Bakhnov V.K. Content of trace elements copper and manganese in peat soils of the Baraba Lowland. In book: *Trace elements in soils, plants and waters of the southern part of Western Siberia*. Novosibirsk: Nauka Publ., Siberian Branch, 1971. P. 17–27. (in Russian).
- Bakhnov V.K. Copper and manganese in swamp soils of Baraba and the effect of microfertilizers on the yield of cereal crops cultivated on these soils. In book: *Genetic features and issues of soil fertility in Western Siberia*. Novosibirsk: Nauka Publ., Siberian Branch, 1972. P. 194–211. (in Russian).
- Bakhnov V.K. Biogeochemical aspects of the bog formation process. Novosibirsk: Nauka Publ., Siberian Branch, 1986. 193 p. (in Russian).
- Bobrov V.A., Preis Yu.I., Budashkina V.V. Assessment of mineral matter fluxes from the atmosphere based on the trace element composition of the peat deposit of the Bakchar-1 raised bog (southern taiga of Western Siberia). *Problems of Biogeochemistry and Geochemical Ecology*. 2013. Vol. 22. No. 1. P. 20–29. (in Russian).
- Valutsky V.I. Forest-steppe rhyams of Eastern Baraba as objects of nature conservation. Moscow: Dep. in VINITI No. 2448-V91, 1991. 23 p. (in Russian).
- Veretennikova E.E. Content and distribution of chemical elements in peats of the southern taiga subzone of Western Siberia. *Geografia i prirodnye resursy*. 2013. No. 2. P. 89–95. (in Russian).
- Veretennikova E.E., Kuryina I.V., Dyukarev E.A., Golovatskaya E.A., Smirnov S.V. Geochemical Features of Peat Deposits at Oligotrophic Bogs in the Southern Taiga Subzone of West Siberia. *Geochemistry International*. 2021. Vol. 59. No. 6. P. 618–631. <https://doi.org/10.1134/S0016702921050098>
- Vodyanitskii Y.N., Grebenkin N.A., Manakhov D.V., Sashchenko A.V., Tyuleneva V.M. Positive anomalies of uranium content in peatlands of the humid zone: A Review. *Eurasian Soil Science*. 2019. No. 52. No. 12. P. 1533–1541. <https://doi.org/10.1134/S1064229319120135>
- Volkov I.I., Zhabina N.N. Methods for determining various sulfur compounds in marine sediments. In book: *Chemical Analysis of Marine Sediments*. Moscow: Nauka Publ., 1980. P. 5–27. (in Russian).
- Granina L.Z. Early diagenesis of bottom sediments of Lake Baikal. Novosibirsk: Academic Publishing House "Geo", 2008. 156 p. (in Russian).
- Efremova T.T., Efremov S.P., Onuchin A.A., Kutsenogii K.P., Peresedov V.F. Biogeochemistry of Fe, Mn, Cr, Ni, Co, Ti, V, Mo, Ta, W, U in a low moor peat deposit of the Ob'-Tom' Interfluve. *Eurasian Soil Science*. 2003. Vol. 36. No. 5. P. 501–510.
- Ivanova E.S., Kharanzhevskaya Yu.A., Mironov A.A. Lateral distribution and migration of chemical elements in swamp waters within the Bakchar and Iksha river basins (Western Siberia). *Lomonosov Geography Journal*. 2017. No. 4. P. 55–64. (in Russian).
- Inisheva L.I., Inishev N.G. Aquatic migration of chemical elements in the system of geochemically coupled oligotrophic landscapes with a flow of surface-bog waters. *Fundamental Problems of Water and Water Resources at the Turn of the Third Millennium: Proceedings of the All-Russian Conference*. Tomsk: NTL Publishing, 2000. P. 204–208. (in Russian).
- Inisheva L.I., Inishev N.G. Elements of water balance and hydrochemical characteristics of oligotrophic bogs of the southern taiga subzone of Western Siberia. *Water Resources*. 2001. Vol. 28. No. 4. P. 371–377. <https://doi.org/10.1023/A:1010433319474>
- Leonova G.A., Maltsev A.E., Preis Yu.I., Bobrov V.A. Geoecological assessment of the current state of upper bogs (ryams) of the Barabin forest-steppe under anthropogenic impact. *Geosphere Research*. 2022a. No. 4. P. 76–95. (in Russian).
- Leonova G.A., Maltsev A.E., Aysueva T.S., Bobrov V.A., Melenevsky V.N., Bychinsky V.A., Miroshnichenko L.V. Geochemistry of early diagenesis of bog deposits on the example of the Holocene section of the Dulikha peat bog (Eastern

- Baikal region). Russian Geology and Geophysics. 2022b. Vol. 63. No. 6. P. 689–705. <https://doi.org/10.2113/rgg20214314>
- Liss O.L., Abramova L.I., Avetov N.A., Berezina N.A., Inisheva L.I., Kurnishkova T.V., Sluka Z.A., Tolpysheva T.Yu., Shvedchikova N.K. Bog Systems of Western Siberia and Their Environmental Significance. Tula: Grif i Ko, 2001. 584 p. (in Russian).
- Lishtvan I.I., Korol N.T. Basic Properties of Peat and Methods for Their Determination. Minsk: Nauka i Tekhnika, 1975. 318 p. (in Russian).
- Lukashev K.I., Kovalev V.A., Zhukhovitskaya A.L., Khomich A.A., Generalova V.A. Geochemistry of Lake-Bog Lithogenesis. Minsk: Nauka i Tekhnika, 1971. 280 p. (in Russian).
- Preys Yu.I., Leonova G.A., Maltsev A.E. Stratigraphy and dynamics of peat and carbon accumulation on the riams of the Baraba forest-steppe in the Holocene (West Siberia). Geology and mineral resources of Siberia. 2022. Vol. 49. No. 1. P. 36–48. (in Russian). <https://doi.org/10.20403/2078-0575-2022-1-36-47>
- Savitchev O.G. Chemical composition of bog waters in the Tomsk region (Western Siberia) and their interaction with mineral and organomineral compounds. Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. 2009. Vol. 314. No. 1. P. 72–77. (in Russian).
- Savichev O.G. Distribution of inorganic pollutants over the depth of upper peat deposit. Contemporary Problems of Ecology. 2015. Vol. 8. No. 1. P. 118–124. <https://doi.org/10.1134/S1995425515010114>
- Savitchev O.G., Shmakov A.V. Vertical zonality and intra-annual changes in the chemical composition of waters of the Timiryazevskoe bog (Tomsk, Western Siberia). Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. 2012. Vol. 320. No. 1. P. 156–161. (in Russian).
- Savitchev O.G., Guseva N.V., Kupriyanova E.A., Skorokhodova A.A., Akhmed-Ogly K.V. Chemical composition of the waters of the Obskoe bog (Western Siberia) and its spatial changes under the influence of pollutant discharges. Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. 2013. Vol. 323. No. 1. P. 168–172. (in Russian).
- Savichev O.G., Mazurov A.K., Rudmin M.A., Shakhova N.E., Semiletov I.P., Sergienko V.I. Mechanisms of accumulation of chemical elements in a peat deposit in the eastern part of Vasyugan swamp (West Siberia). Doklady Earth Sciences. 2019a. Vol. 486. No. 1. P. 568–570. <https://doi.org/10.1134/S1028334X19050258>
- Savitchev O.G., Nalivaiko N.G., Rudmin M.A., Mazurov A.K. Microbiological conditions of chemical elements distribution on peat deposit depth in ecosystems of the Vasyugan swamp east part (Western Siberia). Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering. 2019b. Vol. 330. No. 9. P. 184–194. (in Russian). <https://doi.org/10.18799/24131830/2019/9/2272>
- Skorokhodova A.A., Savitchev O.G. Contents and migration forms of coPer and zinc in natural waters of the Vasyugan bog. Tomsk State University Journal. 2013. No. 368. P. 166–172. (in Russian).
- Kharanzhevskaya Yu.A., Ivanova E.S., Voistinova E.S. Many-year dynamics of humic substances content in the drained high bog waters in Western Siberia. Water sector of Russia: problems, technologies, management. 2017. No. 1. P. 19–36. (in Russian). <https://doi.org/10.35567/1999-4508-2017-1-2>
- Shvartsev S.L. Geochemistry of natural waters in the region of the Great Vasyugan Mire. The Great Vasyugan Mire. Current State and Development Processes. Ed. by M.V. Kabanov. Tomsk: Publishing House of the Institute of Atmospheric Optics, 2002. P. 139–149. (in Russian).
- Shvartsev S.L., Zdvizhkov M.A., Serebrennikova O.V., Savichev O.G., Naimushina O.S. Geochemistry of wetland waters from the lower Tom basin, southern Tomsk oblast. Geochemistry International. 2012. Vol. 50. No. 4. P. 367–380. <https://doi.org/10.1134/S0016702912040076>
- Goldstein G.I., Newbury D.E., Echlin P., Joy D.C., Fiori C., Lifshin E. Scanning electron microscopy and x-ray microanalysis. New York: Plenum Press, 1981. 235 p.
- Gorham E., Janssens J.A. The distribution and accumulation of chemical elements in five peat cores from the mid-continent to the eastern coast of North America. Wetlands. 2005. Vol. 25. № 2. P. 259–278. <https://doi.org/10.1672/3>
- Griffiths N.A., Sebestyen S.D., Oleheiser K.C. Variation in peatland porewater chemistry over time and space along a bog to fen gradient. Science of the Total Environment. 2019. Vol. 697. P. 134152. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134152>
- Helmer E.H., Urban N.R., Eisenreich S.J. Aluminum geochemistry in peatland waters. Biogeochemistry. 1990. Vol. 9. No. 3. P. 247–276. <https://doi.org/10.1007/BF00000601>
- Kempton H., Krachlera M., Shoty W., Zaccane C. Major and trace elements in Sphagnum moss from four southern German bogs, and comparison with available moss monitoring data. Ecological Indicators. 2017. Vol. 78. P. 19–25. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.02.029>

Malawska M., Wilkomirski B. Geochemistry and geochemical differentiation on major elements in selected peat bog profiles (south-east of Poland). Soil science and plant nutrition. 2004. Vol. 50. No. 6. P. 925–930. <https://doi.org/10.1080/00380768.2004.10408555>

Mineralogy Database [Electronic resource]. URL: <https://www.webmineral.com> (on access 27.08.2025).

Rudmin M., Ruban A., Savichev O., Mazurov A., Dauletova A., Savinova O. Authigenic and Detrital Minerals in Peat Environment of Vasyugan Swamp, Western Siberia. Minerals. 2018. Vol. 8. No. 11. P. 500. <https://doi.org/10.3390/min8110500>

Shotyk W., Weiss D., Kramers J.D., Frei R., Cheburkin A.K., Gloor M., Reese S. Geochemistry of the peat bog at Etang de la Gruère, Jura Mountains, Switzerland, and its record of atmospheric Pb and lithogenic trace metals (Sc, Ti, Y, Zr, and REE) since 12,370 14C yr BP. Geochimica et Cosmochimica Acta. 2001. Vol. 65. No. 14. P. 2337–2360. [https://doi.org/10.1016/S0016-7037\(01\)00586-5](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(01)00586-5)

Stanton M.R., Yager D.B., Fey D.L., Wright W.G. Formation and Geochemical Significance of Iron Bog Deposits. Formation and Geochemical Significance of Iron Bog Deposits (Eds. Church S.E., Guerard P., Finger S.E.). San Juan County, Colorado: U.S. Geological Survey Professional Paper 1651, 2007. P. 689–720.

Steinmann P., Shotyk W. Geochemistry, mineralogy, and geochemical mass balance on major elements in two peat bog profiles (Jura Mountains, Switzerland). Chemical Geology. 1997. Vol. 138. № 1-2. P. 25–53. [https://doi.org/10.1016/S0009-2541\(96\)00171-4](https://doi.org/10.1016/S0009-2541(96)00171-4)

Stepanova V.A., Pokrovsky O.S., Viers J., Mironycheva-Tokareva N.P., Kosykh N.P., Vishnyakova E.K. Elemental composition of peat profiles in western Siberia: Effect of the micro-landscape, latitude position and permafrost coverage. Applied Geochemistry. 2015. Vol. 53. P. 53–70. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2014.12.004>

Received 31 August 2025

Accepted 14 October 2025

Published 31 October 2025

About the authors:

Anton E. Maltsev – Candidate of Geological-Mineralogical Sciences, Senior Researcher in the Laboratory of Geochemistry of Radioactive Elements and Ecogeochemistry in the V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Novosibirsk, Russia); maltsev@igm.nsc.ru; <https://orcid.org/0000-0002-5847-3180>

Yuliya I. Preis – Candidate of Biological Sciences, Leading Researcher in the Laboratory of Geoinformation Technologies in the Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Tomsk, Russia); preisui53@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0005-8524-8797>

Galina A. Leonova – Doctor of Geological-Mineralogical Sciences, Leading Researcher in the Laboratory of Geochemistry of Radioactive Elements and Ecogeochemistry in the V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Novosibirsk, Russia); leonova@igm.nsc.ru; <https://orcid.org/0000-0001-5127-7083>

Alexandra A. Lomova – Research Engineer in the Laboratory of Geochemistry of Radioactive Elements and Ecogeochemistry in the V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Novosibirsk, Russia); lomovaaa@igm.nsc.ru; <https://orcid.org/0009-0006-1461-2755>

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 631.41

<https://doi.org/10.31251/pos.v8i4.344>

Изменение химического состава растительного опада в процессе разложения в условиях олиготрофного болота

© 2025 Е. А. Головацкая , Л. Г. Никонова

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

Цель исследования. Оценка влияния типа растительного опада на скорость трансформации органического вещества и высвобождения макро- и микроэлементов.

Место и время проведения. Исследования проводились в период с 2008 по 2012 гг. на территории олиготрофного болота «Бакчарское» (Бакчарский р-н Томской области) в сосново-кустарничково-сфагновом фитоценозе (Низкий рям) (56°58'34,10" с.ш., 82°36'27,48" в.д.).

Методы. Определение скорости разложения растительных остатков выполнили методом закладки растительности в торф. В исходных образцах и после эксперимента определили зольность, содержание углерода и азота. Элементный состав золы растительных остатков изучили с использованием электронного микроскопа HITACHI-S-3400N с рентгеноспектральным анализатором.

Основные результаты. Оценка изменения массы исследуемых растительных образцов показала, что наиболее интенсивно процессы разложения шли на начальном этапе (в течение первых 12 месяцев), затем скорость значительно снизилась. В процессе разложения растительных остатков в течение первого года, как правило, шла иммобилизация азота во всех исследуемых образцах растений. Однако к концу эксперимента фиксировали потери азота во всех образцах, за исключением *Sphagnum fuscum*, для которого установлено увеличение содержания азота на 5%. В результате минерализации органического вещества растительного опада снизилась зольность, также за исключением *Sph. fuscum*, для которого отмечено незначительное увеличение зольности (в 1,1 раза). В состав золы исследуемых растений входит ряд элементов – К, Са, Р, Mg, Al, Si, S, Fe и др., при этом наибольшую роль играют К и Са. В процессе разложения произошло резкое снижение содержания калия (в 1,6–7,9 раз) и кальция (в 2,2–7,1 раз) во всех образцах, за исключением *Sph. fuscum*. Также для всех образцов характерно накопление железа, алюминия и кремния; содержание фосфора увеличивается во всех образцах, за исключением *Sph. fuscum*.

Заключение. В процессе разложения произошла потеря углерода во всех растительных остатках, при этом динамика потерь строго соответствовала снижению массы органического вещества; во всех образцах (за исключением *Sph. fuscum*) наблюдается вынос азота. Выявлено, что зольность растительных остатков снизилась в 1,2–1,9 раза, за исключением *Sph. fuscum*, для которого отмечено небольшое увеличение зольности, что может быть связано с накоплением зольных элементов в растительных остатках *Sph. fuscum* в сочетании с низкой скоростью потери массы органического вещества. В процессе разложения растительных остатков установлено выщелачивание калия, кальция и накопление Fe, Al, Si, P во всех исследуемых образцах. Таким образом, выявленные особенности динамики элементного состава растительных остатков позволили установить специфический ход разложения для каждого из основных видов растений торфообразователей сосново-кустарничково-сфагнового биогеоценоза Бакчарского болота.

Ключевые слова: торфяники; растения-торфообразователи; Западная Сибирь; скорость разложения; химический состав.

Цитирование: Головацкая Е.А., Никонова Л.Г. Изменение химического состава растительного опада в процессе разложения в условиях олиготрофного болота // Почвы и окружающая среда. 2025. Том 8. № 4. e344. DOI: [10.31251/pos.v8i4.344](https://doi.org/10.31251/pos.v8i4.344)

ВВЕДЕНИЕ

Болотные экосистемы играют важнейшую биосферную роль за счет способности постоянно накапливать углерод в виде торфяных залежей. Накопление органического вещества торфа происходит в результате превышения скорости его образования над деструкцией органического вещества растительных остатков. Биогеохимические циклы олиготрофных болот, в отличие от других экосистем, в силу особенностей водно-минерального питания слабо связаны с минеральными горизонтами, грунтовыми водами и окружающими ландшафтами, так как основная часть микр- и макроэлементов поступает в результате атмосферного выпадения (Веретенникова, Головацкая, 2012; Татаринцева и др., 2022). Растительный опад является важным источником энергии и питательных веществ в экосистемах, поэтому его разложение обуславливает один из основных потоков углерода (С) в атмосферу, а также приводит к изменению концентрации химических элементов (источником

трансформации, модификации, преобразования) в экосистемах (Berg, 2014). Следовательно, разложение опада представляется важным процессом в функционировании естественной экосистемы и способствует высвобождению или накоплению химических элементов (Shcherbov, Lazareva, 2010; Jonczak, 2013; Berg, 2014). Скорость разложения растительного опада определяется, в основном, тремя факторами: 1) климатом – чем теплее и влажнее условия, тем активнее протекает процесс разложения 2) качеством опада, например, чем выше содержание азота (N), тем интенсивнее разложение, и 3) видовым составом и численностью микроорганизмов-деструкторов (Козловская и др., 1978; Денисенков, 2000). Круговорот питательных веществ в экосистеме зависит от видового состава растений, поглощения и использования ими питательных веществ, количества и химического состава опада и взаимодействия с ризосферой, а также изменений в окружающей среде (Hättenschwiler et al., 2005). При изменении климатических условий или антропогенном воздействии меняется гидротермический режим болот вместе с изменением биогеохимических циклов, поскольку потепление и понижение уровня болотных вод стимулируют разложение органического вещества и, как следствие, увеличение выбросов CO₂ в атмосферу.

В связи с вышесказанным, целью работы являлась оценка влияния типа растительного опада на скорость трансформации органического вещества и высвобождения макро- и микроэлементов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследования проводились на территории олиготрофного болота «Бакчарское» (Бакчарский р-н Томской области) в сосново-кустарничково-сфагновом фитоценозе (Низкий рям) (56°58'34,10" с.ш., 82°36'27,48" в.д.). Растительность представлена типичными видами-доминантами рямов: древесный ярус – *Pinus sylvestris* f. *Litwinowii* (**проективное покрытие (п.п.)** яруса 30%), кустарнички – *Ledum palustre* L., *Chamaedaphne calyculata* L., *Andromeda polifolia* L., *Vaccinium uliginosum* L. (п.п. – 65%), травы – *Eriophorum vaginatum* L., *Rubus chamaemorus* L., *Drosera rotundifolia* L. (п.п. – 5%), сфагновые мхи – *Sphagnum fuscum* (Schmp.) Klinggr., *Sphagnum angustifolium*, *Sphagnum magellanicum* Brid. (п.п. – 95%). Мощность торфяной залежи низкого рьяма достигает 200 см. В основании залежи лежит слой хорошо разложившегося древесно-хвощового и древесного (березового) торфа (170–200 см), который перекрывает мощный слой переходного торфа двух видов – древесно-осокового и древесно-сфагнового (100–170 см). Выше находится слой (0–100 см), состоящий из магелланикум-торфа со средней степенью разложения и фускум-торфа с низкой степенью разложения.

По данным метеостанции «Бакчар» за период с 1991 по 2020 гг, среднегодовая температура исследуемой территории составляет +0,5°C, среднегодовое количество осадков 497 мм. Средние температуры воздуха января и июля: -18,8°C и +18,2°C, соответственно. Продолжительность бесснежного периода 178 ± 9 дней (Всероссийский научно-исследовательский ..., 2021). Максимальный уровень болотных вод в условиях низкого рьяма Бакчарского болота достигает +1 см (в период снеготаяния), в среднем держится отметки -9,5 см относительно средней поверхности болота.

Для определения интенсивности трансформации растительных остатков применяли метод закладки растительности в торф (Козловская и др., 1978; Головацкая, Никонова, 2017; Головацкая, Никонова, 2024). В августе–сентябре 2008 г. на болоте были собраны растения доминанты сосново-кустарничково-сфагнового фитоценоза: *Sphagnum fuscum*, *Andromeda polifolia*, *Ledum palustre*, *Chamaedaphne calyculata*, *Pinus sylvestris*, *Rubus chamaemorus*. Растительный материал был высушен в лабораторных условиях и развешен в мешочки из синтетического материала (масса навески составляла 3–6 г). Образцы закладывали в торфяную залежь на глубину 10 см от поверхности в конце вегетационного периода (сентябрь 2008 г.). Исследование проводили в трехкратной повторности, всего было заложено 72 образца (по 12 образцов каждого вида). Для закладки выбирали участки с относительно равномерным растительным покровом и микрорельефом. Было выбрано четыре участка с выравненной поверхностью площадью по 0,5×0,5 м. Расстояние между участками составляло 1,5–2 м. Образцы извлекали через 12, 24, 36, 48 месяцев и определяли в них убыль массы растительного вещества весовым методом.

В исходных образцах и после эксперимента определяли зольность, содержание углерода и азота. Определение зольности проводили по ГОСТ 11306-83, содержание углерода и азота – в соответствии с (Пономарева, Плотникова, 1975; Воробьева, 2006). Элементный состав золы растительных остатков определяли с использованием электронного микроскопа HITACHI-S-3400N с рентгеноспектральным анализатором.

После инкубирования в торфяной залежи растительные образцы извлекали и высушивали до воздушно-сухого веса, далее производили расчет потерь массы, в % от исходного веса образца, по следующей формуле:

$$\text{Потери массы (\%)} = \frac{(M_0 - M_t)}{M_0} \times 100 \quad (1)$$

где M_0 – вес исходного образца, M_t – вес оставшегося образца через 12, 24, 36, 48 месяцев.

Для каждого образца после инкубирования рассчитывали изменение содержания углерода, азота и зольных элементов как процент от их исходного содержания:

$$\text{Потери элемента (\%)} = \frac{(X_0 \times M_0 - X_t \times M_t)}{X_0 \times M_0} \times 100 \quad (2)$$

где X_0 – исходное содержание элемента (мг/г), X_t – содержание элемента через 1, 2, 3, 4 года.

Для определения скорости разложения растительных остатков использовали экспоненциальное уравнение (Olson, 1963):

$$\frac{M_t}{M_0} = e^{-kt} \quad (3)$$

и рассчитывали константу разложения:

$$k = -\frac{\ln\left(\frac{M_t}{M_0}\right)}{t} \quad (4)$$

где M_t – оставшаяся масса после разложения, M_0 – масса исходного образца, t – время разложения, год.

Статистическую обработку данных (расчет средних значений, стандартного отклонения, коэффициентов корреляции) осуществляли с помощью программ Excel и Statistica. Достоверность различий скорости трансформации между разными видами растений-торфообразователей оценивали по критерию Стьюдента, при уровне значимости 0,05.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Оценка изменения массы исследуемых растительных образцов показала, что наиболее интенсивные процессы разложения протекают на начальном его этапе (в течении первых 12 месяцев); затем скорость разложения значительно снижается, в течение 2 года наблюдается снижение интенсивности процесса в 1,5 (*Chamaedaphne calyculata*) – 6,5 (*Sphagnum fuscum*) раза. Наиболее устойчив к разложению *Sphagnum fuscum*: суммарные потери его массы за 4 года составляют около 12%; наименее устойчив *Rubus chamaemorus*, потери массы – 77% (рис. 1). Потери массы кустарничков и сосны – от 50 до 65%.

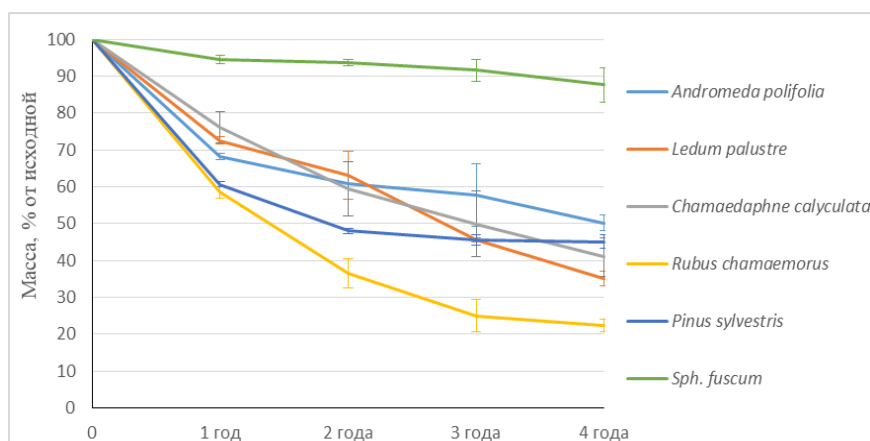


Рисунок 1. Потери массы при разложении растений-торфообразователей. На рисунке представлены среднее значение и стандартное отклонение (вертикальные планки).

Результаты t-теста показали, что средние потери массы достоверно различаются для кустарничков и *Rubus chamaemorus* ($t = 4,78$, $p < 0,008$), для кустарничков и *Sphagnum fuscum* ($t = 14,91$, $p < 0,0003$). Также достоверные различия потери массы получены для *Rubus chamaemorus* и *Sphagnum fuscum* ($t = 6,74$, $p < 0,0002$). Для кустарничков средние значения потери массы достоверно не различаются.

Динамика выноса углерода (рис. 2) из растительных остатков растений-торфообразователей, в целом, соответствует динамике потери массы; средние потери углерода за 4 года для сосудистых растений составляют 63%, для *Sphagnum fuscum* – 12,5%.

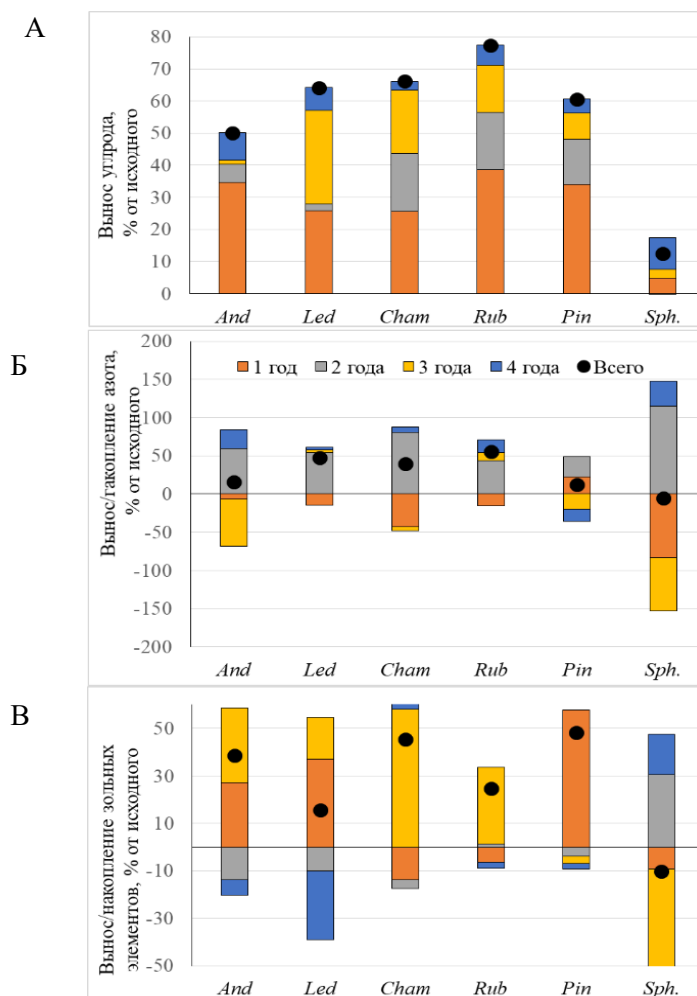


Рисунок 2. Изменение содержания общего углерода (А) и азота (Б), зольности (В) в растительных образцах в процессе трансформации (отрицательные значения означают накопление элементов в образцах).

В процессе разложения растительных остатков в течение первого года, как правило, наблюдали увеличение концентрации азота во всех исследуемых образцах растений – от 7% (*Andromeda polifolia*) до 83% (*Sphagnum fuscum*) от исходного содержания, за исключением *Pinus sylvestris*, в образцах которого содержание азота снизилось на 22% (см. рис. 2). Однако к концу эксперимента потери азота составили от 13 (*Pinus sylvestris*) до 55% (*Rubus chamaemorus*) от исходного количества; только для *Sphagnum fuscum* получено увеличение содержания азота на 5%. В результате минерализации органического вещества растительного опада изменяется и зольность (см. рис. 2). Во всех образцах к концу эксперимента зольность снизилась в 1,2–1,9 раза по сравнению с исходными значениями, за исключением *Sphagnum fuscum*, у которого произошло незначительное увеличение зольности (в 1,1 раза).

В состав золы исследуемых растений входит ряд элементов – К, Са, Р, Мг, Аl, Si, S, Fe и др., при этом наибольшую роль играют К и Са. Состав золы *Sphagnum fuscum* отличается довольно высоким содержанием Si и Fe (рис. 3). Содержание зольных элементов в процессе разложения изменилось, и к концу четвертого года произошло резкое снижение содержания калия (в 1,6–7,9 раз) и кальция (в 2,2–7,1 раз) во всех образцах, за исключением *Sphagnum fuscum*, у которого содержание калия уменьшилось, а содержание кальция увеличилось в 1,4 раза относительно исходного содержания (рис. 4). Также для всех образцов характерно накопление железа, алюминия и кремния; содержание фосфора увеличилось во всех образцах, за исключением *Sphagnum fuscum*.

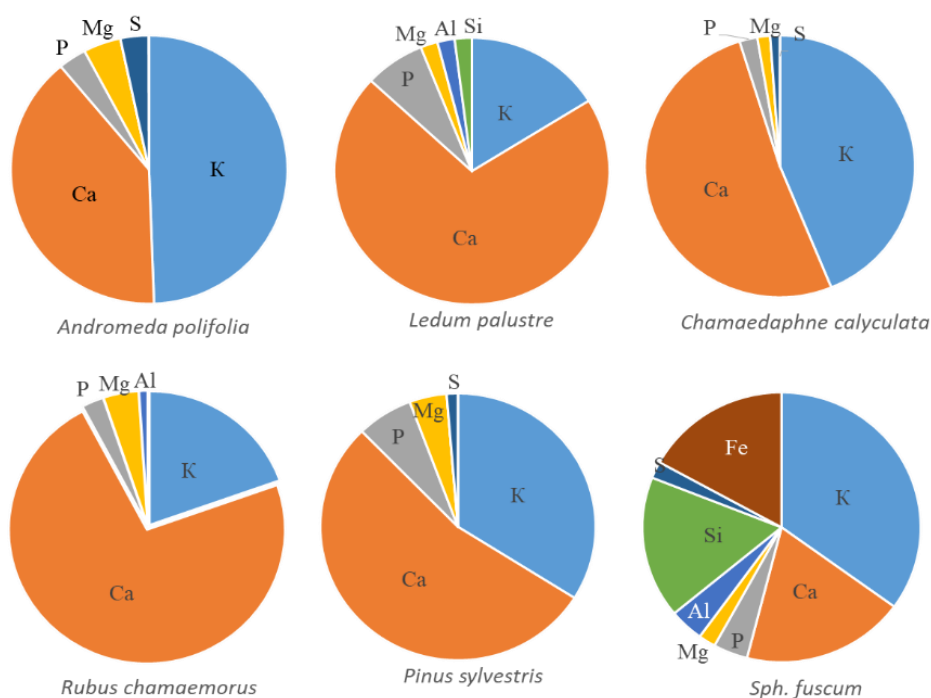


Рисунок 3. Элементный состав золы растений-торфообразователей.

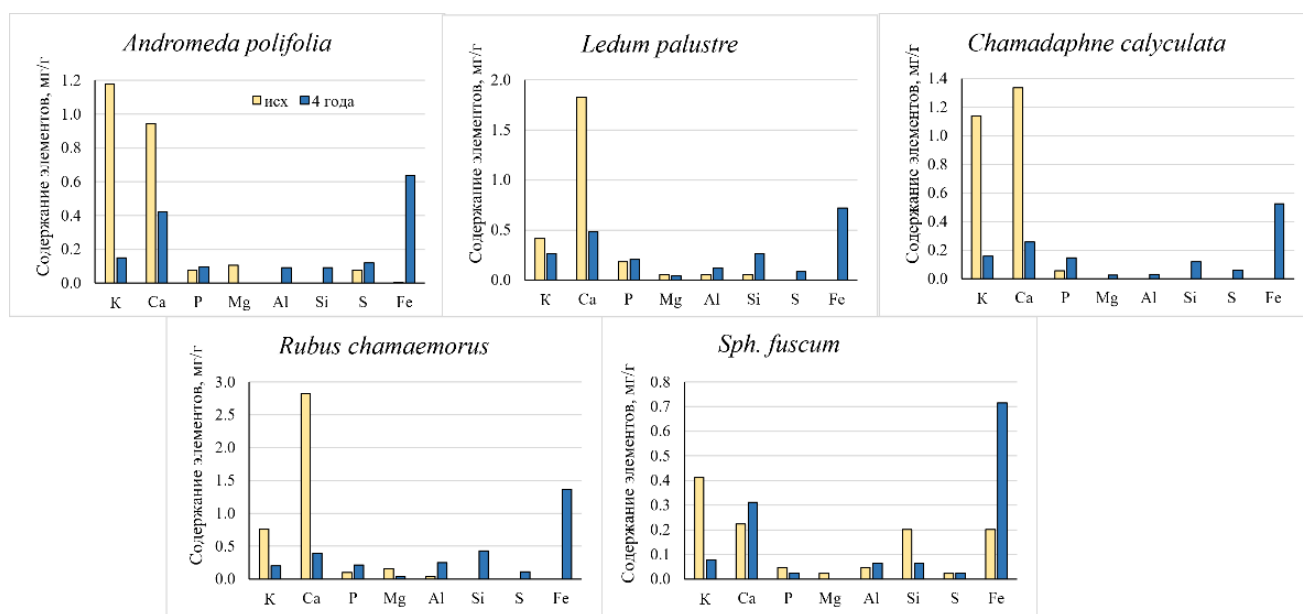


Рисунок 4. Изменение состава золы в процессе трансформации растений-торфообразователей.

Динамика нормализованных концентраций элементов (концентрация любого элемента равна 100% в нулевой момент времени) в процессе разложения показана на рисунке 5. Во всех образцах общей тенденцией является выщелачивание K ($p < 0,001$) и Ca ($p < 0,05$); исключение составляют образцы *Sphagnum fuscum*, где происходит накопление кальция. Накопление Mg произошло в образцах *Chamaedaphne calyculata*, для остальных видов торфообразователей характерно снижение концентрации магния. В целом можно отметить увеличение концентрации фосфора в образцах кустарничков и *Rubus chamaemorus* и снижение его содержания в образцах *Sphagnum fuscum*. Для всех образцов характерно накопление железа. Возможно, это связано с тем, что исследуемое болото находится на территории Бакcharского железорудного месторождения.

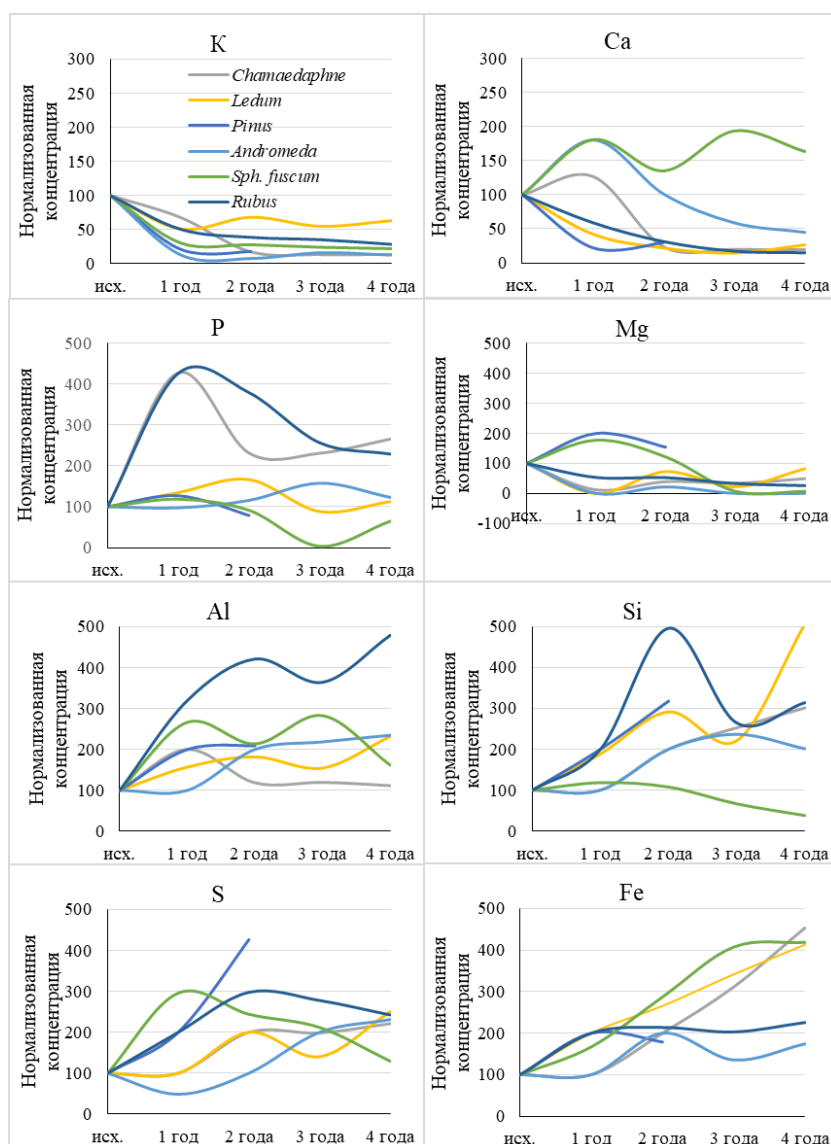


Рисунок 5. Нормализованные концентрации химических элементов (концентрация любого элемента равна 100% в нулевой момент времени) в процессе разложения растительных остатков.

ОБСУЖДЕНИЕ

Исходные растительные образцы отличались по химическому составу (табл. 1). Самым низким содержанием углерода, азота, и самым высоким соотношением C/N (85) характеризуется сфагновый мох, он же является и самым низкзольным. Для кустарничков и сосны установлено самое высокое содержание общего углерода и общего азота, относительно низкое отношение C/N; сосна отличается наибольшей зольностью. Наиболее благоприятными характеристиками для микроорганизмов-деструкторов обладают листья морошки: высокое содержание углерода и азота, наименьшее значение C/N. Ранее было показано, что скорость разложения во многом определяется видом растительного опада (а именно, его химическим составом) (Никонова и др., 2019).

Регрессионный анализ подтвердил зависимость скорости разложения растительных остатков от исходного содержания азота и отношения C/N: коэффициент детерминации (R^2) равен 0,72 и 0,79, соответственно (рис. 6), зависимость скорости разложения от содержания углерода и зольных элементов статистически незначима. Опад, характеризующийся высоким соотношением C/N, слабо перерабатывается микроорганизмами, тогда как при соотношении C/N в пределах 20-30, опад является наиболее благоприятным для микроорганизмов-деструкторов (Козловская и др., 1978; Bragazza et al., 2007). Кроме того, соотношение C/N определяет доступность опада не только микроорганизмам, но и почвенным беспозвоночным (Мишустин, 1975; Лиштван, 1989; Физикохимия и биология ..., 2013; Soong et al., 2016). Чем уже соотношение C/N, тем выше суммарная численность микроорганизмов и активнее идут процессы трансформации органического вещества. Наименьшая микробиологическая

активность и, соответственно, скорость трансформации органического вещества была отмечена для растительных остатков *Sphagnum fuscum*, характеризующихся максимально широким среди исследованных растений соотношением C/N (Никонова и др., 2017, Nikonova et al., 2020).

Таблица 1

Химический состав исходных растений-торфообразователей

Вид растения	Содержание элементов, %			C/N
	Углерод	Азот	Зольность	
<i>Sphagnum fuscum</i>	39,3±0,11	0,46±0,02	1,2±0,00	85
<i>Andromeda polifolia</i>	49,5±0,14	1,15±0,01	2,62±0,03	33
<i>Ledum palustre</i>	50,3±0,31	1,27±0,01	2,61±0,03	39
<i>Chamaedaphne calyculata</i>	50,3±0,13	1,38±0,02	2,53±0,01	37
<i>Pinus sylvestris</i>	48,63±0,30	1,15±0,01	4,01±0,02	42
<i>Rubus chamaemorus</i>	41,87±0,26	1,38±0,02	2,15±0,01	30

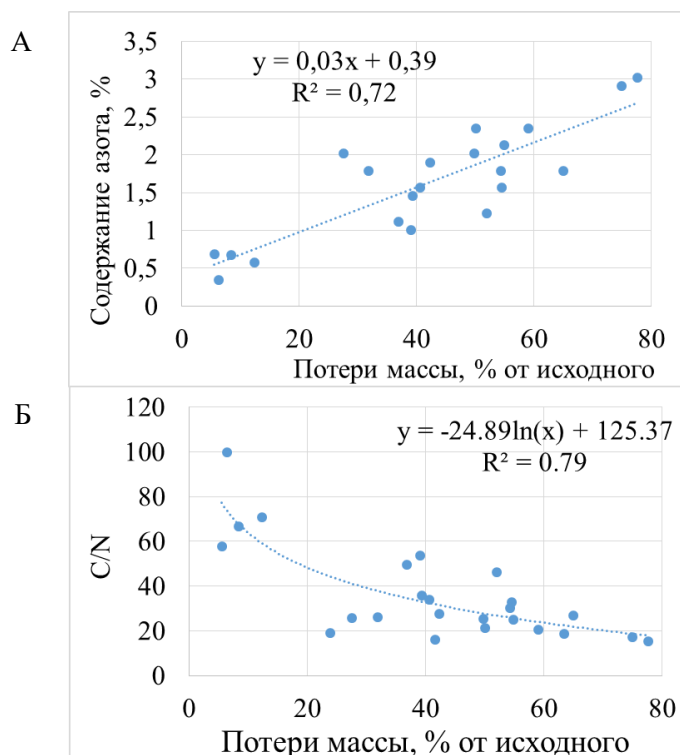


Рисунок 6. Зависимость скорости разложения растительных остатков от исходного содержания азота (А) и отношения C/N (Б).

Наиболее интенсивное разложение органического вещества происходит на первых этапах деструкции, что объясняется всплеском активности микроорганизмов в ответ на попадание свежего опада в торфяную залежь (Физикохимия и биология ..., 2013). В течение первого года эксперимента по оценке скорости трансформации растительных остатков наименьший коэффициент трансформации получен для *Sphagnum fuscum* (0,06), максимальный (0,54) для *Rubus chamaemorus* (табл. 2). В процессе трансформации растительных остатков происходит смена эвтрофного микробного сообщества на олиготрофное, увеличение коэффициентов олиготрофности и снижение коэффициента минерализации, что свидетельствует о замедлении скорости трансформации органического вещества растительных остатков (Никонова и др., 2017). К концу эксперимента скорость разложения снижается в 1,2–2,2 раза (см. табл. 2). При этом процесс трансформации растительных остатков протекает нелинейно и для некоторых видов, например, сфагновых мхов, практически прекращается через 15–50 лет (*Sphagnum fuscum*). Трансформация растительных остатков трав протекает значительно быстрее и уже через 15–20 лет опад трав разлагается практически полностью (рис. 7). Разложение листьев кустарничков занимает больше времени – процесс трансформации прекращается только через 20–60 лет в зависимости от вида кустарничков; оставшиеся в виде хорошо разложившего торфа растительные остатки листьев составляют менее 5%.

Таблица 2

Коэффициенты скорости разложения (k) органического вещества растений-торфообразователей

Вид растения	Коэффициент разложения			
	1 год	2 года	3 года	4 года
<i>Sphagnum fuscum</i>	0,06	0,03	0,03	0,03
<i>Andromeda polifolia</i>	0,38	0,25	0,19	0,17
<i>Ledum palustre</i>	0,38	0,25	0,19	0,17
<i>Chamaedaphne calyculata</i>	0,27	0,26	0,24	0,22
<i>Pinus sylvestris</i>	0,50	0,37	0,26	0,20
<i>Rubus chamaemorus</i>	0,54	0,50	0,47	0,37

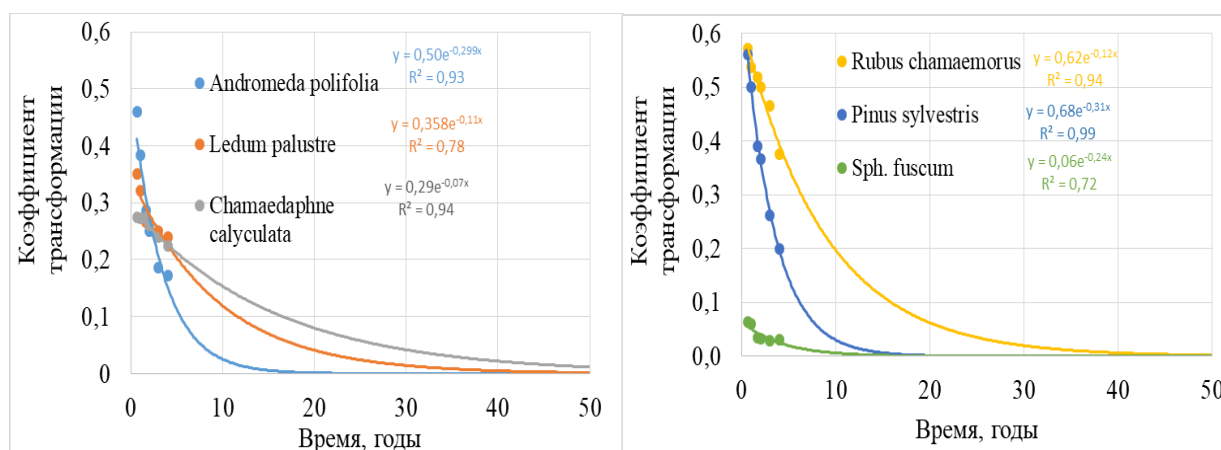


Рисунок 7. Изменение коэффициентов трансформации растительных остатков растений-торфообразователей в торфяных залежах. Линиями показан прогноз изменения коэффициента трансформации со временем.

Данные ботанического состава торфяной залежи и датирования верхних горизонтов торфа (рис. 8) подтверждают выводы о существенном снижении скорости трансформации растительных остатков сфагновых мхов со временем. Так, верхняя часть (0–60 см) торфяной залежи низкого яра сложена фускум-торфом со степенью разложения 5% при возрасте на глубине 50–60 см 230 лет. Растительные остатки трав в этих слоях торфа практически отсутствуют, содержание растительных остатков кустарничков составляют менее 5% (Головацкая, Никонова 2013, 2017).

В процессе разложения растительных остатков происходит вынос углерода и азота (Козловская и др., 1978; Бамбалов и др., 1990; Миронычева-Токарева, Вишнякова, 2004; Миронычева-Токарева и др., 2007; Паршина, 2009). И если содержание углерода в растительных образцах тесно связано с потерей массы органического вещества (коэффициент корреляции 0,97), то относительно динамики содержания азота в растительных остатках все не так однозначно. Как правило, в процессе деструкции органического вещества происходит снижение содержания общего азота в растительных образцах, однако в отдельных случаях может происходить и увеличение (иммобилизация) содержания азота в растительных остатках. Сведения о процессах накопления азота при деструкции растительных остатков встречаются в литературе, однако причины этого явления до конца еще не установлены. Предполагается, что на первых стадиях разложения может наблюдаться повышение концентрации азота в субстрате за счет деструкции безазотистых соединений, азотфиксации и потребления азота гифами грибов из почвы (Базилевич, Титлянова, 2008; Lindahl et al., 2007). Возможно, это может быть связано с вращением сапротрофных грибковых гиф, транспортирующих N из окружающей среды (Frey et al., 2000), а освобождение минерального азота начинается после достижения в разлагающемся материале критической концентрации азота (Trentbath, Diggle, 1997). Значительное увеличение содержания азота при разложении сфагновых мхов (почти в четыре раза) отмечается Л.С. Козловской с соавторами (1978), при более длительном процессе разложения содержание азота убывает. В то же время, согласно С.Г. Прокушкину с соавторами (2014), увеличение содержания азота не всегда сопровождается усилением минерализации, возможно этот процесс связан с образованием или наличием труднорастворимых азотсодержащих веществ, что как раз и может способствовать замедлению процесса минерализации. Величина иммобилизации N при разложении растительных остатков также может регулироваться начальной доступностью N в субстрате (растительных остатках),

поскольку микробы сталкиваются с острым дефицитом N (Manzoni et al., 2012; Bonanomi et al., 2017). В работе М. Mooshammer с соавторами (2012) показано наличие отрицательной связи между начальным содержанием N в подстилке и скоростью иммобилизации N. Нами также получена отрицательная зависимость между начальной концентрацией азота в растительных остатках и величиной выноса/накоплений азота в процессе трансформации (коэффициент корреляции $r = -0,84$).

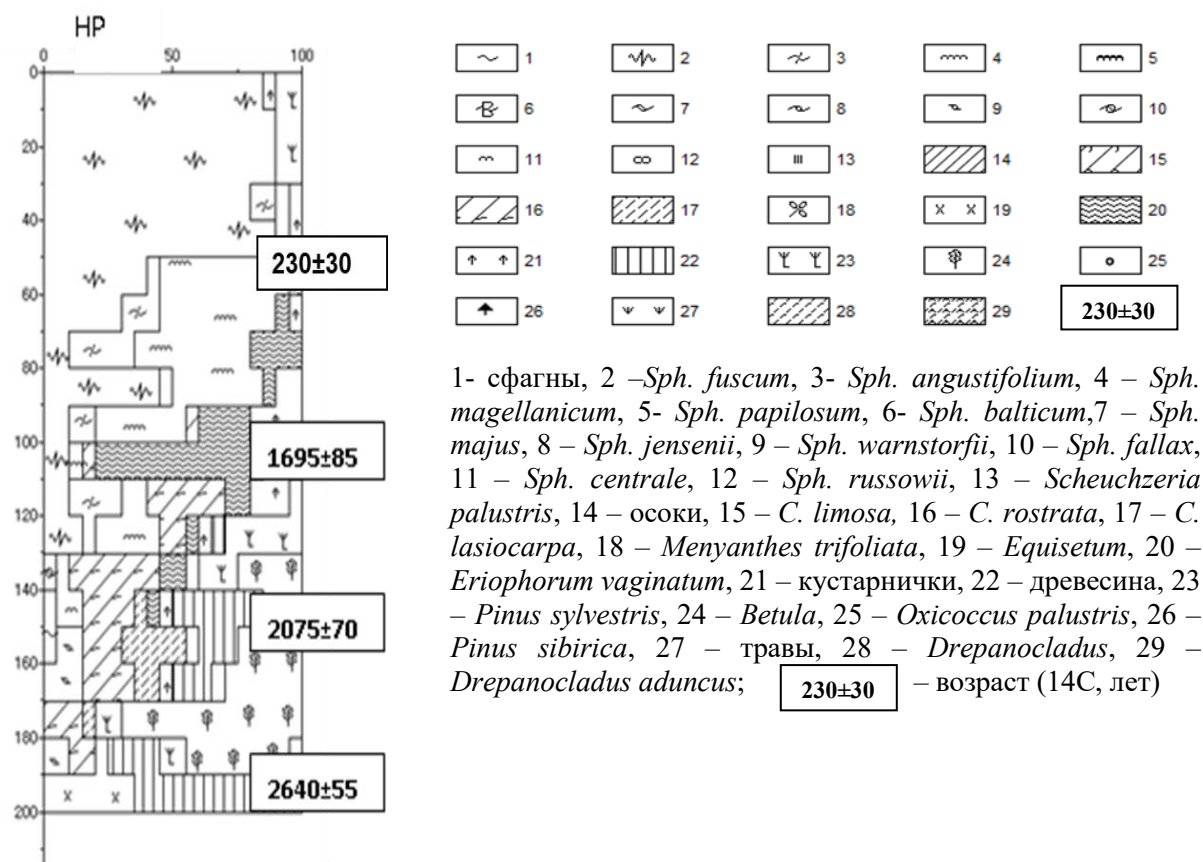


Рисунок 8. Строение торфяной залежи сосново-кустарничково-сфагнового фитоценоза (низкого яряма).

Калий является очень мобильным элементом и выщелачивался из исследуемых образцов с самого начала эксперимента. Магний относительно мобилен и его выщелачивание происходит примерно с той же скоростью, что и потеря массы органического вещества. Эти тенденции, а также увеличение содержания S и P, были, в основном, идентичны тем, что описаны ранее для опавшей хвои с разных видов деревьев (Berg, 2014). Накопление P в подстилках зафиксировано и в других исследованиях (Moore et al., 2011), что может быть связано с недостатком фосфора в исходных растительных остатках для обеспечения микробиологической активности (Manzoni et al., 2012; Mooshammer et al., 2012). В процессе разложения растительных остатков происходит накопление кремния, алюминия и железа; подобные данные получены при исследовании разложения растительных остатков в типичных тундровых фитоценозах Крайнего Северо-Востока Азии (Пугачев, Тихменев, 2017). Анализ зависимости изменения содержания химических элементов в растительных остатках от исходного состава растительных остатков (содержание углерода, азота, C/N, зольности) показал, что почти все элементы зависят от потери массы, за исключением Mg и Al, для которых не выявлено значимых зависимостей. Для калия, кальция и фосфора зависимость положительная, т.е. вместе с потерей массы происходит активное выщелачивание элементов, в то время как для кремния, серы и железа наблюдается отрицательная связь: с уменьшением массы происходит увеличение содержания этих элементов. Кроме того, выявлено, что динамика содержания фосфора, алюминия, кремния, серы и железа связана с содержанием азота в растительных остатках (табл. 3). Снижение зольности, в целом, коррелирует с изменением содержания химических элементов, о чем свидетельствуют полученные коэффициенты корреляции. Общее снижение зольности в процессе трансформации растительных остатков обусловлено выносом преобладающих в составе минеральной части элементов, таких как K,

Ca, Mg, но при этом может замедляться за счет аккумуляции Fe, S, Si, Al и P, а в некоторых случаях аккумуляция этих элементов может даже привести к увеличению зольности, например, в растительных остатках *Sphagnum fuscum* (см. рис. 2B).

Таблица 3

Коэффициенты корреляции Пирсона между элементным составом золы и свойствами растительных остатков

Элементы Параметры	K	Ca	P	Mg	Al	Si	S	Fe
Потери массы	0,52	0,47	-0,52			-0,38	-0,55	-0,51
Углерод			0,30					
Азот			0,70		0,50	0,42	0,47	0,43
C/N			-0,56					
Зольность	0,46	0,69	0,59	0,74	0,37	0,42	0,35	0,38

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты исследования показали специфику процесса разложения шести видов растений–торфообразователей олиготрофного болота в нативных условиях. Каждый вид характеризуется своей динамикой скорости потери массы и изменения элементного состава. Скорость разложения растительных остатков зависит от исходного содержания в них азота и отношения C/N, при этом отношение C/N обычно является показателем доступности органического вещества для микроорганизмов–деструкторов: чем оно ниже, тем более доступны растительные остатки для микроорганизмов. Процесс трансформации растительных остатков протекает нелинейно и в зависимости от вида растений может практически прекращаться через 15–50 лет, либо в результате консервации (сфагновые мхи), либо в результате почти полного разложения (травы и листья кустарничков). Основным торфообразователем на исследуемых олиготрофных болотах являются сфагновые мхи, о чем также свидетельствует ботанический состав торфяной залежи.

В процессе разложения наблюдается вынос углерода во всех растительных остатках, при этом динамика выноса углерода строго соответствует потерям массы органического вещества; во всех образцах (за исключением *Sph. fuscum*) наблюдается вынос азота. Выявлено, что зольность растительных остатков снижается в 1,2–1,9 раз, за исключением *Sph. fuscum*, для которого отмечено небольшое увеличение зольности, что может быть связано с накоплением зольных элементов в растительных остатках сфагнум фускум, в сочетании с низкой скоростью потери массы органического вещества. В процессе разложения растительных остатков происходит выщелачивание калия, кальция и накопление Fe, Al, Si, P во всех исследуемых образцах.

Таким образом, выявленные особенности динамики элементного состава при разложении растительных остатков позволили установить специфический ход деструкции для каждого вида растений торфообразователей сосново-кустарничково-сфагнового биогеоценоза Бакчарского болота.

ФИНАНСОВАЯ ПОДДЕРЖКА

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № 121031300154-1).

ЛИТЕРАТУРА

- Базилевич Н.И., Титлянова А.А. Биологический круговорот на пяти континентах: азот и зольные элементы в природных наземных экосистемах / отв. ред. А.А. Тишков. Новосибирск: Издательство СО РАН, 2008. 381 с.
- Бамбалов Н.Н., Хоружик А.В., Лукашко Е.С., Стригутский В.П. Превращение отмерших растений в болотных биогеоценозах // Эксперимент и математическое моделирование в изучении биогеоценозов лесов и болот. Москва: Наука, 1990. С. 53–63.
- Веретенникова Е.Э., Головацкая Е.А. Распределение свинца и ртути в торфяных залежах Западной Сибири (болота Васюганья) // Химия в интересах устойчивого развития. 2012. Том 20. № 2. С. 181–187.
- Воробьева Л.А. Теория и практика химического анализа почв. Москва: ГЕОС, 2006. 400 с.
- Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации – Мировой центр данных (ВНИИГМИ-МЦД) [Электронный ресурс] <https://www.meteorf.ru> (дата обращения 20.09.2021).

Головацкая Е.А., Никонова Л.Г. Разложение растительных остатков в торфяных почвах олиготрофных болот // Вестник Томского государственного университета. Биология. 2013. № 3(23). С. 137–151.

Головацкая Е.А., Никонова Л.Г. Влияние уровня болотных вод на процессы трансформации сфагновых мхов в торфяной почве олиготрофных болот // Почвоведение. 2017. № 5. С. 603–613. <https://doi.org/10.7868/80032180X17030030>

Головацкая Е.А., Никонова Л.Г. Биогеохимическая трансформация органического вещества растений-торфообразователей в процессе разложения // Западно-Сибирские торфяники и цикл углерода: прошлое и настоящее. Материалы Седьмого международного полевого симпозиума (Ханты-Мансийск, 15–27 августа 2024 г.). Томск: Национальный исследовательский Томский государственный университет, 2024. С. 110–112.

ГОСТ 11306-83. Торф и продукты его переработки. Методы определения зольности. Москва: Издательство стандартов, 1994. 7 с.

Денисенков В.П. Основы болотоведения: учебное пособие. Санкт-Петербург: Издательство С.-Петерб. ун-та, 2000. 220 с.

Козловская Л.С., Медведева В.М., Пьявченко Н.И. Динамика органического вещества в процессе торфообразования. Ленинград: Наука. Ленингр. отделение, 1978. 172 с.

Лиштван И.И. Физика и химия торфа: учебное пособие для вузов. Москва: Недра, 1989. 303 с.

Мишустин Е.Н. Ассоциации почвенных микроорганизмов. АН СССР. Ин-т микробиологии. Москва: Наука, 1975. 107 с.

Миронычева-Токарева Н.П., Вишнякова Е.К. Динамика разложения органического вещества на болотах различного генезиса // Болота и биосфера: Сборник материалов Третьей Научной школы; 400-летию города Томска посвящается (Томск, 13–16 сентября 2004 г.). Томск: Томский центр научно-технической информации, 2004. С. 23–30.

Миронычева-Токарева Н.П., Косых Н.П., Вишнякова Е.К. Компоненты углеродного баланса на болотах средней тайги и лесотундры Западной Сибири // Торфяники Западной Сибири и цикл углерода: прошлое и настоящее. Материалы Второго Международного полевого симпозиума (Ханты-Мансийск, 24 августа – 02 сентября 2007 г.) / Под редакцией академика С.Э. Вомперского. Ханты-Мансийск: Издательство научно-технической литературы, 2007. С. 117–118.

Никонова Л.Г., Курганова И.Н., Лопес де Гереню В.О., Жмурич В.А., Головацкая Е.А. Влияние абиотических факторов на разложение опада растений-торфообразователей в инкубационном эксперименте // Вестник Томского государственного университета. Биология. 2019. № 46. С. 148–170. <https://doi.org/10.17223/19988591/46/8>

Паршина Е.К. Деструкция растительного вещества в болотных экосистемах таежной и лесотундровой зон Западной Сибири. Автореферат диссертации... канд. биол. наук. Томск, 2009. 23 с.

Пономарева В.В., Плотникова Т.А. Методические указания по определению содержания состава гумуса в почвах (минеральных и торфяных). Ленинград: Наука, 1975. 105 с.

Прокушкин С.Г., Прокушкин А.С., Сорокин Н.Д. Интенсивность разложения отдельных компонентов фитодетрита в листовничниках криолитозоны Средней Сибири // Известия Российской академии наук. Серия биологическая. 2014. № 1. С. 76. <https://doi.org/10.7868/S0002332914010093>

Пугачев А.А., Тихменев Е.А. Консервация растительного органического вещества и почвообразование в экосистемах зональных тундр Крайнего Северо-Востока Азии // Arctic Environmental Research. 2017. Том 17. № 3. С. 255–264. <https://doi.org/10.17238/issn2541-8416.2017.17.3.255>

Татаринцева В.Г., Котова Е.И., Орлов А.С., Пономарева Т.И., Селянина С.Б., Дайбова Е.Б. Металлы и As в торфе верховых болот Архангельской области // Успехи современного естествознания. 2022. № 6. С. 60–65. <https://doi.org/10.17513/use.37842>

Физикохимия и биология торфа. Методы оценки численности и разнообразия бактериальных и актиномицетных комплексов торфяных почв: учебное пособие / Т.Г. Добровольская и др.; науч. ред. Л.И. Инишева. Томск: Издательство Томского гос. пед. ун-та, 2010. 99 с.

Berg B. Decomposition patterns for foliar litter: A theory for influencing factors // Soil Biology and Biochemistry. 2014. Vol. 78. P. 222–232. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2014.08.005>

Bonanomi G., Cesarano G., Gaglione S.A., Ippolito F., Sarker T., Rao M.A. Soil fertility promotes decomposition rate of nutrient poor, but not nutrient rich litter through nitrogen transfer // Plant and Soil. 2017. Vol. 412. P. 397–411. <https://doi.org/10.1007/s11104-016-3072-1>

- Bragazza L., Siffi C., Iacumin P., Gerdol R. Mass loss and nutrient release during litter decay in peatland: the role of microbial adaptability to litter chemistry // Soil Biology and Biochemistry. 2007. No. 39. No. 1. P. 257–267. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2006.07.014>
- Frey S.D., Elliott E.T., Paustian K., Peterson G.A. Fungal translocation as a mechanism for soil nitrogen inputs to surface residue decomposition in a no-tillage agroecosystem // Soil Biology and Biochemistry. 2000. Vol. 32. No. 5. P. 689–698. [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(99\)00205-9](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(99)00205-9)
- Jonczak J. Effect of peat samples drying on measured content of carbon and nitrogen fractions // Soil Science Annual. 2013. Vol. 64. No. 4. P. 130–134. <https://doi.org/10.2478/ssa-2013-0020>
- Hättenschwiler S., Tiunov A.V., Scheu S. Biodiversity and litter decomposition in terrestrial ecosystems // Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics. 2005. Vol. 36. No. 1. P. 191–218. <https://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.36.112904.151932>
- Lindahl B.D., Ihrmark K., Boberg J., Trumbore S.E., Höglberg P., Stenlid J., Finlay R.D. Spatial separation of litter decomposition and mycorrhizal nitrogen uptake in a boreal forest // New Phytologist. 2007. Vol. 173. No. 3. P. 611–620. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2006.01936.x>
- Manzoni S., Taylor P., Richter A., Porporato A., Ågren G. I. Environmental and stoichiometric controls on microbial carbon-use efficiency in soils // New Phytologist. 2012. Vol. 196. No. 1. P. 79–91. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2012.04225.x>
- Moore T.R., Trofymow J.A., Prescott C.E., Tituset B.D. Nature and nurture in the dynamics of C, N and P during litter decomposition in Canadian forests // Plant Soil. 2011. Vol. 339. No. 1. P. 163–175. <https://doi.org/10.1007/s11104-010-0563-3>
- Mooshammer M., Wanek W., Schnecker J., Wild B., Leitner S., Hofhansl F. Stoichiometric controls of nitrogen and phosphorus cycling in decomposing beech leaf litter // Ecology. 2012. Vol. 93. No. 4. P. 770–782. <https://doi.org/10.1890/11-0721.1>
- Nikonova L.G., Golovatskaya E.A., Tereshchenko N.N. Decomposition rate of peat-forming plants at the initial stages of destruction in peat deposits of the oligotrophic bogs “Bakcharskoe” and “Timiryasevskoe” // Environmental Dynamics and Global Climate Change. 2020. Vol. 11. No 1. P. 37–48. <https://doi.org/10.17816/edgcc34045>
- Olson J.S. Energy storage and the balance of producers and decomposers in ecological systems // Ecology. 1963. Vol. 44. No. 2. P. 322–331. <https://doi.org/10.2307/1932179>
- Shcherbov B.L., Lazareva E.V. Migration factors of radionuclides and heavy metals during forest fires in Siberia. In book: Advances in Environmental Research. Vol. 4. Novosibirsk: Nova Science Publishers, Inc., 2010. P. 99–119.
- Soong J.L., Vandegehuchte M.L., Horton A.J., Nielsen U.N., Deneff K., Shaw E.A., de Tomasel C.M., Parton W., Wall D.H., Cotrufo M.F. Soil microarthropods support ecosystem productivity and soil C accrual: evidence from a litter decomposition study in the tallgrass prairie // Soil Biology and Biochemistry. 2016. Vol. 92. P. 230–238. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2015.10.014>
- Trentbath B.R., Diggle A.J. An interpretative model of carbon and nitrogen transformation applied to a residue incubation experiment // Australian Journal of Agricultural Research. 1997. Vol. 43. No. 3. P. 537–553.

Поступила в редакцию 14.11.2025

Принята 03.12.2025

Опубликована 08.12.2025

Сведения об авторах:

Головацкая Евгения Александровна – доктор биологических наук, профессор РАН, директор ФГБУН Института мониторинга климатических и экологических систем СО РАН (г. Томск, Россия); golovatskayaea@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0003-4354-7156>


Никонова Лилия Гарифулловна – кандидат биологических наук, научный сотрудник лаборатории мониторинга углеродного баланса наземных экосистем ФГБУН Института мониторинга климатических и экологических систем СО РАН (г. Томск, Россия); lili12358@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-1759-5082>

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.



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

Changes in the chemical composition of plant litter during decomposition in an oligotrophic peatland

© 2025 E. A. Golovatskaya,  L. G. Nikonova 

Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Akademicheskii prospect, 10/3, Tomsk, Russia. E-mail: golovatskayaea@gmail.com

The aim of the study was to assess the influence of the plant litter type on the organic matter transformation rate and the release of macro- and microelements.

Location and time of the study. The study was conducted from 2008 to 2012 on the territory of the oligotrophic peatlands "Bakcharskoye" (Bakcharsky district of Tomsk region) in a pine-shrub-sphagnum phytocenosis (Low ryam) (56°58'34,10" N 82°36'27,48" E).

Methods. The plant residues decomposition rate was determined by the litterbag method. Carbon and nitrogen contents, as well as ash content, were determined in the initial and post-experiment samples. The elemental composition of plant residue ash was determined using a HITACHI-S-3400N electron microscope with an X-ray spectral analyzer.

Results. The mass loss of the studied plant samples revealed that the decomposition processes were most intensive at the initial stage of decomposition during the first 12 months, afterwards the decomposition rate significantly decreasing. During the first year of plant residues decomposition, nitrogen immobilization generally occurred in all plant samples. However, by the end of the experiment, nitrogen loss was observed in all samples, with the exception of *Sphagnum fuscum*, for which a 5% increase in nitrogen content was observed. As a result of the mineralization of organic matter in plant litter, ash content decreased, also with the exception of *Sph. fuscum*, for which a slight increase of 1,1 times was revealed. The ash of the studied plants contained a number of elements, including K, Ca, P, Mg, Al, Si, S, Fe, and others, with K and Ca being the major components. During decomposition the ash content changed: a sharp decrease in K (by 1,6–7,9 times) and Ca (by 2,2–7,1 times) took place in all samples except for *Sph. fuscum*. All samples also showed accumulation of iron, aluminum, and silicon. Phosphorus content was found to increase in all samples except *Sph. fuscum*.

Conclusions. During decomposition, carbon depletion was found in all plant residues, with the dynamics of carbon loss strictly corresponding to the mass loss of organic matter. Nitrogen loss was revealed in all samples, except *Sph. fuscum*. The ash content of plant residues decreased by 1,2–1,9 times, with the exception of *Sph. fuscum*, for which a slight increase in ash content was found. The latter may be due to the accumulation of ash elements in the plant residues of *Sph. fuscum*, in combination with the low rate of organic matter mass loss. During the plant residues decomposition the leaching of K and Ca, and accumulation of Fe, Al, Si, P occurred in all the studied samples. The identified dynamics pattern of the elemental content during the decomposition of plant residues provided a better insight into the specifics of destruction of each peat-forming plant species in the pine-shrub-sphagnum biogeocenoses of the Bakchar bog.

Keywords: peatlands; peat-forming plants; West Siberia; decomposition rate; mineral composition.

How to cite: Golovatskaya E.A., Nikonova L.G. Changes in the chemical composition of plant litter during decomposition in an oligotrophic peatland. The Journal of Soils and Environment. 2025. 8(4). e344. DOI: [10.31251/pos.v8i4.344](https://doi.org/10.31251/pos.v8i4.344) (in Russian with English abstract).

FUNDING

The study was financially supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project No. № 121031300154-1).

REFERENCES

- Bazilevich N.I., Titlyanova A.A. Biotic turnover on five continents: element exchange processes in terrestrial natural ecosystems / A.A. Tishkov (ed.). Novosibirsk: Publishing House of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 2008. 381 p. (in Russian).
- Bambalov N.N., Khoruzhik A.V., Lukashko E.S., Strigutsky V.P. Transformation of dead plants in bog biogeocenoses. In book: Experiment and mathematical modeling in the study of biogeocenoses of forests and bogs. Moscow: Nauka Publ., 1990. P. 53–63. (in Russian).
- Veretennikova E.E., Golovatskaya E.A. Distribution of lead and mercury in peat deposits of West Siberia (marshland of Vasyuganye). *Khimiya v interesakh ustoichivogo razvitiya*. 2012. Vol 20. No. 2. P. 181–187. (in Russian).
- Vorobyeva L.A. Theory and practice of soil chemical analysis. Moscow: GEOS, 2006. 400 p. (in Russian).
- Russian Research Institute for Hydrometeorological Information – World Data Center (RIHMI-WDC) [Electronic resource] <https://www.meteorf.ru> (accessed on 20.09.2021). (in Russian).

- Golovatskaya E.A., Nikonova L.G. Decomposition of plant residues in peat soils of oligotrophic peatlands. Tomsk State University Journal of Biology. 2013. No. 3(23). P. 137–151. (in Russian).
- Golovatskaya E.A., Nikonova L.G. The influence of the bog water level on the transformation of sphagnum mosses in peat soils of oligotrophic bogs. Eurasian Soil Science. 2017. Vol. 50. No. 5. P. 580–588. <https://doi.org/10.1134/S1064229317030036>
- Golovatskaya E.A., Nikonova L.G. Biogeochemical transformation of organic matter of peat-forming plants during the process of decomposition. In book: West Siberian peatlands and the carbon cycle: past and present. Proceedings of the Seventh International Field Symposium (Khanty-Mansiysk, 15–27 August, 2024). Tomsk: National Research Tomsk State University, 2024. P. 110–112. (in Russian).
- GOST 11306-83. Peat and its processed products. Methods for determining ash content. Moscow: Publishing House of Standards, 1994. 7 p. (in Russian).
- Denisenkov V.P. Fundamentals of Swamp Science: Textbook. St. Petersburg: St. Petersburg University Press, 2000. 220 p. (in Russian).
- Kozlovskaya L.S., Medvedeva V.M., Pivchenko N.I. Dynamics of Organic Matter in the Process of Peat Formation, Leningrad: Nauka Publ., Leningrad Branch, 1978. 172 p. (in Russian).
- Lishtvan I.I. Physics and chemistry of peat. Moscow: Nedra Publ., 1989. 303 p. (in Russian).
- Mishustin E.N. Associations of Soil Microorganisms. In book: USSR Academy of Sciences. Institute of Microbiology. Moscow: Nauka Publ., 1975. 107 p. (in Russian).
- Mironycheva-Tokareva N.P., Vishnyakova E.K. Dynamics of the organic material in bogs of different genesis. In book: Bogs and Biosphere: Proceedings of the Third Scientific School. Dedicated to the 400th Anniversary of the City of Tomsk (Tomsk, 13–16 September, 2004). Tomsk: Tomsk Center for Scientific and Technical Information, 2004. P. 23–30. (in Russian).
- Mironycheva-Tokareva N.P., Kosykh N.P., Vishnyakova E.K. Carbon balance components of wetlands in the middle taiga and the forest-tundra. In book: Peatlands of Western Siberia and the Carbon Cycle: Past and Present. Proceedings of the Second International Field Symposium (Khanty-Mansiysk, 24 August – 2 September, 2007) / Edited by Academician S.E. Vompersky. Khanty-Mansiysk: Publishing House of Scientific and Technical Literature, 2007. P. 117–118. (in Russian).
- Nikonova L.G., Kurganova I.N., López de Gerenu V.O., Zhmurin V.A., Golovatskaya E.A. Impact of abiotic factors on the decomposition of litter of peat-forming plants in the incubation experiment. Tomsk State University Journal of Biology. 2019. No. 46. P. 148–170. (in Russian). <https://doi.org/10.17223/19988591/46/8>
- Parshina E. K. Destruction of plant matter in the bog ecosystems of the taiga and forest-tundra zones of Western Siberia: Abstract of Dissertation... Cand. of Biol. Sci. Tomsk, 2009. 23 p. (in Russian).
- Ponomareva V.V., Plotnikova T.A. Guidelines for determining the composition of humus in soils (mineral and peat soils). Leningrad: Nauka Publ., 1975. 105 p. (in Russian).
- Prokushkin S.G., Prokushkin A.S., Sorokin N.D. The intensity of phytodetrit decomposition in larch forest of the permafrost zone in Central Siberia. Biology Bulletin. 2014. Vol. 41. No. 1. P. 89–97. <https://doi.org/10.1134/S1062359014010075>
- Pugachev A.A., Tikhmenev E.A. Conservation of plant organic matter and soil formation in ecosystems of zonal tundra of Extreme Northeast Asia. Arctic Environmental Research. 2017. Vol. 17. No. 3. P. 255–264. (in Russian). <https://doi.org/10.17238/issn2541-8416.2017.17.3.255>
- Tatarintseva V.G., Kotova E.I., Orlov A.S., Ponomareva T.I., Selyanina S.B., Daibova E.B. Metals and As in peat of high-level swamps of the Arkhangelsk region. Advances in Current Natural Sciences. 2022. No. 6. P. 60–65. (in Russian). <https://doi.org/10.17513/use.37842>
- Physico-chemistry and biology of peat. Methods for estimating the abundance and diversity of bacterial and actinomycete complexes of peat soils / T.G. Dobrovolskaya et al.; ed. by L.I. Inishev. Tomsk: Publishing House of Tomsk State Pedagogical University, 2010. 99 p. (in Russian).
- Berg B. Decomposition patterns for foliar litter: A theory for influencing factors. Soil Biology and Biochemistry. 2014. Vol. 78. P. 222–232. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2014.08.005>
- Bonanomi G., Cesarano G., Gaglione S.A., Ippolito F., Sarker T., Rao M.A. Soil fertility promotes decomposition rate of nutrient poor, but not nutrient rich litter through nitrogen transfer. Plant and Soil. 2017. Vol. 412. P. 397–411. <https://doi.org/10.1007/s11104-016-3072-1>

- Bragazza L., Siffi C., Iacumin P., Gerdol R. Mass loss and nutrient release during litter decay in peatland: the role of microbial adaptability to litter chemistry. *Soil Biology and Biochemistry*. 2007. No. 39. No. 1. P. 257–267. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2006.07.014>
- Frey S.D., Elliott E.T., Paustian K., Peterson G.A. Fungal translocation as a mechanism for soil nitrogen inputs to surface residue decomposition in a no-tillage agroecosystem. *Soil Biology and Biochemistry*. 2000. Vol. 32. No. 5. P. 689–698. [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(99\)00205-9](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(99)00205-9)
- Jonczak J. Effect of peat samples drying on measured content of carbon and nitrogen fractions. *Soil Science Annual*. 2013. No. 64. No. 4. P. 130–134. <https://doi.org/10.2478/ssa-2013-0020>
- Hättenschwiler S., Tiunov A.V., Scheu S. Biodiversity and litter decomposition in terrestrial ecosystems. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*. 2005. Vol. 36. No. 1. P. 191–218. <https://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.36.112904.151932>
- Lindahl B.D., Ihrmark K., Boberg J., Trumbore S.E., Höglberg P., Stenlid J., Finlay R.D. Spatial separation of litter decomposition and mycorrhizal nitrogen uptake in a boreal forest. *New Phytologist*. 2007. Vol. 173. No. 3. P. 611–620. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2006.01936.x>
- Manzoni S., Taylor P., Richter A., Porporato A., Ågren G. I. Environmental and stoichiometric controls on microbial carbon-use efficiency in soils. *New Phytologist*. 2012. Vol. 196. No. 1. P. 79–91. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2012.04225.x>
- Moore T.R., Trofymow J.A., Prescott C.E., Tituset B.D. Nature and nurture in the dynamics of C, N and P during litter decomposition in Canadian forests. *Plant Soil*. 2011. Vol. 339. No. 1. P. 163–175. <https://doi.org/10.1007/s1104-010-0563-3>
- Mooshammer M., Wanek W., Schnecker J., Wild B., Leitner S., Hofhansl F. Stoichiometric controls of nitrogen and phosphorus cycling in decomposing beech leaf litter. *Ecology*. 2012. Vol. 93. No. 4. P. 770–782. <https://doi.org/10.1890/11-0721.1>
- Nikonova L.G., Golovatskaya E.A., Tereshchenko N.N. Decomposition rate of peat-forming plants at the initial stages of destruction in peat deposits of the oligotrophic bogs “Bakcharskoe” and “Timiryasevskoe”. *Environmental Dynamics and Global Climate Change*. 2020. Vol. 11. No 1. P. 37–48. <https://doi.org/10.17816/edgcc34045>
- Olson J.S. Energy storage and the balance of producers and decomposers in ecological systems. *Ecology*. 1963. Vol. 44. No. 2. P. 322–331. <https://doi.org/10.2307/1932179>
- Shcherbov B.L., Lazareva E.V. Migration factors of radionuclides and heavy metals during forest fires in Siberia. In book: *Advances in Environmental Research*. Vol. 4. Novosibirsk: Nova Science Publishers, Inc., 2010. P. 99–119.
- Soong J.L., Vandegehuchte M.L., Horton A.J., Nielsen U.N., Deneff K., Shaw E.A., de Tomasel C.M., Parton W., Wall D.H., Cotrufo M.F. Soil microarthropods support ecosystem productivity and soil C accrual: evidence from a litter decomposition study in the tallgrass prairie. *Soil Biology and Biochemistry*. 2016. Vol. 92. P. 230–238. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2015.10.014>
- Trentbath B.R., Diggle A.J. An interpretative model of carbon and nitrogen transformation applied to a residue incubation experiment. *Australian Journal of Agricultural Research*. 1997. Vol. 43. No. 3. P. 537–553.

Received 14 November 2025

Accepted 03 December 2025

Published 08 December 2025

About the authors:

Evgeniya A. Golovatskaya – Doctor of Biological Sciences, Professor of the Russian Academy of Sciences, Director, Institute for Monitoring Climatic and Ecological Systems of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Tomsk, Russia); golovatskayaea@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0003-4354-7156>

Liliya G. Nikonova – Candidate of Biological Sciences, Junior Researcher, Laboratory for Monitoring the Carbon Balance of Terrestrial Ecosystems, Institute for Monitoring Climatic and Ecological Systems, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Tomsk, Russia); lili112358@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-1759-5082>

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.v8i4.314>

Особенности торфяных залежей горных болот на западном макросклоне Среднего Урала (хребет Басеги)

© 2025 И. В. Рычкова, И. А. Самофалова 

ФГБОУ ВО «Пермский государственный аграрно-технологический университет имени академика Д.Н. Прянишникова», ул. Петропавловская, 23, г. Пермь, 614990, Россия. E-mail: Rychkova-IV@mail.ru; samofalovairaida@mail.ru

Цель исследования. Выявить особенности торфяных залежей горных болот Среднего Урала.

Место и время проведения. Территория исследования расположена в пределах ООПТ «Государственный заповедник «Басеги» (Гремячинский городской округ, Пермский край), в состав которого входит хребет Басеги (58°45'–59°00' с.ш., 58°15'–58°38' в.д.). Исследования проводили в 2018–2022 гг. в пределах водосборных воронок на двух ключевых участках, расположенных на части склонов западной и восточной экспозиций хребта на горе Северный Басег.

Методы. Объект исследования – торфяные залежи. Применяли методы: маршрутов, сравнительно-географический, ГИС-технологий, индикационных связей, статистические (описательной статистики, информационно-логический анализ), картографические, геомоделирования. Исходные материалы: топографические карты масштаба 1:25000, подготовленные с помощью программы SAS-Planet, космические снимки (спутники ДЗЗ SPOT-6 и ResursP 14.08.2014 и 27.09.2014) с разрешением до 1,5 м. Обработка материала, анализ данных проведены на базе современной ГИС MapInfo Professional. Составлены цифровые карты рельефа, мощности торфа в пределах болотных массивов. Осуществлены геоботанические наблюдения на болотных массивах хребта Басеги. Исследования на западном склоне осуществляли в границах трех болотных массивов, на восточном склоне – одного болотного массива. Проведены работы по бурению торфяных залежей (9 шт. и 3 шт., соответственно). Отбор образцов торфа осуществляли с интервалами в 10 см до полного обследования торфяного слоя. Расположение скважин спланировано с учетом растительного покрова на болотном мезоландшафте по линии «центр – периферия» и основных растительных формаций. В торфяных залежах определяли: влажность, зольность и степень разложения торфа, pH_{H_2O} , окраску торфа по стандартной цветовой шкале.

Основные результаты. Растительность болот представлена травяно-сфагновыми фитоценозами. Геоботаническое описание растительного покрова болотных массивов демонстрирует гетерогенность болотных биотопов. Болотные массивы мелко-залежные, с низким стоянием уровня болотных вод (УБВ равен 22–50 см). Мощность торфяной залежи варьирует от 40 до 150 см на западном склоне и от 180 до 325 см на восточном склоне хребта. Смена эвтрофной и мезотрофной растительности на олиготрофную происходит вначале на периферии болота, а затем в центральной части, что типично для болотных систем, формирующихся в условиях сильно пересеченного рельефа. Болотные массивы на склонах разных экспозиций различаются по высоте залегания, плановой конфигурации болотных массивов, их размерам и пространственному расположению. Торф имеет различные оттенки бурой окраски (от очень темно-красного до охристого), встречается буровато-черный, реже буровато-серый. В пределах толщи торфяной залежи происходит изменение окраски торфа, что свидетельствует о смене основных растений-торфообразователей. Определена специфичная окраска торфа для каждого болотного массива. Наибольшая влагоемкость с максимальной степенью разброса отмечается в торфяных залежах на периферии болотных массивов. Зольность торфа варьирует от низкозольного до высокозольного. Отмечается тесная связь между зольностью и окраской торфа, особенно на западном склоне хребта.

Заключение. В структуре растительности преобладает травяно-кустарничковый и мохово-лишайниковый ярусы. Растительный покров является гетерогенным, так как сочетает в своем составе разные по трофности растительные сообщества. Рисунок болотного массива зависит от рельефа местности. Высокие показатели вертикального расчленения (более 10 м) в сочетании с уклоном создают условия для развития болота вертикально (ключевой участок 2), в обратном же случае, болото развивается как вертикально, так и горизонтально (ключевой участок 1). Торфяные залежи неоднородны по окраске. Анализ торфа показывает неравномерность отложений растительных остатков, их различия по мощности и степени разложения. Степень разложения торфа изменяется в зависимости от глубины: в поверхностных слоях она составляет около 25%, постепенно увеличиваясь до 50% в более глубоких слоях. Исследованные болотные массивы относятся к переходному типу по их генезису, а по уровню питания их можно отнести к мезотрофным. Наблюдается периферически-олиготрофный ход развития болотных систем. Определены региональные и зональные особенности торфяных залежей на западном макросклоне Среднего Урала: значительная роль геоморфологического фактора, что влияет на

разные формы болотных массивов на склонах западной и восточной экспозиции; присутствие сфагнома (в том числе в торфе низинного типа); высокая зольность торфов, особенно придонных; закономерность в строении торфяной залежи – низинный торф залегает в основании, верховые – чаще в верхней части залежи; направленность развития торфяников от низинного (эвтрофного) через переходный (мезотрофный) к верховому (олиготрофному) типу; смена эвтрофной и мезотрофной растительности на олиготрофную происходит сначала на периферии болота, а затем в центральной части болотного массива.

Ключевые слова: горные болота; Средний Урал; торфяные залежи; фитоценоз; торф; зольность; влагоемкость; информационно-логический анализ.

Цитирование: Рычкова И.В., Самофалова И.А. Особенности торфяных залежей горных болот на западном макросклоне Среднего Урала (хребет Басеги) // Почвы и окружающая среда. 2025. Том 8. № 4. e314. DOI: [10.31251/pos.v8i4.314](https://doi.org/10.31251/pos.v8i4.314)

ВВЕДЕНИЕ

В конце XX – начале XXI столетия возрос научно-практический интерес к исследованиям гидроморфных и полугидроморфных почв в связи с возрастанием антропогенной нагрузки и прогнозируемыми климатическими изменениями. В залежах торфа законсервированы значительные запасы органического углерода, поэтому торфяной пул играет важную роль в биогеохимическом цикле углерода и процессах изменения климата (Broll, Keplin, 2005; Borgmark, 2005; Волкова и др., 2010; Колужный, 2018; Инишева, 2022; Рычкова, Самофалова, 2023). Монолиты торфа представляют собой архивы информации о палеоусловиях окружающей среды (Yeloff, Mauquoy, 2006; Тишков и др., 2023).

Важная биосферная роль принадлежит горным водно-болотным экосистемам, поддерживающим гидрологические, биогеохимические и биологические связи с окружающими их экосистемами, с которыми болота постоянно обмениваются веществом, энергией, информацией (Пьявченко, 1985; Волкова и др., 2010). Кроме того, горные болота являются комплексным барьером (механическим, физико-химическим, биогеохимическим) на пути миграции поллютантов.

Горные болота не выделяют в особый тип, но они имеют ряд особенностей, отличающих их от болот равнинных ландшафтов. Так, болотные массивы гор, как правило, имеют небольшие размеры, что делает их сильно зависимыми от окружающей климатической обстановки и чувствительными к антропогенному воздействию (Волкова и др., 2010; Лапшина и др., 2015; Ивченко, Знаменский, 2016; Жангуров и др., 2017). В составе растительного покрова горных болот отмечаются некоторые изменения видового состава, обусловленные внедрением представителей альпийской флоры и выпадением некоторых бореальных видов.

Болота предгорий и гор Кавказа, Карпат, Алтая, Урала, Саян, Тянь-Шаня и Памира описывали многие исследователи (Сторожева, 1960; Платонов, 1965; Кац, 1971; Андриенко, 1974). Проявление влияния рельефа на развитие болотных систем происходит в комплексе с другими природными факторами: климатом, геологическим строением, гидрологическими условиями. Считается, что болотные системы могут быть приурочены к любым формам рельефа различного генезиса (Шадрина, 1974; Жиров, Кирюшкин, 2003; Лапшина, 2003; Вомперский и др., 2005). От характера рельефа зависит скорость надвигания болота на прилегающие участки. По данным Н.И. Пьявченко (1985), при равнинном рельефе в условиях лесной зоны надвигание болот на суходол становится заметным через 10–15 лет, при крутизне склона 5° болото надвигается на суходол со скоростью 1 м за 100 лет, при уклоне 20° – 1 м за 400 лет, при уклоне 40° – 1 м за 800 лет.

В России одной из древнейших горных систем является Уральский хребет, который служит мощным климаторазделом континента Евразии. Большая протяжённость (более 2000 км) Уральского хребта с севера на юг обуславливает проявление широтной зональности, которая в сочетании с высотной поясностью и экспозиционной асимметрией склонов создает многообразие экологических типов болотных ландшафтов. Проявление зональности выражается в изменении типов болот, площади заболоченных ландшафтов, мощности торфяных залежей, составе растительности (Пьявченко, 1985). Так, на Полярном Урале в условиях близкого залегания вечной мерзлоты наблюдается наибольшая степень заболоченности при малой мощности торфяных залежей. По направлению к северу и с увеличением высоты местности болотообразующая роль сфагновых мхов уменьшается. На Северном Урале наибольшую площадь занимают гипновые болота, сходные с болотами тундровой зоны. Сильная заболоченность отмечается выше границы леса. Характерно наличие мерзлоты в торфяниках и слабое торфонакопление, преимущественно за счет гипновых и осоково-гипновых торфов. Мощность торфа не превышает 30–40 см (Сторожева, 1960). Ниже границы леса встречаются деградирующие бугристые торфяники, образовавшиеся в условиях другого климата. Средний и

Южный Урал заболочены слабее, но заторфованность здесь больше. Болота располагаются в озерных котловинах, поймах рек, на террасах и склонах. На пологих склонах развиты крупные болота ключевого питания, относящиеся к типу низинных или переходных. Центральная часть их открытая, периферия занята согрой. На Южном Урале довольно много болот озерного происхождения с отложениями сапропеля. Мощность торфяных залежей здесь различна, местами достигая 9 м (Кац, 1971; Ивченко, Денисенков, 2012; Баишева и др., 2012; Ивченко, Знаменский, 2016; Гончарова, 2017). Слабоизученным в этом отношении является горная ландшафтная зона западного макросклона Среднего Урала.

Детального исследования болотных систем Среднего Урала до настоящего времени не проводилось. Территория Среднего Урала, как и всего Уральского региона, характеризуется неоднородным геолого-геоморфологическим строением, сложной историей формирования и развития. В этой связи, целью нашего исследования было выявить особенности торфяных залежей горных болот Среднего Урала.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Ненарушенные горно-таежные леса на Среднем Урале сохранились в пределах ООПТ «Государственный заповедник «Басеги» (Гремячинский городской округ, Пермский край), в состав которого входит хребет Басеги (рис. 1), с координатами 58°45'–59°00' с.ш. и 58°15'–58°38' в.д. Хребет простирается на 24 км и ориентирован с севера на юг параллельно главному Уральскому хребту. С северной стороны хребта находится обширная долина реки Усьвы, с южной – долина реки Вильвы. Хребет состоит из трех отдельных массивов – Северный Басег (951,9 м н.у.м.), Средний Басег (994,7 м н.у.м.) и Южный Басег (850 м н.у.м.), разделённых понижениями.

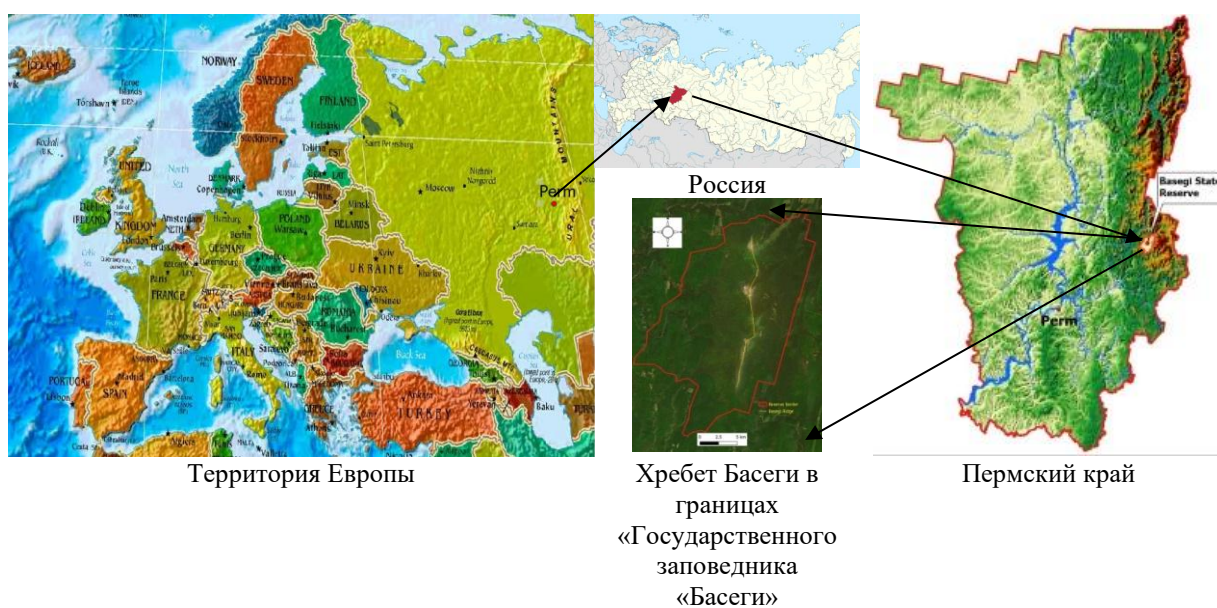


Рисунок 1. Местоположение объекта исследования.

В геологическом отношении территория хребта представляет собой комплекс метаморфизированных, терригенных, вулканогенных и интрузивных образований протерозойского, девонского и кембрийского возраста, перекрытый маломощным чехлом рыхлых четвертичных отложений. Рельеф среднегорный (высоты колеблются от 600 до 900 м). Территория хребта входит в зону грядово-останцового низкогорья Среднего Урала, которая является частью центральной зоны Урала и Новоземельско-Уральской области. Склоны гор, в целом, преимущественно прямые, местами ступенчатые, их средняя крутизна составляет 15–20°. Все вершины хребта имеют асимметричный профиль (с пологими западными склонами и более крутыми восточными).

Хребет Басеги расположен в зоне умеренного климата, солнечная радиация достигает 80–90 ккал/см² в год. Территория подвержена влиянию западных ветров, которые приносят из Атлантического океана влагу и неустойчивую погоду; характерен типичный континентальный бореальный климат с резкими колебаниями температур. Среднегодовая температура составляет –1,0°–1,4°. За год выпадает от 450 до 1100 мм осадков, причем половина этого объема представляет собой снег. Осадков на западном склоне хребта выпадает на 25–130 мм больше, чем на восточном склоне

(Летопись природы ..., 1997). Устойчивый снежный покров держится около 180 дней. Средняя глубина снежного покрова на западных склонах составляет 115–120 см, на восточных – почти на 30 см меньше.

Территорию хребта дренируют 14 водотоков различной протяженности от 2 до 27 км, являющихся притоками главной реки – Усьвы. В западной части от хребта формируются водосборные бассейны рек в форме дубового листа, а в восточной – стоковая система формируется в виде лопасти (Самофалова, 2020б; 2023). Таким образом, образование водосборных бассейнов в западной и восточной частях хребта указывает на различные процессы разрушения горного массива. В пределах хребта Басеги речные долины разработаны слабо в связи с твердыми подстилающими породами. Реки, спускающиеся с западных склонов хребта Басеги, следуют строго в западном направлении. Верховья рек и ручьев часто заболочены. В горных условиях встречаются заболоченные участки, плохо дренируемые и приуроченные к выровненным платообразным поверхностям на склонах, где происходит накопление внутрипочвенной влаги, стекающей с вышележащей части склона, и за счет затрудненного стока (Сарманова, Самофалова, 2017; Самофалова, 2017; Самофалова 2020а, 2020б; Самофалова и др., 2021; Самофалова, 2021). Ранее в пределах хребта Басеги определена бассейновая территориальная структура элементов **литоводосборных бассейнов (ЛВБ)** по Т.А. Трифионовой (1999). Установлена приуроченность болотных ландшафтов к местам водосборных воронок, расположенных на склоновых поверхностях литоводосборных бассейнов рек в переходных зонах: субальпийские луга – парковый лес, парковый лес – горная тайга (Самофалова, 2017; 2020б; 2023). Площадь переувлажненных территорий в пределах заповедника по данным ДЗ составляет 1472 га (Сивкова, Слесарев, 2023).

Хребет Басеги расположен в Уральской провинции, включающей горно-моховую и мохово-травяную тайгу. Основу растительности составляют леса, занимающие склоны и низины между горами. По зональному подразделению растительного покрова П.Л. Горчаковским (1975), данная местность определяется как часть средней тайги бореально-лесной зоны, расположенной на западных склонах Уральских гор, где господствует густая тайга с древостоем из ели и пихты. Согласно геоботаническому районированию Пермского края, хребет Басеги относится к подобласти пихтово-еловых и берёзовых лесов области горно-таёжных пихтарников. Выражены следующие вертикальные пояса растительности: горно-лесной, субальпийский (подгольцовый) и горно-тундровый (гольцовый). Подгольцовый пояс подразделяется на подпояса парковых лесов, криволесья и субальпийских лугов.

Исследования проводили в 2018–2022 гг. Использовали методы: сравнительно-географический, ГИС-технологий, индикационных связей, статистические, картографические, геомоделирования. Исходные материалы: топографические карты масштаба 1:25000, подготовленные с помощью программы SAS-Planet, космические снимки (спутники ДЗЗ SPOT-6 и ResursP 14.08.2014 и 27.09.2014) с разрешением до 1,5 м. Обработка материала, анализ данных проведены на базе современной ГИС MapInfo Professional. Составлены цифровые карты рельефа, мощности торфа в пределах болотных массивов.

Методом маршрутов на западном и восточном склонах хребта на пологих участках с незначительным уклоном в пределах горы Северный Басег определены ключевые участки. Болотный массив на западном склоне вытянут вдоль хребта с севера на юг протяженностью 1,5 км и занимает высоты 525–492 м н.у.м. в переходной зоне горно-таежного высотного пояса и паркового редколесья. Исследования на западном склоне (ключевой участок 1) осуществляли в границах трех болотных массивов (табл. 1) площадью 14,94 га. На восточном склоне (ключевой участок 2) болотный массив спускается с горы в направлении от центральной части хребта на восток на высоте 570–556 м н.у.м., длиной от 250 до 350 м, площадью около 3 га.

Внутри каждого из болотных мезоландшафтов, благодаря предварительному осмотру, определены отдельные болотные микроландшафты, в пределах которых проведено геоботаническое описание (Классификация видов торфа..., 1951; Полевая геоботаника, 1964; Куликова, 2006).

Бурение **торфяных залежей (ТЗ)** (12 шт.) и отбор проб торфа проведено с интервалами 10 см до минерального ложа (Атлас растительных остатков, 1959; Справочник по торфу, 1982). Расположение скважин спланировано с учетом растительного покрова на болотном мезоландшафте по линии «центр – периферия» и основных растительных формаций (болотные микрозоны). Первоочередное значение придавалось растительности «генетического центра» болота, отражающего динамику развития экосистемы (Куликова, 2006). Типологические особенности болот определяли по характеру залегания в горном ландшафте в соответствии с классификационной схемой морфологических типов, разработанной для ледников (Гвоздецкий, Голубчиков, 1987; Долгушин, Осипова, 1989; Волкова и др.,

2010), гидроморфологической классификацией болот (Иванов, 1957), схемой гидротопографической классификации горных болот Европы (Wheeler, Proctor, 2000).

Таблица 1

Основная характеристика болотных массивов на склонах хребта

Болотный массив	№ скважины (ТЗ)	Высота н.у.м., м	Глубина скважины, см	pH _{H2O}	Растительная группировка
Западный склон, ключевой участок 1					
1	11	498	120	4,6	Травяно-моховая (осоково-пушицево-пухляково-сфагновая)
	7	525	150	4,6	Березово-пушицево-осоково-сфагновая
	12	520	40	4,2–4,6	Елово-чернично-морошково-сфагновая
2	8	517	140	4,2–4,4	Осоково-шейхцериево-сфагновая
	9	518	60	4,8	Вейниково-сабельниково-осоково-сфагновая
3	10	492	120	5,2–5,4	Сабельниково-осоково-сфагновая
Восточный склон, ключевой участок 2					
4	3	562	180	5,0	Осоково-сфагновая
	1	556	300	4,8–5,0	Вахтово-осоково-сфагновая
	6	570	325	5,0	Елово-чернично-морошково-сфагновая

В каждой торфяной залежи при помощи портативных кондуктометра (EC232 ЭКОСТАБ Портативный кондуктометр) и рН-метра (для воды EcoDigital цифровой) определены показатели электропроводности и рН болотных вод.

В образцах торфа определяли: влажность, зольность (ГОСТ 11306-83) и окраску по стандартной цветовой шкале (Андропова, 1992). По образцам торфа в лабораторных условиях глазомерно-процентными макро- и микроскопическими методами определяли степень разложения и степень минерализации торфа.

Использованы методы описательной статистики. Статистическая обработка осуществлялась в программах Microsoft Excel и STATISTICA 8. Проведена оценка существенности разности выборочных средних зольности торфа по *t*-критерию на уровне значимости 0,05.

Использование только статистических методов ограничивает возможности исследования. Состояние растительного покрова обусловлено множеством факторов, а для многофакторных явлений более перспективно применение **информационно-логического анализа (ИЛА)** (Сорочкин, 1977; Пивоварова, 2006; Самофалова, 2017; Самофалова, 2020а; 2020б; 2023; Пивоварова и др., 2025). В основу метода ИЛА положено представление об измеряемости информации, которая передается изучаемому явлению от факторов, и оценка силы связи между признаками путем сравнения априорной вероятности (всей выборки) с условными вероятностями (каждого из факторов). С помощью информационно-логического анализа определяется степень связи между явлением и фактором показателями: общая информативность *T* (бит) и коэффициент эффективности передачи информации от фактора к явлению *K* (при *K* > 0,13 связь является достоверной). При анализе связей с помощью информационных показателей учитывали следующие характеристики: торфяные скважины, болотные массивы, экспозиция склонов, окраска торфа, зольность торфа. Для определения степени зависимости проведено ранжирование характеристик и составлены таблицы абсолютной встречаемости сочетаний, а затем рассчитана матрица оценок вероятности сочетаний разных состояний по отношению условной вероятности для каждого ранга явления по каждому рангу фактора. Для каждого центрального образа (таксона) рассчитаны специфичные (наиболее вероятные) состояния признаков.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Роль геоморфологического фактора в формировании торфяных залежей в условиях Урала достаточно значительна. Считается, что в горной местности торфяники встречаются редко и приурочены, в основном, к горным долинам и озёрным котловинам (Русский, 2001); также торфяники характерны для межуальных понижений, древних лощин стока, образующаясь путем заболачивания озёр и суходолов.

Считается, что растительный покров болотного биотопа гомогенен, если питающие воды в пределах болотного массива не изменяются и распределены равномерно по поверхности болота.

Однако, если участки болота отличаются по свойствам питающих вод, растительный покров является гетерогенным, так как сочетает в своем составе разные по трофности растительные сообщества. В целом, в болотных массивах 100% проективное покрытие характерно для мохово-лишайникового яруса и около 60–80% приходится на травяно-кустарничковый ярус.

В пределах болотного микроландшафта 1 (ТЗ 11) растительная группировка определена как травяно-моховая (табл. 1), так как отсутствует древесный ярус (только отдельно стоящие деревья в угнетенном состоянии). В растительном покрове преобладают следующие виды: *Eriophorum vaginatum* L., *Carex pauciflora* Lightf., *Trichophorum cespitosum* (L.) Hartm., *Sphagnum fallax* (H. Klinggr.) H. Klinggr., *S. riparium* Ångstr., *Pleurozium schreberi* (Brid.) Mitt.

Растительное сообщество, характеризующее ТЗ 7 на высоте 525 м отличается тем, что в вертикальной структуре растительности возрастает доля травяно-кустарничкового яруса. Доминантами в древесном ярусе являются *Betula pubescens* Ehrh., в травяно-кустарничковом ярусе – *Carex rostrata* Stokes, *Eriophorum vaginatum*, *Oxycoccus palustris* Pers., в мохово-лишайниковом – *Sphagnum fallax* и *S. divinum* Flatberg & K. Hassel. В данном микроландшафте встречается до пяти видов сфагнов.

Елово-чернично-морошково-сфагновое сообщество расположено на окраине болотного массива 1 в некотором понижении относительно предыдущего микроландшафта и характеризуется большим проективным покрытием древесного яруса (40%). Преобладающий вид в древесном ярусе *Picea obovata* Ledeb. (25–50%). В травяно-кустарничковом ярусе содоминантами являются *Rubus chamaemorus* L., *Vaccinium myrtillus* L., обильна *Eriophorum vaginatum*. Также в этом ярусе единично встречаются различные виды осок и седмичник европейский. Мохово-лишайниковый ярус представлен 4 видами сфагнов, среди которых преобладают *Sphagnum girgensohnii* Rossow и *S. divinum*. Встречается *Polytrichum commune* Hedw. (менее 5% проективного покрытия).

Итак, разнообразие растительных сообществ связано с разным типом питания. Питающие воды распределены неравномерно на поверхности болота, что может диагностировать различия по положению в рельефе и указывает на разные условия болото- и торфообразовательного процесса. Наименьшая мощность ТЗ оказалась под елово-чернично-морошково-сфагновым растительным сообществом, где ТЗ сложена древесным торфом, переходящим глубже 40 см в минеральную основу.

Болотный мезоландшафт 2 имеет меньший перепад высот внутри массива, расположен на высоте 517–518 м н.у.м. Однако болотные биотопы здесь также представлены различными сочетаниями растений-торфообразователей: вейниково-сабельниково-осоково-сфагновое и осоково-шейхцериево-сфагновое сообщества. Древесный ярус в большей степени (около 15%) представлен на окраине болотного массива (ТЗ 9), а в центральной части единично стоящими *Betula pubescens*, *Pinus sibirica* Du Tour, *Picea obovata*. Кустарниковый ярус отличается большим разнообразием видов растений также на окраине болотного массива 2 с невысоким проективным покрытием (менее 5 и менее 1%). В травяно-кустарничковом ярусе в центральной части болотного массива (ТЗ 8) преобладают *Scheuchzeria palustris* L., *Carex limosa* L., а на окраине (ТЗ 9) – *Calamagrostis langsdorffii* (Link) Trin., *C. purpurea* (Trin.) Trin., *Comarum palustre* L., *Carex rostrata* и *C. canescens* L. Мохово-лишайниковый ярус представлен шестью видами *Sphagnum* в центральной части массива и четырьмя видами на окраине болотного массива – общие доминанты *Sphagnum riparium*, *S. fallax*. Кроме этого, в центральной части массива преобладает *S. divinum*, а на окраине появляется *Polytrichum commune* (до 5% проективного покрытия). На ключевом участке болотного массива 2, от его центра занятого осоково-шейхцериево-сфагновым растительным сообществом с присутствием болотных кустарничков (*Vaccinium uliginosum* L., *Oxycoccus palustris*), мощность торфяной залежи снижается к окраине болота, постепенно переходя в грубогумусный или перегнойный органический материал (органо-минеральный горизонт). Мощность ТЗ здесь варьирует от 60 см на высоте 518 м н.у.м. до 140 см на высоте 517 м.

Болотный массив 3 топографически расположен ниже по сравнению с вышеописанными болотными мезоландшафтами. На данном болотном массиве преобладает ев-мезотрофные сабельниково-осоково-сфагновые растительные сообщества. В травяно-кустарничковом ярусе содоминируют *Comarum palustre*, *Carex rostrata*, *Carex limosa*. Обильны *Equisetum fluviatile* L., *Oxycoccus palustris*, *Menyanthes trifoliata* L. В нижнем ярусе растительного покрова обнаружено несколько видов сфагнума, характерных для эвтрофных и мезотрофных болотных экосистем (*Sphagnum riparium*, *S. fallax*, *S. centrale* C.E.O. Jensen). Отмечен *Polytrichum commune*, занимающий до 5% проективного покрытия и *Sphagnum divinum*. Последний вид характерен для олиготрофных болот, что может указывать на начавшееся развитие болота по переходному типу. Мощность ТЗ невелика и

составляет 70 см. Глубже растительные остатки встречаются в сочетании с минеральным компонентом. Общая глубина скважины 100 см.

На восточном склоне хребта болотный массив характеризуется сменой болотных биотопов с высотой местности. Центральная часть болота представлена вахтово-осоково-сфагновым фитоценозом (ТЗ 1, 556 м). Основные доминанты в этой части болотного массива травянистые растения *Menyanthes trifoliata*, *Carex limosa*, *C. rostrata* и сфагнумы: *Sphagnum balticum* (Russow) C.E.O. Jensen, *S. divinum*, *S. papillosum* Lindb., *S. russowii* Warnst. Единично в растительном покрове встречаются *Eriophorum vaginatum*, *Equisetum fluviatile*, *Drosera rotundifolia* L., *D. anglica* Huds., *Ligularia sibirica* (L.) Cass., *Oxycoccus palustris*, *Sphagnum rubellum* Wilson и *S. centrale* C.E.O. Jensen. К северной части массива развиваются осоково-сфагновые сообщества (ТЗ 3, 562 м) с преобладающими видами *Carex rostrata*, *Sphagnum riparium*, *S. fallax*, *S. russowii*. Восточная окраина болота занята елово-чернично-морошково-сфагновым сообществом (ТЗ 6, 570 м). Здесь хорошо выражен древесный ярус, в котором преобладает *Picea obovata*. Осоки встречаются единично. Около 25–50% проективного покрытия занимает *Vaccinium myrtillus*, *Rubus chamaemorus*. В мохово-лишайниковом ярусе содоминируют *Sphagnum girgensohnii* и *Polytrichum commune*, от 5 до 12% проективного покрытия занимает *Sphagnum divinum*, менее 5% покрытия приходится на *S. russowii* и *S. centrale*. Мощность торфяной залежи в болотном массиве 4 варьирует от 180 до 325 см.

Геоботаническое описание растительного покрова болотных массивов демонстрирует гетерогенность болотных биотопов. Определены типы болот как топяные и лесо-топяные, а группы в соответствии с преобладающими растениями торфообразователями как травяно-моховые, древесно-моховые и древесно-травяные.

Реакция среды болотных вод варьирует от сильнокислой на западном склоне хребта до слабокислой на восточном склоне. Наиболее низкие значения pH 4,2–4,6 ед. характерны для болотных массивов западного склона.

Формирование минерализации болотных вод в вегетационный период происходит под влиянием процессов поглощения минеральных компонентов растениями и увеличения их содержания при распаде органики и в процессе испарения (Калужный, 2018). Минерализация болотных вод в исследуемых болотных массивах низкая и варьирует в пределах 0,005–0,04 г/л (в пересчете с электропроводности 1,0 мС/см = 0,5 грамм солей на литр). Таким образом, воды являются достаточно пресными, бедными и очень слабо минерализованными.

Болотные системы могут быть приурочены к любым формам рельефа разнообразного генезиса (Жиров, Кирышкин, 2003). Взаимосвязь рельефа местности с болотными массивами достаточно сложная и мало изученная. Рельеф влияет на соотношение между быстротой роста размеров болотных систем (плоскостной) и быстротой его роста в вертикальном направлении, т.е. на формирование собственного рельефа болотного массива. Разные вариации в морфометрии рельефа и смены коренных пород всегда вызывают закономерные изменения характерных черт болотных систем. Четко выраженные изменения признаков болот отмечаются на границах перехода при смене коренных пород и четвертичных отложений.

Преобладающее влияние на формирование болотных ландшафтов в пределах водосборных воронок оказывают конкретные морфометрические показатели (средняя высота и средний уклон бассейнов), что доказывает литологические различия западного и восточного склонов хребта (Самофалова 2020б; 2023). Согласно геологической карте дочетвертичных образований, западный склон хребта сложен сланцами серицит-хлорит-кварцевыми, а восточный – кварцито-песчаниками и сланцами. Соответственно, процессы бассейнообразования проходят с разной интенсивностью на склонах хребта, что создает различные условия для образования торфяных залежей. Изменение литологического состава предопределяет способность водотоков врезаться, образовывать наносы, расчленять территорию и, как следствие, изменяется водно-минеральное питание в болотных фитоценозах, меняется характер водообмена между болотом и окружающими его минеральными почвами и грунтами.

Формирование горных болот происходит в условиях резко расчлененного рельефа, который ограничивает горизонтальное расширение торфяных залежей, что особенно заметно на западном склоне на ключевом участке 1. Здесь болотные массивы расположены в пределах водосбора безымянного ручья, приурочены к трем ступеням в пределах водосборной воронки и вытянуты полосой вдоль хребта; микрорельеф бугристо-мочажинный. Болотные массивы имеют уклон с севера на юг (рис. 2а). Общий перепад высот на ключевом участке 1 составляет около 30 м. Торфяная залежь неглубокая, с колебаниями от 0,4 до 1,5 м (ТЗ 11, 12, 7) (рис. 2б). Наименьшие значения вертикального

расчленения и наибольшие значения горизонтального расчленения рельефа создают условия для развития болота горизонтально только в болотном массиве 2 (ТЗ 8 и 9).

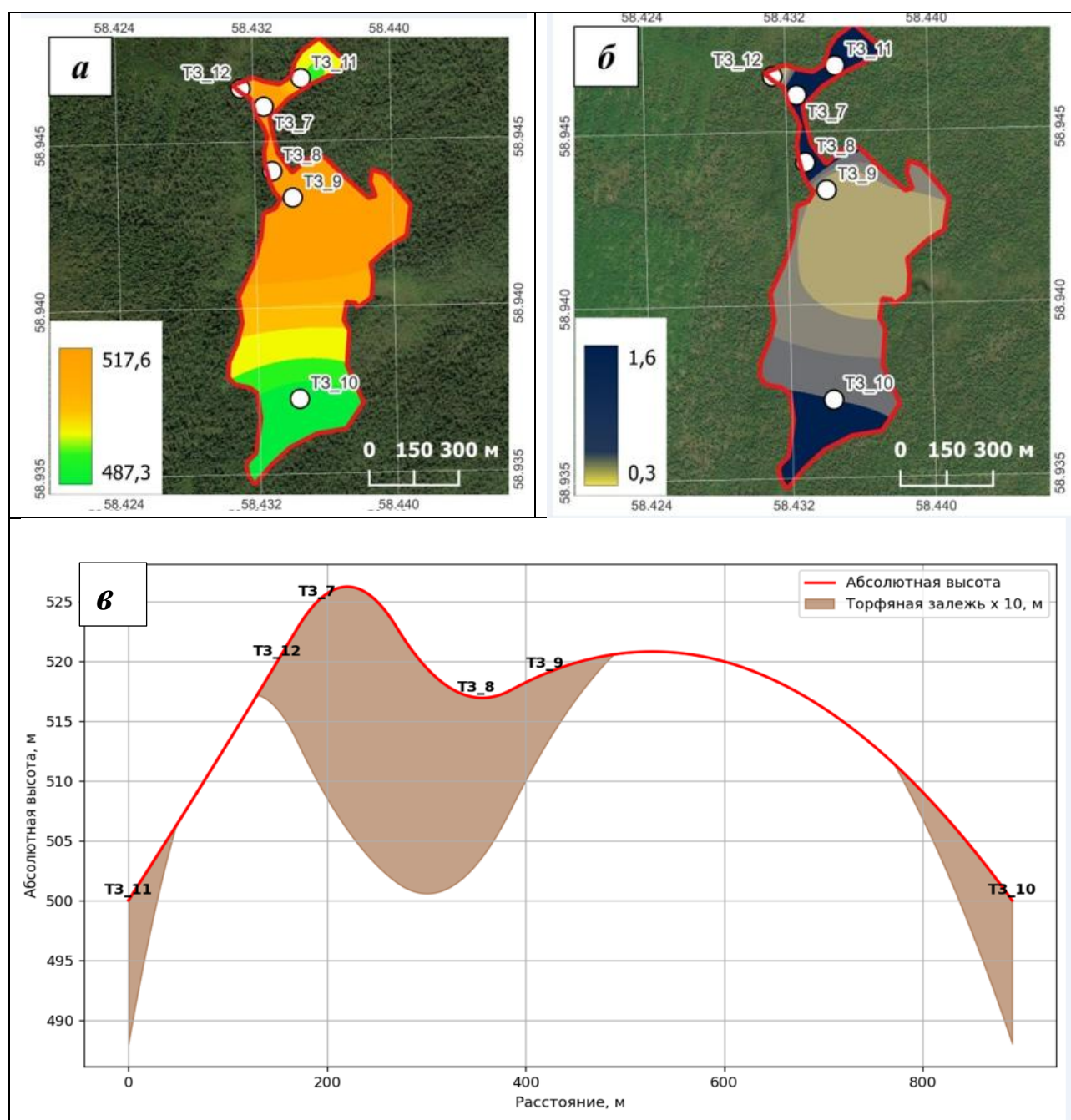


Рисунок 2. Топографический профиль абсолютной высоты местности и мощности торфяных залежей в пределах ключевого участка 1 на западном склоне: а) цифровая модель рельефа; б) цифровая модель мощности торфа; в) мощность торфа на минеральной поверхности с учетом ее кривизны.

В районах интенсивных неотектонических поднятий заторфованность всегда меньше, чем в областях опусканий (Жиров, Кирюшкин, 2003). Так как процессы торфообразования и торфонакопления происходят в понижениях рельефа, то болотные микроландшафты принимают их форму, их контуры дают представления о геометрической форме понижений, т.е. контур нулевой границы болотных микроландшафтов является проведенной горизонталью по склону понижения (рис. 2в). При неотектонических поднятиях улучшается естественный дренаж и происходит смена растительного покрова: травяно-моховые растительные группировки (ТЗ 11) переходят в древесно-моховые (ТЗ 12) и древесно-травяные (ТЗ 7). Топографический профиль абсолютной высоты местности и мощности торфяных залежей в пределах ключевого участка 1 демонстрирует изменение

рельефа и мощности торфа. Здесь происходит смена мезо- (ТЗ 11) и эвтрофного (ТЗ 12) болотных массивов на олиготрофный (ТЗ 7) с выпуклой поверхностью, а далее в понижениях и слабовыпуклых участках поверхности формируются мезотрофные болотные массивы. Таким образом, смена эвтрофной и мезотрофной растительности на олиготрофную происходит вначале на периферии болота, а затем в центральной части, что типично для болотных систем, формирующихся в условиях сильнопересеченного рельефа.

На восточном склоне болотный массив 4 (ключевой участок 2) значительно меньше по площади и имеет изометричную форму в плане. Перепад высот внутри болотного ландшафта составляет 14 м (рис. 3а). Мощность ТЗ изменяется и в разных частях болотного массива и варьирует от 1,80 м до 3,25 м (рис. 3б).

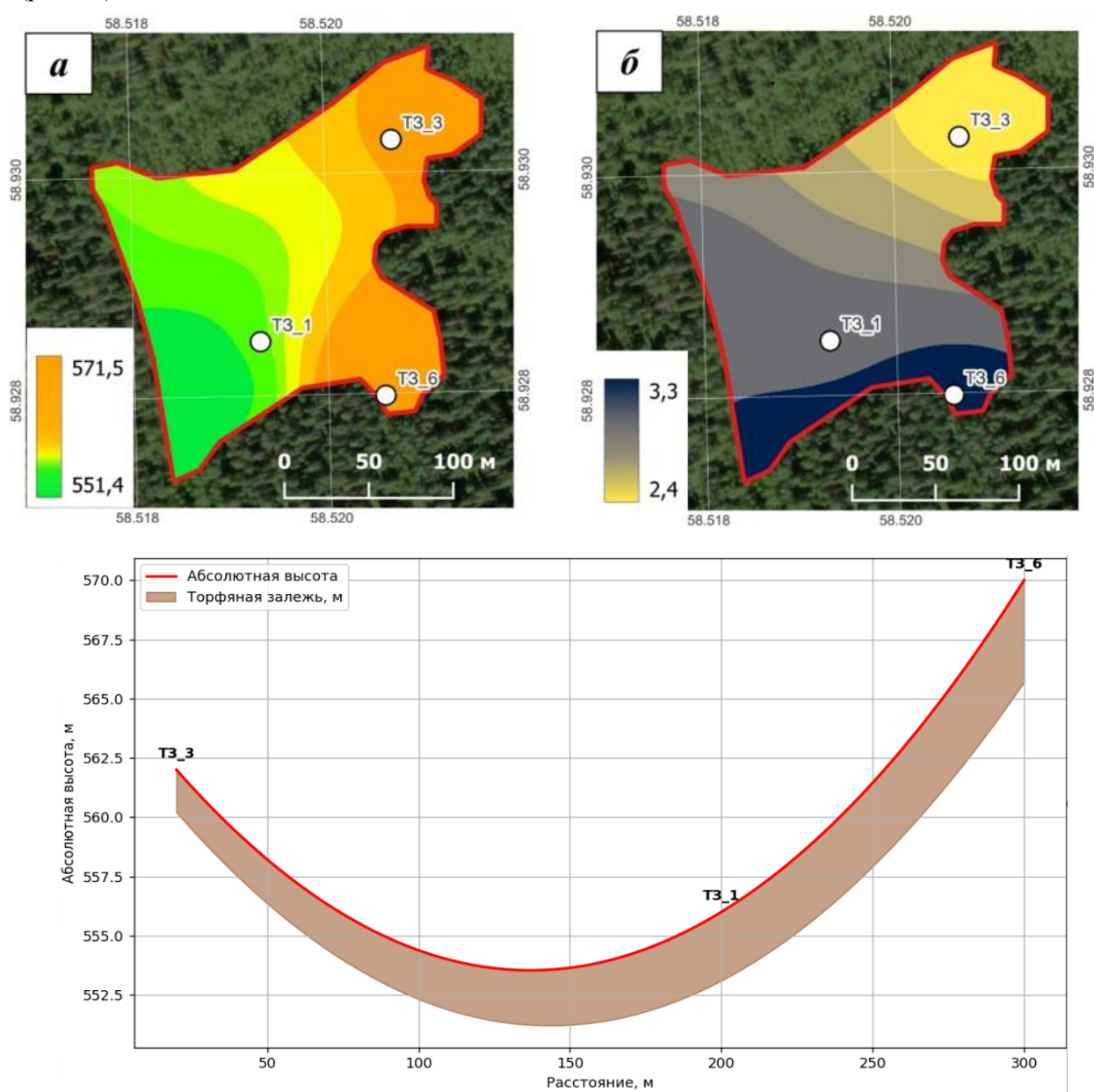


Рисунок 3. Топографический профиль абсолютной высоты местности и мощности торфяных залежей в пределах ключевого участка 2 на восточном склоне: а) цифровая модель рельефа; б) цифровая модель мощности торфа; в) мощность торфа на минеральной поверхности с учетом ее кривизны.

Наибольшая толща торфа зафиксирована в юго-восточной части болотного массива, расположенной на большей высоте (ТЗ 6). Поверхность болотного массива изменяется с северо-востока на юго-запад и с востока на запад. Мезотрофные микроландшафты (травяно-моховая растительность) характерны для северной слабовыпуклой и центральной пониженной части болотного

массива. Выпуклая часть поверхности болотного массива (ТЗ 6) характеризуется древесно-моховой группировкой. На ключевом участке 2 поверхность торфяной залежи повторяет минеральную поверхность (рис. 3в), что может косвенно указывать на большую прочность пород, чем на западном склоне Северного Басега.

Дифференциацию поверхности болотных ландшафтов устанавливают по следующим признакам: морфология поверхности (выпуклая, плоская, вогнутая); рисунок поверхности (гомогенный или комплексный); тип водно-минерального питания (атмосферное, грунтовое, поверхностно-сточное) (Лапшина, 2003).

В болотных массивах хребта Басеги по основным механизмам обеспечения болот избыточной влагой выделены: на западном склоне – тип топогенных болот смешанного питания (болота торфяно-поверхностно-сточного питания); на восточном склоне – тип солигенных болот (ключевого питания) за счет постоянного латерального притока.

На основе многоуровневой классификации (Лапшина, 2003) изучаемые болотные массивы хребта Басеги на зонально-географическом уровне можно отнести к следующим зонально-климатическим типам болот: выпуклых (сфагновых комплексных) и вогнутых очаговых (травяных) болот в суффозионных западинах. Выпуклые болота питаются атмосферными осадками и сложная структура поверхности (гряды, мочажины, озерки, рямы, их разнообразные сочетания) формируются в результате внутриболотного стока (западный склон Северного Басега); развиваются на всех типах поверхности. Вогнутые болота размещаются в неглубоких депрессиях в подгольцовом поясе на небольших террасированных наклоненных в сторону хребта поверхностях (восточный склон Северного Басега).

Известно, что окраска торфа зависит от состава растений торфообразователей и степени разложения. В анализируемых торфяных залежах преобладают различные оттенки бурого (от очень темно-красноватого до охристого), встречаются буровато-черный, реже буровато-серый.

Так, торф ТЗ 7 (в центре болотного массива) характеризуется наиболее темной окраской – буровато-черной, что свидетельствует о высокой степени его разложения и специфике растительности, входящей в состав (рис. 4А). Торф ТЗ 11 и 12 (на окраине болотного массива) отличается очень темной красновато-бурой окраской. Такие темные оттенки в окраске торфа могут быть связаны с наличием в его составе определенных видов растительных остатков, таких как пушица, черника и береза. Эти растения, благодаря высокому содержанию пигментов, способствуют формированию более темной окраски торфа, что является характерной особенностью горных болот на Среднем Урале. В болотном массиве 2 развиваются растительные группировки: вейниково-сабельниково-осоково-сфагновая (ТЗ 9) и осоково-шейхцериево-сфагновая (ТЗ 8). Окраска торфа изменяется от очень темно-красновато-бурого в слое залежи до 20 см и в слоях от 50 до 70 см, до очень темно-бурого на глубинах 20–50 см и 70–130 см. Буроватая окраска торфа указывает на присутствие осоки и сфагновых мхов в процессе его формирования. Торф, состоящий из шейхцерии, на воздухе меняет цвет, темнеет до коричневого оттенка. В болотном массиве 3 преобладает растительность, представленная сабельниковыми, осоковыми и сфагновыми сообществами. Торф здесь отличается буровато-рыжей окраской. Окраска торфа изменяется по глубине залегания: буровато-черная до 20 см, далее до глубины 20–80 см становится красновато-бурой, а глубже вновь буровато-черная.

На восточном склоне окраска торфа сильно варьирует (рис. 4Б). В залежи на более высокой позиции (570 м) торф до глубины 50 см имеет различные оттенки бурого цвета; далее до 100 см торф характеризуется как очень темный красновато-бурый; на глубине 100–180 см торф имеет буровато-черную окраску, а далее до 300 см отмечается чередование очень темной красновато-бурой и буровато-черной окраски вплоть до минерального горизонта. В ТЗ 3 (562 м) также отмечается чередование торфа с очень темной красновато-бурой и буровато-черной окраски с той лишь разницей, что прослой торфа с красноватой окраской меньше по мощности. В торфяной залежи, расположенной в наиболее низкой позиции в пределах болотного массива, торф до 70 см очень темно-бурый, далее до 180 см цвет сменяется на очень темный красновато-бурый, затем идет слой буровато-черного торфа до 230 см и далее снова очень темный красновато-бурый.

Итак, окраска торфа представляет собой сочетание различных бурых оттенков. В пределах всей толщи торфяной залежи происходит изменение окраски торфа. Это свидетельствует о смене основных растений-торфообразователей и косвенно указывает на смену гидротермических условий в ходе развития залежи.

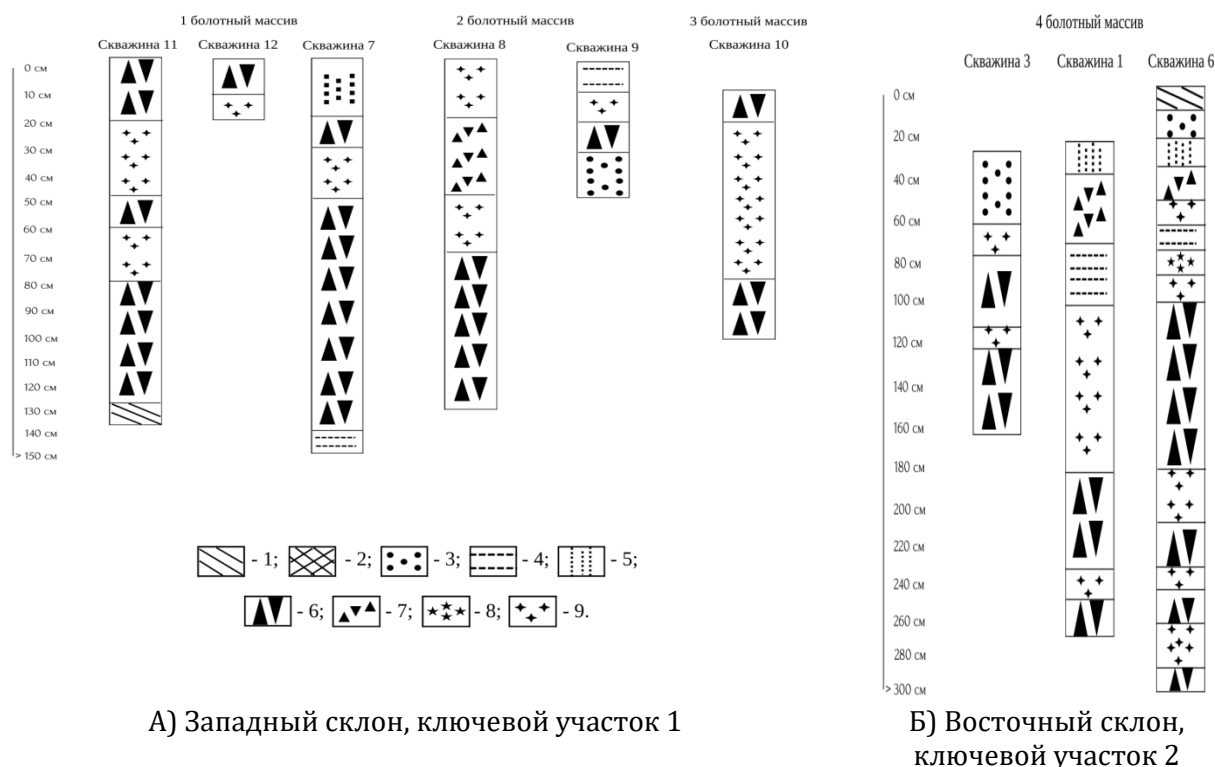


Рисунок 4. Окраска торфа по профилю торфяных залежей.

Условные обозначения: 1 – темно-бурый; 2 – охристо-бурый; 3 – буровато-серый; 4 – очень темно-серый; 5 – интенсивно-бурый; 6 – буровато-черный; 7 – очень темно-бурый; 8 – темно-красновато-бурый; 9 – очень темный красновато-бурый.

Проведен информационно-логический анализ и установлена наиболее характерная специфичная окраска торфа в пределах торфяных залежей (табл. 2). Результаты демонстрируют преобладающие цвета торфа в болотных массивах. В болотном массиве 1 наиболее вероятная окраска торфа изменяется в пределах болотного микроландшафта от темно бурой до интенсивно бурой. В болотном массиве 2 в профилях залежей появляются серые оттенки торфа и наиболее специфичным является буровато-серый и очень темно-бурый торф. В болотном массиве 3 наиболее вероятной окраской является очень темная красновато-бурая. В болотном микроландшафте на восточном склоне специфичной является буровато-черная окраска торфа (ТЗ 6 и 3) и очень темная красновато-бурая (ТЗ 1). Следует отметить, что максимальная степень разброса (неоднородности) характерна для торфа на восточном склоне.

Таблица 2

Результаты информационно-логического анализа по окраске торфа в торфяных скважинах

Склон	Болотный массив	№ скважины	Высота, м н.у.м	Преобладающая окраска торфа
Западный	1	11	498	темно-бурая
		12	520	очень темная красновато-бурая > буровато-черная
		7	525	интенсивно-бурая > очень темно-серая > буровато-черная
	2	8	517	очень темно-бурая > буровато-черная
		9	518	буровато-серая > очень темно-серая
	3	10	492	очень темная красновато-бурая
Восточный	4	3	562	буровато-черная > буровато-серая, очень темная красновато-бурая
		1	556	очень темная красновато-бурая > буровато-черная
		6	570	буровато-черная > охристо-бурая > темно-бурая

Одной из важных характеристик торфа является его влагоемкость. В изучаемых торфяных залежах показатель влагоемкости изменяется в широких пределах даже в пределах отдельных микроландшафтов (рис. 5А). Следует заметить, что в торфяных залежах ближе к периферии болота влагоемкость наибольшая и с большим размахом изменчивости. В торфяных залежах,

сформированных ближе к центру болотного массива, значения влагоемкости менее разбросаны и хорошо группируются вокруг медианы.

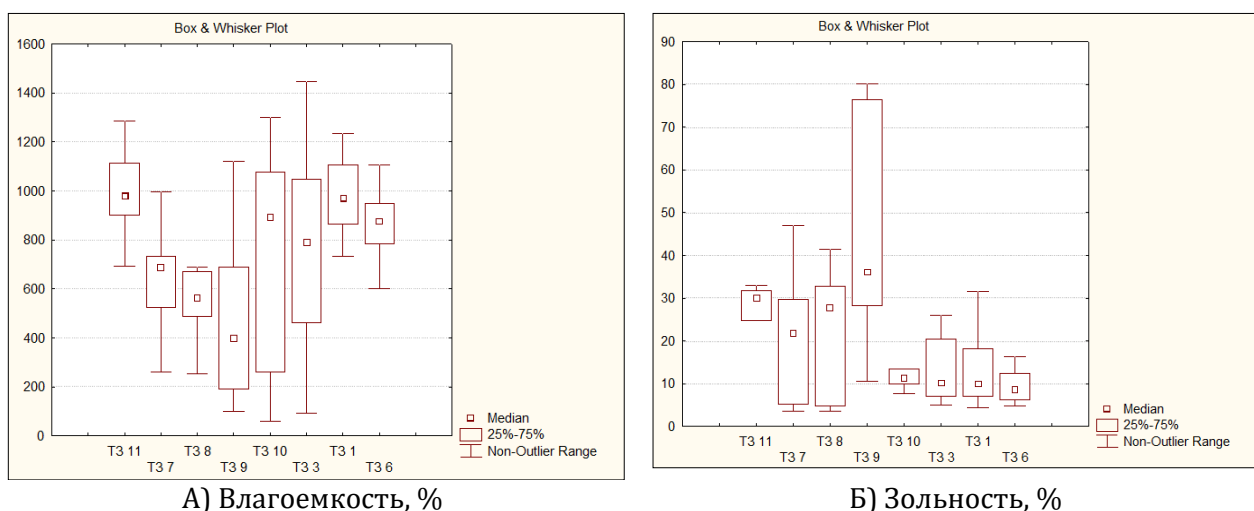


Рисунок 5. Свойства торфа в торфяных залежах (для всей толщи залежи).

В болотном массиве 1 болотного микрорельефа (ТЗ 7) влагоемкость варьирует от 3000% на поверхности до менее 100% на глубине 120 см и глубже (рис. 6А). Следует отметить, что изменение влагоемкости с глубиной в торфяной залежи скважин 7 и 11 диагностирует их принадлежность к переходному типу (Классификация видов торфа ..., 1951). Слой торфа 0–40 см с влагоемкостью 1500–3000% является торфом верховым типа. Далее, до 100 см влагоемкость снижается и варьирует в диапазоне около 1000%, что свойственно влагоемкости торфа переходного типа. На глубине 100–120 см отмечается некоторое возрастание влагоемкости.

Таким образом, болотный массив 1 отличается более или менее хорошо выраженной выпуклостью рельефа – чередуются повышенные (ТЗ 12, 7) и пониженные участки (ТЗ 11). Центр болотного массива расположен восточнее, так как поверхность в центре является выпуклой из-за того, что сфагновые мхи, характерные для этих болот, быстрее нарастают в части болота с минимальной минерализацией вод.

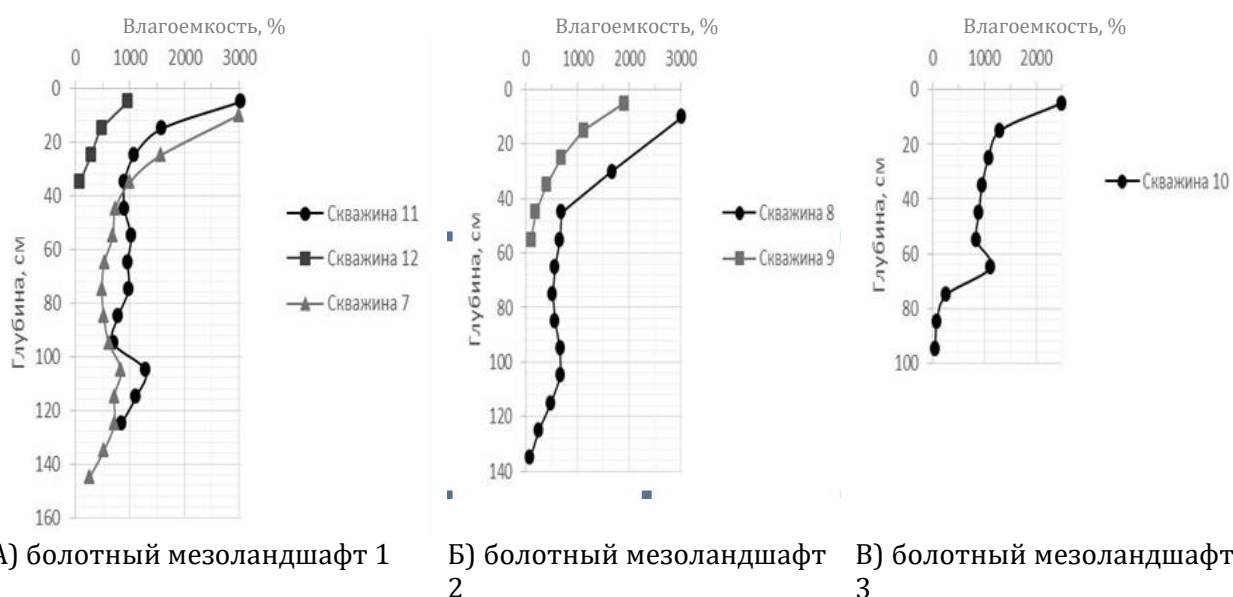


Рисунок 6. Распределение влажности в профиле торфяных залежей на западном склоне.

Изменение влагоемкости торфа с глубиной в скважинах болотного массива 2 позволяет, предположительно, отнести торфяные залежи к низинному типу (рис. 6Б): до 50–60 см залегает слой верхового торфа, а во втором полуметре (до 100–110 см), где влагоемкость с достаточной

стабильностью составляет около 500%, торф относится к низинному типу. Глубже 110 см влагоемкость резко снижается и становится менее 100%, что диагностирует наличие минерального компонента в сочетании с органическим веществом. В профиле торфяной залежи 10 (болотный массив 3) выделяются слои, сформированные по переходному (0–20 см) и по низинному (20–70 см) типу (рис. 6В). Мощности слоев разных типов болотообразования меньше, чем в торфяных залежах, расположенных выше по рельефу. Таким образом, можно предположить меньший возраст этой торфяной залежи.

Анализ изменения влагоемкости торфа по глубине на восточном склоне (рис. 7) позволяет сделать ряд выводов-предположений. В юго-восточной краевой части болота (ТЗ 6) влагоемкость торфа до 280 см изменяется незначительно, в пределах 700–1000%, что позволяет отнести залежь к низинному типу. Более дифференцированы по влагоемкости профили торфяной залежи в центральной и северной краевой части болотного участка (ТЗ 1 и 3, соответственно). Источником минеральных соединений торфа служит привнос минеральных компонентов с паводковыми и грунтовыми водами, воздушная и биогенная миграции. Зольность торфа в торфяных залежах варьирует в широком диапазоне (см. рис. 5Б).

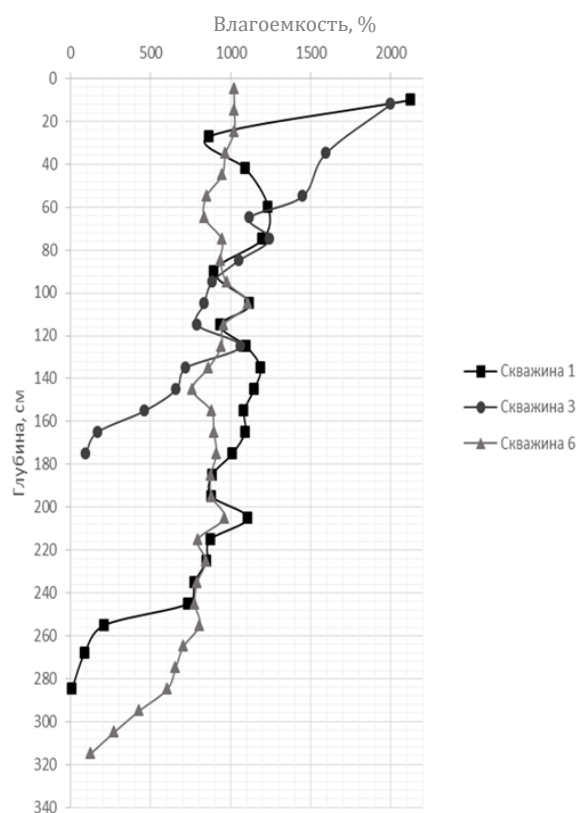
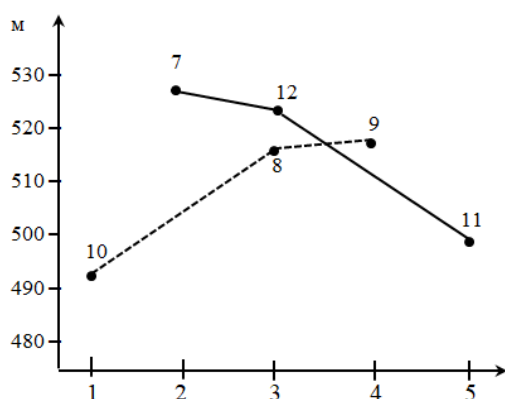


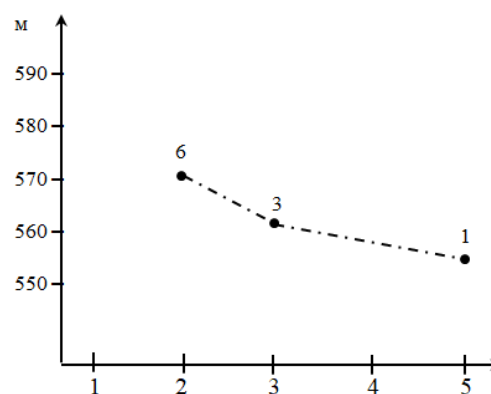
Рисунок 7. Распределение влажности в профиле торфяной залежи на восточном склоне, мезоландшафт 4.

Определена достоверность различий зольности торфа болотных массивов на западном склоне на основании расчета критерия существенности t (критерий Стьюдента) разности средних ($t_{факт} > t_{0,5}$). Это доказывает пестроту гидротермических условий в пределах болотного ландшафта.

Информационно-логический метод позволяет сравнивать сразу несколько выборок. Определены наиболее специфичные состояния зольности торфяных залежей. На западном склоне на части ключевого участка в болотном массиве 1 зольность торфа повышается с уменьшением высоты (рис. 8А, сплошная линия), а в болотных массивах 2 и 3, расположенных несколько южнее, отмечается обратная зависимость: с уменьшением высоты местности зольность торфа снижается (рис. 8А, пунктирная линия). На ключевом участке 2 на восточном склоне в болотном массиве 4 проявляется та же тенденция, что и в болотном массиве 1 (рис. 8Б).



А) западный склон, ключевой участок 1
 — болотный массив 1
 --- болотный массив 3 (ТЗ 10) и 2 (ТЗ 8,



Б) восточный склон, ключевой участок 2
 ---- болотный массив 4

9)

цифры на графиках – номера торфяных залежей;
 цифры на горизонтальной оси – группы шкалы зольности:
 1 – менее 25%; 2 – 15–25%; 3 – 25–35%; 4 – 35–45%; 5 – более 45%.

Рисунок 8. Изменение зольности торфа в верхнем слое торфяной залежи в зависимости от высоты местности.

Определена информационная связь между окраской торфа и его зольностью. Так, на восточном склоне с зольностью торфа < 20% наиболее вероятна охристо-бурая и буровато-серая окраска, на западном склоне окраска торфа при этой же зольности темнее: очень темно-серая и интенсивно-бурая. Для торфа с зольностью 20–45% специфична буровато-черная (восточный склон) и очень темно-бурая (западный склон) окраска. Торф с зольностью > 45% характеризуется близкой окраской торфа: очень темно-бурой и темно-бурой на восточном и западном склонах, соответственно. Наиболее тесная связь между зольностью торфа и его окраской проявляется на западном склоне: общая информативность $T=0,375$ бит, коэффициент эффективности передачи каналов связи $K=0,287$.

Зольность торфа более всего варьирует в пределах профилей на западном склоне (рис. 9).

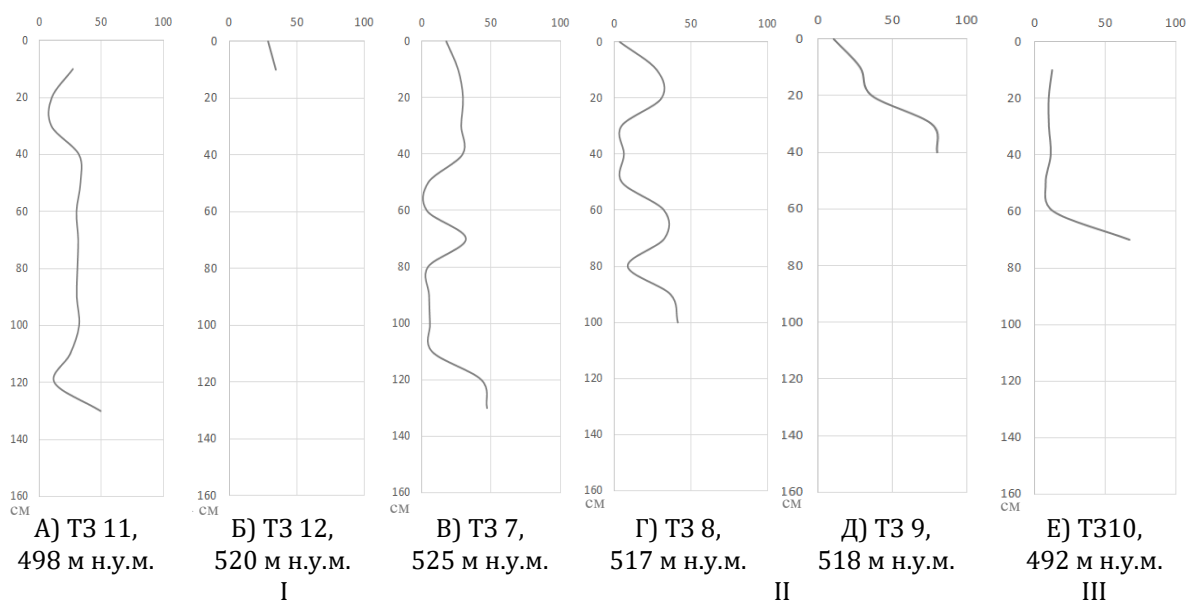


Рисунок 9. Зольность торфа (%) по профилю торфяной залежи (ТЗ) на западном склоне, ключевой участок 1. Обозначения: I – массив 1; II – массив 2; III – массив 3.

На восточном склоне зольность торфа в пределах скважин изменяется иначе, чем на западном склоне (рис. 10). Необходимо отметить, что зольность торфа постепенно с незначительным

варьированием увеличивается с глубиной. В ТЗ 3 на северо-восточном направлении резкое повышение зольности отмечается с глубины 90 см. В ТЗ 1 в юго-западном направлении резкое изменение показателя происходит в слое глубже 160 см, а в ТЗ 6 – на глубине более 230–240 см.

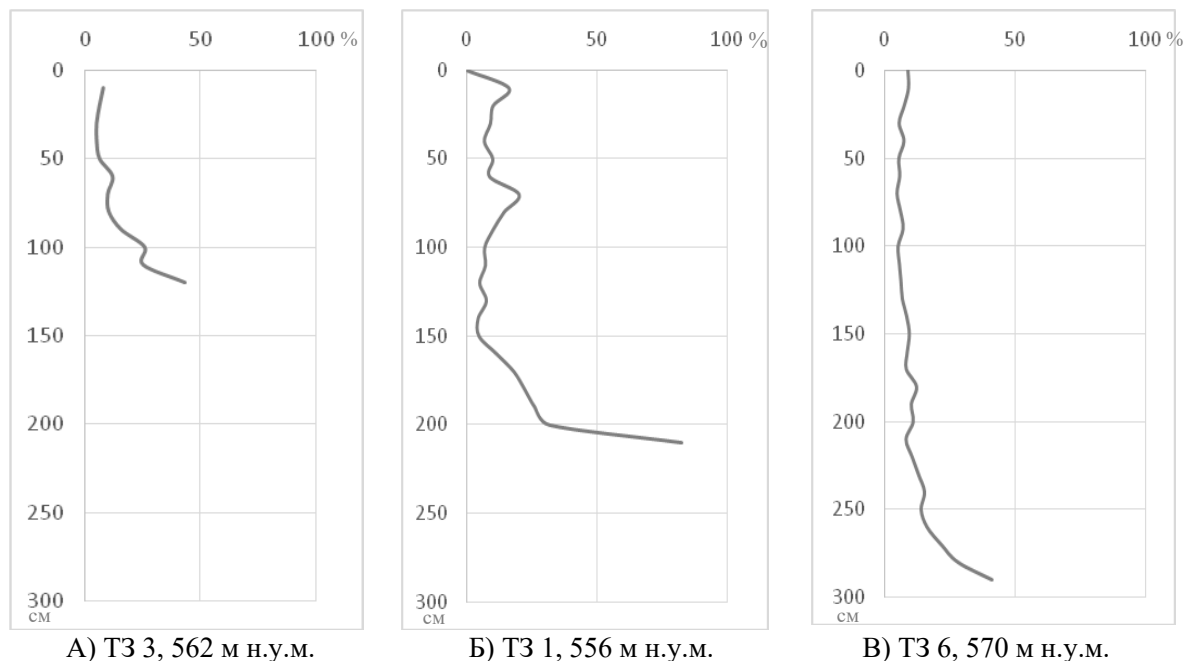


Рисунок 10. Зольность торфа (%) по профилю торфяной залежи (ТЗ) на восточном склоне, ключевой участок 2 (болотный массив 4).

Для диагностики и разделения торфа по типу питания на низинный, верховой и переходный, наиболее информативным показателем является зольность (Кутузова и др., 2014; Курьина и др., 2018; Инишева, 2022).

Исследуемые ТЗ можно отнести к смешанному типу, так как в процессе развития болота происходит смена водно-минерального питания; в пределах ТЗ отмечается смена типа торфонакопления. Неоднородная и повышенная зольность торфа объясняется тем, что болота испытывают влияние вод различного происхождения. Болота на разных стадиях развития могут претерпевать вторичные изменения торфяных пластов, что проявляется в повышенной зольности. Значения зольности более 8–10% соответствует низинному типу торфа. За верхний предел нормальнозольных торфов приняты значения от 10 до 15%. Торф с более высокой зольностью считается сформированным под влиянием экзогенных процессов.

В торфяных залежах мощностью более 100 см отмечается несколько пиков зольности торфа, превышающих пороговое значение. Наличие пиков зольности свидетельствует о дополнительном поступлении минеральных веществ за счет увеличения уровня поверхностного стока, что определяется периодами увеличения влажности климата. В придонном слое торфа повышенная зольность объясняется влиянием подстилающих пород на начальной стадии образования болота. При стабильном водно-минеральном режиме болота (за счет поверхностно-сточного, грунтового и атмосферного питания) формируются, в основном, нормально зольные торфа с зольностью менее 15%. Прослойки торфа с большей зольностью свидетельствуют о периодическом подтоплении поверхности болота.

С помощью информационно-логического анализа установлена достоверная связь между значением зольности и слоем торфа по глубине: общая информативность $T=0,211$ бит; коэффициент $K=0,185$. Наиболее вероятные значения зольности на определенных глубинах могут служить некоторыми границами циклов торфообразования, которые различаются гидротермическими условиями и преобладающими торфообразователями в эти периоды. Так, зольность торфа менее 20% наиболее вероятно обнаружить на глубине более 160 см, а также в слоях 60–70 и 110–120 см. Торф с зольностью 20–45% наиболее специфичен, в первую очередь, для глубины 80–90 см, а во вторую – 110–120 и 130–140 см. Торф с зольностью более 45% чаще отмечается на глубине 130–150, а также 70–80 и 30–50 см.

Обобщая основные характеристики торфа, выделяются следующие типы строения торфяных залежей: на ключевом участке 1 в торфяных залежах с мощностью торфа более 120 см отмечается верховая стадия образования болота (центральная часть болотных массивов 1 и 2 в ТЗ 7 и 8 на глубине 60–80 и 50–80, соответственно). В торфяных залежах меньшей мощности диагностируются низинная и переходно-низинная стадии.

На ключевом участке 2 в торфяных залежах выделяются все стадии образования болот (низинная, переходная, верховая), то есть тип ТЗ – смешанный. Изменение зольности торфа по профилю диагностирует чередование стадий развития болота. Верховая стадия развития болота отмечается на глубине 50–80 см, а с учетом слоев переходного торфа сверху и снизу составляет 30–120 см в ТЗ, сформированных на высоте более 560 м. В торфяной залежи на высоте менее 560 м слой верхового торфа встречается на глубине 160–200 см, а с учетом слоев переходного торфа – 130–210 см. Выше и ниже выделенные слои верхового торфа обрамляет торф низинного и переходно-низинного типа.

ВЫВОДЫ

1. Растительность горных болот на Среднем Урале (хребет Басеги) представлена травяно-сфагновыми фитоценозами. Древесный ярус в болотных массивах формируется, преимущественно, берёзой пушистой и елью. Кустарниковый ярус представлен, в основном, пушицей влагалищной и клюквой болотной. В структуре растительности преобладает травяно-кустарничковый и мохово-лишайниковый ярусы. При большом разнообразии видов растений в травяно-кустарничковом ярусе выделяются следующие виды растений-торфообразователей: осока топяная, осока весенняя, осока бутылчатая, сабельник болотный, вейник пурпурный, черника обыкновенная и черника болотная. В мохово-лишайниковом ярусе преобладают виды сфагнум магелланский, сфагнум обманчивый, сфагнум береговой и кукушкин лен. Растительный покров является гетерогенным, так как сочетает в своем составе разные по трофности растительные сообщества.

2. Болотные массивы на склонах разных экспозиций отличаются по особенностям высоты залегания; расчленение рельефа влияет на расположение и развитие болот. Геоморфологическая позиция торфяника обуславливает форму ложа и его уклон, от чего в свою очередь зависит распределение торфа по площади и глубине. На западном склоне рельеф болот неровный, микрорельеф бугристо-мочажинный; болотные массивы имеют уклон с севера на юг; общий перепад высот составляет около 30 м; форма болотных массивов вытянутая. На восточном склоне болотный массив значительно меньше по площади, поверхность болотного массива понижается с северо-востока на юго-запад и с востока на запад; перепад высот 14 м; массив изометричный по форме, то есть длина примерно равна ширине. Рисунок болотного массива зависит от рельефа местности. Высокие показатели вертикального расчленения (более 10 м) в сочетании с уклоном создают условия для развития болота вертикально (ключевой участок 2), в обратном же случае, болото развивается как вертикально, так и горизонтально (ключевой участок 1).

3. Торфяные залежи обладают мощностью от 40 до 150 см на западном склоне и от 180 до 325 см на восточном склоне хребта. Степень разложения торфа различна в профиле залежи, при этом в поверхностных слоях она составляет около 25%, постепенно увеличиваясь до 50% в более глубоких слоях. Исследованные болотные массивы относятся к переходному типу по их генезису, тогда как по уровню питания их можно отнести, в большей степени, к мезотрофным. Отмечается периферически-олиготрофный ход развития болотных систем.

4. Установлена неоднородность окраски торфа; изменения в окраске свидетельствуют о смене основных растений-торфообразователей в период формирования торфяной залежи. Анализ торфяных залежей показывает неравномерность отложений растительных остатков: их различия по мощности и степени разложения. Зольность торфа в верхнем слое торфяной залежи изменяется в зависимости от высоты местности в пределах болотного массива.

5. Определены региональные и зональные особенности торфяных залежей на западном макросклоне Среднего Урала: роль геоморфологического фактора значительна, что влияет на разные формы болотных массивов на склонах западной и восточной экспозиции в пределах хребта Басеги; присутствие сфагнума (в том числе, в торфе низинного типа); высокая зольность торфов, особенно придонных; закономерность в строении торфяной залежи – низинный торф залегает в основании, верховые – чаще в верхней части залежи; направленность развития торфяников – от низинного (эвтрофного) через переходный (мезотрофный) к верховому (олиготрофному) типу; смена эвтрофной

и мезотрофной растительности на олиготрофную происходит вначале на периферии болота, а затем в центральной части болотного массива.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы признательны д.б.н. Т.Г. Ивченко, заместителю директора по научной работе Н.А. Зенковой, обучающимся Н.Н. Ковязину, П.Ш. Сайрановой, Д.Д. Сивковой за участие в экспедиции, помощь в отборе образцов и сборе данных; к.г.н. М.А. Кондратьевой и к.б.н. Е.С. Лобановой за критические замечания, высказанные при подготовке статьи к печати; к.б.н. А.Н. Чащину за помощь в создании картографических моделей болотных массивов.

ЛИТЕРАТУРА

Андриенко Т.Л. Типы болот Украинских Карпат // Типы болот СССР и принципы их классификации. / Редколлегия: Т.Г. Абрамовой, М.С. Боч, Е.А. Галкиной. Ленинград: Санкт-Петербургская издательско-книготорговая фирма «Наука», 1974. С. 110–115.

Андропова М.И. Стандартные цветовые шкалы для полевого определения и кодирования окраски почв. Москва: РосНИИземпроект, 1992.

Атлас растительных остатков / Под ред. С.Н. Тюренова. Москва, Ленинград: Наука, 1959. 228 с.

Баишева Э.З., Мулдашев А.А., Мартыненко В.Б., Широких П.С., Минаева Т.Ю. Анализ флоры высших растений Тюлюкского болота (Южный Урал, природный парк «Иремель») // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2012. Том 14. № 1–7. С. 1684–1688.

Волкова И.И., Байков К.С., Сысо А.И. Болота Кузнецкого Алатау как естественные фильтры природных вод // Сибирский экологический журнал. 2010. Том 7. № 3. С. 379–388.

Вомперский С.Э., Сирин А.А., Цыганова О.П., Валяева Н.А., Майков Д.А. Болота и заболоченные земли России: попытка анализа пространственного распределения и разнообразия // Известия Российской академии наук. Серия географическая. 2005. № 5. С. 39–50.

Гвоздецкий Н.А., Голубчиков Ю.Н. Горы. Москва: Мысль, 1987. 400 с.

Гончарова Н.Н. Болота Приполярного Урала // Западно-Сибирские торфяники и цикл углерода: прошлое и настоящее: Материалы Пятого международного полевого симпозиума (Ханты-Мансийск, 19–29 июня 2017 г.). Ханты-Мансийск: Национальный исследовательский Томский государственный университет, 2017. С. 12–14.

Горчаковский П.Л. Растительный мир высокогорного Урала. Москва: «Наука», 1975. С. 13–67.

Долгушин Л.Д., Осипова Г.Б. Ледники. Москва: Мысль, 1989. 448 с.

Жангуров Е.В., Дубровский Ю.А., Дёгтева С.В., Дымов А.А. Эколого-генетические особенности формирования торфяных почв горной ландшафтной зоны Северного Урала (Печоро-Илычский заповедник) // Лесоведение. 2017. № 2. С. 94–101.

Жиров А.И., Кирюшкин В.Н. Влияние геолого-геоморфологических условий на структуру болотных систем // Вестник Санкт-Петербургского университета. Серия 7. Геология. География. 2003. № 1. С. 132–136.

Иванов К.Е. Основы гидрологии болот лесной зоны. Ленинград: Гидрометеиздат, 1957. 499 с.

Ивченко Т.Г., Денисенков В.П. Особенности растительности и торфяной залежи болота на хребте Зигальга (Южный Урал) // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2012. Том 14. № 1(5). С. 1244–1248.

Ивченко Т.Г., Знаменский С.Р. Экологическая структура растительных сообществ ключевых болот горно-таежного пояса Южного Урала // Экология. 2016. № 5. С. 346–352. <https://doi.org/10.7868/S0367059716050048>

Инишева Л.И. Предложения к классификации торфяных почв // Почвоведение. 2022. № 2. С. 168–175. <https://doi.org/10.31857/S0032180X22020071>

Калужный И.Л. Общие черты формирования гидрохимического режима основных типов болот России // Метеорология и гидрология. 2018. № 8. С. 72–81.

Кац Н.Я. Болота земного шара / [АН СССР. Моск. о-во испытателей природы]. Москва: Наука, 1971. 295 с.

Классификация видов торфа и торфяных залежей. Москва: Главторффонд, 1951. 68 с.

Куликова Г.Г. Основные геоботанические методы изучения растительности. Москва, 2006. Часть 2. 152 с.

Курына И.В., Веретенникова Е.Э., Ильина А.А., Дюкарев Е.А., Головацкая Е.А., Смирнов С.В. Реконструкция условий формирования торфяной залежи низинного болота на юге таежной зоны Западной Сибири // Известия

Российской академии наук. Серия географическая. 2018. № 4. С. 66–76.
<https://doi.org/10.1134/S2587556618040106>

Кутузова Н.Д., Голубева О.В., Куст Г.С., Розов С.Ю., Розонова М.С. Характеристика торфяных почв Дубненского болотного массива // Роль почв в биосфере: Труды Института экологического почвоведения МГУ имени М.В. Ломоносова / под ред. Н.О. Ковалевой. Выпуск 14. Москва: МАКС Пресс, 2014. С. 105–133.

Лапшина Е.Д. Некоторые принципы и подходы к классификации болотных ландшафтов // Вестник Томского государственного университета. 2003. № 7. С. 161–169.

Лапшина Е.Д., Игнатова Е.А., Игнатов М.С., Скучас Ю.В. К изучению бриофлоры высокогорий Приполярного Урала (Ханты-Мансийский автономный округ) // Материалы международной Бриологической конференции, посвященной 100-летию со дня рождения А.Л. Абрамовой (Санкт-Петербург, 12–16 октября 2015 г.). Санкт-Петербург: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2015. С. 96–100.

Летопись природы «Заповедник «Басеги». Гремячинск, 1997. 180 с.

Пивоварова Е.Г. Решение вопросов пространственной и временной вариации агрохимических свойств почв с помощью информационно-логического анализа // Агрохимия. 2006. № 8. С. 77–84.

Пивоварова Е.Г., Макарычев С.В., Гейфе И.В. Математические модели эталонов почв борových ложбин древнего стока Алтайского края // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2025. № 2(244). С. 22–28. <https://doi.org/10.53083/1996-4277-2025-244-2-22-28>

Платонов Г.М. Болота предгорий Западного Саяна // Особенности болотообразования в некоторых лесных и предгорных районах Сибири и Дальнего Востока. Москва, 1965. С. 35–46.

Полевая геоботаника. Москва; Ленинград: 1964. 336 с.

Пьявченко Н.И. Торфяные болота, их природное и хозяйственное значение. Москва: Наука, 1985. 152 с.

Русский В.И. О строении торфяных залежей уральских месторождений // Известия Уральского государственного горного университета. 2001. Вып. 13. С. 54–58.

Рычкова И.В., Самофалова И.А. Экологические функции горных болотных экосистем / Экологическая безопасность в условиях антропогенной трансформации природной среды [Электронный ресурс]: материалы всероссийской научной конференции молодых ученых, посвященной памяти Н.Ф. Реймерса и Ф.Р. Штильмарка (г. Пермь, 20–21 апреля 2023 г.) / под ред. С.А. Бузмакова; Пермский государственный национальный исследовательский университет. Пермь, 2023. С. 189–193.

Самофалова И.А. Информационно-логический анализ дифференциации почвенного покрова высотных геосистем на Среднем Урале // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2017. № 11(157). С. 105–114.

Самофалова И.А. Геомоделирование почвенного покрова на основе обобщенного пространственного анализа территории заповедника «Басеги» (Средний Урал) // ИнтерКарто. ИнтерГИС. 2020а. Том 26. № 4. С. 131–146. <https://doi.org/10.35595/2414-9179-2020-4-26-131-146>

Самофалова И.А. Использование бассейнового подхода для изучения дифференциации растительного и почвенного покровов (хребет Басеги, Средний Урал) // География и природные ресурсы. 2020б. № 1(160). С. 175–184. [https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2020-1\(175-184\)](https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2020-1(175-184))

Самофалова И.А. Почва как компонент охраняемых ландшафтов в системе ООПТ (на примере ФГБУ «Государственный заповедник «Басеги») // Агрохимический вестник. 2021. № 1. С. 19–27. <https://doi.org/10.24412/1029-2551-2021-1-004>

Самофалова И.А. Пространственно-структурная организация почвенного покрова западного макросклона Среднего Урала. Автореферат диссертация ... д-р биол. наук. Пермь, 2023. 34 с.

Самофалова И.А., Кондратьева М.А., Сайранова П.Ш., Ивченко Т.Г., Зенкова Н.А. Горные болота заповедника «Басеги» (Средний Урал) // Природа Басег: труды Государственного заповедника «Басеги». Вып. 6: сборник статей. Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2021. С. 6–25.

Сарманова З.Р., Самофалова И.А. Почвенный покров болотного массива на западном склоне горы Северный Басег // Антропогенная трансформация природной среды. 2017. № 3. С. 196–198.

Сивкова Д.Д., Слесарев Н.В. Анализ распространения заболоченных территорий в лесных массивах хребта Басеги по данным дистанционного зондирования // Молодёжная наука – 2023: технологии и инновации. Материалы Всероссийской научно-практической конференции молодых учёных, аспирантов и студентов, посвящённой Десятилетию науки и технологий в Российской Федерации. В 3-х томах. Том 1. Науч. редколлегия Э.Ф. Сатаев [и др.]. Пермь: Изд-во «ОТ и ДО», 2023. С. 372–375.

Сорочкин В.М. О применении информационно-логического метода в почвенных исследованиях // Почвоведение. 1977. № 9. С. 131–139.

Справочник по торфу / Научные редакторы: И.Ф. Ларгин, С.С. Корчунов, Л.М. Малков и др.; Редколлегия: А.В. Лазарев, С.С. Корчунов. Москва: Недра, 1982. 760 с.

Сторожева М.М. Материалы к характеристике болот восточного склона Северного Урала и Зауралья // Труды Института биологии УФАИ СССР. Свердловск: Уральский Филиал АН СССР, 1960. Вып. 20. 53 с.

Тишков А.А., Грачева Р.Г., Константинов Е.А., Самусь А.В. Опорный разрез верхового болота Валдая как источник палеоэкологической и палеоклиматической информации // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2023. Том 509. № 1. С. 105–113. <https://doi.org/10.31857/S2686739722602654>

Трифонов Т.А. Формирование почвенного покрова гор: геосистемный аспект // Почвоведение. 1999. № 2. С. 174–181.

Шадрина Н.И. О связи геоморфологических условий с характером растительности и торфонакоплением болотных урочищ восточных предгорий Среднего Урала // Типы болот СССР и принципы их классификации. / Редколлегия: Т.Г. Абрамовой, М.С. Боч, Е.А. Галкиной. Ленинград: Санкт-Петербургская издательско-книготорговая фирма «Наука», 1974. С. 162–166.

Borgmark A. Holocene climate variability and periodicities in south-central Sweden, as interpreted from peat humification analysis // Holocene. 2005. Vol. 15. No. 3. P. 387–395. <https://doi.org/10.1191/0959683605hl816rp>

Broll G., Keplin B. Mountain ecosystems: studies in treeline ecology. Berlin; Heidelberg: Springer, 2005. 354 p.

Wheeler B.D., Proctor M.C.F. Ecological gradients, subdivisions and terminology of north-west European mires // Journal of Ecology. 2000. Vol. 88. No. 2. P. 187–203. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2745.2000.00455.x>

Yeloff D., Mauquoy D. The influence of vegetation composition on peat humification: implications for paleoclimatic studies // Boreas. 2006. Vol. 35. No. 4. P. 662–673. <https://doi.org/10.1111/j.1502-3885.2006.tb01172.x>

Поступила в редакцию 12.05.2025

Принята 18.09.2025

Опубликована 31.10.2025

Сведения об авторах:

Рычкова Ирина Владимировна – аспирант кафедры агрохимии и почвоведения ФГБОУ ВО «Пермский государственный аграрно-технологический университет имени академика Д.Н. Прянишникова» (г. Пермь, Россия); Rychkova-IV@mail.ru

Самофалова Ираида Алексеевна – доктор биологических наук, доцент, профессор кафедры агрохимии и почвоведения ФГБОУ ВО «Пермский государственный аграрно-технологический университет имени академика Д.Н. Прянишникова» (г. Пермь, Россия); samofalovairaida@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-8726-8269>

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.



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

Characteristic features of peat deposits of mountain mires on the western macroslope of the Middle Urals (Basegi Ridge)

© 2025 I. V. Rychkova, I. A. Samofalova 

Perm State Agro-Technological University named after academician D.N. Prianishnikov, Petropavlovskaya str., 23, Perm, Russia. E-mail: Rychkova-IV@mail.ru; samofalovairaida@mail.ru

The aim of the study. To identify the characteristic features of peat deposits of mountain mires of the Middle Urals.

Location and time of the study. The study was conducted in 2018–2022 in the protected area "Basegi State Nature Reserve" (Gremyachinsky Urban District, Perm Territory), which includes the Basegi Ridge (58°45'–59°00' N, 58°15'–58°38' E). The study was carried out within the boundaries of the two catchment funnels in two key areas located on the slopes of the western and eastern exposures of the ridge on the Severny Basegi Mount.

Methods. Peat deposits were the object of the study. The following methods were used: field routes, comparative geography, GIS technologies, indicator links, statistics (descriptive statistics, information and logical analysis), cartographic, geomodeling. Source materials: topographic maps at the scale of 1:25000, prepared using the SAS-

Planet program, space images (remote sensing satellites SPOT-6 and ResursP of 14.08.2014 and 27.09.2014) with a resolution of up to 1.5 m. Material processing and data analysis were carried out using GIS MapInfo Professional. Digital maps of the relief, peat thickness in the mire massifs were compiled. Geobotanical observations were carried out in the mire massifs of the Basegi Ridge. On the western slope the study was carried out within the boundaries of three mire massifs, whereas on the eastern slope within one mire massif. Peat deposits (9 pcs. and 3 pcs. respectively) were drilled to collect peat samples at 10 cm intervals throughout the total peat layer. The location of the boreholes was planned taking into account the vegetation cover on the mire mesolandscape along the "center - periphery" line and the main plant formations. Peat samples were analyzed for moisture, ash content, degree of peat decomposition; pH; peat color was determined according to a standard color scale.

Results. The vegetation of the mires was represented by grass-sphagnum phytocenoses. The geobotanical description of the vegetation cover of the mire massifs demonstrated the heterogeneity of the mire biotopes. The mire massifs are shallow, with a low standing of the mire water level (22-50 cm). The thickness of the peat deposit varied from 40 to 150 cm on the western slope and from 180 to 325 cm on the eastern slope of the ridge. The replacement of eutrophic and mesotrophic vegetation by oligotrophic occurred first on the mire periphery and then in the central part, which is typical for mire systems formed in highly rugged relief. Mire massifs on the slopes of different exposures differ in altitude, planned configuration of the mire massifs, their size and spatial location. Peat had various shades of brown color (from very dark red to ochre), brownish-black, less often brownish-gray. Within the thickness of the peat deposit, the color of the peat changed, which indicating the change in the main peat-forming plants. A specific peat color was determined for each mire massif. The highest water-holding capacity with the maximum degree of scattering is noted in peat deposits on the periphery of the mire massifs. The ash content of peat varied from low-ash to high-ash. A close relationship was noted between the ash content and the color of peat, especially on the western slope of the ridge.

Conclusions. The vegetation structure of the studied mires is dominated by grass-shrub and moss-lichen layers. The vegetation cover is heterogeneous, since it combines plant communities of different trophicity. The pattern of the mire massif depends on the terrain. High rates of vertical dissection (more than 10 m) combined with a slope provide conditions for the development of a vertical mire (key area 2), otherwise, the mire develops both vertically and horizontally (key area 1). Peat deposits are heterogeneous in color. Peat analysis showed uneven deposits of plant residues, their differences in thickness and degree of decomposition. The degree of peat decomposition varies depending on the depth, in the surface layers being about 25%, gradually increasing to 50% in deeper layers. The studied mire massifs belong to the transitional type by their genesis, by the level of nutrition they can be attributed to mesotrophic. A peripheral-oligotrophic development of the mire systems is observed. Regional and zonal features of peat deposits on the western macroslope of the Middle Urals were determined: the role of the geomorphological factor is significant, which affects different forms of mire massifs on the slopes of western and eastern exposures; the presence of sphagnum (including in lowland peat); high ash content of peats, and especially high ash content of bottom peats. A pattern in the structure of a peat deposit was observed: lowland peat occurs at the base, whereas high-moor peat occurs more often in the upper part of the deposit. Peatland develops from lowland (eutrophic) through transitional (mesotrophic) to high-moor (oligotrophic) type; a change from eutrophic and mesotrophic vegetation to oligotrophic occurs first on the periphery of a mire and then in its central part.

Keywords: mountain mires; the Middle Urals; peat deposits; phytocenosis; peat; ash content; moisture; information-logical analysis.

How to cite: Rychkova I.V., Samofalova I.A. Characteristic features of peat deposits of mountain mires on the western macroslope of the Middle Urals (Basegi Ridge). *The Journal of Soils and Environment*. 2025. 8(4). e314. DOI: [10.31251/pos.v8i4.314](https://doi.org/10.31251/pos.v8i4.314) (in Russian with English abstract).

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors are grateful to Doctor of Biological Sciences T.G. Ivchenko, Deputy Director for Research N.A. Zenkova, and students N.N. Kovyazin, P.Sh. Sayranova, and D.D. Sivkova for their participation in the field expedition and assistance in collecting samples and data; Candidate of Geographical Sciences M.A. Kondratieva and Candidate of Biological Sciences E.S. Lobanova for their critical comments during the preparation of the article for publication; and Candidate of Biological Sciences A.N. Chashchin for his assistance in developing the cartographic models of the mire massifs.

REFERENCES

- Andrienko T.L. Types of swamps of the Ukrainian Carpathians. In book: Types of swamps of the USSR and principles of their classification. Editorial board: T.G. Abramova, M.S. Boch, E.A. Galkina. Leningrad: St. Petersburg publishing and bookselling firm «Nauka», 1974. P. 110–115. (in Russian).
- Andronova M.I. Standard color scales for field determination and coding of soil color. Moscow: RosNIIZemproekt, 1992. (in Russian).

- Atlas of plant residues / S.N. Tyuremnov (ed.). Moscow, Leningrad: Nauka Publ., 1959. 228 p. (in Russian).
- Baisheva E.Z., Muldashev A.A., Martynenko V.B., Shirokikh P.S., Minayeva T.Yu. The analysis of flora of vascular plants and bryophytes of the Tjuljukskoe mire (Southern Urals mts., nature park "Iremel"). *Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2012. Vol. 14. No. 1–7. P. 1684–1688. (in Russian).
- Volkova I.I., Baikov K.S., Syso A.I. Kuznetsk Alatau mires as filters for natural waters. *Contemporary Problems of Ecology*. 2010. Vol. 3. No. 3. P. 265–271. <https://doi.org/10.1134/S1995425510030021>
- Vompersky S.E., Sirin A.A., Tsyganova O.P., Valyaeva N.A., Maikov D.A. Peatlands and paludified lands of Russia: attempt of analyses of spatial distribution and diversity. *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Seriya geograficheskaya*. 2005. No. 5. P. 39–50. (in Russian).
- Gvozdetsky N.A., Golubchikov Yu.N. *Mountains*. Moscow: Mysl, 1987. 400 p. (in Russian).
- Goncharova N.N. Mires of The Subpolar Ural. In book: *West Siberian peatlands and carbon cycle: past and present. Proceedings of the Fifth international field symposium (Khanty-Mansiysk, 19–29 June, 2017)*. Khanty-Mansiysk: National Research Tomsk State University, 2017. P. 12–14. (in Russian).
- Gorchakovskiy P.L. *Plant life of the high-mountain Urals* Moscow: Nauka Publ., 1975. P. 13–67. (in Russian).
- Dolgushin L.D., Osipova G.B. *Glaciers*. Moscow: Mysl, 1989. 448 p. (in Russian).
- Zhangurov E.V., Dubrovskii Yu.A., Degteva S.V., Dymov A.A. Eco-genetic specificities of peat soils formation in montane realms in Northern Ural (Pechora-Ilych Nature Reserve). *Lesovedenie*. 2017. No. 2. P. 94–101. (in Russian).
- Zhirov A.I., Kirushkin V.N. The influence of geological and geomorphological conditions on bog systems structures. *Vestnik of Saint Petersburg University. Series 7. Geology. Geography*. 2003. No. 1. P. 132–136. (in Russian).
- Ivanov K.E. *Fundamentals of hydrology of forest zone swamps*. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1957. 499 p. (in Russian).
- Ivchenko T.G., Denisenkov V.P. Peculiarity of The Vegetation and peat deposit of The Mire on The Ridge Zigalga (South Ural). *Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2012. Vol. 14. No. 1(5). P. 1244–1248. (in Russian).
- Ivchenko T.G., Znamenskiy S.R. Ecological structure of plant communities on spring fens in the mountain taiga belt of the Southern Urals. *Russian Journal of Ecology*. 2016. Vol. 47. No. 5. P. 453–459. <https://doi.org/10.1134/S1067413616050040>
- Inisheva L.I. Proposals for the Classification of Peat Soils. *Eurasian Soil Science*. 2022. Vol. 55. No. 2. P. 147–153. <https://doi.org/10.1134/S1064229322020077>
- Kalyuzhny I.L. General features of formation of hydrochemical regime for the main types of bogs in Russia. *Meteorologiya i Gidrologiya*. 2018. No. 8. P. 72–81. (in Russian).
- Katz N.Ya. *Swamps of the globe* / [USSR Academy of Sciences. Moscow Society of Naturalists]. Moscow: Nauka Publ., 1971. 295 p. (in Russian).
- Classification of types of peat and peat deposits*. Moscow: Glavtorffond, 1951. 68 p. (in Russian).
- Kulikova G.G. *Basic geobotanical methods of studying vegetation*. Moscow, 2006. Part 2. 152 p. (in Russian).
- Kurina I.V., Veretennikova E.E., Il'ina A.A., Dyukarev E.A., Golovatskaya E.A., Smirnov S.V. Reconstruction of conditions of formation of the eutrophic peatland deposits in south of the taiga zone of Western Siberia. *Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Biological Series*. 2018. No. 4. P. 66–76. (in Russian). <https://doi.org/10.1134/S2587556618040106>
- Kutuzova N.D., Golubeva O.V., Kust G.S., Rozov S.Yu., Rozonova M.S. Characteristics of peat soils of the Dubna bog massif. In book: *The role of soils in the biosphere. Transactions of the Institute of Ecological Soil Science of Moscow State University named after M.V. Lomonosov* / edited by N.O. Kovaleva. Issue 14. Moscow: MAKSS Press, 2014. P. 105–133. (in Russian).
- Lapshina E.D. Some principles and approaches to the classification of marsh landscapes. *Tomsk State University Journal*. 2003. No. 7. P. 161–169. (in Russian).
- Lapshina E.D., Ignatova E.A., Ignatov M.S., Skuchas Yu.V. Sphagnum mosses in vegetation cover of highlands in the Sub-Polar Ural, Khanty-Mansiysk Autonomous District. *Proceedings of the International Bryological Conference dedicated to the 100th anniversary of the birth of A.L. Abramova (St. Petersburg, 12–16 October, 2015)*. St. Petersburg: «LETI» Publishing House, 2015. P. 96–100. (in Russian).
- Chronicle of nature «Basegi Nature Reserve»*. Gremyachinsk, 1997. 180 p. (in Russian).

- Pivovarova E.G. Studying the spatial and temporal variation of agrochemical soil properties using information-logical analysis. *Agrokhimia*. 2006. No. 8. P. 77–84. (in Russian).
- Pivovarova E.G., Makarychev S.V., Gefke I.V. Mathematical models of soil reference standards of pine-forest hollows of ancient streamflows in the Altai region. *Bulletin of Altai State Agricultural University*. 2025. No. 2(244). P. 22–28. (in Russian). <https://doi.org/10.53083/1996-4277-2025-244-2-22-28>
- Platonov G.M. Swamps of the foothills of the Western Sayan. In book: Features of swamp formation in some forest and foothill areas of Siberia and the Far East. Moscow, 1965. P. 35–46. (in Russian).
- Field Geobotany. Moscow; Leningrad, 1964. 336 p. (in Russian).
- Pyavchenko N.I. Peat bogs, their natural and economic significance. Moscow: Nauka Publ., 1985. 152 p. (in Russian).
- Russkiy V.I. On the structure of peat deposits of the Ural fields. *News of the Ural State Mining University*. 2001. Issue 13. P. 54–58. (in Russian).
- Rychkova I.V., Samofalova I.A. Ecological functions of mountain swamp ecosystems. In book: Environmental Safety in the Context of Anthropogenic Transformation of the Natural Environment [Electronic resource]. Proceedings of the All-Russian Scientific Conference of Young Scientists Dedicated to the Memory of N.F. Reimers and F.R. Shtilmark (Perm, 120–21 April, 2023) / edited by S.A. Buzmakov; Perm State National Research University. Perm, 2023. P. 189–193. (in Russian).
- Samofalova I.A. Information-logical analysis of soil cover differentiation of the altitude geosystems in the Middle Urals. *Bulletin of Altai State Agricultural University*. 2017. No. 11(157). P. 105–114. (in Russian).
- Samofalova I.A. Geomodeling of soil cover on the basis of generalized spatial analysis territories of the «Basegi» reserve (Middle Ural). *InterCarto. InterGIS*. 2020a. Vol. 26. No. 4. P. 131–146. (in Russian). <https://doi.org/10.35595/2414-9179-2020-4-26-131-146>
- Samofalova I.A. Using the basin approach to study the differentiation of vegetation and soil cover (Basegi ridge, Middle Urals). *Geografia i prirodnye resursy*. 2020b. No. 1(160). P. 175–184. (in Russian). [https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2020-1\(175-184\)](https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2020-1(175-184))
- Samofalova I.A. Soil as a component of protected landscapes in the system of specially protected natural territories (on the example “Basegi” state reserve). *Agrochemical Herald*. 2021. No. 1. P. 19–27. (in Russian). <https://doi.org/10.24412/1029-2551-2021-1-004>
- Samofalova I.A. Spatial and structural organization of the soil cover of the western macroslope of the Middle Urals. Abstract of the Dissertation ... Dr. of Biol. Sci. Perm, 2023. 34 p. (in Russian).
- Samofalova I.A., Kondratieva M.A., Sayranova P.Sh., Ivchenko T.G., Zenkova N.A. Mountain bogs of the Basegi Nature Reserve (Middle Urals). In book: Nature of Basegi. Works of the Basegi State Nature Reserve. Issue 6: collection of articles. Perm: Publishing house of Perm. national research polytechnic university, 2021. P. 6–25. (in Russian).
- Sarmanova Z.R., Samofalova I.A. Soil cover of a bog array on the western slope of the Northern Basegi. *Anthropogenic Transformation of Nature*. 2017. No. 3. P. 196–198. (in Russian).
- Sivkova D.D., Slesarev N.V. Analysis of the distribution of wetlands in the forested areas of the Basegi ridge based on remote sensing data. In book: Youth Science – 2023: Technologies and Innovations. Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference of Young Scientists, Postgraduates and Students Dedicated to the Decade of Science and Technology in the Russian Federation. In 3 volumes. Vol. 1. Scientific. editorial board E.F. Sataev [et al.]. Perm: Publishing house «OT i DO», 2023. P. 372–375. (in Russian).
- Sorochkin V.M. On the application of the information-logical method in soil research. *Pochvovedenie*. 1977. No. 9. P. 131–139. (in Russian).
- Handbook of peat / Scientific editors: I.F. Largin, S.S. Korchunov, L.M. Malkov et al.; Editorial Board: A.V. Lazarev, S.S. Korchunov. Moscow: Nedra, 1982. 760 p. (in Russian).
- Storozheva M.M. Materials for the characterization of the swamps of the eastern slope of the Northern Urals and Trans-Urals. Proceedings of the Institute of Biology of the Ural Branch of the USSR Academy of Sciences. Sverdlovsk: Ural Branch of the USSR Academy of Sciences, 1960. Issue 20. 53 p. (in Russian).
- Tishkov A.A., Gracheva R.G., Konstantinov E.A., Samus A.V. The key section of the Valdai peat bog as a source of paleoecological and paleoclimatic information. *Doklady Earth Sciences*. 2023. Vol. 509. No. 1. P. 345–352. <https://doi.org/10.31857/S2686739722602654>
- Trifonova T.A. Formation of the soil mantle in mountains: the geosystem aspect. *Pochvovedenie*. 1999. No. 2. P. 174–181. (in Russian).

Shadrina N.I. On the relationship between geomorphological conditions and the nature of vegetation and peat accumulation in bog areas of the eastern foothills of the Middle Urals. In book: Types of swamps of the USSR and principles of their classification. Editorial board: T.G. Abramova, M.S. Boch, E.A. Galkina. Leningrad: St. Petersburg publishing and bookselling firm «Nauka», 1974. P. 162–166. (in Russian).

Borgmark A. Holocene climate variability and periodicities in south-central Sweden, as interpreted from peat humification analysis. *Holocene*. 2005. Vol. 15. No. 3. P. 387–395. <https://doi.org/10.1191/0959683605hl816rp>

Broll G., Keplin B. Mountain ecosystems: studies in treeline ecology. Berlin; Heidelberg: Springer, 2005. 354 p.

Wheeler B.D., Proctor M.C.F. Ecological gradients, subdivisions and terminology of north-west European mires. *Journal of Ecology*. 2000. Vol. 88. No. 2. P. 187–203. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2745.2000.00455.x>

Yeloff D., Mauquoy D. The influence of vegetation composition on peat humification: implications for paleoclimatic studies. *Boreas*. 2006. Vol. 35. No. 4. P. 662–673. <https://doi.org/10.1111/j.1502-3885.2006.tb01172.x>

Received 12 May 2025

Accepted 18 September 2025

Published 31 October 2025

About the authors:

Irina V. Rychkova – Postgraduate Student, Department of Agrochemistry and Soil Science in the Perm State Agro-Technological University named after academician D.N. Prianishnikov (Perm, Russia); rychkova-iv@mail.ru

Iraida A. Samofalova – Doctor of Biological Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Agrochemistry and Soil Science in the Perm State Agro-Technological University named after academician D.N. Prianishnikov (Perm, Russia); samofalovairaida@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-8726-8269>

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 528.88, 528.9, 631.4, 911.52
<https://doi.org/10.31251/pos.v8i4.323>



Дешифрирование болот Томской области методом кластеризации

© 2025 Д. И. Голубец ^{1, 2, 3}, Е. А. Дюкарев ^{2, 4}

¹ФГБУН Институт географии имени В.Б. Сочавы СО РАН, улица Улан-Баторская, 1, г. Иркутск, 664033, Россия. E-mail: dim.golubets1203@gmail.com

²ФГБУН Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Академический проспект, 10/3, г. Томск, 634055, Россия. E-mail: egor@imces.ru

³ФГБНУ Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий, проспект Академика Лаврентьева, 6, г. Новосибирск, 634055, Россия

⁴ФГБУ ВО «Югорский государственный университет», ул. Чехова, 16, г. Ханты-Мансийск, 628012, Россия

Целью работы является тематическое картографирование болотных геосистем Томской области с использованием данных дистанционного зондирования Земли высокого пространственного и спектрального разрешения (Sentinel-2) методом K-means для повышения точности оценки площадей и выявления локальных и региональных особенностей распределения болот. В качестве предикторов использованы спектральные каналы (2, 3, 4, 8A, 11) и индексы (NDVI, NDWI, NDBI) за период с апреля по сентябрь 2024 г., обработанные в Google Earth Engine. Картографическая визуализация выполнена в QGIS. Выделено 14 кластеров, объединённых в 7 групп: залесённые, открытые и комплексные болота, древесная и лугово-кустарниковая растительность, водные объекты и открытый грунт. Общая площадь болот составила 49,7% территории области, что на 5,4% превышает ранее опубликованные данные. Наибольшие расхождения – у залесённых болот (+9,32%) и комплексных (–5,87%), что обусловлено высоким разрешением и оптимальным набором предикторов, включая SWIR-канал для определения увлажнённости территории. Результаты подтверждают эффективность безусловной классификации для выделения гомогенных болотных геосистем. Для повышения точности рекомендуется интеграция полевых данных, временных рядов спутниковых снимков и дополнительных предикторов, таких как текстурные и морфометрические параметры.

Ключевые слова: данные дистанционного зондирования Земли; болота; тематическое дешифрирование.

Цитирование: Голубец Д.И., Дюкарев Е.А. Дешифрирование болот Томской области методом кластеризации // Почвы и окружающая среда. 2025. Том 8. № 4. е323. DOI: [10.31251/pos.v8i4.323](https://doi.org/10.31251/pos.v8i4.323)

ВВЕДЕНИЕ

Болота представляют собой важнейшие ячейки углеродного цикла, выступающие как природные хранилища углерода, способные и депонировать, и выделять существенные объёмы парниковых газов. Одним из ключевых элементов оценки углеродного баланса болотных экосистем является анализ растительности, основного производителя биомассы и индикатора разных типов болот (Базанов и др., 2009). Эта проблема имеет международный интерес, что подтверждается большим количеством конференций и сборников научных работ по данной тематике (Global Peatlands Assessment ..., 2022). Согласно работе (Терентьева и др., 2020), площади болот Западно-Сибирской равнины варьируются от 50,7 до 58,3 Мга.

Первой картой растительности Западной Сибири является «Карта растительности Западно-Сибирской равнины», составленная под редакцией И.С. Ильиной и общим руководством академика В.Б. Сочавы сотрудниками Института географии Сибири и Дальнего Востока СО АН СССР (ныне Институт географии имени В.Б. Сочавы СО РАН) (Ильина и др., 1977). В ее основу положена регионально-типологическая классификация, в которой рассмотрена принадлежность растительности Западной Сибири к планетарным и региональным единицам растительности, таким как «тип растительности», «фратрии растительных формаций» и «региональные комплексы». Особенностью данной карты является применение не только инвентаризационного подхода к картографированию растительности, но и эколого-динамического, отражающего как особенности сочетаний определенных растительных группировок в микро- и мезокомбинации, так и выделение их в серии, объединенные одним направлением развития. Впервые такой подход к классификации болотной растительности был предложен Т.К. Юрковской (1968).

Одним из примечательных моментов является использование в болотоведении терминологии из ландшафтоведения (микро-, мезо-, макроландшафт, болотная фация, урочище и т.д.) без использования как такового ландшафтного подхода. Попытка совместить понятийный аппарат приведена в работе (Синюткина, 2012), где применен геосистемный подход к рассмотрению болот и приведена классификация геомер (гомогенных геосистем (Сочава, 1978)) с рассмотрением иерархической структуры южнотаежной лесоболотной васюганской подгруппы геомов в пределах Томской области. В этих работах был применен метод дешифрирования данных дистанционного зондирования Земли (ДДЗЗ) (Синюткина, 2017; Синюткина, Гашкова, 2022) для исследования постпирогенной трансформации растительного покрова участка Большого Васюганского болота. Однако данные работы носят локальный характер, что, тем не менее, не умаляет их важности.

Среди работ, в которых применяется дешифрирование **данных дистанционного зондирования Земли (ДДЗЗ)** для классификации болот на больших территориях, можно отметить карту болотных комплексов таежной зоны Западной Сибири И.Е. Терентьевой с соавторами (Терентьева и др., 2020), построение которой основано на спутниковых данных Landsat, дешифрированных методом «максимального правдоподобия». Этим автором результаты картографирования болот были использованы для оценки эмиссии метана и диоксида углерода (Терентьева и др., 2017). Следует упомянуть и работу «Спутниковое картографирование растительного покрова России» под руководством Института космических исследований РАН (Барталев и др., 2016). В одной из последних работ приведено расширение класса «болота» на более дробные единицы, где тестовым участком выступила Томская область (Шинкаренко и др., 2024).

В этих работах применяются методы машинного обучения, относящиеся к группе «обучение с учителем» (Supervised classification). Они хотя и имеют ряд плюсов, таких как: возможность задавать эталонные значения (более тонкая настройка), не требуют экспертной интерпретации результатов, оценивают важность предикторов; но имеют и минусы: требуется очень качественная обучающая выборка (с точными диапазонами значений предикторов для каждого класса), которая охватывает все классы объектов, возможные для выделения с вводными предикторами. Этот недостаток данной группы методов имеет решающее влияние, так как если не учесть все разнообразие объектов, которое возможно определить вводными предикторами или же, наоборот, переучесть, то произойдет либо включение объектов в класс, не соответствующий ему, что завысит результаты, либо излишнее дробление, не соответствующее действительности. В связи с этим мы предлагаем использование методов классификации «без обучения» (Unsupervised classification), плюсами которой является априорное определение количества выделяемых кластеров, тем самым минимизируется влияние человеческого фактора за счет автоматического выделения кластеров; но также имеются и минусы: подходит не для всех типов распределений данных, требуется экспертная интерпретация результатов.

Цель данной работы — тематическое картографирование болотных геосистем Томской области с использованием дешифрирования данных дистанционного зондирования Земли высокого пространственного и спектрального разрешения (Sentinel-2) методом кластеризации K-means для повышения точности оценки площадей и выявления локальных и региональных особенностей распределения болот.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В работах, перечисленных выше, в качестве предикторов были использованы следующие материалы ДДЗЗ:

1) снимки аппарата MODIS в 2 каналах с пространственным разрешением 230 м (620–670 нм, 841–876 нм), а также данные ASTER GDEM и GTOPO30 с пространственным разрешением 30 м и 30" соответственно (Шинкаренко и др., 2024);

2) спутниковые спектральные данные системы Landsat с пространственным разрешением 30 м (Терентьева и др., 2020);

3) спутниковые спектральные данные системы Sentinel 2, 4, 8, 8A, 12, а также NDVI с пространственным разрешением варьирующемся от 10 до 20 м (Синюткина, Гашкова, 2022).

Поскольку одной из задач данной работы является выявление локальных особенностей пространственного распределения болот, в качестве предикторов были выбраны снимки спутниковой системы Sentinel-2, с облачностью менее 5% от площади покрытия снимка, в спектральных каналах с 2 (Blue), 3 (Green), 4 (Red), 8A (NIR) и 11 (SWIR1), а также спектральные индексы NDWI, NDVI, NDBI (Montero Loaiza, 2021), чтобы учесть максимальное разнообразие характеристик объектов земной поверхности. Для того, чтобы учесть фенологические различия растительности разных

болотных геосистемах, снимки были усреднены с апреля по сентябрь 2024 года. Была применена попытка использования цифровых моделей рельефа и производных характеристик (экспозиция, крутизна, LS-factor, TWI и др.) в качестве предикторов, но, как выяснилось, это привело лишь к созданию большей ошибки кластеризации. Методом дешифрирования объектов был выбран алгоритм машинного обучения – кластеризация K-means. Суть данного метода заключается в разделении набора данных на k кластеров, изначально представленных центроидами – центрами кластеров, случайно расставленными по n-мерному пространству предикторов, где каждый объект, в нашем случае пиксель, относится к ближайшему по расстоянию (зачастую евклидову) кластеру. Алгоритм является итерационным (повторяющимся пока не выполнится условие); в последующем центроиды рассчитываются как среднее значение входящих в него объектов. Процесс повторных пересчетов размещения центроидов не заканчивается, пока дисперсия внутри кластера не станет минимально возможной при заданном количестве кластеров. Количество кластеров, равное 25, подбиралось экспертно. Вычисления проводились в сервисе Google Earth Engine, предоставляющем большие производительные мощности и широкий набор данных. Последующее вычисление пространственной статистики и картографирование материалов проводилось в программном комплексе QGIS версии 3.32. В результате были выделены 3 группы классов болот (табл. 1).

Таблица 1

Классы модели, полученной методом K-means

Тип классов	Группа классов	Класс	№ класса
Болота	Залесенные болота	Сосново-кустарничково-сфагновые болота (рямы)	1
		Рямово-мочажинные комплексы	2
		Древесные кустарничково-мохово-разнотравные болота (согры)	6
	Комплексные болота	Грядово-мочажинные комплексы	3
		Грядово-озерковые комплексы	4
	Открытые болота	Осоково-гипновые топи	7
		Травяно-сфагновые топи	5
	Растительность дренированных местоположений	Древесная растительность	Темнохвойный лес
Светлохвойный лес			10
Мелколиственный лес			11
Смешанный лес			12
Лугово-кустарниковая растительность		Луга и кустарники	13
Водные объекты			8
Открытый грунт, земли сельскохозяйственного назначения и селитебные территории			14

Приведенное выше выделение болотных классов растительности, вне принадлежности к региональным единицам, является принятым во многих работах (Лисс и др., 2001; Березин и др., 2014; Синюткина, 2012, 2017; Терентьева и др., 2020; Шинкаренко и др., 2024), в них же можно ознакомиться с их определением и описанием.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для сравнения результатов картографирования болот была выбрана работа (Шинкаренко и др., 2024), так как в ней идентичными являются территория моделирования и составляющая легенды, относящаяся к болотным объектам. Авторская модель дешифрирования, полученная методом K-means, имеет размер 666 813 126 пикселей с пространственным разрешением 17x30 м (рис. 1А) по сравнению с 5 946 762 пикселями методом Random Forest с пространственным разрешением 230 м (рис. 1Б), имея, как следствие, большую детальность и дисперсную структуру (пространственное разрешение авторской модели выше в 103 раза).

При сопоставлении пространственного распределения структуры классов и групп классов видно высокое соответствие: 1) размещение «комплексных» болот преимущественно в северной и северо-западной части области; 2) группа «залесенных» болот преобладает на левобережье реки Томь; 3) «открытые» болота сопутствуют «комплексным» болотам, большей своей частью являясь их периферией; 4) юго-восточная часть области наименее заболоченная.

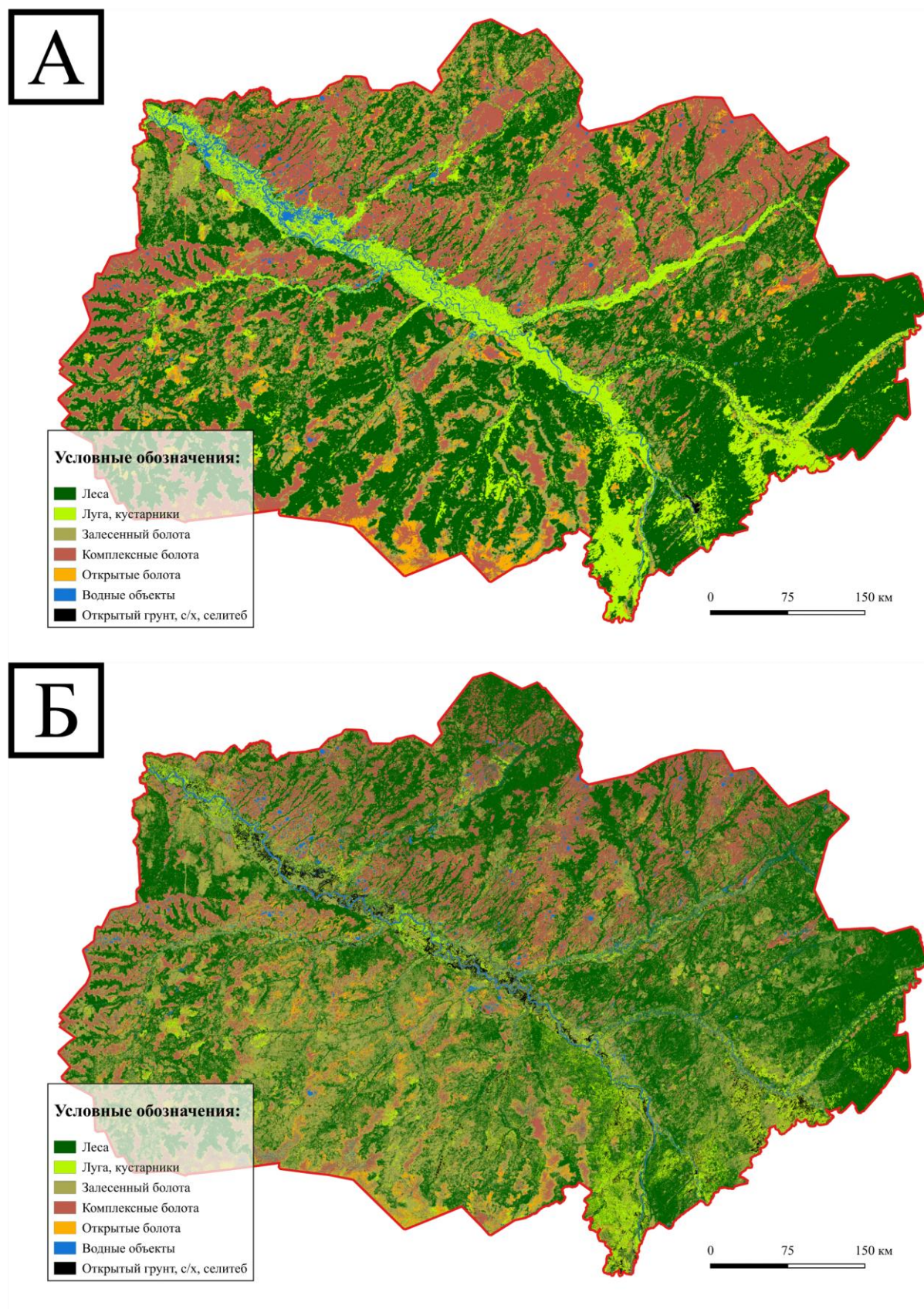


Рисунок 1. Дешифрирование объектов земной поверхности: А – согласно работе (Шинкаренко и др., 2024), Б – авторское дешифрирование.

Если же переходить к численному сопоставлению, то, согласно карте, представленной в работе (Шинкаренко и др., 2024), процент заболоченной территории субъекта равняется 44,3%, при площади Томской области в 314 391 км² («открытые» – 4,0%; «комплексные» – 20,0%; «залесенные» – 20,3%). По нашим предварительным оценкам, это значение соответствует 49,7% («открытые» – 6,0%; «комплексные» – 14,1%; «залесенные» – 29,6%). Разность оценок составляет 5,4% или около 17 000 км², что говорит о достаточно хорошей сходимости.

Рассматривая процентное соотношение между всеми классами, заметим, что картина становится несколько иной. Среднее значение расхождения составило 4,42%. Оценка группы классов «залесенных болот» разнится на 9,32%. Наша модель показывает следующие отличия: выше значения площадей «рямово-мочажинного комплекса» – 9,49% и «сосново-кустарничкового-сфагнового болота (ряма)» – 2,69%, ниже значения, занимаемые «древесного кустарничково-мохово-разнотравного болота (согры)» – 2,87%. При этом выше значения площадей «темнохвойного леса» на 7,17%, на 10,35% ниже значение для «смешанных лесов». Общее различие в оценке распространения лесов составляет 2,61% (рис. 2). Это можно трактовать как недоучет моделью (Шинкаренко и др., 2024) влагонасыщения объектов земной поверхности. В модели K-mean эта проблема решается использованием среди предикторов спектрального канала SWIR1, диапазон которого позволяет идентифицировать объекты по увлажненности, тем самым давая более точные оценки болот и лесов.

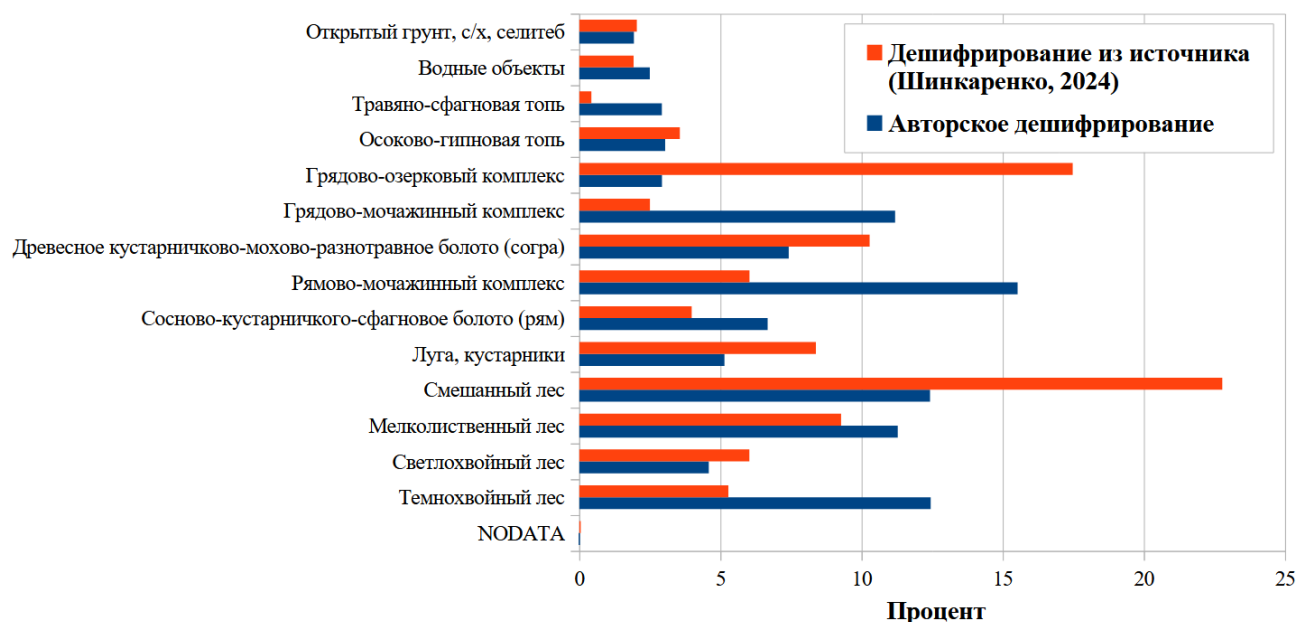


Рисунок 2. Процентное соотношение классов согласно работе (Шинкаренко и др., 2024) и авторского дешифрирования.

Высокие различия наблюдаются в «комплексных» болотных системах: на 8,68% выше значения, занимаемые «грядово-мочажинными комплексами», на 14,55% ниже площади «грядово-озерковых комплексов» (рис. 3Б); такая ситуация связана с комплексностью последнего класса. При дешифрировании ДДЗ3 высокого пространственного разрешения выделяются мелкие водные объекты, не объединяясь с классом «грядово-мочажинный комплекс». Также наблюдаются различия в оценке открытых объектов – «травяно-сфаговой топи» (значения выше на 2,49%) и «лугов и кустарников» (ниже значения на 3,24%). Можно сделать предположение, что в этих классах происходят обоюдно направленные ложно подтвержденные и отклоненные ошибки при их выделении; по остальным классам расхождения составляют менее 2% (рис. 2).

Верификация модели была проведена на основе визуальной оценки спутниковых снимков сверхвысокого пространственного разрешения. На (рис. 3А) видны различия в дешифрировании снимков с разным пространственным разрешением. В частности, можно отметить, что спутниковые данные MODIS плохо учитывают дисперсную, мозаичную структуру, которая, в том числе, наблюдается в пойменной части реки.

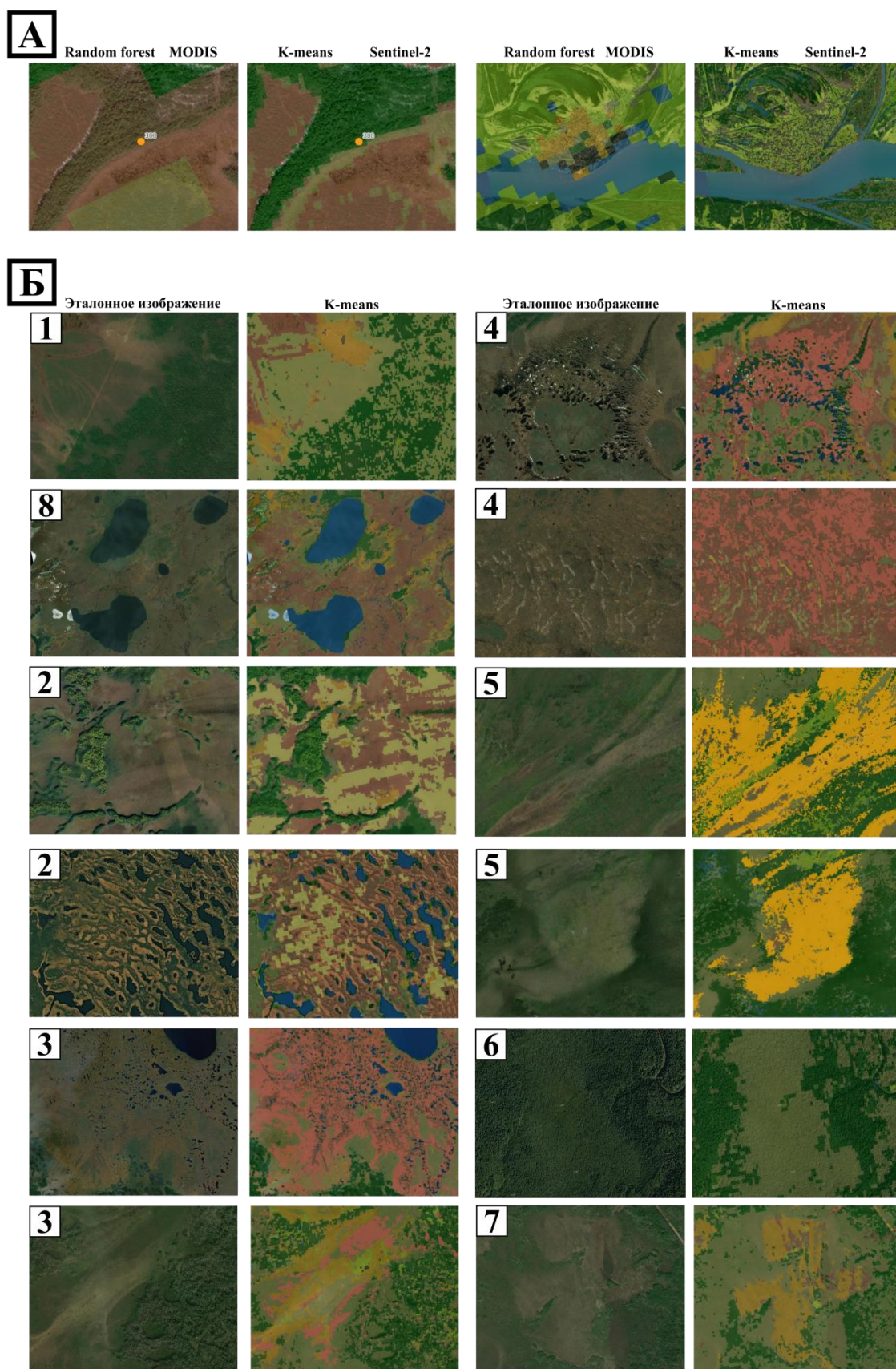


Рисунок 3. Примеры: А – точности дешифрирования в зависимости от пространственного разрешения спутниковых систем; Б – точности дешифрирования и пересечения болотных классов (ярким цветом выделен рассматриваемый класс (номер указан сверху слева) из группы классов (табл. 1), цвета смотреть в (рис. 1)). Если класс повторяется дважды, то сверху указан вариант с верно положительным дешифрированием, снизу с ложно положительным.

На (рис. 3Б) показаны ошибки авторской модели. Основные ошибки проявляются в перекликивании классов внутри групп. Также группа классов «залесенные болота» достаточно часто пересекается с группой классов «древесная растительность». Как справедливо отмечается в работе (Шинкаренко и др., 2024), большинство ошибок моделей при использовании в качестве предикторов спутниковых данных связано с комплексностью (Юрковская, 1968) и мелкоконтурностью болот.

Большую часть ошибок можно объяснить следующим: 1) некоторые классы пересекаются между собой (что можно исправить введением текстурных коэффициентов, подбором дополнительных предикторов); 2) комплексные классы требуют дополнительной обработки (состоят из комбинации полученных классов); при этом процент болот должен быть немногим больше, чем получился при текущем результате, так как в грядово-озерковый класс в некоторых случаях не включены водные объекты небольшой площади.

ОБСУЖДЕНИЕ

Основным ограничением данной работы является рассмотрение достаточно малой территории. Несмотря на то, что даже при разных подходах к выбору ДДЗЗ и алгоритмов дешифрирования, получаются достаточно близкие оценки, но при масштабировании моделей появятся новые нюансы, которые необходимо будет учитывать (рассматривать новые предикторы и алгоритмы) для уменьшения ошибок дешифрирования. Так как основная пространственная дифференциация болот Западной Сибири прослеживается по природным зонам, при расширении территории моделирования в меридиональном направлении будут появляться новые типы болот. В частности, при изучении зоны тундр интересна работа К.И. Симоновой и Н.В. Цывкуновой (2024), результатом которой является рассмотрение зависимости экологической приуроченности озер от гидрохимических, морфометрических, геоботанических параметров и значений спектральных индексов, что во многом поможет при расширении классификационных единиц и будет полезно для их классификации по степени трофности.

Как справедливо отмечалось (Барталев и др., 2016), спутниковые данные MODIS являются подходящими при тематическом дешифрировании на национальном уровне; такая оценка является первичной для последующих детальных исследований с привлечением ДДЗЗ с более высокими пространственными и спектральными разрешениями, а также полевых данных (Синюткина, Гашкова, 2022). Дополнительная кластеризация в достоверно выделенных классах позволит проводить более детальное дешифрирование при условии, что подберется качественный временной ряд спутниковых снимков земной поверхности.

Отдельно встает вопрос о связи и последующем развитии таких исследований в области болотоведения, геоботаники и ландшафтоведения, так как даже высокая детальность спутниковой съемки не даст возможность рассматривать результаты дешифрирования с такой детальностью, какая принята в этих науках. Как один из вариантов можно рассматривать возможность совмещения в анализе моделей и карт растительности или геосистем. В частности, из «Карты растительности Западно-Сибирской равнины» (Ильина и др., 1977) можно взять флористический состав контуров карты и совместить их ядра с дешифрированными контурами спутниковых снимков, чтобы увеличить детальность дешифрирования. Безусловно, такой подход имеет ряд недостатков: смена флористического состава в субдоминантах и сопутствующих видах, трансформация растительных ассоциаций и топологических геосистем. Однако использование карты позволит идентифицировать доминантные виды на контурах дешифрирования, что поможет проследить пространственную динамику. Резкие трансформации, такие как пожары и рубки, достаточно неплохо идентифицируются; исходя из общих представлений о сукцессионных рядах, при подобных нарушениях можно проследить динамику смены растительности. Оцифрованный вариант карты представлен в источнике (Растительность Западно-Сибирской равнины, М 1:1 500 000).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение метода кластеризации K-means к данным дистанционного зондирования высокого пространственного разрешения (Sentinel-2) позволило выделить 14 объектов земной поверхности, объединённых в 7 групп, отражающих основные типы болот и зональной растительности, а также водные объекты и открытые грунты с антропогенными ландшафтами для территории Томской области. Полученная карта демонстрирует более высокую детализацию по сравнению с существующими аналогами, особенно в отношении комплексных болот, где традиционные методы склонны к укрупнению и усреднению. Общая площадь болот (156 252 км²), оценённая в 49,7%

территории области, несколько превышает ранее опубликованные данные, что подчёркивает важность использования данных высокого разрешения и современных алгоритмов кластеризации.

Полученные расхождения с данными (Шинкаренко и др., 2024), в частности завышение доли грядово-мочажинных комплексов на 8,68% и занижение грядово-озерковых на 14,55%, обусловлены использованием ДДЗЗ с высоким пространственным разрешением, что позволило выделять мелкие водные объекты, которые в составе комплексных болот не агрегируются в единый класс, а идентифицируются отдельно. Указанное свидетельствует о более высокой чувствительности данных к пространственной структуре болотных массивов. Выявлены и ограничения подхода: пересечение спектральных сигнатур отдельных классов, влияние широтной зональности на фенологические циклы и сложность интерпретации комплексных болотных угодий, состоящих из комбинации элементов; в последующем необходимо применить дополнительную обработку данных для устранения этих ошибок.

Таким образом, метод K-means является эффективным инструментом для тематического дешифрирования болот при наличии тщательно подобранных предикторов и последующей визуальной верификации. Для дальнейшего повышения точности классификации и устойчивости модели в пространстве и времени рекомендуется интеграция дополнительных данных: текстурных индексов, временных рядов, морфометрических параметров рельефа, а также полевых наблюдений и тематических карт. Такой комплексный подход позволит не только повысить достоверность карт болот, но и заложить основу для создания динамических моделей их трансформации.

ФИНАНСОВАЯ ПОДДЕРЖКА

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда № 25-17-00167, <https://rscf.ru/project/25-17-00167/>.

ЛИТЕРАТУРА

- Базанов В.А., Савичев О.Г., Скугарев А.А., Харанжевская Ю.А. Применение метода фитоиндикации в гидрологических исследованиях заболоченных территорий Западной Сибири (на примере р. Ключ, Томская область) // Вестник Томского государственного университета. Биология. 2009. № 4(8). С. 84–96.
- Барталев С.А., Егоров В.А., Жарко В.О., Лупян Е.А., Плотников Д.Е., Хвостиков С.А., Шабанов Н.В. Спутниковое картографирование растительного покрова России. Москва: ИКИ РАН, 2016. 208 с.
- Березин А.Е., Базанов В.А., Скугарев А.А., Рыбина Т.А., Паршина Н.В. Ландшафты Большого Васюганского болота // Торфяники Западной Сибири и цикл углерода: прошлое и настоящее: материалы Четвёртого Международного полевого симпозиума (Новосибирск, 4–17 августа 2014 г.) / Под редакцией А.А. Титляновой и М.И. Дергачёвой. Новосибирск: Национальный исследовательский Томский государственный университет, 2014. С. 50–52.
- Ильина И.С., Лапшина Е.И., Махно В.Д., Романова Е.А. Принципы составления обзорной «Карты растительности Западно-Сибирской равнины» // Геоботаническое картографирование. 1977. С. 41–57.
- Лисс О.Л., Абрамова Л.И., Аветов Н.А., Березина Н.А., Инишева Л.И., Курнишкова Т.В., Слука З.А., Толпышева Т.Ю., Шведчикова Н.К. Болотные системы Западной Сибири и их природоохранное значение. Тула: Гриф и К, 2001. 584 с.
- Растительность Западно-Сибирской Равнины М1:1 500 000 [Электронный ресурс]: Каталог ресурсов. Геопортал ИВМ СО РАН. URL: <https://gis.krasn.ru/blog/catalog?call=search&resourceId=83b1f702-18fd-92bf-1c83-14c012406bbd> (дата обращения 05.04.2025).
- Симонова К.И., Цывкунова Н.В. Применение спектральных индексов для изучения экологических особенностей тундровых озёр // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2024. Том 21. № 5. С. 249–262. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2024-21-5-249-262>
- Синюткина А.А. Классификация болотных геосистем Томской области // Вестник Томского государственного университета. 2012. № 357. С. 192–194.
- Синюткина А.А. Ландшафтное картографирование болот Томской области // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: География. Геоэкология. 2017. № 2. С. 21–28.
- Синюткина А.А., Гашкова Л.П. Оценка состояния и геоинформационное моделирование постпирогенной динамики участка Большого Васюганского болота // Региональные геосистемы. 2022. Том 46. № 3. С. 366–377. <https://doi.org/10.52575/2712-7443-2022-46-3-366-377>
- Сочава В.Б. Введение в учение о геосистемах. Новосибирск: Наука, 1978. 318 с.

Терентьева И.Е., Сабреков А.Ф., Глаголев М.В., Лапшина Е.Д., Смоленцев Б.А., Максютлов Ш. Новая карта болот южной тайги Западной Сибири для оценки эмиссии метана и диоксида углерода // Водные ресурсы. 2017. Том 44. № 2. С. 209–220. <https://doi.org/10.7868/S032105961702016X>

Терентьева И.Е., Филиппов И.В., Сабреков А.Ф., Глаголев М.В., Курбатова Ю.А., Максютлов Ш. Картографирование таежных болот Западной Сибири на основе дистанционной информации // Известия Российской академии наук. Серия географическая. 2020. Том 84. № 6. С. 920–930 <https://doi.org/10.31857/S2587556620060102>

Шинкаренко С.С., Барталев С.А., Дюкарев Е.А., Головацкая Е.А., Сайгин И.А. Развитие методов картографирования болотных комплексов Западной Сибири на основе временных рядов данных дистанционного зондирования и машинного обучения // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2024. Том 21. № 6. С. 200–212. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2024-21-6-200-212>

Юрковская Т.К. О некоторых принципах построения легенды карты растительности болот // Геоботаническое картографирование. 1968. С. 44–51.

Global Peatlands Assessment – The State of the World’s Peatlands: Evidence for action toward the conservation, restoration, and sustainable management of peatlands. Main Report. Global Peatlands Initiative. United Nations Environment Programme. Nairobi, 2022. 425 p.

Google Earth Engine [Электронный ресурс]: платформа для анализа пространственных данных. URL: <https://earthengine.google.com> (дата обращения 05.04.2025).

Montero Loaiza D. List of Spectral Indices [Электронный ресурс]. Awesome-ee-spectral-indices documentation. 2021. URL: <https://awesome-ee-spectral-indices.readthedocs.io/en/latest/list.html> (дата обращения 05.04.2025).

Поступила в редакцию 31.07.2025

Принята 02.09.2025

Опубликована 31.10.2025

Сведения об авторах:

Голубец Дмитрий Игоревич – инженер лаборатории физической географии и биогеографии ФГБУН Институт географии имени В.Б. Сочавы СО РАН (г. Иркутск, Россия); ФГБУН Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН (г. Томск, Россия); ФГБНУ Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий (г. Новосибирск, Россия); dima.golubets1203@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0003-3217-7866>

Дюкарев Егор Анатольевич – кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории климато-экологических исследований ФГБУН Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН (г. Томск, Россия); ФГБУ ВО «Югорский государственный университет» (г. Ханты-Мансийск, Россия); egor@imces.ru; <https://orcid.org/0000-0002-7019-4459>

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.



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

Mapping of mires of the Tomsk region by the clustering method

© 2025 D. I. Golubets ^{1, 2, 3}, E. A. Dyukarev ^{2, 4}

¹*V.B. Sochava Institute of Geography, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Ulan-Batorskaya, 12, Irkutsk, Russia. E-mail: dima.golubets1203@gmail.com*

²*Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Akademicheskii prospect, 10/3, Tomsk, Russia. E-mail: egor@imces.ru*

³*Federal Research Center for Information and Computational Technologies, Academician Lavrentyev Avenue, 6, Novosibirsk, Russia*

⁴*Yugra State University, str. Chekhova, 16, Khanty-Mansiysk, Russia*

The aim of the study was thematic classification of mire ecosystems in Tomsk Region using Sentinel-2 Earth observation data and the K-means clustering method to improve the accuracy of area estimation and identify

local spatial distribution patterns of mires. Spectral bands (2, 3, 4, 8A, 11) and indices (NDVI, NDWI, NDBI) from April to September 2024 were used as predictors and processed in Google Earth Engine. Cartographic visualization was performed in QGIS. Fourteen clusters were identified and grouped into seven classes: forested, open, and complex mires, woody and meadow-shrub vegetation, water bodies and bare soil. The total mire area was estimated as 49.7% of the region's territory, exceeding previous estimates by 5.4%. The largest discrepancies were observed for forested mires (+9,32%) and complex mires (–5,87%); these discrepancies can be attributed to the high spatial resolution and optimized set of predictors, including the SWIR band for moisture detection. The results confirm the effectiveness of unsupervised classification for delineating homogeneous mire ecosystems. To further improve accuracy, integration of field data, time series, and additional predictors such as texture and morphometric parameters is recommended.

Keywords: remote sensing of the Earth; mires; thematic classification.

How to cite: Golubets D.I., Dyukarev E.A. Mapping of mires of the Tomsk region by the clustering method. *The Journal of Soils and Environment*. 2025. Vol. 8. No. 4. e323. DOI: [10.31251/pos.v8i4.323](https://doi.org/10.31251/pos.v8i4.323) (in Russian with English abstract)

FUNDING

This research was funded by the Russian Science Foundation, grant № 25-17-00167, <https://rscf.ru/en/project/25-17-00167/>.

REFERENCES

- Bazanov V.A., Savichev O.G., Skugarev A.A., Kharanzhevskaya Yu.A. Application of method phitoindication in hydrological researches of boggy territories of the Western Siberia (by the example of the small river Kluch, Tomsk area). *Tomsk State University Journal of Biology*. 2009. No. 4(8). P. 84–96. (in Russian).
- Bartalev S.A., Egorov V.A., Zharko V.O., Lupyan E.A., Plotnikov D.E., Khvostikov S.A., Shabanov N.V. Satellite Mapping of Vegetation Cover of Russia. Moscow: IKI RAS, 2016. 208 p. (in Russian).
- Berezin A.E., Bazanov V.A., Skugarev A.A., Rybina T.A., Parshina N.V. Landscapes of the Great Vasyugan Mire. In book: *Peatlands of Western Siberia and the Carbon Cycle: Past and Present. Materials of the 4th International Field Symposium (Novosibirsk, 4–17 August, 2014)* / Edited by A.A. Titlyanova and M.I. Dergacheva. Novosibirsk: National Research Tomsk State University, 2014. P. 50–52. (in Russian).
- Iljina I.S., Lapshina E.I., Makhno V.D., Romanova E.A. Principles of compiling of the survey «Vegetation map of West Siberian plain». *Geobotanical Mapping*. 1977. P. 41–58. (in Russian).
- Liss O.L., Abramova L.I., Avetov N.A., Berezina N.A., Inisheva L.I., Kurnishkova T.V., Sluka Z.A., Tolpysheva T.Yu., Shvedchikova N.K. Swamp systems of Western Siberia and their environmental significance. Tula: Grif and K, 2001. 584 p. (in Russian).
- Vegetation of the West Siberian Plain Scale 1:1 500 000 [Electronic resource]: Resource Catalog. Geoportal of the Institute of Numerical Mathematics SB RAS. URL: <https://gis.krasn.ru/blog/catalog?call=search&resourceId=83b1f702-18fd-92bf-1c83-14c012406bbd> (accessed on 05.04.2025). (in Russian).
- Simonova K.I., Tsivkunova N.V. Investigation of tundra lakes' ecological features by applying spectral indices. *Sovremennye Problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2024. Vol. 21. No. 5, H. 249–262. (in Russian). <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2024-21-5-249-262>
- Sinyutkina A.A. Mire geosystem classification of Tomsk region. *Tomsk State University Journal*. 2012. No. 357. P. 192–194. (in Russian).
- Sinyutkina A.A. Landscape mapping of bogs in the Tomsk region. *Proceedings of Voronezh State University. Series: Geography. Geoecology*. 2017. No. 2. P. 21–28. (in Russian).
- Sinyutkina A.A., Gashkova L.P. State assessing and gis modeling of the post-pyrogeic dynamics of the Great Vasyugan mire site. *Regional Geosystems*. 2022. Vol. 46. No. 3. P. 366–377. (in Russian) .
<https://doi.org/10.52575/2712-7443-2022-46-3-366-377>
- Sochava V.B. Introduction to the Study of Geosystems. Novosibirsk: Nauka Publ., 1978. 318 p. (in Russian).
- Terent'eva I.E., Sabrekov A.F., Glagolev M.V., Lapshina E.D., Smolentsev B.A., Maksyutov S.S. A New map of wetlands in the southern taiga of the West Siberia for assessing the emission of methane and carbon dioxide. *Water Resources*. 2017. Vol. 44. No 2. P. 297–307. <https://doi.org/10.1134/S0097807817020154>
- Terent'eva I.E., Filippov I.V., Sabrekov A.F., Glagolev M.V., Kurbatova Yu.A., Maksyutov Sh. Western Siberia's taiga wetlands mapping based on remote sensing data. *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Seriya geograficheskaya*. 2020. Vol. 84. No. 6. P. 920–930. (in Russian). <https://doi.org/10.31857/S2587556620060102>

Shinkarenko S.S., Bartalev S.A., Dyukarev E.A., Golovatskaya E.A., Saigin I.A. Development of mapping methods for wetland complexes in Western Siberia based on time series of remote sensing data and machine learning. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2024. Vol. 21. No. 6. P. 200–212. (in Russian). <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2024-21-6-200-212>

Yurkovskaja T.K. Some principles of compilation of a bog vegetation map. *Geobotanical Mapping*. 1968. P. 44–51. (in Russian).

Global Peatlands Assessment – The State of the World’s Peatlands: Evidence for action toward the conservation, restoration, and sustainable management of peatlands. Main Report. Global Peatlands Initiative. United Nations Environment Programme. Nairobi, 2022. 425 p.

Google Earth Engine [Electronic resource]: a platform for spatial data analysis. URL: <https://earthengine.google.com> (accessed on 05.04.2025).

Montero Loaiza D. List of Spectral Indices [Electronic resource]. Awesome-ee-spectral-indices documentation. 2021. URL: <https://awesome-ee-spectral-indices.readthedocs.io/en/latest/list.html> (accessed on 05.04.2025).

Received 31 July 2025

Accepted 02 September 2025

Published 31 October 2025

About the authors:

Dmitry I. Golubets – Engineer, Laboratory of Physical Geography and Biogeography, V.B. Sochava Institute of Geography, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Irkutsk, Russia); Laboratory of Climate and Environmental Research, Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Tomsk, Russia.); Laboratory of Regional Monitoring Problems, Federal Research Center for Information and Computational Technologies (Novosibirsk, Russia); dima.golubets1203@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0003-3217-7866>

Egor A. Dyukarev – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Leading Researcher, Laboratory of Climate Systems Physics, Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Tomsk, Russia); UNESCO Research Center Environmental Dynamics and Global Climate Change, Yugra State University (Khanty-Mansiysk, Russia); egor@imces.ru; <https://orcid.org/0000-0002-7019-4459>

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/)



Изменение численности копиотрофной и олиготрофной микрофлоры верхового Усть-Бакчарского болота в процессе постпирогенного восстановления

© 2025 О. М. Минаева , Т. И. Зюбанова , Е. Е. Акимова , А. А. Синюткина

Сибирский научно-исследовательский институт сельского хозяйства и торфа – филиал ФГБУН Сибирский федеральный научный центр агробиотехнологий РАН, ул. Гагарина, 3, г. Томск, 634050, Россия.

E-mail: t.i.zubanova@yandex.ru

Цель исследования. Изучить динамику численности копиотрофной и олиготрофной микрофлоры торфяных олиготрофных почв верхового Усть-Бакчарского болота в условиях постпирогенного восстановления.

Место и время проведения. Работы проведены на территории Усть-Бакчарского болота, расположенного в южно-таежной подзоне Западной Сибири в пределах Томской области в 2022–2024 гг.

Методы. На основе анализа архивных спутниковых данных выделены три контура пожаров 1999, 2003 и 2014 гг. Отбор образцов торфа провели на двух площадках – постпирогенной UBF1 (подвергшейся пожарам 1999 и 2014 гг.) и условно фоновой UB (пожар 1999 г.) из слоев 0–15 и 15–30 см, включая участки понижений и повышений. Численность микроорганизмов определяли методами разведения и высева на плотные питательные среды с дальнейшим подсчетом количества колониеобразующих единиц (КОЕ). Для анализа функциональной эколого-трофической структуры микробного сообщества болотных почв рассчитаны коэффициенты олиготрофности и минерализации.

Основные результаты. Установлено, что численность копиотрофной и олиготрофной микрофлоры в почвах Усть-Бакчарского болота была на сравнительно невысоком уровне, не превышая $1,7 \times 10^7$ и $6,8 \times 10^7$ КОЕ/г почвы, соответственно. На выбранном участке исследования (понижение или повышение) не обнаружено значительного повторяющегося в годовой динамике повышения или понижения численности копиотрофов и олиготрофов, а ее вариация в большей степени зависела от глубины отбора и года исследования. Действие пожара на изучаемых участках, на протяжении всего периода исследований приводило, в основном, к значительному снижению числа как копиотрофов, так и олиготрофов (до 44 раз) по сравнению с фоновыми участками, что связано с выгоранием растительного покрова в верхних слоях торфа. Число микромицетов также находилось на достаточно невысоком уровне (до $2,6 \times 10^5$ КОЕ/г почвы). Влияние пожаров на обилие микромицетов неоднозначно: в 2022–2023 гг. отмечено их увеличение до 70 раз по сравнению с фоновыми участками, однако к 2024 г. произошло снижение до 2,6 раз на постпирогенных участках. Отмечено, что микромицеты в почвах верхового Усть-Бакчарского болота занимают, преимущественно, олиготрофные эколого-трофические ниши. На постпирогенных участках на протяжении исследований коэффициент олиготрофности был ниже (до 8 раз), что свидетельствует о снижении устойчивости функционирования болотной экосистемы и увеличении ее зависимости от поступления свежего органического вещества. Коэффициент минерализации был значительно повышен (до 28 раз), что отражает интенсификацию процессов разложения органического вещества на данном этапе.

Заключение. Полученные результаты демонстрируют, что пожары приводят к обеднению состава микробного сообщества и уменьшению численности основных эколого-трофических групп. Перестановка в структуре почвенной микрофлоры Усть-Бакчарского болота на постпирогенных участках приводит к уменьшению коэффициента олиготрофности и увеличению коэффициента минерализации. Учитывая сравнительно невысокую численность микрофлоры на исследуемых участках Усть-Бакчарского болота по сравнению с числом почвенных микроорганизмов в других болотных экосистемах, можно предположить, что исследуемая экосистема характеризуется замедленными циклами основных биогенных элементов.

Ключевые слова: болотная экосистема; коэффициент минерализации; коэффициент олиготрофности; микромицеты; микробное сообщество; пожары; постпирогенное восстановление.

Цитирование: Минаева О.М., Зюбанова Т.И., Акимова Е.Е., Синюткина А.А. Изменение численности копиотрофной и олиготрофной микрофлоры верхового Усть-Бакчарского болота в процессе постпирогенного восстановления // Почвы и окружающая среда. 2025. Том 8. № 4. е333. DOI: [10.31251/pos.v8i4.333](https://doi.org/10.31251/pos.v8i4.333)

ВВЕДЕНИЕ

Природная особенность Западной Сибири – высокая заболоченность, достигающая 30%, и широкое развитие сфагновых болот (Синюткина и др., 2024). Западно-Сибирские болота,

охватывающие обширные территории от Урала до Енисея, представляют собой один из крупнейших на планете комплексов заболоченных экосистем. Болота Западной Сибири – мощные биогеохимические «фабрики», которые участвуют в регуляции гидрологического режима обширных территорий, циклах углерода, азота и других элементов, а также служат средой обитания для множества редких и эндемичных видов флоры и фауны (Синюткина, 2024). Особенное значение они имеют для накопления и долгосрочного хранения органического углерода в форме торфа, что играет ключевую роль в глобальном балансе парниковых газов и замедлении темпов изменения климата. В условиях растущего антропогенного давления на биосферу Земли и наблюдающихся климатических изменений, изучение и сохранение этих экосистем приобретает особую актуальность.

Особенность болот Томской области – сочетание их различных типов: верховых, низинных (эвтрофных) и переходных, а также уникальный веретьево-топяной сетчато-полигональный тип низинных болот. Болота, в частности объект нашего исследования верховое Усть-Бакcharское болото, играют важную роль в депонировании органического углерода, они эффективные «поглотители» CO₂; однако различные антропогенные факторы, негативно влияющие на их функционирование, способны превратить данные экосистемы в источник парниковых газов, что усиливает последствия глобального потепления (Головацкая, Никонова, 2017; Sinyutkina, 2021).

До настоящего момента пожары в Томской области остаются одной из острых экологических проблем (Харанжевская, Синюткина, 2023; Синюткина и др., 2024; Feurdean et al., 2020). Данные статистики показывают, что с 2000-х годов число пожаров и площади выгоревших территорий сохраняются на значительном уровне, а пик приходится на засушливые периоды и плотно заселенные районы (Игнатъева и др., 2020). Пожары уничтожают растительный покров и верхний слой торфа, резко изменяют химический состав почвы и воды, способствуют выделению парниковых газов, усиливая климатическое воздействие. Известно, что на постпирогенных участках отмечается повышение степени разложения и зольности в верхних слоях почвы по сравнению с участками, не подвергшимися воздействию пожаров (Веретенникова и др., 2021; Харанжевская, Синюткина, 2023).

Биологическая активность почв играет ключевую роль в стабильном функционировании болотных экосистем (Гродницкая и др., 2022). Она обусловлена функционированием микробных сообществ и фауны, которые играют главную роль в процессах гумификации, минерализации, нитрификации и иных почвенных процессах, изменяя химический состав торфа по мере его разложения, а также обеспечивая биохимический гомеостаз и стабильный кругооборот основных элементов (Волкова и др., 2020). Учитывая изменения условий среды обитания (влажность, аэрация, температура) и ускоренную деградацию органического вещества на постпирогенных участках болот, большинство исследователей отмечают трансформацию структуры микробного сообщества почв (Гродницкая и др., 2022). Однако данных о путях восстановления микробного сообщества после пожаров в настоящее время недостаточно.

Цель работы – изучить динамику численности копитрофной и олиготрофной микрофлоры торфяных олиготрофных почв верхового Усть-Бакcharского болота в условиях постпирогенного восстановления.

В задачи исследования входило:

1. Оценить влияние пожаров верхового Усть-Бакcharского болота на численность наиболее значимых трофических групп микроорганизмов.
2. Рассчитать и проанализировать изменение коэффициентов олиготрофности и минерализации почв верхового Усть-Бакcharского болота при постпирогенном восстановлении.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Усть-Бакcharское болото расположено в южно-таежной подзоне Западной Сибири в пределах Томской области на террасе р. Бакchar (рисунок). Площадь болота составляет 3,5 км², из которых 1,6 км² осушено в 1980 г. для добычи торфа, расстояние между каналами 40 м. В разные годы после осушения болото подвергалось выгоранию. На основе анализа архивных спутниковых данных Landsat и базы данных FIRMS (<https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov>) на территории болота выделено три контура пожаров 1999 г., 2003 г. и 2014 г. Наибольшая площадь распространения пожара составила 0,9 км² в 1999 г., пожары 2003 г. и 2014 г. менее обширны, площади горения составляли 0,7 и 0,4 км² соответственно. Растительный покров до осушения и пожаров был представлен сосново-кустарничково-сфагновым фитоценозом. Мощность торфяной залежи около 3 м, образована, преимущественно, сфагновым торфом (Синюткина и др., 2024).

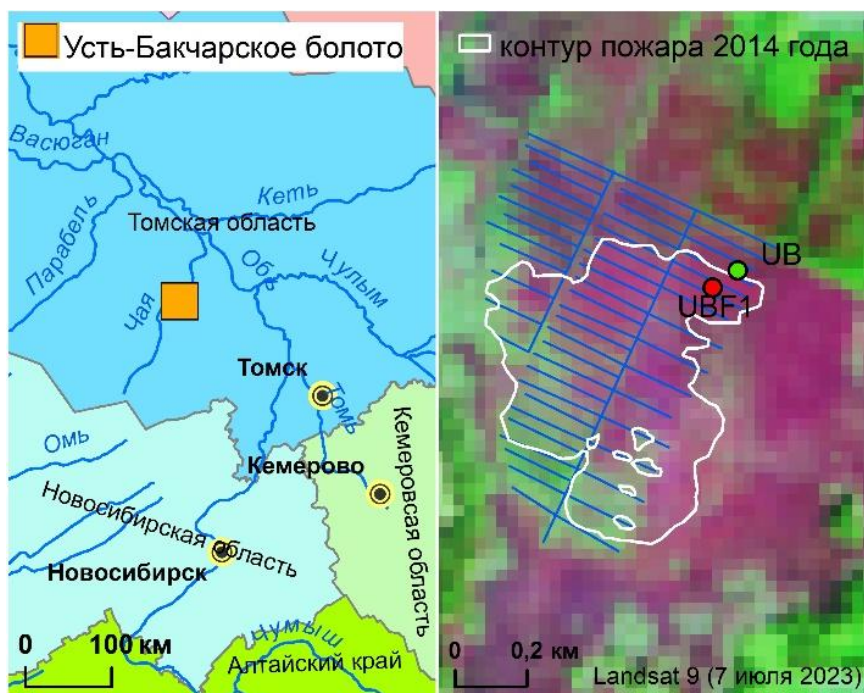


Рисунок. Схема расположения ключевых участков исследования Усть-Бакcharского болота.

Отбор образцов торфа проводился на двух площадках – постпирогенной (UBF1) и условно фоновой (UB) (рисунок, табл. 1) в 2022–24 гг. В связи с отсутствием невыгоревших участков в пределах осушенной части болота, в качестве фоновой выбрана площадка в пределах контура наиболее раннего пожара.

Таблица 1

Характеристика объектов исследования

Площадка	Координаты	Годы пожаров	Фитоценоз
UBF1	57°34'39'' с.ш. 82°16'22'' в.д.	1999, 2014	кустарничково-моховой
UB	57°34'41'' с.ш. 82°16'25'' в.д.	1999	березово-сосновый кустарничково-моховой

На площадке UBF1 в результате пожара 2014 г. произошло полное выгорание растительного покрова и верхнего слоя торфяной залежи. В первые годы после пожара толщина горелого слоя составляла несколько см, к 2022–24 гг. она сократилась до 1 см и менее. Через 8–10 лет после пожара здесь продолжает сохраняться высокая доля открытых поверхностей (20–30%), отмечено зарастание *Polytrichum strictum* (**проективное покрытие (ПП)** 10–15%), ПП сфагновыми мхами не более 10%, ПП ярусом подроста из сосны и березы менее 10%. Наблюдается полное восстановление кустарничкового яруса (ПП 80%).

На площадке UB отмечено восстановление древесного яруса из сосны и березы (ПП до 20%), кустарничков (ПП 80%), частичное восстановление сфагновых мхов (ПП 25%), доля открытых поверхностей сократилась до 30%.

Микрорельеф участков мелко-кочковатый и отличается сглаженностью форм в сравнении с естественными сосново-кустарничково-сфагновыми болотами; амплитуда колебаний высот на обеих площадках составляет около 30 см. Указанная особенность микрорельефа связана с отсутствием интенсивного разрастания сфагновых мхов, образующих положительные формы – моховые подушки на естественных болотах, даже через 25 лет после пожара на площадке UB. Вывороченность поверхности обуславливает однородность водно-физических свойств торфяной залежи между положительными и отрицательными формами микрорельефа.

Верхние горизонты торфяной залежи обеих площадок сложены фускум торфом с низкой зольностью (1–3%), кислой реакцией среды (рН 3,3–3,8), низкой степенью разложения (10–15%). Средняя влажность за период 2022–24 гг. изменялась в пределах 89,7–92,0% с минимальными

значениями в 2023 г. и максимальными в 2022 г. Зольность понижений на обеих площадках и повышения на площадке UBF1 в слое 0–15 см выше в сравнении с нижележащим 15–30 см (4–7 и 2%, соответственно). На положительной форме площадки UB, наоборот, зольность оказалась выше в слое 15–30 см (1,5 и 6%, соответственно) в связи с наличием на этой глубине трансформированной горелой прослойки пожара 1999 г. Наблюдаются некоторые различия в температурном режиме торфяной залежи, как между площадками, так и между повышениями и понижениями в пределах одной площадки. По данным автоматического мониторинга, полученным на высоте около средней поверхности, с интервалом измерений 1 час за период май–сентябрь 2024 года, средняя температура на площадке UBF1 составила 12,2 °C на глубине 10 см и 10,7 °C на глубине 20 см, на площадке UB ниже на 0,7–0,9 °C. Площадка UBF1 характеризуется большей амплитудой суточных (на глубине 10 см 2,9 и 1,9 °C, соответственно) и сезонных (21,7 и 19,4 °C) колебаний температуры (Синюткина, 2025). По данным измерений в дату отбора, температура в слоях 10 и 20 см оказалась на 2–3 °C выше на повышениях в сравнении с понижениями на площадке UBF1 и на 3–5 °C выше на площадке UB.

Комплекс полевых исследований численности микроорганизмов проведен в июле–августе 2022, 2023 и 2024 гг. Численности микроорганизмов на участках понижения и повышения анализировали на глубинах 0–15 и 15–30 см, которые на протяжении вегетационного периода в находятся, в основном, выше и ниже уровня залегания болотных вод, соответственно. Микробиологический анализ проведен из смешанного образца торфа, полученного из не менее трех повторностей, взятых из отобранных монолитов, размером 20×20 см.

Численность микроорганизмов в субстрате определяли методами высева на плотные питательные среды: копиотрофов – на гидролизате рыбной муки (ГРМ-агаре); олиготрофов – на голодном агаре (агар-агар 2% и дистиллированная вода); микроскопических грибов – на среде Чапека (50 г/л, pH 5,0–5,5) (Практикум по микробиологии, 2005). Температура инкубирования 26–28 °C. Спустя трое суток проводили учет копиотрофов, семь суток – грибов и олиготрофов (Терещенко и др., 2017). Для определения численности микроорганизмов использовали высев образцов в трех биологических и шести аналитических повторностях каждый. Численность микроорганизмов рассчитывали и выражали в **колониеобразующих единицах (КОЕ)** на грамм абсолютно-сухой почвы (Головченко и др., 2022).

Для анализа структуры микробного сообщества вычисляли коэффициент олиготрофности и коэффициент минерализации. **Коэффициент олиготрофности (K_o)** – отношение численности микроорганизмов, выросших на голодном агаре, к численности микроорганизмов, выросших на ГРМ-агаре. **Коэффициент минерализации (K_m)** рассчитывали как отношение численности микроорганизмов, усваивающих, преимущественно, неорганические источники азота и не содержащее азот органическое вещество, к численности аммонификаторов, ориентированных, в основном, на усвоение органического азота.

Статистическая обработка полученных результатов проведена с помощью методов статистического анализа и представлена в виде средней арифметической величины с доверительным интервалом с учетом дискретного распределения Пуассона данных о численностях в выборках. Оценка значимости различий численности микроорганизмов на различных участках проведена с помощью неравенства Чебышева.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Существование болотных систем и почв невозможно без микроорганизмов, которые участвуют как в процессах почвообразования, так и развития болот (Артамонова, 2002). Почвообитающие микроорганизмы являются фундаментальными участниками почвообразовательных процессов и устойчивого функционирования болотных экосистем (Филиппова, 2008; Волкова и др., 2020). Значительная доля представителей микробного сообщества участвует в активном разложении органических остатков сфагновых мхов, кустарничков и других болотных растений, преобразуя их в гумусовые вещества. Их участие в данном процессе составляет основу формирования торфа. Благодаря ферментативной активности микрофлоры почв осуществляются процессы гумификации, минерализации, денитрификации и другие биохимические превращения, определяющие химические и физические свойства болотных почв. Микроорганизмы обеспечивают круговорот углерода, азота, фосфора, серы и других элементов в экосистемах. Благодаря быстрой перестройке микробного сообщества под изменяющиеся условия окружающей среды (влажность, аэрация, температура), поддерживается устойчивость болот к внешним воздействиям.

Высокая численность микробов в торфяных болотах обеспечивает интенсивные процессы разложения органического вещества и круговорота элементов (Головченко и др., 2018; Волкова и др.,

2020). Общее микробное число, как правило, связывают с наличием копиотрофов, которые предпочитают или способны быстро развиваться в средах, богатых органическим веществом и питательными соединениями. В болотных почвах такие условия создаются, например, при поступлении свежих растительных остатков и во влажных верхних горизонтах, где высоко содержание растворимых мономеров (сахаров, аминокислот). Копиотрофные микроорганизмы являются основными участниками интенсивного разложения органических субстратов, быстро используя доступные для трансформации органические соединения и запуская цепочку минерализации. Напротив, олиготрофные микроорганизмы приспособлены к жизни в условиях ограниченного содержания доступных питательных веществ. Данные представители почвенной микрофлоры доминируют в зрелых, относительно бедных слоях болот, где легкоразлагаемая органика уже практически отсутствует, и вызывают дальнейшую деградацию и минерализацию торфа на поздних этапах сукцессии. Олиготрофы растут медленно, потребляют минимальные количества субстрата и особенно важны для устойчивой поддержки процессов разложения в старых слоях торфа, где скапливаются сложнодеградируемые органические соединения и снижается приток новой органики. Деятельность копиотрофных и олиготрофных микроорганизмов регулирует скорость и глубину разложения органических веществ, сохраняя баланс между накоплением (консервацией) и минерализацией органического вещества (Добровольская и др., 2014).

Исходя из сказанного, численность копиотрофных микроорганизмов свидетельствует о большой концентрации легкоразлагаемого органического вещества в почвах болот или о наличии постоянного пополнения их запаса извне (растительные и животные остатки). В проведенных исследованиях показано, что на Усть-Бакчарском болоте численность копиотрофной микрофлоры находится на достаточно невысоком уровне (табл. 2).

Таблица 2

Число КОЕ копиотрофных микроорганизмов, млн/г почвы
(среднее \pm 95% доверительный интервал)

Участок		Год исследования		
		2022	2023	2024
понижение, 0–15 см	UB	$1,3 \pm 0,2$	$5,1 \pm 0,9$	$4,7 \pm 0,8$
	UBF1	$0,9 \pm 0,1^*$	$3,4 \pm 0,5^*$	$2,9 \pm 0,6^*$
повышение, 0–15 см	UB	$11 \pm 1,3$	$3,5 \pm 0,6$	$3,5 \pm 0,7$
	UBF1	$1,4 \pm 0,1^*$	$6,7 \pm 0,9^*$	$3,9 \pm 0,7^*$
понижение, 15–30 см	UB	$5,3 \pm 0,1$	$0,4 \pm 0,3$	$1,0 \pm 0,4$
	UBF1	$11 \pm 1,6^*$	$17 \pm 1,7^*$	$0,4 \pm 0,2^*$
повышение, 15–30 см	UB	$13 \pm 1,3$	$1,1 \pm 0,5$	$1,8 \pm 0,4$
	UBF1	$0,3 \pm 0,1^*$	$1,4 \pm 0,5^*$	$0,4 \pm 0,3^*$

Примечание (здесь и далее в табл. 3–4).

* – установлена статистическая значимость отличий результатов между условно фоновым (UB) и постпирогенным (UBF1) участками.

Известно, что численность микроорганизмов в верхних слоях торфа может достигать десятков млрд. КОЕ/г (Головченко и др., 2021). В наших исследованиях на всем его протяжении число копиотрофных микроорганизмов варьировало от $2,9 \times 10^5$ до $1,7 \times 10^7$ КОЕ/г почвы. Выбранный участок обследований (понижение или повышение), как правило, не оказывал значительного закономерного влияния на численность копиотрофов: вариация числа жизнеспособных микроорганизмов происходила по глубине отбора и по годам независимого от данного фактора.

Наличие пожара на изучаемых участках на протяжении всего периода исследований приводило, в основном, к значительному понижению численности данной трофической группы микроорганизмов – до 44 раз. Исключение составляли участки понижения на глубине залегания 15–30 см, в которых периодически наблюдалась более высокая численность копиотрофных микроорганизмов после пожара. Это, возможно, связано с режимом увлажнения; как правило, копиотрофные организмы являются аэробами, чья численность в болотных водах всегда ниже, чем верхних, более сухих торфяных горизонтах. В случае подсыхания нижних слоев, в связи с невысокой микробной активностью происходит накопление доступной органики, которая в более благоприятных условиях дает возможность для кратковременного увеличения численности микроорганизмов данной трофической группы.

Уменьшение пула микроорганизмов на участках, подвергшихся пожару, неоднократно описано и связано с выгоранием растений и верхних слоев торфа, которые являются основными путями пополнения доступных легкоразлагаемых органических соединений (Богородская и др., 2005; Филиппова, 2008; Гродницкая и др., 2022).

Несмотря на то, что на постпирогенных участках происходит увеличение зольности и уменьшение концентрации органического вещества (Головацкая, Никонова, 2017; Синюткина и др., 2024), а значит, следовало бы ожидать увеличения концентрации олиготрофных микроорганизмов, на исследуемых участках Усть-Бакчарского болота наблюдается обратная ситуация (табл. 3).

Таблица 3

Число КОЕ олиготрофных микроорганизмов, млн/г почвы
(среднее \pm 95% доверительный интервал)

Участок		Год исследования		
		2022	2023	2024
понижение, 0–15 см	UB	3,4 \pm 0,3	28 \pm 2,0	68 \pm 9,1
	UBF1	1,6 \pm 0,2*	6,4 \pm 0,7*	6,2 \pm 0,9*
повышение, 0–15 см	UB	19 \pm 1,7	14 \pm 1,3	9,7 \pm 1,1
	UBF1	13 \pm 1,1*	8,8 \pm 1,0*	13 \pm 1,3*
понижение, 15–30 см	UB	0,6 \pm 0,1	0,2 \pm 0,1	2,6 \pm 0,7
	UBF1	0,5 \pm 0,1*	2,9 \pm 0,2*	0,2 \pm 0,2*
повышение, 15–30 см	UB	11 \pm 1,2	0,3 \pm 0,2	4,0 \pm 0,7
	UBF1	0,8 \pm 0,0*	1,4 \pm 0,5*	1,0 \pm 0,4*

На протяжении всего периода исследований постпирогенные участки характеризовались снижением пула олиготрофных микроорганизмов по сравнению с фоновыми – до 44 раз. Данное наблюдение можно связать с тем, что уменьшение количества копиотрофной микрофлоры на постпирогенных участках приводит к сокращению потока сложноразлагаемых соединений, служащих основным субстратом для размножения олиготрофной микрофлоры.

Микромицеты играют ключевую роль в почвообразовательных процессах в болотных почвах, особенно в условиях кислой среды и низкой теплообеспеченности, характерных для торфяных горизонтов. Они доминируют среди микроорганизмов, разлагающих целлюлозу, могут достигать 60–90% всей микрофлоры, участвующей в деструкции органического вещества. Благодаря своей адаптации к кислым и прохладным условиям, микромицеты обеспечивают разложение трудно минерализуемых органических субстратов в болотах, где бактериальная активность подавлена, что делает их ключевым звеном в процессах гумификации, минерализации и преобразования органического вещества, поддерживая формирование и устойчивость торфяной почвы как экосистемы (Хабибуллина и др., 2014). Численность микромицетов в торфяных почвах болот часто достигает высоких значений (сотни тысяч – десятки миллионов КОЕ/г) (Филиппова, 2008; Головченко и др., 2018) и широко варьирует в зависимости от типа болота, глубины слоя и условий среды.

Для Усть-Бакчарского болота численность микромицетов, как и общая микробная, находилась на достаточно невысоком уровне. В проведенный период исследований она варьировала от $1,2 \times 10^2$ до $2,6 \times 10^5$ КОЕ/г почвы (табл. 4).

Таблица 4

Число грибных КОЕ на плотных питательных средах, тыс./г почвы
(среднее \pm 95% доверительный интервал)

Участок		Год исследования		
		2022	2023	2024
понижение, 0–15 см	UB	120 \pm 15	120 \pm 40	28 \pm 19
	UBF1	78 \pm 10	61 \pm 21*	11 \pm 11*
повышение, 0–15 см	UB	54 \pm 9	90 \pm 10	100 \pm 39
	UBF1	56 \pm 8	140 \pm 39*	260 \pm 58*
понижение, 15–30 см	UB	1,5 \pm 1,5	0,1 \pm 0,1	43 \pm 27
	UBF1	9 \pm 4*	9 \pm 1*	3 \pm 3*
повышение, 15–30 см	UB	30 \pm 6	5 \pm 8	140 \pm 38
	UBF1	33 \pm 8*	86 \pm 12*	55 \pm 19*

Постпирогенные участки на протяжении 2022–2023 гг. исследований характеризовались либо отсутствием значимых изменений численности микромицетов, либо ее увеличением до 70 раз по сравнению с численностью данных микроорганизмов в почвах фона. В 2024 г. практически во всех образцах почв постпирогенных участков отмечена меньшая численность микроскопических плесневых грибов (до 2,6 раз).

По трофической принадлежности почвенные плесневые грибы могут быть как копитрофами, так и олиготрофами. При этом, в связи с большей бактериальной численностью аэробных быстроразмножающихся бактерий на участках с оптимальными для их развития условиями, часто микромицеты вынуждены занимать олиготрофные ниши, что и наблюдалось на изучаемом болоте. Фактически значительная доля олиготрофов представлена плесневыми грибами, принадлежащими в основной массе к родам *Mucor*, *Trichoderma*, *Aspergillus*, *Penicillium* и *Chaetomium*. По преимущественному родовому составу микромицетов изучаемые участки не отличались от других сфагновых болот (Филиппова, 2008; Хабибуллина и др., 2014).

Соотношение копитрофных и олиготрофных микроорганизмов является одним из индикаторов, определяющих динамику и устойчивость болотных почв, их способность аккумулировать углерод, очищать воду, регулировать климатические процессы и поддерживать функции всей болотной экосистемы. На основании данных о численности копитрофных и олиготрофных представителей, а также количестве микроорганизмов, способных утилизировать минеральные формы азота, высчитывались коэффициенты олиготрофности и минерализации, определяющие соотношение этих групп (табл. 5).

Таблица 5

Коэффициенты олиготрофности (K_o) и минерализации (K_m)

Участок		Год исследования					
		2022		2023		2024	
		K_o	K_m	K_o	K_m	K_o	K_m
понижение, 0–15 см	UB	2,69	0,93	5,46	0,02	14,30	0,35
	UBF1	1,71	0,88	1,91	0,55	2,15	0,44
повышение, 0–15 см	UB	1,75	0,05	4,02	0,04	2,76	0,23
	UBF1	8,91	0,50	1,31	0,28	2,51	0,30
понижение, 15–30 см	UB	0,11	0,54	0,35	0,28	3,43	0,57
	UBF1	0,05	0,05	0,17	0,22	0,57	0,57
повышение, 15–30 см	UB	0,82	0,03	0,24	0,02	2,26	0,52
	UBF1	2,64	0,31	1,00	0,10	2,43	0,72

Данные коэффициенты отражают степень активности и адаптацию микробных процессов разложения органического вещества в почвах, что напрямую связано с устойчивостью экосистем и балансом углерода в болотах.

Коэффициент олиготрофности (K_o) демонстрирует адаптацию микробных сообществ к условиям бедного субстрата, с низким содержанием органики, или с органикой, более сложной для деградации. Высокий коэффициент олиготрофности, как правило, свидетельствует о доминировании микроорганизмов, способных выживать в субстратах с низкими концентрациями питательных веществ и осуществлять деградацию малодоступных простых органических соединений, что важно для устойчивого функционирования болотных экосистем.

Для постпирогенных участков Усть-Бакчарского болота в годы исследований, как правило, наблюдалось уменьшение коэффициента олиготрофности (до 8 раз), что может свидетельствовать об уменьшении устойчивости болотной экосистемы и большей зависимости от поступления новых источников углерода. На участке пожара 1999 г. низкие значения коэффициента олиготрофности характерны для слоя, в котором проявляются следы старого пожара (UB повышение), но следует отметить, что в вышележащем слое наблюдается увеличение данного коэффициента. Это может свидетельствовать о восстановлении состава микробного сообщества и создании благоприятных условий для продолжения современной аккумуляции торфа. Можно предположить, что на участке пожара 2014 г. в процессе постпирогенного восстановления также произойдет увеличение коэффициента олиготрофности.

Коэффициент минерализации (K_m) отражает интенсивность разложения органического вещества. Значение $K_m > 1$ свидетельствует об активных процессах высвобождения минеральных соединений из органических соединений, а значения $K_m < 1$ – о преобладании иммобилизации и консервации органического вещества в виде торфа или в самой микрофлоре (Зинченко и др., 2014).

Для болотных систем, в отличие от окультуренных пахотных почв, характерно небольшое значение данного коэффициента. На протяжении исследований для постпирогенных и фоновых участков Усть-Бакчарского болота значения коэффициента минерализации варьировали в пределах 0,02–0,93. Влияние пожаров на данный параметр, как правило, характеризовалось его увеличением (до 28 раз); реже отмечалось отсутствие влияния или небольшое его понижение. Наблюдается тенденция к постепенному снижению коэффициента минерализации на площадке UBF1 в слое 0–15 см, что, вероятно, отражает создание благоприятных условий для аккумуляции торфа; можно предположить, что при дальнейшем разрастания сфагновых мхов, процесс торфонакопления продолжится.

Увеличение коэффициента минерализации обычно связывают с разрушением растительного покрова и нарушением гидрологического режима, что способствует доступу кислорода и ускоренному разложению органики в верхних слоях торфа. В начальные годы после пожара повышение коэффициента минерализации может сопровождаться усилением выделения углекислого газа (CO₂) и других продуктов разложения, что свидетельствует об активном распаде торфа. С течением времени (через 6–10 лет после пожара) коэффициент минерализации постепенно снижается по мере восстановления растительного покрова, изменения микробной активности и восстановления влажностного режима болота (Харанжевская, Синюткина, 2023). Таким образом, в начальные годы после пожара активность микроорганизмов, способных минерализовать органику, возрастает, но вместе с этим микробное сообщество становится менее разнообразным и смещается в сторону увеличения присутствия олиготрофных групп, адаптированных к условиям с ограниченными органическими субстратами (Богородская и др., 2005; Богородская, Иванова, 2020).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Влияние пожаров на численность микроорганизмов разных эколого-трофических групп не вызывает сомнений. В основном, на постпирогенных участках наблюдается обеднение видового состава микрофлоры и уменьшение общего количества микроорганизмов, разлагающих как легкодоступную органику, так и сложно минерализуемые субстраты, что связано, прежде всего, со снижением потока органического вещества извне. Микромицеты в почвах Усть-Бакчарского болота, как и в целом бактериальное сообщество, на постпирогенных участках имеют тенденцию к снижению численности по сравнению с фоновыми. Отмечено уменьшение коэффициента олиготрофности и увеличение коэффициента минерализации для постпирогенных участков. Учитывая небольшую выявленную численность микрофлоры изученных трофических групп, характерную для исследуемых участков Усть-Бакчарского болота по сравнению с данными о количестве почвенных микроорганизмов в других болотных экосистемах, по нашему мнению, можно заключить, что почвы данного болота характеризуются замедленными циклами основных биогенных элементов, необходимыми для поддержания баланса экосистемы. Полученные значения коэффициентов минерализации и олиготрофности могут свидетельствовать о том, что на протяжении всего периода восстановления болота после пожаров (более 10 лет) изучаемая экосистема все еще находится в стадии активизации минерализационных процессов. Кроме того, на основе анализа коэффициентов олиготрофности и минерализации выдвинуто предположение о направленности постпирогенной динамики болотной экосистемы, а именно – прекращении или замедлении процесса деградации и возобновлении процесса аккумуляции торфяной залежи.

ФИНАНСОВАЯ ПОДДЕРЖКА

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

ЛИТЕРАТУРА

- Артамонова В.С. Микробиологические особенности антропогенно преобразованных почв. Новосибирск: Издательство СО РАН, 2002. 225 с.
- Богородская А.В., Иванова Г.А. Оценка состояния микробных комплексов почв после пожаров и рубок в сосняках Нижнего Приангарья // Сибирский лесной журнал. 2020. № 3. С. 37–50. <https://doi.org/10.15372/SJFS20200304>
- Богородская А.В., Сорокин Н.Д., Иванова Г.А. Влияние пирогенного фактора на микробные комплексы почв сосняков Средней Сибири // Лесоведение. 2005. № 2. С. 25–31.
- Веретенникова Е.Э., Курьина И.В., Дюкарев Е.А., Головацкая Е.А., Смирнов С.В. Геохимические особенности торфяных залежей олиготрофных болот южно-таежной зоны Западной Сибири // Геохимия. 2021. Том 66. № 6. С. 562–576. <https://doi.org/10.31857/S0016752521050095>

- Волкова Е.М., Акатова Е.В., Дубинина Н.С. Микробиологическая активность торфов разного генезиса // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2020. № 4. С. 65–79.
- Головацкая Е.А., Никонова Л.Г. Влияние уровня болотных вод на процессы трансформации сфагновых мхов в торфяной почве олиготрофных болот // Почвоведение. 2017. № 5. С. 603–613. <https://doi.org/10.7868/80032180X17030030>
- Головченко А.В., Харлак А.Л., Глухова Т.В. Оценка микробного пула растений верховых болот // Вестник Томского государственного университета. Биология. 2018. № 43. С. 25–43. <https://doi.org/10.17223/19988591/43/2>
- Головченко А.В., Дмитриенко Ю.Д., Морозов А.А., Поздняков Л.А., Глухова Т.В., Инишева Л.И. Микробная биомасса в низинных торфяниках: запасы, структура, активность // Почвоведение. 2021. № 7. С. 838–848. <https://doi.org/10.31857/S0032180X21050099>
- Головченко А.В., Семенова Т.А., Морозов А.А., Глухова Т.В., Инишева Л.И. Микобиота низинных торфяников // Почвоведение. 2022. № 3. С. 337–346. <https://doi.org/10.31857/S0032180X22030054>
- Гродницкая И.Д., Карпенко Л.В., Пашкеева О.Э., Гончарова Н.Н., Старцев В.В., Батурина О.А., Дымов А.А. Влияние лесных пожаров на микробиологические свойства торфяных олиготрофных почв и торфяно-подзолов глеевых в болотах северной части Сым-Дубчесского междуречья (Красноярский край) // Почвоведение. 2022. № 4. С. 454–468. <https://doi.org/10.31857/S0032180X22040098>
- Добровольская Т.Г., Головченко А.В., Звягинцев Д.Г. Анализ экологических факторов, ограничивающих деструкцию верхового торфа // Почвоведение. 2014. № 3. С. 304–316. <https://doi.org/10.7868/S0032180X14030046>
- Зинченко М.К., Бибик Т.С., Стоянова Л.Г. Влияние систем удобрений на структуру и изменение отдельных физиологических групп микроорганизмов в серой лесной почве Владимирского Ополя // Фундаментальные исследования. 2014. № 12–3. С. 552–557.
- Игнатъева А.В., Кнауэ Р.В., Чупина Е.А. Оценка влияния лесных пожаров на экологическую обстановку и меры по мониторингу за чрезвычайными ситуациями в лесах Томской области // Успехи современного естествознания. 2020. № 4. С. 85–92. <https://doi.org/https://doi.org/10.17513/use.37367>
- Практикум по микробиологии: учебное пособие для студ. высш. учеб. заведений / А.И. Нетрусов, М.А. Егорова, Л.М. Захарчук и др.; Под ред. А.И. Нетрусова. Москва: Академия, 2005. 608 с.
- Синюткина А.А. Использование вегетационных и водных индексов для оценки состояния постпирогенных верховых болот Западной Сибири // Известия Иркутского государственного университета. Серия: Науки о Земле. 2024. Том 48. С. 90–109. <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2024.48.90>
- Синюткина А.А. Трансформация температурного режима торфяной залежи на постпирогенных болотах (Западная Сибирь) // Отражение био-, гео-, антропогенных взаимодействий в почвах и почвенном покрове : сборник материалов VIII Международной научной конференции, посвященной 95-летию кафедры почвоведения и экологии почв ТГУ (Томск, 16–19 сентября 2025 г.) / отв. ред. С.П. Кулижский. Томск: Издательство Томского государственного университета, 2025. С. 109–113.
- 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. Том 79. № 1. С. 78–88. <https://doi.org/10.55959/MSU0579-9414.5.79.1.6>
- 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. <https://doi.org/10.31251/pos.v7i1.246>
- Терещенко Н.Н., Акимова Е.Е., Минаева О.М. Современные методы оценки микробиологических свойств и экологического статуса почвы: Практикум. Томск: Издательский дом ТГУ, 2017. 152 с.
- Филиппова Н.В. К изучению микоценоза болот: некоторые данные о болотных микро- и макромицетах // Динамика окружающей среды и глобальные изменения климата. 2008. Том 1. № S1. С. 141–155.
- Хабибуллина Ф.М., Кузнецова Е.Г., Васенева И.З. Микромицеты подзолистых и болотно-подзолистых почв в подзоне средней тайги на северо-востоке европейской части России // Почвоведение. 2014. № 10. С. 1228–1234. <https://doi.org/10.7868/S0032180X14100049>
- Харанжевская Ю.А., Синюткина А.А. Динамика химического состава вод постпирогенных болот в условиях лесотундры и тайги Западной Сибири // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2023. Том 334. № 6. С. 193–203. <https://doi.org/10.18799/24131830/2023/6/4042>
- Feurdean A., Florescu G., Tantau I., Vanniere B., Diaconu A.-C., Pfeiffer M., Warren D., Hutchinson S.M., Gorina N., Gaika 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. Vol. 244. P. 106495. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2020.106495>

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. Vol. 205. P. 105464. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105464>

Поступила в редакцию 05.09.2025

Принята 28.11.2025

Опубликована 12.12.2025

Сведения об авторах:

Минаева Оксана Модестовна – кандидат биологических наук, доцент, старший научный сотрудник Сибирского научно-исследовательского института сельского хозяйства и торфа – филиал ФГБУН Сибирский федеральный научный центр агробиотехнологий РАН, научный отдел (г. Томск, Россия); mom05@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-5925-6022>

Зюбанова Татьяна Ивановна – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник Сибирского научно-исследовательского института сельского хозяйства и торфа – филиал ФГБУН Сибирский федеральный научный центр агробиотехнологий РАН, научный отдел (г. Томск, Россия); t.i.zyubanova@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-9429-9706>

Акимова Елена Евгеньевна – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник Сибирского научно-исследовательского института сельского хозяйства и торфа – филиал ФГБУН Сибирский федеральный научный центр агробиотехнологий РАН, научный отдел (г. Томск, Россия); akimovanell@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-3279-8200>

Синюткина Анна Алексеевна – кандидат географических наук, старший научный сотрудник Сибирского научно-исследовательского института сельского хозяйства и торфа – филиал ФГБУН Сибирский федеральный научный центр агробиотехнологий РАН, научный отдел (г. Томск, Россия); ankalaeva@yandex.ru; <https://orcid.org/0009-0004-1283-0797>

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.



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

Changes in the abundance of copiotrophic and oligotrophic microorganisms in the Ust-Bakchar raised bog during post-fire restoration

© 2025 O. M. Minaeva , T. I. Zyubanova , E. E. Akimova , A. A. Sinyutkina 

Siberian Research Institute of Agriculture and Peat – Division of Siberian Federal Research Centre for AgroBioTechnologies of the Russian Academy of Sciences, Gagarina st., 3, Tomsk, Russia. E-mail: t.i.zyubanova@yandex.ru

The aim of the study was to investigate the population dynamics of copiotrophic and oligotrophic microorganisms in the peat oligotrophic soils of the Ust-Bakchar raised bog during post-fire restoration.

Location and time of the study. The research was conducted in the Ust-Bakchar bog located in the southern taiga subzone of West Siberia in Tomsk region over the period 2022–2024.

Methods. Based on the analysis of archival satellite data, three fire perimeters from 1999, 2003, and 2014 were delineated. Peat samples were collected at two sites: the post-fire UBFI site, which had experienced fires in both 1999 and 2014, and the conditionally background UB site, affected by the 1999 fire, at depths of 0–15 and 15–30 cm, under microtopographic depressions and elevations. Microbial abundance was determined using dilution of soil suspension and plating it on solid nutrient media with subsequent counting of colony-forming units (CFU). To analyse the functional ecological-trophic structure of the soil microbial community, oligotrophic and mineralisation coefficients were calculated.

Results. The abundance of copiotrophic and oligotrophic microflora in soils of the Ust-Bakchar bog was relatively low, not exceeding 1.7×10^7 and 6.8×10^7 CFU g⁻¹ soil, respectively. The study sites, both depressions or elevations, did not exert significant systematic influence on the copiotrophs and oligotrophs abundance, the latter varied primarily due to sampling depth and year of investigation. The presence of fire at the study sites throughout the entire research period predominantly resulted in significant reductions in the abundance of both copiotrophs and oligotrophs (up to 44-fold) compared with the background site, where vegetation cover and upper peat layers were burnt. The abundance of micromycetes was also relatively low ($< 2.6 \times 10^5$ CFU g⁻¹ soil). The influence of fires on microbial abundance was ambiguous: in 2022–2023, increases of up to 70 times were observed compared with the background site; however, by 2024, this had declined by 2.6 times at post-fire sites. Micromycetes in the soils of the Ust-Bakchar raised bog primarily occupied oligotrophic ecological-trophic niches. At the post-fire sites, a decrease in the oligotrophic coefficient (up to 8 times) was typically observed, indicating reduced stability of the

bog ecosystem functioning and its increased dependence on fresh organic matter inputs. The mineralization coefficient increased 28 times, indicating intensification of organic matter decomposition processes.

Conclusions. *The results demonstrate that fires lead to impoverishment of microbial community composition and reduction in abundance of the main ecological trophic groups. Structural shifts in the soil microflora of the Ust-Bakchar bog at post-fire sites resulted in decreased oligotrophic coefficients and increased mineralization coefficients. Taking into account the relatively low number of microorganisms in the studied area of the Ust-Bacharsky bog in comparison with the number of soil microorganisms in other ecosystems, it is possible to assume that the studied ecosystem is characterized by slow cycling of the main biogenic elements.*

Keywords: *bog ecosystem; mineralization coefficient; oligotrophic coefficient; micromycetes; microbial community; fires; post-fire restoration.*

How to cite: *Minaeva O.M., Akimova E.E., Zyubanova T.I., Sinyutkina A.A. Changes in the abundance of copiotrophic and oligotrophic microorganisms in the Ust-Bakchar raised bog during post-fire restoration. The Journal of Soils and Environment. 2025. 8(4). e333. DOI: [10.31251/pos.v8i4.333](https://doi.org/10.31251/pos.v8i4.333) (in Russian with English abstract).*

FUNDING

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

REFERENCES

- Artamonova V.S. Microbial specific of soil reforming antropogenity in Western Siberia. Novosibirsk: SB RAS Publisher, 2002. 225 p. (in Russian).
- Bogorodskaya A.V., Ivanova G.A. Evaluation of soil microbial complexes after fires and logging in pine forests of the Lower Priangar'e. *Siberian Journal Forestry Science*. 2020. No. 3. P. 37–50. (in Russian). <https://doi.org/10.15372/SJFS20200304>
- Bogorodskaya A.V., Sorokin N.D., Ivanova G.A. The influence of fire on microbocenoses of soils in Central Siberian pine forests. *Lesovedenie*. 2005. No. 2. P. 25–31. (in Russian).
- Veretennikova E.E., Kuryina I.V., Dyukarev E.A., Golovatskaya E.A., Smirnov S.V. Geochemical features of peat deposits at oligotrophic bogs in the southern taiga subzone of West Siberia. *Geochemistry International*. 2021. Vol. 59. No. 6. P. 618–631. <https://doi.org/10.1134/S0016702921050098>
- Volkova E.M., Akatova E.V., Dubinina N.S. Microbiological activity of peats of different genesis. *Izvestiya Tula State University. Earth Sciences*. 2020. No. 4. P. 65–79. (in Russian).
- Golovatskaya E.A., Nikonova L.G. The influence of the bog water level on the transformation of sphagnum mosses in peat soils of oligotrophic bogs. *Eurasian Soil Science*. 2017. Vol. 50. No. 5. P. 580–588. doi: <https://doi.org/10.1134/S1064229317030036>
- Golovchenko A.V., Harlak A.L., Gluhova T.V. Assessment of the microbial pool of raised bog plants. *State University Journal of Biology*. 2018. No. 43. P. 25–43. (in Russian). <https://doi.org/10.17223/19988591/43/2>
- Golovchenko A.V., Morozov A.A., Pozdnyakov L.A., Dmitrienko Y.D., Glukhova T.V., Inisheva L.I. Microbial biomass in eutrophic peatlands: stock, structure, and activity. *Eurasian Soil Science*. 2021. Vol. 54. No. 7. P. 1068–1077. <https://doi.org/10.1134/S1064229321050094>
- Golovchenko A.V., Morozov A.A., Semenova T.A., Glukhova T.V., Inisheva L.I. The mycobiota of eutrophic peatlands. *Eurasian Soil Science*. 2022. Vol. 55. No. 3. P. 348–356. <https://doi.org/10.1134/S106422932203005X>
- Grodnitskaya I.D., Karpenko L.V., Pashkeeva O.E., Goncharova N.N., Startsev V.V., Dymov A.A., Baturina O.A. Impact of forest fires on the microbiological properties of oligotrophic peat soils and gleyed peat podzols of bogs in the northern part of the Sym-Dubches interfluvium, Krasnoyarsk region. *Eurasian Soil Science*. 2022. Vol. 55. No. 4. P. 460–473. <https://doi.org/10.1134/S1064229322040093>
- Dobrovol'skaya T.G., Golovchenko A.V., Zvyagintsev D.G. Analysis of ecological factors limiting the destruction of high-moor peat. *Eurasian Soil Science*. 2014. Vol. 47. No. 3. P. 182–193. <https://doi.org/10.1134/S106422931403003X>
- Zinchenko M.K., Bibik T.S., Stoyanova L.G. Influence of systems of fertilizers on structure and change of separate physiological groups of microorganisms in grey forest potholes Vladimirsky Opolya. *Fundamental Research*. 2014. No. 12–3. P. 552–557. (in Russian).
- Ignateva A.V., Knaub R.V., Chupina E.A. Assessment of the impact of forest fires on the ecological situation and measures for monitoring of emergency situations in the forests of the Tomsk region. *Advances in Current Natural Sciences*. 2020. No. 4. P. 85–92. (in Russian). <https://doi.org/https://doi.org/10.17513/use.37367>
- Microbiology Workshop: a textbook for students/ A.I. Netrusov, M.A. Egorova, L.M. Zakharchuk et al.; Edited by A.I. Netrusov. Moscow: Akademiya, 2005. 608 p. (in Russian).

Sinyutkina A.A. The application of vegetation and water indices to assess the state of post-pyrogenic raised bogs in Western Siberia. The Bulletin of Irkutsk State University. Series: Earth Sciences. 2024. Vol. 48. P. 90–109. (in Russian). <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2024.48.90>

Sinyutkina A.A. Transformation of the temperature regime of peat deposits in post-pyrogenic mires (Western Siberia). In book: Reflection bio-, geo-, antroposferal interactions in soil and soil cover. Collection of materials VIII International Scientific Conference, dedicated to the 95th anniversary of the department of Soil Science and Soil Ecology TSU (Tomsk, 16–19 September, 2025) / S.P. Kulizhskiy (ed.). Tomsk: Publishing House of Tomsk State University, 2025. P. 109–113. (in Russian).

Sinyutkina A.A., Gashkova L.P., Kharanzhevskaya Yu.A. Pyrogenic changes of bog vegetation and peat in Western Siberia. Lomonosov Geography Journal. 2024. Vol. 79. No. 1. (in Russian). <https://doi.org/10.55959/MSU0579-9414.5.79.1.6>

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. Vol. 7. No. 1. e246. (in Russian). <https://doi.org/10.31251/pos.v7i1.246>

Tereshchenko N.N., Akimova E.E., Minaeva O.M. Modern methods for assessing soil microbiological properties and ecological status. Handbook. Tomsk: Publishing House of TSU, 2017. 152 p. (in Russian).

Filippova N.V. To the bog fungi investigation: some data about micro- and macromycetes. Environmental Dynamics and Global Climate Change. 2008. No. S1. P. 141–155. (in Russian).

Khabibullina F.M., Kuznetsova E.G., Vaseneva I.Z. Micromycetes in podzolic and bog-podzolic soils in the middle taiga subzone of northeastern European Russia. Eurasian Soil Science. 2014. Vol. 47. No. 10. P. 1027–1032. <https://doi.org/10.1134/S1064229314100044>

Kharanzhevskaya Yu.A., Sinyutkina A.A. Wildfire-related changes of mire water chemistry in forest-tundra and taiga zones of Western Siberia. Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering. 2023. Vol. 334. No. 6. P. 193–203. (in Russian). <https://doi.org/10.18799/24131830/2023/6/4042>

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. Vol. 244. P. 106495. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2020.106495>

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. Vol. 205. P. 105464. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105464>

Received 05 September 2025

Accepted 28 November 2025

Published 12 December 2025

About the authors:

Oksana M. Minaeva – Candidate of Biological Sciences, Senior Researcher, Siberian Research Institute of Agriculture and Peat – Division of Siberian Federal Research Centre for AgroBioTechnologies of the Russian Academy of Sciences, Research Department (Tomsk, Russia); mom05@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-5925-6022>

Tatyana I. Zyubanova – Candidate of Biological Sciences, Senior Researcher, Siberian Research Institute of Agriculture and Peat – Division of Siberian Federal Research Centre for AgroBioTechnologies of the Russian Academy of Sciences, Research Department (Tomsk, Russia); t.i.zyubanova@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-9429-9706>

Elena E. Akimova – Candidate of Biological Sciences, Senior Researcher, Siberian Research Institute of Agriculture and Peat – Division of Siberian Federal Research Centre for AgroBioTechnologies of the Russian Academy of Sciences, Research Department (Tomsk, Russia); akimovanell@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-3279-8200>

Anna A. Sinyutkina – Candidate of Geography Sciences, Senior Researcher, Siberian Research Institute of Agriculture and Peat – Division of Siberian Federal Research Centre for AgroBioTechnologies of the Russian Academy of Sciences, Research Department (Tomsk, Russia); ankalaeva@yandex.ru; <https://orcid.org/0009-0004-1283-0797>

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/)



Опыт исследования балансовых потоков парниковых газов с торфяников Беларуси, используемых для промышленной добычи торфа

© 2025 З. А. Ничипорович , Л. А. Заневская , Л. Н. Гаврилюк

ГНПО «Научно-практический центр Национальной академии наук по биоресурсам», Академическая, 27, г. Минск, 220072, Беларусь. E-mail: nichiporovich_z@mail.ru

Цель исследования. Изучение пространственно-временной динамики климатически активных парниковых газов (CO_2 , CH_4 , N_2O), выделяемых торфяниками Беларуси, которые используются для промышленной добычи торфа. Исследования направлены на получение новых коэффициентов эмиссии парниковых газов, а также уточнение и постоянное обновление определяемого на национальном уровне вклада страны в глобальные антропогенные выбросы торфяниками.

Место и время проведения. Исследования проводили на полях торфодобычи (май–сентябрь, 2022–2024 гг.) и каналах осушительной системы (июнь–сентябрь, 2024 г.) Гричино-Старобинского торфяного месторождения Солигорского района Минской области.

Методы. Метод ИК-спектроскопии применяли для суточных инструментальных измерений эмиссии C-CO_2 с торфодобывающих участков с использованием газоанализатора LI-COR LI-820, а метод статичных камер – для регистрации балансовых потоков CO_2 , CH_4 , N_2O с каналов осушительной системы в реальном режиме времени. Камеральная обработка результатов натурных измерений CO_2 , CH_4 , N_2O осуществлена на основе программного обеспечения CAMPBELL SCIENTIFIC (Австралия) и газового хроматографа «Хроматек-Кристалл 5000.2» (Россия).

Основные результаты. Впервые в Беларуси получены новые данные о выбросах CO_2 с промышленных торфяников. Установлено, что совокупные удельные выбросы C-CO_2 за 3-х летний период измерений составили $10,33 \text{ т C-CO}_2 \text{ га}^{-1}$, в том числе за 2022 г. – $3,46 \text{ т C-CO}_2 \text{ га}^{-1}$, 2023 – $5,61 \text{ т C-CO}_2 \text{ га}^{-1}$, 2024 г. – $1,26 \text{ т C-CO}_2 \text{ га}^{-1}$, средние совокупные выбросы – $3,44 \text{ т C-CO}_2 \text{ га}^{-1}$. Общий объем эмиссии CO_2 , CH_4 , N_2O с осушительных каналов составил $4,947 \text{ т/га}$; преобладающим был диоксид углерода с показателем $4,808 \text{ т CO}_{2\text{-экв.}} \text{ га}^{-1}$ (97,19%), метан в общем пуле занимал 2-м место – $0,112 \text{ т CO}_{2\text{-экв.}} \text{ га}^{-1}$ (2,26%), а эмиссия закиси азота была пренебрежимо мала – $0,027 \text{ т CO}_{2\text{-экв.}} \text{ га}^{-1}$ (0,55%). Основными факторами, влияющими на эмиссию парниковых газов, являются температурный режим и уровень грунтовых вод (УГВ). Максимум выбросов CO_2 , зарегистрированный в 2023 г., обусловлен аномально высокой средней температурой в период измерений с показателем $32,0^\circ\text{C}$ и УГВ (от $-0,7$ до $-0,8 \text{ м}$) в картовых каналах, обеспечив высокую эффективность процесса сушки, запускающего механизм антропогенной эмиссии CO_2 . Напротив, подтопление грунтовыми водами эталонных площадок с УГВ от $-0,05$ до $-0,10 \text{ м}$ и снижение средней температуры до $26,5^\circ\text{C}$ в 2024 году создало анаэробные условия, при которых была отмечена самая низкая эмиссия – $1,26 \text{ т C-CO}_2 \text{ га}^{-1}$, что в 4,45 раза ниже показателя 2023 г.

Заключение. Представленные результаты по эмиссии CO_2 получены в условиях послойно-фрезерной добычи торфа на торфяных месторождениях Беларуси и нацелены на разработку национальных коэффициентов выбросов парниковых газов с учетом генезиса торфа, специфических климатических условий и существующей практики добычи торфа в стране. В перспективе такие данные могут служить основой для создания оценочных и прогностических пространственно-временных моделей эмиссии парниковых газов с торфяников Беларуси в современных условиях их антропогенного освоения.

В настоящее время по результатам исследований разработана технология дистанционного мониторинга выбросов парниковых газов, реализованная программным комплексом информационной поддержки, который прошел 2-ой этап опытной эксплуатации и будет передан в Минприроды Республики Беларусь для применения в их практической деятельности.

Ключевые слова: торфодобыча; дренажные каналы; парниковые газы (CO_2 , CH_4 , N_2O); ИК-спектроскопия; газовая хроматография.

Цитирование: Ничипорович З.А., Заневская Л.А., Гаврилюк Л.Н. Опыт исследования балансовых потоков парниковых газов с торфяников Беларуси, используемых для промышленной добычи торфа // Почвы и окружающая среда. 2025. Том 8. № 4. е324. DOI: [10.31251/pos.v8i4.324](https://doi.org/10.31251/pos.v8i4.324)

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность исследований эмиссии и стоков парниковых газов (ПГ) с нарушенных торфяников обусловлена двумя мировыми проблемами: глобальным потеплением климата и необходимостью сокращения выбросов ПГ антропогенного происхождения.

Беларусь имеет самую высокую долю торфяников в Европе (около 15% территории страны) с общей площадью 2,39 млн га, при этом около 1,5 млн га болот (7% территории страны) осушены для использования в сельском и лесном хозяйстве и для добычи торфа (Углеродные кредиты ..., 2011). Занимая небольшую территорию, страна входит в мировой топ–10 по отношению к выбросам CO₂ с деградированных торфяников и в топ 3 – по объемам выбросов на единицу площади, уступая Индонезии и Эстонии, с показателем 1,99 т с 1 га (Peters, von Unger, 2017).

В контексте углеродного развития страны и адаптации к изменению климата, Республика Беларусь взяла на себя обязательства по проектным сокращениям выбросов ПГ до 2030 г. не менее чем на 28% от уровня выбросов 1990 г., а позже была взята новая безусловная экономическая цель – снижение выбросов до 35% с учетом сектора «ЗИЗЛХ» (Землепользование, изменение землепользования и лесное хозяйство). В настоящее время установлена новая общеэкономическая условная цель – снизить выбросы парниковых до 40% с учетом сектора «ЗИЗЛХ» при поддержке международного финансирования (Постановление Совета Министров ..., 2021).

Одной из приоритетных целей, выдвинутых Международной группой экспертов ООН по климату, является уточнение и постоянное обновление определяемых на национальном уровне вкладов каждой страны в глобальные антропогенные выбросы парниковых газов. В связи с этим, на передний план выдвигается задача создания и совершенствования функциональной системы мониторинга, отчетности и верификации антропогенных выбросов ПГ, в том числе с нарушенных торфяников.

В настоящее время в Беларуси для предоставления отчетов о выбросах парниковых газов с нарушенных торфяников используется самый низкий из трех – 1-ый уровень их инвентаризации (IPCC ..., 2006), так называемый «по умолчанию», с показателем 1,1 т/га/год для торфяников под добычей, без учета существующих практик в стране, генезиса и пространственной неоднородности торфяной залежи, специфических климатических условий. В связи с этим, для перехода на 2-ой, более высокий уровень необходима разработка национальных уточненных коэффициентов, полученных в реальных условиях на основе оценки пространственно-временной динамики потоков парниковых газов как в сезон добычи торфа, так и иные периоды. Разработка инновационных подходов и методик на основе эталонированных выбросов и автоматизированных методов их экстраполяции на аналоги-ландшафты, в том числе с применением данных дистанционного зондирования является перспективной задачей для перехода на 3-й, самый высокий уровень с учетом трансформации торфяной залежи и динамики выбросов ПГ при каждой операции полного цикла добычи торфа.

Однако до настоящего времени в Беларуси не проводилось систематических исследований в этом направлении и не выработан механизм, позволяющий решать эти задачи. Лишь с 2022 г. начаты инструментальные сезонные измерения потоков ПГ в реальном режиме времени на тестовых полигонах Беларуси, результаты которых представлены в данной статье и являются одним из аспектов реализации вышеозначенной проблемы.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Характеристика Старобинского тестового полигона. Старобинский полигон является многолетней научно-производственной базой различных организаций и ведомств для проведения наземного и дистанционного мониторинга оценки трансформации нарушенных торфяников Полесского региона в ходе их естественной антропогенной эволюции. Гричино-Старобинское торфяное месторождение (кадастровый номер 1186), на котором расположен полигон, с 2022 г. используется как сырьевая база ОАО «Старобинский ТБЗ» для добычи торфа послойно-поверхностным (фрезерным) способом (Распоряжение Президента ..., 2020). До этого участок представлял пахотные сельскохозяйственные земли, используемые для выращивания зерновых культур (пшеница, рожь, кукуруза) и сенокоса (август 2020 г.). Предполагаемый срок эксплуатации составляет 13 лет, в том числе с условно стабильной мощностью – 12, что явилось обоснованием выбора полигона как для оценки трансформации торфяной залежи, так и пространственно-временной динамики эмиссии парниковых газов в период от начала добычи торфа (2022 г.) до ее полного завершения.

Торфяная залежь представлена низинными видами торфа с преобладанием тростникового – 70,9 %, со средней глубиной залегания торфа 1,77 м. Степень разложения варьирует от 35 до 55%, влажность – от 82,41 до 90,01%, зольность – от 6,25 до 28,99%. Подстилающие грунты – пески мелкие (Отчет о выполнении работ ..., 2020).

Полигон включает два обособленных польдера с системой картвых каналов, разделенных Кривичским каналом, который является основным водоприемником полей торфодобычи (бассейн р.

Припять). Расстояние между картовыми каналами принято 40 м (Отчет о выполнении работ ..., 2020). Площадь полигона составляет 98,9 га (брутто) и 79,1 га (нетто), из них 28,61 га, незадействованные в добыче, заняты противопожарными водоемами, благоустроенными кавальерами, насосными станциями, железнодорожной веткой с колесей 750 мм и другими неэксплуатируемыми участками. Расположение Старобинского тестового полигона показано на рисунке 1.

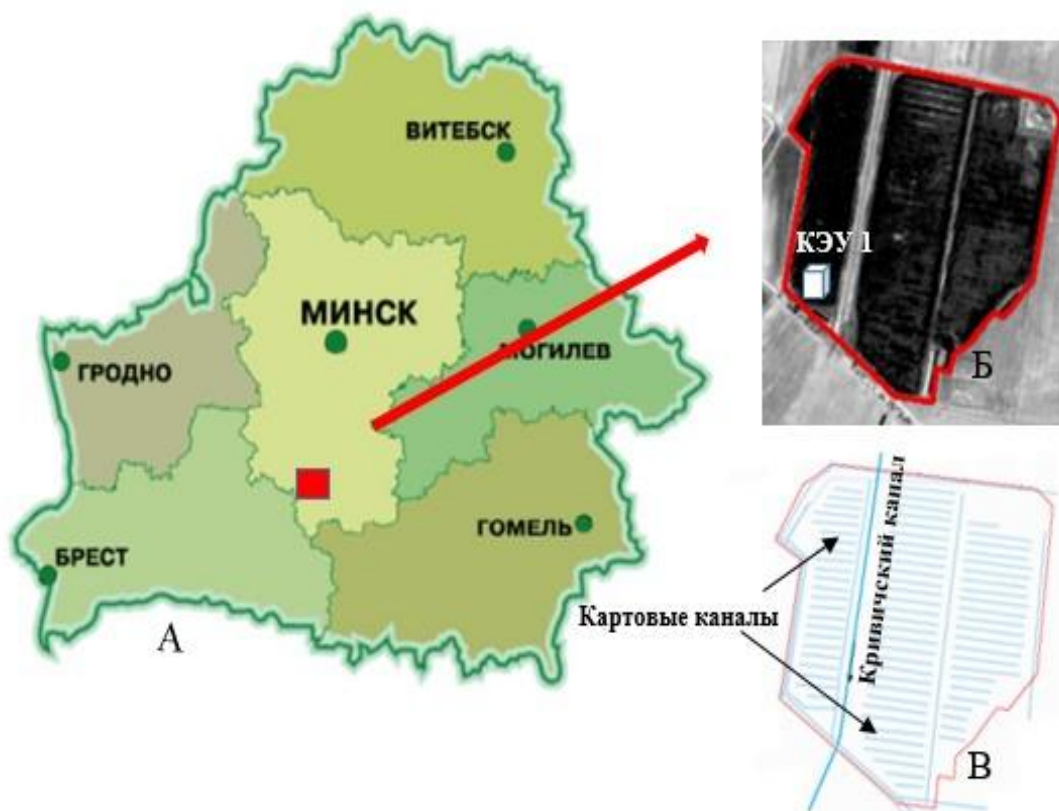


Рисунок 1. Схема расположения Старобинского тестового полигона: А – на карта-схеме Беларуси (Минская область, Солигорский район); Б – границы полигона, фрагмент космоснимка Канопус-В6 (панхром, 10.09.2023); В – схема осушительных каналов полигона.

Характеристика калибровочно-эталонного участка (КЭУ). КЭУ включает две **эталонных площадки (ЭП)**, на которых были установлены камеры для сбора газа: на основной поверхности торфяника (**ЭП-1а**) и на валовом канале (**ЭП-1б**) (рис. 2). Координатная привязка эталонных площадок представлена в таблице 1.

Таблица 1

Координатная привязка ЭП 1 в системе WGS 84

ЭП 1	Широта	Долгота
ЭП 1а	52°43'15,77" с.ш.	27°21'13,994" в.д.
ЭП 1б	52°43'14,87" с.ш.	27°21'13,27" в.д.

Метод ИК-спектроскопии применяли для суточных инструментальных измерений CO₂ один раз в месяц в реальном режиме времени с основной поверхности полей торфодобычи, используя средства газоанализатора LI-COR LI-820 при регистрации данных в автоматическом режиме каждые 5 секунд.

Метод статичных камер (Лактионова и др., 2011; Drösler, 2005) применялся для измерений балансовых потоков климатически активных парниковых газов CO₂, CH₄, N₂O с каналов осушительной сети и для сравнительного анализа выбросов с основной поверхности торфяника и каналов.

Камеральная обработка результатов натурных инструментальных измерений осуществляла с применением программного обеспечения CAMPBEL SCIENTIFIC (Австралия) и газового хроматографа «Хроматек-Кристалл 5000.2» (Россия) с электронно-захватным и пламенно-ионизационным детекторами для CO₂, CH₄, N₂O (Лактионова и др., 2011).



Рисунок 2. Калибровочно-эталонный участок: ЭП-1а – основная поверхность торфяника, ЭП-1б – валовый канал (фото Л.А. Заневской).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В рамках данной статьи исследованы выбросы парниковых газов с промышленных торфяников от двух источников: с основной поверхности торфяной залежи и из дренажных каналов.

Эмиссия CO_2 через основную поверхность торфяника. За 2022–2024 гг. измерительной сессии эмиссия CO_2 методом ИК-спектроскопии в реальном режиме времени в период добычи торфа (май–сентябрь) были рассчитаны совокупные удельные выбросы C-CO_2 , которые составили $10,33 \text{ т га}^{-1}$, в том числе с разбивкой по месяцам: 1,14; 1,26; 3,21; 2,63 и 2,09 т га^{-1} , соответственно (табл. 2).

Таблица 2

Эмиссия CO_2 за измерительный сезон добычи торфа за 2022–2024 гг.

Год	Эмиссия, $\text{т C-CO}_2 \text{ га}^{-1}$					Эмиссия, $\text{т C-CO}_2 \text{ га}^{-1}$
	май	июнь	июль	август	сентябрь	
2022	0,35	0,38	0,74	1,04	0,95	3,46
2023	0,56	0,62	2,28	1,36	0,79	5,61
2024	0,23	0,26	0,19	0,23	0,35	1,26
Всего 2022–2024	1,14	1,26	3,21	2,63	2,09	10,33
Средняя совокупная эмиссия (т/га)						3,44

Анализ результатов показал, что для балансового потока диоксида углерода с исследуемых торфяников характерно только однонаправленное действие – в сторону эмиссии. Исключение стоковой составляющей в балансе объясняется отсутствием биомассы на производственных полях в соответствии с общепринятой практикой добычи фрезерного торфа. Как показали результаты 3-х летних (2022–2024 гг.) измерений, максимальные выбросы были зарегистрированы в 2023 г. с показателем $5,61 \text{ т C-CO}_2 \text{ га}^{-1}$ за сезон торфодобычи (май–сентябрь). В 2022 г. эмиссия C-CO_2 была ниже в 1,61 раза и составила $3,46 \text{ т га}^{-1}$, а в 2024 г. – еще ниже, в 4,45 раза по отношению к 2023 г. с результатом $1,26 \text{ т га}^{-1}$ (табл. 2).

Сезонная динамика CO_2 , была рассмотрена на примере 2023 г., который характеризуется максимальными из трех сценариев выбросами, по сравнению с 2022 и 2024 гг. Так можно выделить два временных интервала распределения CO_2 : незначительный рост эмиссии с мая ($0,56 \text{ т га}^{-1}$) по июнь ($0,62 \text{ т га}^{-1}$) и быстрый максимум в июле, в период наиболее активной фазы добычи торфа, с показателем $2,28 \text{ т га}^{-1}$. Для второго периода, после подъема, в оставшиеся месяцы торфодобывающего

сезона (августе и сентябре) газообменные процессы носили затухающий характер и регистрировалось сокращение $C-CO_2$ до 1,36 и 0,79 т га⁻¹, соответственно (табл. 2, рис. 3).

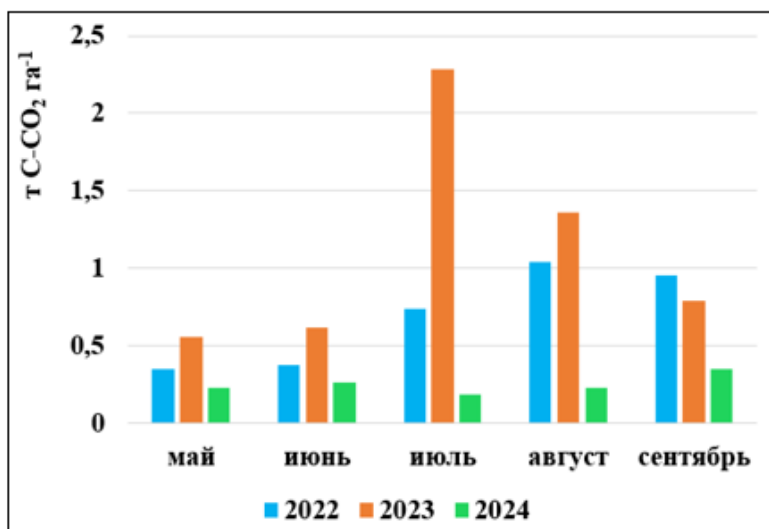


Рисунок 3. Эмиссия CO_2 за 2022–24 гг. с разбивкой по месяцам в сезон добычи торфа.

Максимальные значения эмиссии в 2023 г. по сравнению с 2022 и 2024 гг. обусловлены аномально высокими температурами атмосферного воздуха (в °C): 27,3 в мае, 36,2 в июне, 32,0 в июле, 35,8 в августе и 23,8 в сентябре. В камере для сбора газа во время измерений выбросов CO_2 температура повышалась на 1–2 градуса. Температура воздуха и торфяной залежи контролировалась в течение всего периода измерений вручную, а в камере – автоматически средствами ИК-газоанализатора. Высокая температура и уровень стояния грунтовых вод в картовых каналах от -0,7 до -0,8 м, а в валовом канале в период измерений – от -1,0 м и ниже, обеспечивали высокую эффективность процесса сушки торфяной залежи до воздушно-сухого состояния с характерной мелко дисперсной и пылевидной фракциями торфа.

Следует отметить, что добычу торфа осуществляли открытым послойно-поверхностным (фрезерным) способом, технологический процесс которого включает фрезерование, ворошение, валкование, уборку в штабели складирования. Фрезерование и ворошение обеспечивают контроль сушки и влагосодержания торфяной залежи. Удаление влаги осуществляется за счет отрыва капиллярной каймы при фрезеровании на глубину 11 (15) мм, как наиболее эффективную для дальнейшего высушивания до необходимых кондиций естественным образом, с помощью последующих 2–3-х кратных ворошений (Отчет о выполнении работ ..., 2020). Понижение влажности торфа обеспечивает приток кислорода и благоприятные аэробные условия, при которых активизируется деятельность бактерий и микроорганизмов; торф подвергается быстрой биологической деструкции, что обеспечивает более доступную органику, ее расщепление и высвобождение CO_2 . При избыточном увлажнении происходит резкое затухание этих процессов и, соответственно, снижение эмиссии CO_2 (Степанов, 2011; Waddington et al., 2002).

Несмотря на то что в 2024 г. также регистрировали высокий температурный фон в июне, июле, августе и сентябре (29,18; 27,92; 25,92 и 23,2 °C, соответственно), объем выбросов CO_2 снизился в 4,45 раза по сравнению с 2023 г., что было обусловлено подтоплением производственных площадей грунтовыми водами почти до уровня поверхности торфяной залежи, что в данном случае явилось определяющим фактором снижения выбросов CO_2 (табл. 2, рис. 3).

В 2022 г. площади Старобинского полигона только введены в эксплуатацию для добычи торфа, в мае некоторые участки находились еще в состоянии повышенной влажности, что не обеспечивало возможность добычи торфа в полном объеме. Кроме того, температура в мае и июне была не так высока и составляла 16 и 23 °C; в результате были получены низкие значения $C-CO_2$ (0,35 т га⁻¹; 0,38 т га⁻¹). С ростом температуры до 26 °C в июле-августе наблюдалось увеличение эмиссии от 0,74 до 1,04 т га⁻¹, соответственно. Несмотря на то, что сентябрь отмечен понижением температуры до 14 °C, эмиссия диоксида углерода была чуть ниже августовских значений с показателем 0,95 т га⁻¹ (табл. 2, рис 3.), что объясняется улучшенным состоянием производственных полей за счет снижения влажности в верхнем

горизонте хорошо прогретой за сезон торфяной залежи и влиянием факторов активизирующих газообменные процессы.

Сравнительный анализ балансовых потоков CO_2 с результатами зарубежных исследований торфяников, используемых для добычи торфа показал, что средняя совокупная эмиссия трех летних измерений потоков CO_2 в период добычи торфа (май–сентябрь) составила $3,44 \text{ т га}^{-1}$ (Беларусь), а за 2022 г. $-3,46 \text{ т га}^{-1}$; эти результаты почти идентичны данным российских ученых (эмиссия $3,3 \text{ т га}^{-1} \text{ год}^{-1}$), полученных на торфяниках Московской области за 11 лет измерений (2005–2015 гг.) (Сирин, Суворов, 2022).

Самые низкие значения эмиссии CO_2 из 3-х годовых сценариев зарегистрированы в 2024 г. в условиях высокого **уровня грунтовых вод (УГВ)** с показателем $1,26 \text{ т га}^{-1}$, которые наиболее близки и вполне согласуются с данными эстонских исследователей (2009 г.) на торфяниках Kasesoo, Puhatu, Hiiesoo с показателем эмиссии $1,74 \text{ т га}^{-1} \text{ год}^{-1}$ (Salm et al., 2012). В этот же ряд можно поставить значение выбросов C-CO_2 с канадских торфяников Ривьер-дю-Лу, провинция Квебек (2018–2020 гг.) с выбросами $\text{C-CO}_2 - 1,86 \text{ т га}^{-1} \text{ год}^{-1}$ (Clark et al., 2023), что также сопоставимо с результатом 2024 г., представленным в нашей статье.

Показатель эмиссии $2,53 \text{ т C-CO}_2 \text{ га}^{-1} \text{ год}^{-1}$ (2019, 2021–2022 гг.) отмечен на площадках в долине Дрейтон провинции Альберта (Hunter et al., 2024). Результат эмиссии $2,46 \text{ т C-CO}_2 \text{ га}^{-1} \text{ год}^{-1}$ турецких исследователей (2010–2014 гг.), полученный методом вихревых ковариаций на торфянике Ениджага (Guler et al., 2016), также согласуется с нашими данными 2022–24 гг. ($1,26\text{--}5,61 \text{ т C-CO}_2 \text{ га}^{-1} \text{ год}^{-1}$), попадая в эмиссионный интервал.

По данным канадских ученых (Waddington et al., 2002), при исследовании торфяников в провинции Квебек (1998–99 гг.) установлено, что при снижении УГВ от $-19,9$ до $-61,5$ см выбросы C-CO_2 в сухой год возросли в 4,13 раза – до $363 \text{ г м}^{-2} \text{ месяц}^{-1}$ по сравнению с влажным – $88 \text{ г м}^{-2} \text{ месяц}^{-1}$. Аналогичные результаты роста эмиссии C-CO_2 в 4,45 раза зафиксированы на белорусских полях торфодобычи при снижении УГВ от $-0,05$ до $-0,7\text{--}0,8$ м, выбросы диоксида варьировали от $1,26$ до $5,61 \text{ т га}^{-1}$.

Эмиссия CO_2 с каналов осушительной сети торфяников. Для полноты эксперимента в условиях выявления дополнительных источников выбросов ПГ в 2024 г. были проведены суточные измерения балансовых потоков климатически активных парниковых газов (CO_2 , CH_4 , N_2O) с валового канала (ЭП-16) в июне–сентябре. Установлено, что выбросы CO_2 составили $45,23$ ($20,03\text{--}86,62$) $\text{мг C-CO}_2 \text{ м}^{-2} \text{ час}^{-1}$, а метана, с учетом потенциала глобального потепления, регистрировалось $3,9$ ($0,775\text{--}10,75$) $\text{мг CO}_2\text{-экв. м}^{-2} \text{ час}^{-1}$ (рис. 4).

Результаты сопоставимы с данными латышских исследователей, полученными в безморозный период 2021 г., с показателем по CO_2 ($-4,6\text{--}83,8$) $\text{мг C-CO}_2 \text{ м}^{-2} \text{ час}^{-1}$ и CH_4 ($-2,2\text{--}12,6$) $\text{мг м}^{-2} \text{ час}^{-1}$ (Vanags-Duka et al., 2022). Российскими учеными представлены данные об эмиссии метана за семь лет исследований (2005–2011 гг.) с каналов полей торфодобычи Дубненского болотного массива с показателем $28,5$ ($0,01\text{--}150,0$) $\text{мг м}^{-2} \text{ час}^{-1}$ (Сирин и др., 2012). Данные эталонной площадки канала Старобинского полигона ниже и составляют $3,9$ ($0,775\text{--}10,75$) $\text{мг CO}_2\text{-экв. м}^{-2} \text{ час}^{-1}$, что также не противоречат российским и были выше нижней и ниже верхней границ выбросов CH_4 .

Выбросы закиси азота измерены в июне–сентябре 2024 г. с ЭП-16 валового канала. Объемы совокупных выбросов эмиссии N_2O составили $26,57 \text{ кг CO}_2\text{-экв. га}^{-1}$ с распределением по месяцам $3,52$; $13,02$; $6,87$ и $3,16 \text{ кг CO}_2\text{-экв. га}^{-1}$ в июне, июле, августе и сентябре, соответственно, а объемы средней совокупной эмиссии – $6,64 \text{ кг CO}_2\text{-экв. га}^{-1}$. Результаты согласуются с данными белорусских ученых (Бурло и др., 2016) при измерениях N_2O на заброшенных участках открытого торфа после добычи, составляющих $8,2 \text{ кг CO}_2\text{-экв. га}^{-1} \text{ год}^{-1}$, а также не противоречат результатам, полученным с каналов осушительной системы Московской области в 2022 г. с показателем $1,8 \text{ кг га}^{-1}$ (Сирин, Суворов, 2022).

Следует отметить, что публикаций, связанных с выбросами парниковых газов с каналов осушительной системы торфодобывающих полей, очень мало. Однако проблема представляет интерес для стран, активно занимающихся животноводством, где торфяники используют под пастбища, сенокосы, а каналы как места для водопоя животных. Последние публикации по этим исследованиям относятся к таким странам как Нидерланды (Hendriks et al., 2024), Англия (Peacock et al., 2021; Pickard et al., 2022), Германия (Tiemeyer et al., 2024). В рамках нашей статьи результаты, не связанные с добычей торфа, не подвергали сравнительному анализу, так как таковые не являются объектом исследований.

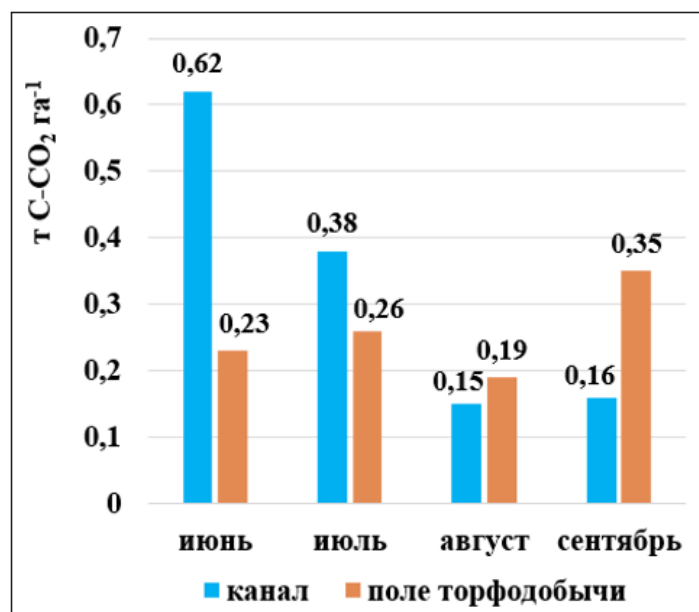


Рисунок 4. Сравнительный анализ эмиссии CO₂ за 2024 г. (с июня по сентябрь).

Сравнительный анализ эмиссии CO₂ с основной поверхности торфяника и дренажных каналов. В рамках пилотного проекта, начатого в 2024 г., были проведены синхронные исследования объемов выбросов диоксида углерода через основную поверхность торфяника и канала, находящихся в одинаковых климатических условиях – подтопления грунтовыми водами. Так как в нашей статье рассматриваются результаты, полученные в рамках только одного 2024 г., то на данном этапе не представляется возможным установить более полное влияние, учесть в полной мере многофакторность, тем более, что затопляемость грунтовыми водами для сезонной добычи торфа не является характерным состоянием потому, что, как правило, добыча в таких условиях не производится из-за низкой несущей способности торфяной залежи вследствие ее высокого влагосодержания.

Установлено, что в июне и июле с каналов регистрировались более высокие выбросы C-CO₂ (0,62 и 0,38 т га⁻¹) по сравнению с поверхностью (0,23 и 0,26 т га⁻¹); а в августе и сентябре, наоборот, выбросы с каналов ниже (0,15 и 0,16 т га⁻¹) по сравнению с поверхностью (0,19 и 0,35 т га⁻¹) (рис. 4). В целом за 4 месяца измерений в реальном режиме времени объем выбросов C-CO₂ с канала составил 1,31 т га⁻¹, что в 1,27 раз выше по сравнению с основной поверхностью торфяника с показателем 1,03 т га⁻¹.

Следует отметить, что из трех климатически активных парниковых газов (CO₂, CH₄, N₂O) эталонной площадки ЭП-16 валового канала осушительной системы торфяника значимым остается диоксид углерода с объемом 4,808 т CO_{2-экв.} га⁻¹ (97,19%), метан в общем пуле занимает 2-е место – 0,112 т CO_{2-экв.} га⁻¹ (2,26%). Значения выбросов закиси азота имели критически низкие значения и были приняты с учетом потенциала глобального потепления на уровне 0,027 т CO_{2-экв.} га⁻¹ (0,55%).

В силу того, что данные пространственно-временной динамики выбросов ПГ получены в условиях 3-х разных сценариев по температурного режиму, УГВ и состоянию торфяной залежи, построение значимых корреляционных уравнений не представляется возможным из-за недостаточного объема данных. По завершению исследований балансовых потоков ПГ каналов осушительной системы торфяников в 2025 г. результаты будут обобщены и представлены в следующих публикациях.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Впервые в Беларуси получены новые данные о выбросах C-CO₂ с поверхности торфяников. Установлено, что совокупные выбросы C-CO₂ за 3-х летний период измерений составили 10,33 т га⁻¹, в том числе за 2022 г. – 3,46 т га⁻¹, 2023 г. – 5,61 т га⁻¹, 2024 г. – 1,26 т га⁻¹, средние совокупные выбросы – 3,44 т га⁻¹. Общий объем эмиссии CO₂, CH₄, N₂O с осушительных каналов составил 4,947 т CO_{2-экв.} га⁻¹; преобладающим был диоксид углерода с показателем 4,808 т CO_{2-экв.} га⁻¹ (97,19%), метан в общем пуле занимал 2-е место – 0,112 т CO_{2-экв.} га⁻¹ (2,26%), а эмиссия закиси азота была пренебрежимо мала – 0,027 т CO_{2-экв.} га⁻¹ (0,55%).

Одними из основных факторов, влияющих на эмиссию парниковых газов, являются, на наш взгляд, температурный режим и уровень грунтовых вод. Максимум выбросов CO₂,

зарегистрированный в 2023 г., обусловлен аномально высокой средней температурой в период измерений с показателем 32,0 °C и УГВ (от -0,7 до -0,8 м) в картовых каналах, обеспечив высокую эффективность процесса сушки, запускающего механизм антропогенной эмиссии CO₂. Напротив, подтопление грунтовыми водами эталонных площадок с УГВ от -0,05 до -0,10 м и снижение средней температуры до 26,5 °C, создало анаэробные условия в 2024 г., обеспечив самые низкие CO₂ с эмиссией 1,26 т га⁻¹, что в 4,45 раза ниже показателя 2023 г.

Представленные результаты по эмиссии парниковых газов получены в условиях послойно-фрезерной добычи торфа на торфяных месторождениях Беларуси и нацелены на создание национальных коэффициентов выбросов парниковых газов с учетом генезиса торфа, специфических климатических условий и существующей практики добычи торфа в стране. В перспективе такие данные при длительных трендах могут служить основой для создания оценочных и прогностических пространственно-временных моделей эмиссии парниковых газов с торфяников Беларуси в современных условиях их антропогенного освоения.

В настоящее время по результатам данных исследований разработана технология дистанционного мониторинга выбросов парниковых газов, реализованная программным комплексом информационной поддержки, который прошел 2-ой этап опытной эксплуатации (Акт от 25.03.2025) и будет передан в Минприроды Республики Беларусь для применения в их практической деятельности.

ФИНАНСОВАЯ ПОДДЕРЖКА

Работа выполнена при финансовой поддержке Национальной академии наук Беларуси государственной программы «Научные технологии и техника» подпрограммы 6 «Исследование и использование космического пространства в мирных целях» (мероприятие 12 «Разработать технологию и программные средства мониторинга выбросов парниковых газов с торфяников Беларуси, используемых для промышленной добычи торфа, с применением данных дистанционного зондирования» (2021–2025); а также государственной программы научных исследований «Природные ресурсы и окружающая среда» подпрограммы 2 «Биоразнообразие, биоресурсы, экология» (НИР 2.15.1 «Балансовые потоки климатически активных парниковых газов (CO₂, CH₄, N₂O) с каналов осушительной системы торфяников, используемых для промышленной добычи торфа» (2024–2025).

ЛИТЕРАТУРА

Бурло А.В., Чувашова А.А., Павлюченко А.М., Лещинская Н.В., Наркевич И.П. Эмиссия закиси азота нарушенными торфяными почвами: количественная оценка и влияние факторов среды // Экологический вестник. 2016. № 1. С. 129–136.

Лактионова Е.А., Савельев В.В., Сергеева М.А. Физикохимия и биология торфа: Определение парниковых газов (CO₂, CH₄, N₂O) в торфах методом газовой хроматографии. Практикум по газохроматографическому анализу: Учебно-методическое пособие. Томск: ЦНТИ, 2011. 60 с.

Отчет о выполнении работ «Оценка воздействия на окружающую среду (ОВОС) по объекту «Добыча торфа на топливо на торфяном месторождении «Гричино-Старобинское» (северо-восточная часть) в Солигорском районе Минской области». Минск, 2020. 80 с.

Постановление Совета Министров Республики Беларусь 29 сентября 2021 г. № 553 Об установлении определяемого на национальном уровне вклада Республики Беларусь в сокращение выбросов парниковых газов до 2030 года [Электронный ресурс]. URL: <https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=C22100553&p1=1> (дата обращения 20.08.2025).

Распоряжение Президента Республики Беларусь от 27.03.2020 г. № 56 рп «О предоставлении земельных участков» [Электронный ресурс]. URL: <https://president.gov.by/ru/documents/category/rasporyazheniya> (дата обращения 30.09.2025).

IPCC Руководящие принципы национальных инвентаризаций парниковых газов МГЭИК. Хаяма: ИГЕС, 2006. Том 4. 756 с.

Сирин А.А., Суворов Г.Г., Чистотин М.В., Глаголев М.В. О значениях эмиссии метана из осушительных каналов // Динамика окружающей среды и глобальные изменения климата. 2012. Том 3. № 2.

Сирин А.А., Суворов Г.Г. Эмиссия парниковых газов на торфоразработках в центре европейской России // Метеорология и гидрология. 2022. № 3. С. 68–80. <https://doi.org/10.52002/0130-2906-2022-3-68-80>

Степанов А.Л. Микробная трансформация парниковых газов в почвах. Москва: ГЕОС, 2011. 192 с.

Углеродные кредиты и заболачивание деградированных торфяников. Климат – Биоразнообразие – Землепользование. Теория и практика – уроки реализации пилотного проекта в Беларуси / Ф. Таннебергер и др.; под ред. Ф. Таннебергер, В. Вихтманн. Штутгарт: Научное издательство Швейцарбарт, 2011. 224 с.

Clark L., Strachan I. B., Strack M., Roulet N. T., Knorr K.-H., Teickner, H. Duration of extraction determines CO₂ and CH₄ emissions from an actively extracted peatland in eastern Quebec, Canada // Biogeosciences. 2023. Vol. 20. No. 3. P. 737–751. <https://doi.org/10.5194/bg-20-737-2023>

Drösler M. Trace gas exchange and climatic relevance of bog ecosystems, southern Germany. PhD thesis. Technischen Universität München, 2005. 182 p.

Guler A.-S., Xuhui L., Fatih E., Nusret K. Large interannual variability in net ecosystem carbon dioxide exchange of a disturbed temperate peatland // Science of the Total Environment. 2016. Vol. 554–555. P. 192–202. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.02.153>

Hendriks L., Weideveld S., Fritz C., Stepina T., Aben R.C.H., Fung N.E., Kosten S. Drainage ditches are year-round greenhouse gas hotlines in temperate peat landscapes // Freshwater Biology. 2024. Vol. 69. No. 1. P. 143–156. <https://doi.org/10.1111/fwb.14200>

Hunter M.L., Frei R.J., Strachan I.B., Strack M. Environmental and management drivers of carbon dioxide and methane emissions from actively-extracted peatlands in Alberta, Canada // Journal of Geophysical Research: Biogeosciences. 2024. Vol. 129. No. 3. e2023JG007738. <https://doi.org/10.1029/2023JG007738>

Peacock M., Audet J., Bastviken D., Futter M.N., Gauci V., Grinham A.R., Harrison J.A., Kent M.S., Kosten S., Lovelock C.E., Veraart A.J., Evans C.D. Global importance of methane emissions from drainage ditches and canals // Environmental Research Letters. 2021. Vol. 16. No. 4. P. 044010. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abeb36>

Peters J., von Unger M. Peatlands in the EU Regulatory Environment (Federal Agency for Nature Conservation, BfN), 2017. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.bfn.de/en/publications/bfn-schriften/bfn-schriften-454-peatlands-eu-regulatory-environment> (дата обращения 28.07.2025).

Pickard A.E., Branagan M., Billett M.F., Andersen R., Dinsmore K.J. Effects of peatland management on aquatic carbon concentrations and fluxes // Biogeosciences. 2022. Vol. 19. No. 5. P. 1321–1334. <https://doi.org/10.5194/bg-19-1321-2022>

Salm J.-O., Maddison M., Holm S., Soosaar K., Truu J., Mander Ü. Emissions of CO₂, CH₄ and N₂O from undisturbed, drained and mined peatlands in Estonia // Hydrobiologia. 2012. Vol. 692. P. 41–55. <https://doi.org/10.1007/s10750-011-0934-7>

Tiemeyer B., Heller S., Oehmke W., Gatersleben P., Bräuer M., Dettmann U. Effects of water management and grassland renewal on the greenhouse gas emissions from intensively used grassland on bog peat // Agricultural and Forest Meteorology. 2024. Vol. 345. P. 109858. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2023.109858>

Vanags-Duka M., Bārdule A., Butlers A., Upenieks E.-M., Lazdiņš A., Purviņa D., Līcīte I. GHG Emissions from Drainage Ditches in Peat Extraction Sites and Peatland Forests in Hemiboreal Latvia // Land. 2022. Vol. 11. No. 12. P. 2233. <https://doi.org/10.3390/land11122233>

Waddington J.M., Warner K.D., Kennedy G.W. Cutover peatlands: A persistent source of atmospheric CO₂ // Global Biogeochemical Cycles. 2002. Vol. 16. No. 1. P. 1–7. <https://doi.org/10.1029/2001GB001398>

Поступила в редакцию 02.08.2025

Принята 31.10.2025

Опубликована 04.11.2025

Сведения об авторах:

Ничипорович Зинаида Адамовна – кандидат технических наук, заведующая лабораторией инструментальной диагностики природных систем и объектов Государственного научно-производственного объединения «Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по биоресурсам» (г. Минск, Республика Беларусь); nichiporovich_z@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0009-9393-8383>

Заневская Людмила Александровна – научный сотрудник лаборатории инструментальной диагностики природных систем и объектов Государственного научно-производственного объединения «Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по биоресурсам» (г. Минск, Республика Беларусь); ludmila-bel@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0002-0978-2638>

Гаврилюк Леонид Николаевич – младший научный сотрудник лаборатории инструментальной диагностики природных систем и объектов Государственного научно-производственного объединения

«Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по биоресурсам» (г. Минск, Республика Беларусь); rett14301@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/)

Balance greenhouse gas fluxes from the Belarus peat deposits used for industrial peat extraction

© 2025 Z. A. Nichiporovich , L. A. Zanevskaya , L. N. Gavrilyuk

State Scientific and Production Association "Scientific and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus for Bioresources", Akademicheskaya st., 27, Minsk, Republic of Belarus. E-mail: nichiporovich_z@mail.ru

The aim of the study was to assess the spatiotemporal dynamics of climatically active greenhouse gases (CO_2 , CH_4 , N_2O) from the Belarus peat deposits used for industrial peat extraction and to obtain new greenhouse gas emission coefficients, as well as to clarify and update the country's contribution in global anthropogenic emission of peatlands.

Location and time of the study. The research was carried out in the peat extraction fields (May–September, 2022–2024) and from the drainage system channels (June–September, 2024) of the Grichino–Starobinsky peat deposit in the Soligorsky district of the Minsk region.

Methods. The IR spectroscopy method was used for daily instrumental measurements of C- CO_2 emissions from peat-producing sites using a LI-COR LI-820 gas analyzer. The static camera method was used to record balanced fluxes of CO_2 , CH_4 , and N_2O from the channels of the drainage system in real time. In-house processing of the results of field measurements of CO_2 , CH_4 , N_2O was carried out on using the software from Campbell Sscienci (Australia) and the Chromatek-Kristall 5000.2 gas chromatograph (Russia).

Results. For the first time in Belarus, new data on CO_2 emissions from industrial peat extraction sites were obtained. It was found that the cumulative specific CO_2 emissions over the 3-year measurement period amounted to $10,33 \text{ t C-CO}_2 \text{ ha}^{-1}$, including $3,46 \text{ t C-CO}_2 \text{ ha}^{-1}$ in 2022, $5,61 \text{ t C-CO}_2 \text{ ha}^{-1}$ in 2023, $1,26 \text{ t C-CO}_2 \text{ ha}^{-1}$ in 2024, and average cumulative emissions of $3,44 \text{ t C-CO}_2 \text{ ha}^{-1}$. The total CO_2 , CH_4 , and N_2O emissions from the drainage channels amounted to $4,947 \text{ t CO}_{2\text{-eq.}} \text{ ha}^{-1}$, with carbon dioxide predominating with an index of $4,808 \text{ t CO}_{2\text{-eq.}} \text{ ha}^{-1}$ (97,19%). Methane ranked second with $0,112 \text{ t CO}_{2\text{-eq.}} \text{ ha}^{-1}$ (2,26%), and nitrous oxide emissions of $0,027 \text{ t CO}_{2\text{-eq.}} \text{ ha}^{-1}$ (0,55%) were negligible.

The main factors influencing green house gas emissions are the temperature regime and the ground water level (GWL) level. The maximum CO_2 emissions recorded in 2023 were caused by an abnormally high average temperature during the measurement period with an index of $32,0^\circ \text{C}$ and GWL ranging from $-0,7$ to $-0,8 \text{ m}$ in the cart channels, ensuring high efficiency of the drying process, triggering the mechanism of anthropogenic CO_2 emissions. On the contrary, in 2024 the groundwater flooding of reference sites with GWL ranging from $-0,05$ to $-0,10 \text{ m}$, accompanied by a decrease in the average temperature to $26,5^\circ \text{C}$, under the resulting anaerobic conditions showed the lowest CO_2 emissions of $1,26 \text{ t C-CO}_2 \text{ ha}^{-1}$, i.e. 4,45 times lower than in 2023.

Conclusions. The presented results about CO_2 emissions were obtained under conditions of layer-by-layer milling of peat in peat deposits in Belarus and can contribute in developing national GHG emission coefficients, taking into account peat genesis, specific climatic conditions and the existing practice of peat extraction in the country. In the future, such data can serve as a basis for developing estimated and predictive spatial and temporal models of greenhouse gas emissions from Belarus peatlands under contemporary conditions of their anthropogenic development. Based on the research results, a technology for remote monitoring of greenhouse gas emissions was developed, implemented by the information support software package, which passed the 2nd stage of operation testing and will be transferred to the Ministry of Natural Resources of the Republic of Belarus for use in their practical activities.

Keywords: peat extraction; drainage channels; greenhouse gases (CO_2 , CH_4 , N_2O); IR-spectroscopy; gas chromatography.

How to cite: Nichiporovich Z.A., Zanevskaya L.A., Gavrilyuk L.N. Balance greenhouse gas fluxes from the Belarus peat deposits used for industrial peat extraction. The Journal of Soils and Environment. 2025. 8(4). e324. DOI: [10.31251/pos.v8i4.324](https://doi.org/10.31251/pos.v8i4.324) (in Russian with English abstract).

FUNDING

The work was carried out with the financial support of the National Academy of Sciences of Belarus from the state program "High-tech technologies and equipment", subprogram 6 "Exploration and use of outer space for peaceful purposes", event 12 "To develop technology and software too tls for monitoring greenhouse

gas emissions from peat bogs in Belarus used for industrial peat extraction using remote sensing data" (2021–2025); as well as by the state scientific research program "Natural Resources and the environment", subprogram 2 "Biodiversity, bioresources, ecology" (Research 2.15.1 "Balanced flows of climatically active greenhouse gases (CO₂, CH₄, N₂O) from channels of the drainage system of peat bogs used for industrial peat extraction" (2024–2025).

REFERENCES

- Burlo A.V., Chuvashova A.A., Pavluchenko A.M., Liashchynskaya N.V., Narkevitch I. P. Emission of nitrous oxide from disturbed peat soils: quantitative assessment and influence of environmental factors. *Ecological Bulletin*. 2016. No. 1. P. 129–136. (in Russian).
- Laktionova E.A., Savelyev V.V., Sergeeva M.A. Physical chemistry and biology of peat: Determination of greenhouse gases (CO₂, CH₄, N₂O) in peat by gas chromatography. Workshop on gas chromatographic analysis: A teaching aid. Tomsk: STIC, 2011. 60 p. (in Russian).
- Environmental Impact Assessment (EIA) report on the Peat Extraction for Fuel facility at the Grichino-Starobinskoye peat deposit (northeastern part) in the Soligorsk district of the Minsk Region. Minsk, 2020. 80 p. (in Russian).
- Resolution of the Council of Ministers of the Republic of Belarus No. 553 on 29 September 2021 On Establishing the Nationally Determined Contribution of the Republic of Belarus to Reducing Greenhouse Gas Emissions by 2030 [Electronic resource]. URL: <https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=C22100553&p1=1> (accessed on 20.08.2025). (in Russian).
- Decree of the President of the Republic of Belarus dated 03.2.2020 No. 56 rp "On the provision of land plots" [Electronic resource]. URL: <https://president.gov.by/ru/documents/category/rasporyazheniya> (accessed on 30.09.2025). (in Russian).
- IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Hayama: IGES, 2006. Vol. 4. 756 p. (in Russian).
- Sirin A.A., Suvorov G.G., Chistotin M.V., Glagolev M.V. Values of methane emission from drainage ditches. *Environmental Dynamics and Global Climate Change*. 2012. Vol. 3. No. 2. (in Russian).
- Sirin A., Suvorov G. Greenhouse Gas Emissions from Peat Extraction in the Center of the European Part of Russia. *Russian Meteorology and Hydrology*. 2022. Vol. 47. No. 3. P. 207–216. <https://doi.org/10.3103/S1068373922030062>
- Stepanov A.L. Microbial transformation of greenhouse gases in soils. Moscow: GEOS, 2011. 192 p. (in Russian)
- Carbon credits from peatland rewetting. Climate – Biodiversity – Land use. Science, policy, implementation and recommendations of a pilot project in Belarus / F. Tanneberger et al.; F. Tanneberger, W. Wichtmann (eds.). Stuttgart: Schweizerbart Science Publ., 2011. 224 p. (in Russian).
- Clark L., Strachan I. B., Strack M., Roulet N. T., Knorr K.-H., Teickner, H. Duration of extraction determines CO₂ and CH₄ emissions from an actively extracted peatland in eastern Quebec, Canada. *Biogeosciences*. 2023. Vol. 20. No. 3. P. 737–751. <https://doi.org/10.5194/bg-20-737-2023>
- Drösler M. Trace gas exchange and climatic relevance of bog ecosystems, southern Germany. PhD thesis. Technischen Universität München, 2005. 182 p.
- Guler A.-S., Xuhui L., Fatih E., Nusret K. Large interannual variability in net ecosystem carbon dioxide exchange of a disturbed temperate peatland. *Science of the Total Environment*. 2016. Vol. 554–555. P. 192–202. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.02.153>
- Hendriks L., Weideveld S., Fritz C., Stepina T., Aben R.C.H., Fung N.E., Kosten S. Drainage ditches are year-round greenhouse gas hotlines in temperate peat landscapes. *Freshwater Biology*. 2024. Vol. 69. No. 1. P. 143–156. <https://doi.org/10.1111/fwb.14200>
- Hunter M.L., Frei R.J., Strachan I.B., Strack M. Environmental and management drivers of carbon dioxide and methane emissions from actively-extracted peatlands in Alberta, Canada. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*. 2024. Vol. 129. No. 3. e2023JG007738. <https://doi.org/10.1029/2023JG007738>
- Peacock M., Audet J., Bastviken D., Futter M.N., Gauci V., Grinham A.R., Harrison J.A., Kent M.S., Kosten S., Lovelock C.E., Veraart A.J., Evans C.D. Global importance of methane emissions from drainage ditches and canals. *Environmental Research Letters*. 2021. Vol. 16. No. 4. P. 044010. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abeb36>
- Peters J., von Unger M. Peatlands in the EU Regulatory Environment (Federal Agency for Nature Conservation, BfN), 2017. [Electronic resource]. URL: <https://www.bfn.de/en/publications/bfn-schriften/bfn-schriften-454-peatlands-eu-regulatory-environment> (accessed on 28.07.2025).
- Pickard A.E., Branagan M., Billett M.F., Andersen R., Dinsmore K.J. Effects of peatland management on aquatic carbon concentrations and fluxes. *Biogeosciences*. 2022. Vol. 19. No. 5. P. 1321–1334. <https://doi.org/10.5194/bg-19-1321-2022>

Salm J.-O., Maddison M., Holm S., Soosaar K., Truu J., Mander Ü. Emissions of CO₂, CH₄ and N₂O from undisturbed, drained and mined peatlands in Estonia. *Hydrobiologia*. 2012. Vol. 692. P. 41–55. <https://doi.org/10.1007/s10750-011-0934-7>

Tiemeyer B., Heller S., Oehmke W., Gatersleben P., Bräuer M., Dettmann U. Effects of water management and grassland renewal on the greenhouse gas emissions from intensively used grassland on bog peat. *Agricultural and Forest Meteorology*. 2024. Vol. 345. P. 109858. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2023.109858>

Vanags-Duka M., Bārdule A., Butlers A., Upenieks E.-M., Lazdiņš A., Purviņa D., Līcīte I. GHG Emissions from Drainage Ditches in Peat Extraction Sites and Peatland Forests in Hemiboreal Latvia. *Land*. 2022. Vol. 11. No. 12. P. 2233. <https://doi.org/10.3390/land11122233>

Waddington J.M., Warner K.D., Kennedy G.W. Cutover peatlands: A persistent source of atmospheric CO₂. *Global Biogeochemical Cycles*. 2002. Vol. 16. No. 1. P. 1–7. <https://doi.org/10.1029/2001GB001398>

Received 02 August 2025

Accepted 31 October 2025

Published 04 November 2025

About the authors:

Zinaida A. Nichiporovich – Candidate of Technical Sciences, Head of the Laboratory of Instrumental Diagnostics of Natural Systems and Objects in the State Scientific and Production Association "Scientific and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus for Bioresources" (Minsk, Republic of Belarus); nichiporovich_z@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0009-9393-8383>

Liudmila A. Zanevskaya – Researcher of the Laboratory of Instrumental Diagnostics of Natural Systems and Objects in the State Scientific and Production Association "Scientific and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus for Bioresources" (Minsk, Republic of Belarus); ludmila-bel@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0002-0978-2638>

Leonid N. Gavrilyuk – Junior Research Assistant of the Laboratory of Instrumental Diagnostics of Natural Systems and Objects in the State Scientific and Production Association "Scientific and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus for Bioresources" (Minsk, Republic of Belarus); rett14301@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/)



История проведения научной конференции «Торфяные болота Сибири: функционирование, ресурсы, восстановление» в 2009–2025 гг.

© 2025 Ю. А. Харанжевская 

Сибирский научно-исследовательский институт сельского хозяйства и торфа – филиал ФГБУН
Сибирский федеральный научный центр агробиотехнологий РАН, ул. Гагарина, 3, г. Томск,
634050, Россия. E-mail: kharan@yandex.ru

В статье представлена основная идея и история проведения конференции «Торфяные болота Сибири: функционирование, ресурсы, восстановление» в 2009–2025 году в г. Томске, инициатором которой являлся Сибирский НИИ сельского хозяйства и торфа – филиал Сибирского федерального научного центра агробиотехнологий РАН. В разные годы в организации конференции принимали участие Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томский политехнический университет, Томский государственный университет, Союз охраны природы и биоразнообразия (Nature and Biodiversity Conservation Union), Государственный заповедник «Васюганский» и др. В 2009–2015 гг. конференция имела более практическую направленность; основной целью ее проведения было установление диалога в формате Круглого стола представителей науки, бизнеса и региональной администрации по вопросам использования торфяных ресурсов. В 2021–2025 гг. формат проведения конференции изменился в контексте новой климатической политики России, связанной с ратификацией Парижского соглашения по климату, в связи с чем актуальным стал вопрос восстановления нарушенных и выработанных торфяных болот.

Ключевые слова: торфяные болота; функционирование; ресурсы; восстановление; научная конференция; история; международное сотрудничество.

Цитирование: Харанжевская Ю.А. История проведения научной конференции «Торфяные болота Сибири: функционирование, ресурсы, восстановление» в 2009–2025 гг. // Почвы и окружающая среда. 2025. Том 8. № 4. е342. DOI: [10.31251/pos.v8i4.342](https://doi.org/10.31251/pos.v8i4.342)

Идея организации и проведения конференции, посвященной торфяным ресурсам и болотам Сибири, возникла в связи с высокой заболоченностью Томской области и постоянным интересом Администрации области и предпринимателей к вопросам практического использования торфа. В 1986–1995 гг. в области функционировало 5 крупных высокomeханизированных торфопредприятий: Барабинское, Орловское, Ишкульское, Аркадьевское и Гусевское, но в конце 90-х годов производственная база всех торфопредприятий была ликвидирована, и промышленная добыча торфа прекратилась. В 2000-х годах сформировалась идея восстановления торфяной промышленности в Томской области; с целью ее возрождения была создана рабочая группа, состоящая из сотрудников Сибирского НИИ торфа (в настоящее время Сибирский НИИ сельского хозяйства и торфа (СибНИИСХиТ) – филиал ФГБУН Сибирский федеральный научный центр агробиотехнологий Российской академии наук (СФНЦА РАН)), по подготовке программы освоения, добычи, переработки и использования торфа. Этой группой была разработана «Концепция рационального использования торфа Сибири и Томской области на 2006–2010 гг.». Состояние и перспективы развития торфодобывающей промышленности в сибирских субъектах РФ были рассмотрены на заседании координационного совета по ресурсной части топливно-энергетического комплекса Сибири межрегиональной ассоциации «Сибирское соглашение» 15 декабря 2005 г. при непосредственном участии чл.-корр. Л.И. Инишевой и д.с.-х.н. Э.В. Титовой. В последующий период 2006–2009 гг. СибНИИСХиТ разработал техническое задание на производство продуктов комплексной переработки торфа и геоинформационные базы данных по торфяным ресурсам Томской области.

В 2009 году в г. Томске была организована первая Международная научно-практическая конференция «Проблемы изучения и использования торфяных ресурсов Сибири». Организатором конференции выступил Сибирский НИИ сельского хозяйства и торфа при поддержке Российской академии сельскохозяйственных наук. Инициатива проведения конференции была поддержана ОАО «Российская топливная компания» и Томским политехническим университетом. Однако конференция по решению руководства института была проведена в дистанционном формате. В конференции приняли участие 65 человек из 10 регионов России (Московская, Владимирская, Тверская, Иркутская, Новосибирская и Томская области, Ханты-Мансийский автономный округ, Красноярский и

Хабаровский края, Республика Алтай). Кроме того, участвовали ученые из Латвии, Литвы, Польши, Украины. Тематика конференции охватывала широкий круг теоретических и практических вопросов. В докладах были представлены аспекты образования и развития болот, рассмотрены особенности ландшафтной структуры растительного покрова, приведена характеристика ресурсов болот. Большое внимание уделялось геоэкологическим исследованиям ресурсов болот, в том числе представлена проблема накопления ртути в торфяной залежи. Большой блок вопросов посвящен использованию торфа и продуктов переработки в различных отраслях хозяйственной деятельности.

В рамках конференции было организовано три секции. В первой секции «Генезис, разведка и ресурсы торфа» были представлены доклады, посвященные вопросам генезиса, условиям и скорости торфонакопления в болотах разных регионов России. На секции рассмотрено современное состояние и направления рационального использования торфяных ресурсов Сибири, перспективные торфяные месторождения Томской области для комплексной переработки торфа. Часть докладов была посвящена лечебным свойствам торфов Томской области, прогнозной оценке их запасов и перспективам использования в санаторно-курортной практике. Во второй секции «Экология и рациональное природопользование торфяных болот» были представлены доклады, посвященные содержанию биогенных элементов в торфах, характеристике химического состава болотных вод и, в целом, геохимической характеристике ландшафтов торфяных болот при нефтегазодобыче. Рассматривались сорбционно-десорбционные свойства торфов, эмиссия метана из болотных ландшафтов, роль микробиальных сообществ в утилизации потоков метана при формировании битумов торфа. В третьей секции «Физика и химия торфа, продукты переработки» представлены доклады, посвященные перспективам использования торфа при переработке железной руды Бакcharского месторождения и региональной модели торфяной отрасли. В ряде докладов рассмотрены практические разработки продукции из торфа: гидрофобно-модифицирующие составы, эффективные строительные материалы, кормовые добавки. По итогам конференции был издан сборник материалов (Проблемы изучения ..., 2009) (рис. 1), в редакционную коллегия которого вошли д.с-х.н. Э.В. Титова и к.г.-м.н. В.К. Бернатонис; ученым секретарем конференции была к.г.-м.н. Ю.А. Харанжевская. В составе организационного комитета над организацией конференции работали к.г.н. А.А. Синюткина (Калаева), И.С. Седнев, Е.С. Воистинова.



Рисунок 1. Сборник первой научно-практической конференции «Проблемы изучения и использования торфяных ресурсов Сибири», 2009 год.

В 2014 году заинтересованность в использовании торфа в регионе значительно возросла, но реальные мероприятия по освоению торфа оставались на начальном этапе. Причиной этого являлся целый ряд проблем: слабое развитие инфраструктуры в Томской области, несостоятельная законодательная база в области торфодобычи, недооценка торфяных ресурсов, слабая изученность показателей качества торфяного сырья, отсутствие адекватных подходов к оценке запасов торфа и его

кондиций для производства того или иного вида продукции, нехватка детальной информации о современном состоянии торфяных болот, в том числе осушенных, выработанных и подготовленных к добыче, потеря традиционных рынков сбыта торфяной продукции; недостаток профессиональных кадров в организациях по добыче торфа и т.д. Для решения обозначенных выше проблем и развития торфяной отрасли в Томской области требовалась переориентация на освоение инноваций. Сибирский НИИ сельского хозяйства и торфа выступил с предложением по организации небольших предприятий по добыче и комплексной переработке торфа в модульном исполнении и применение торфа в качестве топлива для выработки электроэнергии. Организация такого рода предприятий позволила бы обеспечить регион рядом сопутствующих продуктов: грунты и удобрения из торфа для тепличных хозяйств, сорбенты и мелиоранты для рекультивации территорий и т.д.

Перспективные направления развития торфяной отрасли в Томской области обсуждались в рамках второй Международной научно-практической конференции «Проблемы изучения и использования торфяных ресурсов Сибири» 18–21 августа 2014 года в г. Томске. Организатором конференции стал ГНУ Сибирский НИИ сельского хозяйства и торфа Россельхозакадемии (сейчас СибНИИСХиТ – филиал ФГБУН СФНЦА РАН), при участии Института мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Национального исследовательского Томского государственного университета. В состав программного комитета конференции вошли ведущие специалисты в области торфяных ресурсов: Иван Иванович Лиштван, д.т.н., академик; Александр Кириллович Карабанов, д.г.-м.н., чл.-корр., Институт природопользования НАН Белоруссии; Томаш Окружко (Tomasz Okruzko), профессор Варшавского университета естественных наук (Warsaw University of Life Science). Целью конференции стало обсуждение современного состояния торфяных ресурсов области, проблем и перспектив их освоения, разработка программы по развитию торфяной промышленности в регионе. Практической задачей конференции был поиск потенциальных партнеров и инвесторов для создания производств по добыче и переработке торфа, обмен опытом с коллегами из Белоруссии и регионов России. Для решения этой задачи в рамках конференции был организован круглый стол «Опыт и перспективы создания торфяных предприятий», который проходил под председательством директора Сибирского НИИ сельского хозяйства и торфа Н.М. Белоусова; на круглом столе были представлены результаты работы ряда предприятий, занимающихся добычей и переработкой торфа в регионе. Так, Александр Егорович Донькин (ООО «Инноторф», Пенза) представил доклад на тему «Опыт создания предприятия по переработке торфа», а Алексей Александрович Войстриков (ЗАО «Экопром», Екатеринбург) рассказал о своем опыте создания торфопредприятия в Свердловской области.

В рамках конференции были рассмотрены вопросы, связанные с исследованием и освоением торфяных месторождений, оценкой экологического состояния торфяных болот и их пожароопасности, созданием инновационных продуктов из торфа, анализом эффективности применения препаратов из торфа в сельском хозяйстве и при очистке нефтезагрязненных территорий и т.д. В конференции в 2014 году приняли участие представители Республики Беларусь, Китая, Финляндии, а также различных регионов России: Томской, Тюменской, Тверской, Московской, Свердловской и Новосибирской областей, Алтайского края, Якутии (Республика Саха), всего около 70 человек. На конференции состоялось 35 устных докладов, которые были представлены на пленарном заседании, круглом столе и трех секциях (рис. 2).

На пленарной сессии были представлены доклады академика НАН Беларуси И.И. Лиштвана о перспективах комплексного освоения торфяных ресурсов Беларуси, физико-химических свойствах торфа и их трансформации. Директор Института природопользования А.К. Карабанов сделал доклад о направлениях работы института и перспективах сотрудничества в области торфяных ресурсов. Лина Ларва (Leena Larva) из Международного торфяного общества (International Peat Society) сделала доклад о применении торфа в бальнеологии.

На заседании первой секции «Генезис, разведка и технологии добычи торфа» были рассмотрены вопросы изменений стратиграфии и свойств торфяной залежи болот после осушения, разложения растительных остатков в торфяной залежи болот и т.д. На заседании второй секции «Геоэкологические аспекты изучения торфяных болот» был представлен ряд докладов, посвященных проблемам современной аккумуляции углерода, торфяным пожарам, вопросам суточной динамики температуры и испарения с торфяной залежи болот, особенностям структуры и динамики болотных ландшафтов, использовании морфометрических показателей простейших в качестве источника дополнительной информации о палеотермическом режиме болот.

На заседании третьей секции «Физика и химия торфа, продукты переработки» представлены доклады, посвященные технологии очистки сточных вод в системе искусственных водно-болотных

угодий (constructed wetlands), проблемам химической и биотехнологической переработки торфа, созданию торфяных препаратов и стимуляторов роста растений, оценке эффективности их применения в растениеводстве и в животноводстве; были рассмотрены особенности состава органических соединений верховых торфов Беларуси и Западной Сибири, процессы формирования лабильного органического вещества в процессе биологической рекультивации при применении торфяных препаратов и т.д. Председателями секций были к.х.н Татьяна Ивановна Бурмистрова (СибНИИСХиТ), к.б.н. Маргарита Сергеевна Романова (СибНИИСХиТ), к.г.-м.н. Вилис Каземирович Бернатонис (Томский политехнический университет). По итогам конференции был издан сборник материалов (Проблемы изучения ..., 2014).

Вторая Конференция дала новый импульс развитию исследований в области рационального использования торфяных ресурсов, созданию новых торфопродуктов для различных отраслей экономики, укреплению кадрового потенциала в Сибири.



Рисунок 2. Участники Второй международной научно-практической конференции «Проблемы изучения и использования торфяных ресурсов Сибири» в Институте мониторинга климатических и экологических систем СО РАН в 2014 году (фото Т.С. Саваленко).

В рамках конференции в 2014 году было проведено две экскурсии – на болото Темное и на отроги Васюганского болота (Иксинское болото) (рис. 3–4). Маршрут полевой экскурсии на болоте Темное проходил через естественные и осушенные участки, которые в прошлом представляли собой фрезерные поля торфопредприятия «Орловское»; заканчивалась экскурсия на берегу озера Мурашка.

В 2015 году была организована третья Международная научно-практическая конференция «Проблемы изучения и использования торфяных ресурсов Сибири», которая проводилась с 27 сентября по 3 октября в г. Томске на базе Сибирского НИИ сельского хозяйства и торфа, Института мониторинга климатических и экологических систем СО РАН и Сибирского федерального научно-клинического центра Федерального медико-биологического агентства. В конференции приняли участие представители Республики Беларусь, Финляндии, Германии, Польши, а также различных регионов России: Томской, Тюменской, Тверской, Московской, Тульской, Архангельской и Новосибирской областей, Республики Алтай, Приморского края; всего около 70 человек. На конференции состоялось 44 устных доклада, которые были представлены на пленарном заседании и трех секциях (рис. 5).



Рисунок 3. Участники полевой экскурсии на болото Темное в 2014 году (фото Т.С. Саваленко).



Рисунок 4. Участники полевой экскурсии на Иксинское болото в 2014 году (фото А.А. Синюткиной).

В рамках конференции было проведено два круглых стола по темам: «Применение торфяных грязей в санаторно-курортных организациях и во внекурортной практике» и «Состояние и перспективы развития торфяной отрасли в Томской области» (рис. 6). На пленарной сессии были представлены доклады заведующего лаборатории использования и охраны торфяных и сапропелевых

месторождений Института природопользования НАН Беларуси Б.В. Курзо – о перспективах комплексного освоения торфяных и сапропелевых ресурсов Беларуси; зам. директора по науке ФГБУ «Станция агрохимической службы «Томская» Э.В. Титовой – об истории освоения торфяных месторождений Томской области; профессора Томаш Окрузко (Tomasz Okruzko) из Варшавского университета естественных наук (Warsaw University of Life Science) – о проблеме управления водно-болотными угодьями в Польше на примере Бейбжанского национального парка; Лина Ларва (Leena Larva), представитель Международного торфяного общества (International Peat Society) – о проблеме применения торфа в бальнеологии.



Рисунок 5. Участники Третьей Международной научно-практической конференции «Проблемы изучения и использования торфяных ресурсов Сибири» в Институте мониторинга климатических и экологических систем СО РАН в 2015 году (фото Л.П. Гашковой).

На заседании первой секции «Генезис, разведка и ресурсы торфа» были рассмотрены вопросы изменения условий увлажнения местообитаний палеосообществ в течение голоцена, оценки влияния цикличности климата на развитие болотных массивов Западной Сибири, возобновления торфяных ресурсов и их антропогенной динамики в современных условиях и т.д.

На второй секции «Геоэкологические особенности торфяных болот» был представлен ряд докладов, посвященных вопросам эволюции торфяных почв в условиях повторного обводнения; трансформации структуры сообществ раковинных амёб в процессе формирования торфяной залежи и антропогенной бассейновой трансформации химического состава болотных вод; изменения содержания тяжелых металлов в торфяной залежи болот; оценке углеродного обмена растительных сообществ болот и минерализации органического вещества торфов; исследования температурного режима торфяных почв и т.д.

На заседании третьей секции «Физика и химия торфа, продукты переработки» заслушаны доклады, посвященные вопросам деструкции нефтяных компонентов в почве под воздействием торфоминеральной композиции, использования торфа для ремедиации почв техногенных экосистем, изучению спектрально-люминесцентных свойств гуминовых кислот и состава органических соединений и их изменений в различных регионах России в результате деструкции, оценке эффективности применения препаратов из торфа в растениеводстве и в животноводстве и т.д.



Рисунок 6. Заседание круглого стола «Состояние и перспективы развития торфяной отрасли в Томской области» в Администрации Томской области в рамках конференции в 2015 году (фото А.А. Синюткиной).

Оргкомитетом конференции было проведено две экскурсии – на болото Ишколь и на болота бассейна р. Кеть (рис. 7–8), а также Школа молодых ученых, в рамках которой прочитаны лекции ведущими учеными: Томаш Окрузко (Tomasz Okruzko), Б.В. Курзо, О.С. Мисниковой. По итогам конференции был издан сборник материалов конференции (Проблемы изучения ..., 2015). В рамках работы круглого стола «Применение торфяных грязей в санаторно-курортных организациях и во внекурортной практике» были рассмотрены вопросы оценки качества и перспектив использования торфяных ресурсов в лечебной практике, представлены результаты применения грязелечения в комплексной реабилитации взрослых и детей.

На круглом столе «Состояние и перспективы развития торфяной отрасли в Томской области» была рассмотрена общая ситуация в России в области добычи и использования торфа; представлены доклады, посвященные проблемам организации добычи торфа в Томской области в современных условиях, вопросам применения торфа в малой энергетике, использованию торфа в качестве сырья для получения грунтов; были показаны результаты работы по продвижению продукции из торфа на рынок (рис. 6).

Конференция прошла на достаточно высоком уровне и стала значимым событием в Томской области. В работе конференции принял участие зам. губернатора Томской области по агропромышленной политике и природопользованию А.Ф. Кнорр, который выступил председателем круглого стола «Состояние и перспективы развития торфяной отрасли в Томской области». По итогам была принята резолюция, которая включила в себя ряд рекомендаций и план дальнейших действий в данном направлении:

- 1) Рассмотреть возможность принятия нормативных правовых документов для стимулирования создания и развития производств по добыче и переработке торфа.
- 2) Провести работу по актуализации данных по торфяным месторождениям Томской области с оценкой современного состояния перспективных для освоения участков торфяных месторождений и паспортизацией осушенных, подготовленных и частично выработанных участков для предотвращения возникновения пожароопасной ситуации в регионе.
- 3) Проработать вопрос о подготовке кадров специалистов для торфяных предприятий.
- 4) Проработать вопрос о создании торфяного кластера в Томской области.
- 5) Провести оценку процессов заболачивания сельскохозяйственных полей на приграничных к болотам участках и разработать предупреждающие мероприятия.



Рисунок 7. Участники полевой экскурсии на болото Ишколь в 2015 году (фото А.А. Синюткиной).



Рисунок 8. Участники полевой экскурсии на болота в бассейне р. Кеть в 2015 году (фото А.А. Синюткиной).

В 2021 году конференция приобрела новое название и структуру. В связи с развитием климатической повестки в России, пониманием глобальной роли болотных экосистем в цикле углерода, необходимости их охраны и восстановления, было решено изменить название конференции и тематику секций. Организатором четвертой Международной научной конференции «Торфяные болота Сибири: функционирование, ресурсы, восстановление» стал по традиции Сибирский НИИ сельского хозяйства и торфа – филиал ФГБУН СФНЦА РАН совместно с Институтом мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Союзом охраны природы и биоразнообразия (Nature

and Biodiversity Conservation Union), а также с Государственным заповедником «Васюганский». В оргкомитет конференции вошли Ю.А. Харанжевская, А.А. Синюткина, Л.П. Гашкова, А.В. Кравец, Е.С. Иванова. В рамках конференции было организовано два круглых стола и три научных секции (рис. 9), проведено две экскурсии – на Васюганское болото и озерно-болотный комплекс Самусь (рис. 10–11).



Рисунок 9. Участники Четвертой Международной научной конференции «Торфяные болота Сибири: функционирование, ресурсы, восстановление» в Точке Кипения в 2021 году (фото А.А. Синюткиной).

В конференции приняли участие представители Польши, Германии, Норвегии, Беларуси, а также различных регионов России: Томской, Московской, Новосибирской, Архангельской, Ленинградской и Тверской областей, Красноярского края, Республики Мордовия, Ханты-Мансийского автономного округа; всего около 90 человек. На конференции были сделаны 42 устных доклада (из них 35 очных и 7 онлайн) и 11 стендовых, представленных на трех секциях и двух круглых столах.

На заседании секции 1 «Экологический мониторинг болот» были рассмотрены вопросы оценки и моделирования углеродного баланса болотных экосистем, изучения химического состава болотных вод и торфов естественных и антропогенно нарушенных болот, моделирования водного цикла рек заболоченных территорий и т.д. На секции 2 «Ресурсы болот» был представлен ряд докладов, посвященных вопросам оценки ресурсного потенциала болот, результатам исследований, касающихся применения различных препаратов из торфа в сельском хозяйстве и аквакультуре и т.д. На заседании секции 3 «Охрана и восстановление торфяных болот» представлены доклады, касающиеся опыта проведения мероприятий по восстановлению болот в странах Европы и в России, а также оценке состояния осушенных болот Западной Сибири (Торфяные болота Сибири ..., 2021).

В рамках работы круглого стола «Исследование и сохранение ценных болотных экосистем Западной Сибири» был представлен опыт работы заповедника «Васюганский», показана климаторегулирующая функция болотных экосистем Западной Сибири, представлен опыт проведения экологического мониторинга в пределах Большого Васюганского болота, показаны перспективы рекреационного использования болот. По итогам проведения участники Круглого стола определили следующие стратегические задачи:

1. Способствовать взаимодействию администрации ФГБУ «Государственный заповедник «Васюганский» и региональных органов исполнительной власти Томской и Новосибирской областей в части установления охранной зоны государственного природного заповедника «Васюганский»;

2. Оказать научно-методическую помощь в разработке номинационного досье для включения Большого Васюганского болота в Список всемирного наследия Юнеско;

3. Обеспечить обмен информацией о результатах и инициативах научных исследований, проводимых на территории Большого Васюганского болота и в границах заповедника «Васюганский».

В работе круглого стола «Состояние торфяных ресурсов Томской области и их потенциал в развитии экономики региона» приняли участие представители из Германии, а также регионов России (Тверская, Московская, Тюменская и Архангельская области), бизнес партнеры (ИП Елисеев, ООО «Нефтеспас», ООО «Межениновская птицефабрика») и др. Председателем собрания был заместитель губернатора Томской области А.Ф. Кнорр совместно с заместителем директора по научно-технической работе СФНЦА РАН А.М. Захаренко. В рамках работы круглого стола было заслушано 14 докладов, которые охватили вопросы современного состояния торфяных ресурсов Томской области в сравнении с регионами России и мира; рассмотрена имеющаяся линейка продукции из торфа для сельского хозяйства, строительства; показаны результаты использования торфа в медицине и курортологии; изучен опыт добычи и переработки торфяных ресурсов в Томской области и охарактеризованы перспективы использования торфа для разработки торфяных компостов, сорбентов, грунтов и гуминовых препаратов. Отдельный блок вопросов был посвящен проблеме существования и развития торфяной отрасли в контексте новой климатической политики в России в связи с ратификацией Парижского соглашения по климату.

По результатам работы круглого стола были намечены направления для дальнейшей работы:

1. Создать рабочую группу из состава ведущих специалистов в области торфяных ресурсов, а также представителей бизнеса и аграрного сектора экономики области для разработки плана комплексного освоения торфяных месторождений, осушенных и подготовленных к добыче, программы необходимых НИР, для реализации данного плана, координации работы и поддержания обратной связи между наукой и бизнесом.

2. Провести работу по актуализации данных по торфяным месторождениям Томской области с оценкой современного состояния перспективных для освоения участков торфяных месторождений и паспортизацией осушенных, подготовленных и частично выработанных участков для предотвращения возникновения пожароопасной ситуации в регионе; провести оценку физико-технических свойств торфа на перспективных месторождениях; подготовить рекомендации по комплексному использованию торфяных ресурсов и разработать проект восстановления после добычи торфа; провести поиск технологий добычи торфа, которые позволят снизить экологические риски.

3. Составить перечень торфяной продукции, потенциально наиболее востребованной аграрной отраслью и экологическими службами (грунты и субстраты, органические удобрения, гуминовые препараты для растениеводства и животноводства, микробные препараты на торфяной основе, биопрепараты для переработки органических отходов).

4. Разработать новый подход к развитию торфодобывающей промышленности в регионе. Основной акцент должен быть сделан не на крупномасштабной добыче торфа, предполагающей освоение новых участков торфяных месторождений, а на комплексном использовании сырья на уже осушенных участках для производства широкого спектра продукции для сельского хозяйства и решения экологических задач региона. Использование торфа и продуктов его переработки в качестве альтернативы химическим препаратам позволит усилить ассимиляцию CO_2 в биомассе сельскохозяйственных растений и повысить их продуктивность.

5. Разработать системы мер, стимулирующих животноводческие и птицеводческие предприятия, ответственные за производство большого количества органических отходов, складываемых под открытым небом и являющихся источником значительных объемов CO_2 , закиси азота, метана и прочих парниковых газов, к финансированию (софинансированию) научных исследований, направленных на комплексную переработку данных отходов в торфомазотные и торфопометные компосты.

6. Проработать возможность создания «карбоновых ферм» для реализации климатических проектов (согласно Фед. Закону № 296 от 02.07.2021) на участках выработанных торфяных месторождений и в пределах агроценозов, на которых 5–7 и более лет применяются системы минимизированной или даже «нулевой» обработки почвы, исключающие ежегодную вспашку с оборотом пласта.



Рисунок 10. Участники полевой экскурсии на Васюганское болото в 2021 году (фото А.А. Синюткиной).



Рисунок 11. Участники полевой экскурсии на озерно-болотный комплекс Самусь в 2021 году (фото А.А. Синюткиной).

В 2025 году Сибирским НИИ сельского хозяйства и торфа – филиал ФГБУН СФНЦА РАН, при содействии Института мониторинга климатических и экологических систем СО РАН была организована пятая Международная научная конференция «Торфяные болота Сибири: функционирование, ресурсы, восстановление», которая прошла в г. Томске с 8 по 14 сентября. В

мероприятии приняли участие около 70 человек из 12 регионов России, представители ведущих научных центров, заповедников, а также бизнеса и региональной администрации. В конференции приняла участие большая делегация ученых из Малайзии (рис. 12). В состав Программного комитета вошла Лули Меллинг (Lulie Melling), представитель Малазийского торфяного общества, сети ООН по решениям в области устойчивого развития, Университет Санвэй (Malaysian Peat Society, UN Sustainable Development Solutions Network, Sunway University), член Международного общества торфяников (International Peatland Society (IPS)), которая приняла активное участие в работе конференции (рис. 13). Программа конференции включала в себя полевые экскурсии на осушенное болото Темное и низинное Обское болото (рис. 14–15), а также посещение Сибирского ботанического сада и Музея-заповедника «Томская Писаница». Организация полевой экскурсии на болото Темное проводилась при участии ООО «Азимут Исток».

Во время проведения конференции было заслушано более 50 устных докладов на 4 научных секциях, 2 доклада были представлены на стендовой секции. В пленарной части конференции был сделан доклад Е.А. Головацкой, посвященный закономерностям изменения климата и развитию «Российской системы климатического мониторинга» (ВИП ГЗ), а также доклад Лули Меллинг (Lulie Melling), представляющий опыт использования и охраны тропических болот.



Рисунок 12. Участники Пятой Международной научной конференции «Торфяные болота Сибири: функционирование, ресурсы, восстановление» в Точке Кипения в 2025 году (фото Ю.А. Харанжевской).

В рамках секции 1 «Экологический мониторинг болот» были рассмотрены вопросы реконструкции этапов развития болот и динамики пожаров, восстановления болот после техногенного засоления; представлены результаты оценок запасов углерода, величины экосистемного обмена и эмиссии парниковых газов с осушенных и естественных болот разных регионов России; рассмотрены закономерности изменения химического состава болотных вод и вариации его по глубине торфяной залежи, содержания липидов в болотных водах и торфах. Кроме того, был заслушан доклад Захари Ибрагим (Zahari Ibrahim) об управлении заболоченными лесами в Малайзии. На секции 2 «Дистанционное зондирование и картографирование болот» были рассмотрены вопросы применения данных дистанционного зондирования и беспилотных летательных аппаратов для картографирования болотных экосистем, оценки изменчивости эмиссии CO₂, были представлены результаты оценок пространственно-временной организации осушенных и постпирогенных болот. На секции 3 «Ресурсы болот, вопросы практического применения торфа в коммунальном и сельском хозяйстве» была заслушана серия докладов, посвященных применению гуминовых кислот торфа в аквакультуре, при выращивании сельскохозяйственных культур, для борьбы с возбудителями инфекций зерновых, рассмотрены перспективы разработки торфяного месторождения Темное. В рамках секции 4 «Охрана

и восстановление болот» была заслушана серия докладов, посвященных вопросам восстановления осушенных болот, рассмотрены закономерности пространственной дифференциации на участках фрезерной добычи торфа, представлен обзор проектов обводнения в России; также были представлены результаты оценки постпирогенной трансформации органического вещества торфа, изменения элементного состава *Sphagnum fuscum* на выгоревших участках болот и последствия пирогенного фактора на морфометрические и физиологические показатели болотных кустарничков (Торфяные болота Сибири ..., 2025).



Рисунок 13. Председатель оргкомитета конференции 2025 года Ю.А. Харанжевская (справа) и член Международного общества торфяников (International Peatland Society) Лули Меллинг (Lulie Melling) во время полевой экскурсии на болото Темное.



Рисунок 14. Участники полевой экскурсии на болото Темное в 2025 году (фото А.А. Синюткиной).



Рисунок 15. Участники полевой экскурсии на Обское болото в 2025 году (фото А.А. Синюткиной).

Конференция стала площадкой для обмена передовыми исследованиями в области биогеохимии болот, экологического мониторинга, дистанционного зондирования и восстановления болотных экосистем, продемонстрировала высокий уровень синергии между фундаментальной наукой и практикой. По итогам конференции участники единодушно признали необходимость дальнейшего укрепления междисциплинарного сотрудничества и расширения международного партнерства для защиты и устойчивого управления болотными экосистемами Сибири.

ЛИТЕРАТУРА

Проблемы изучения и использования торфяных ресурсов Сибири: Материалы Первой международной научно-практической конференции. Томск: Издательство «Ветер», 2009. 298 с.

Проблемы изучения и использования торфяных ресурсов Сибири: Материалы Второй международной научно-практической конференции (Томск, 18–21 августа 2014 г.). Томск: Издательство ООО «РГ Графика», 2014. 234 с.

Проблемы изучения и использования торфяных ресурсов Сибири: Материалы Третьей международной научно-практической конференции (Томск, 27 сентября – 3 октября 2015 г.). Екатеринбург: ООО Универсальная Типография «Альфа Принт», 2015. 240 с.

Торфяные болота Сибири: функционирование, ресурсы, восстановление: Материалы Четвертой международной научной конференции (Томск, 1–8 октября 2021 г.). Томск: Издательство Ипполитова, 2021. 152 с.

Торфяные болота Сибири: функционирование, ресурсы, восстановление: Материалы Пятой международной научной конференции (Томск, 8–14 сентября 2025 г.). Томск: Издательство «Новый формат», 2025. 118 с.

Поступила в редакцию 03.11.2025

Принята 04.11.2025

Опубликована 10.11.2025

Сведения об авторе:

Харанжевская Юлия Александровна – кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник Сибирского НИИ сельского хозяйства и торфа – филиал ФГБУН Сибирский федеральный научный центр агробиотехнологий РАН, доцент ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский государственный университет» (г. Томск, Россия); kharan@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-9945-0129>

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.



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

International conference "Peatlands of Siberia: functioning, resources, restoration"(the history of its organization in 2009–2025)

© © 2025 Yu. A. Kharanzhevskaya 

Siberian Research Institute of Agriculture and Peat – Branch of the Siberian Federal Scientific Centre of Agro-Bio Technologies of the Russian Academy of Sciences, Gagarin street, 3, Tomsk, Russia. E-mail: kharan@yandex.ru

The paper presents the main idea and history of the conference “Peatlands of Siberia: functioning, resources, restoration” in 2009–2025 in Tomsk. The initiator of the conference was the Siberian Research Institute of Agriculture and Peat, a branch of the Siberian Federal Scientific Center of Agro-Biotechnology of the Russian Academy of Sciences. Over the years, the conference was also co-organized by the Institute for Monitoring of Climate and Ecological Systems of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Tomsk Polytechnic University, Tomsk State University, the Nature and Biodiversity Conservation Union, and the Vasyugan State Nature Reserve. From 2009 to 2015 the conference had a more practical focus, with its primary goal being to establish a roundtable dialogue between representatives of science, business, and regional administration on peat resource use. From 2021 to 2025, the conference format changed in the context of Russia's new climate policy, following the ratification of the Paris Agreement on Climate Change, and the issue of restoring disturbed and depleted peatlands became a pressing task.

Keywords: *peatlands; functioning; resources; restoration; scientific conference; history; international cooperation.*

How to cite: *Kharanzhevskaya Yu.A. International conference "Peatlands of Siberia: functioning, resources, restoration"(the history of its organization in 2009–2025). The Journal of Soils and Environment. 2025. 8(4). e342. DOI: [10.31251/pos.v8i4.342](https://doi.org/10.31251/pos.v8i4.342) (in Russian with English abstract).*

REFERENCES

- Problems of studying and using peat resources of Siberia: Proceedings of the First International Scientific and Practical Conference. Tomsk: Publishing House "Veter", 2009. 298 p. (in Russian).
- Problems of studying and using peat resources of Siberia: Proceedings of the Second International Scientific and Practical Conference (Tomsk, 18–21 August, 2014). Tomsk: Publishing House "RG Grafika", 2014. 234 p. (in Russian).
- Problems of studying and using peat resources of Siberia: Proceedings of the Third International Conference (Tomsk, 27 September – 3 October, 2015). Ekaterinburg: Ltd Universal Printing House "Alpha print", 2015. 240 p. (in Russian).
- Peatlands of Siberia: functioning, resources, restoration: Proceedings of the Fourth International Conference (Tomsk, 1–8 October, 2021). Tomsk: Publishing House of Ippolitova, 2021. 152 p. (in Russian).
- Peatlands of Siberia: functioning, resources, restoration: Proceedings of the Fifth International Conference (Tomsk, 8–14 September, 2025). Tomsk: Publishing House "Novyy format", 2025. 118 p. (in Russian).

Received 03 November 2025

Accepted 04 November 2025

Published 10 November 2025

About the author:

Yulia A. Kharanzhevskaya – Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Leading Researcher in the Siberian Research Institute of Agriculture and Peat – Branch of the Siberian Federal Scientific Centre of Agro-Bio Technologies of the Russian Academy of Sciences; Associate Professor at the National Research Tomsk State University (Tomsk, Russia); kharan@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-9945-0129>

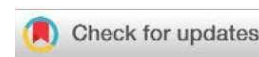
The author read and approved the final manuscript



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

УДК 631.4

<https://doi.org/10.31251/pos.v8i4.343>



К 90-летию со дня рождения члена-корреспондента РАН Гаджиева И.М.

© 2025 Б. А. Смоленцев , Е. Н. Смоленцева 

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

В статье приведены основные сведения о профессиональной, организаторской и административной деятельности Ильяс Мамедовича Гаджиева – известного российского почвовед и эколога, члена-корреспондента РАН, доктора биологических наук, профессора, заслуженного эколога России, лауреата Государственной премии РФ, академика Монгольской академии наук. Плодотворно работая в ИПА СО РАН со дня его основания, он всю свою жизнь и талант ученого посвятил развитию почвоведения, занимаясь вопросами генезиса и эволюции почв Сибири и Монголии, почвенной классификации и картографии, комплексной оценки почвенного покрова и его рационального использования, внося существенный вклад в развитие почвоведения и смежных наук.

Ключевые слова: Гаджиев Ильяс Мамедович; научная деятельность; директор Института почвоведения и агрохимии СО РАН; почвоведение.

Цитирование: Смоленцев Б.А., Смоленцева Е.Н. К 90-летию со дня рождения члена-корреспондента РАН Гаджиева И.М. // Почвы и окружающая среда. 2025. Том 8. № 4. с343. DOI: [10.31251/pos.v8i4.343](https://doi.org/10.31251/pos.v8i4.343)

14 ноября 2025 года исполнилось 90 лет со дня рождения Ильяс Мамедовича Гаджиева – доктора биологических наук, профессора, члена-корреспондента РАН, лауреата Государственной премии РФ, заслуженного эколога России, академика Монгольской академии наук, выдающегося



российского почвовед.

И.М. Гаджиев родился 14 ноября 1935 года в г. Орджоникидзе (ныне Владикавказ) Северо-Осетинской АССР. В 1958 году он окончил агрономический факультет Северо-Осетинского сельскохозяйственного института, получив диплом с отличием, и начал свою трудовую деятельность в должности младшего научного сотрудника Института почвоведения и агрохимии АН Азербайджанской ССР (г. Баку). Первые научные работы И.М. Гаджиева были посвящены изучению почв Главного Кавказского хребта.

В мае 1959 года И.М. Гаджиев переехал в г. Новосибирск по приглашению своего учителя – профессора Р.В. Ковалева, который в 1958 году возглавил лабораторию, а вскоре и Отдел почвоведения Биологического института Сибирского отделения Академии наук СССР (СО АН СССР). Начав с должности старшего лаборанта Отдела почвоведения, И.М. Гаджиев включился в исследования, ориентированные на поиск земельных ресурсов для развития продовольственной базы в нефтедобывающих районах Западной Сибири. В дальнейшем главными объектами его исследований становятся почвы и почвенный покров таёжной зоны Западной Сибири. В 1965 году И.М. Гаджиев успешно защитил кандидатскую диссертацию на тему «Почвы р. Васюган и их рациональное использование» (Гаджиев, 1965).

Рисунок 1. Ильяс Мамедович Гаджиев. Фото из архива почвенного музея ИПА СО РАН.

По просьбе Министерства сельского хозяйства РСФСР с 1966 по 1968 г. Ильяс Мамедович работал в Монгольской Народной Республике (МНР), оказывая консультационную и практическую помощь монгольским коллегам в организации почвенной службы, почвенно-агрохимической лаборатории и проведении картографических работ. В дальнейшем он совместно с монгольскими почвоведомы неоднократно проводил научные исследования в рамках Советско-Монгольской комплексной биологической экспедиции АН СССР и АН МНР. Итогом этой совместной работы стали не только новые научные знания о почвах и почвенном покрове республики, но и подготовка национальных кадров, в том числе первых в Монголии кандидатов и докторов наук по специальности почвоведение. Заслуги И.М. Гаджиева перед МНР были высоко оценены: в 2005 году Национальная академия наук Монголии избрала его действительным членом (академиком).

И.М. Гаджиев активно участвовал в организации Института почвоведения и агрохимии (ИПА) СО АН СССР, основанного в 1968 году; в 1970 году он был назначен первым в истории Института заместителем директора по научной работе (Почвоведы и агрохимии ..., 2004). В этой должности он много сил и внимания уделял организации экспедиционных исследований, оснащению лабораторий Института современными приборами и оборудованием, созданию и развитию научно-исследовательских стационаров в различных природно-климатических зонах Сибири. Одновременно с организационной деятельностью он продолжал исследования почвенного покрова труднодоступных территорий таёжной зоны Западной Сибири. И.М. Гаджиев внёс значительный вклад в выявление в нефтегазоносных районах Сибири территорий, почвенный покров которых пригоден для сельскохозяйственного освоения, поддержав идею развития в этих регионах очаговой системы земледелия.

В связи с необходимостью уделять больше времени научной работе, а также для подготовки докторской диссертации, в 1979 году И.М. Гаджиев оставил пост заместителя директора и перешёл на должность заведующего созданной им лабораторией географии и картографии почв. Им была разработана концепция комплексного картографического отображения современного состояния почвенного покрова и плодородия почв, их потребности в основных элементах питания растений. Эти результаты нашли свое



Рисунок 2. Изучение таёжных почв Западной Сибири. И.М. Гаджиев (справа) и Е.А. Дмитриев. Фото из архива Почвенного музея ИПА СО РАН.

отражение в серии изданных карт – от крупного региона, каким является Западно-Сибирский экономический район, до отдельного сельскохозяйственного предприятия. Под его руководством разработана классификация почв Западной Сибири, составлена серия листов Государственной почвенной карты, которая стала составной частью первой изданной Почвенной карты России.

Результатом обобщения новых данных, полученных в процессе многолетнего изучения почв и почвенного покрова Западной Сибири, стала докторская диссертация И.М. Гаджиева на тему «Эволюция почв южной тайги Западной Сибири» (Гаджиев, 1981). В своей диссертации, а также в изданной одноименной монографии (Гаджиев, 1982), он осветил особенности почвообразования в этом труднодоступном, но важном в хозяйственно-экономическом аспекте регионе. И.М. Гаджиев сформулировал и убедительно доказал гипотезу полигенезиса таёжных дерново-подзолистых почв со вторым гумусовым горизонтом, а также обосновал концепцию климатической эволюции почвенного покрова и смещения природных зон на этой территории в голоцене.

В 1986 году И.М. Гаджиев возглавил ИПА и руководил им 20 лет, которые пришлось на трудный для российской науки период. И.М. Гаджиев всю свою жизнь и талант ученого

посвятил развитию почвоведения, занимаясь вопросами генезиса и эволюции почв Сибири и Монголии, почвенной классификации и картографии, комплексной оценки почвенного покрова и его рационального использования.

Результаты исследований Ильяса Мамедовича Гаджиева опубликованы более чем в 200 научных работах; в их числе 18 монографий и свыше 80 статей в рецензируемых отечественных и зарубежных научных журналах, а также отображены на многочисленных почвенных картах. Из числа основных работ можно выделить:

Гаджиев И.М., Овчинников С.М. Почвы средней тайги Западной Сибири / Отв. ред. д-р. с.-х. наук, проф. Р.В. Ковалев; Академия наук СССР, Сибирское отделение, Институт почвоведения и агрохимии. Новосибирск: Наука, Сибирское отделение, 1977. 152 с.

Гаджиев И.М. Эволюция почв южной тайги Западной Сибири / Науч. ред. Р.В. Ковалев; Академия наук СССР, Сибирское отделение, Институт почвоведения и агрохимии. Новосибирск: Наука, Сибирское отделение, 1982. 278 с.

Генезис, эволюция и география почв Западной Сибири / И.М. Гаджиев, В.М. Курачев, В.Н. Шоба и др.; Академия наук СССР, Сибирское отделение, Институт почвоведения и агрохимии. Новосибирск: Наука, Сибирское отделение, 1988. 223 с.

Государственная почвенная карта СССР М 1:1 000 000. Листы: О-42, Тобольск (К.А. Уфимцева, Р.В. Ковалев, Е.Н. Иванова), 1969; О-44, Колпашево, 1977 (Р.В. Ковалев, Е.Н. Иванова); О-43, Тара, 1980 (Р.В. Ковалев).

Важным направлением работы Ильяса Мамедовича было развитие почвенной картографии, где им были получены выдающиеся результаты. Большое значение для народного хозяйства имела «Карта органо-минеральных ресурсов сельскохозяйственного назначения Западно-Сибирского региона» (1987 г.), за научное обоснование которой И.М. Гаджиеву в числе других разработчиков в 1991 году была присуждена Государственная премия РСФСР в области науки и техники. Под его руководством разработана программа, составлена и издана «Экологическая карта Кемеровской области». Благодаря комплексному подходу и полноте информации о современном состоянии различных компонентов окружающей среды (почв, растительности, поверхностных и подземных вод, атмосферы) эта карта на момент своего издания в 1995 году не имела аналогов в России (Экологическая карта ..., 1995).



Рисунок 3. Комиссия СО АН СССР по эколого-экономической экспертизе проекта Катунской ГЭС на Алтае (И.М. Гаджиев в центре), 1987 год. Фото из архива Почвенного музея ИПА СО РАН.

За выдающиеся научные достижения и значительные заслуги в научно-организационной деятельности в 1997 году И.М. Гаджиев был избран членом-корреспондентом РАН, а также в разные годы удостоен многих правительственных наград.

И.М. Гаджиев активно занимался общественной деятельностью – был председателем Новосибирского областного комитета по охране природы, вице-президентом Докучаевского общества почвоведов, председателем Новосибирского отделения Географического общества России.

Большое внимание он уделял подготовке высококвалифицированных научных кадров: в течение многих лет был председателем диссертационного совета при ИПА, под его руководством защищено 13 докторских и кандидатских диссертаций.

И.М. Гаджиеву были присущи широта научных интересов и глубина исследований, незаурядный организаторский талант, равнодушное отношение к проблемам окружавших его людей и удивительное чувство юмора, помогавшее ему преодолевать трудности и поддерживать коллег и друзей.

Благодарную память об Ильясе Мамедовиче Гаджиеве сохраняют многие, кому посчастливилось работать и общаться с этим замечательным человеком. Его идеи и научные достижения продолжают вдохновлять современных исследователей, дают им информацию к размышлению, подсказывают пути решения актуальных научных проблем почвоведения и экологии.

ЛИТЕРАТУРА

Гаджиев И.М. Почвы бассейна р. Васюган и их хозяйственное использование. Автореферат диссертации ... канд. биол. наук. Новосибирск, 1965. 28 с.

Гаджиев И.М. Эволюция почв южной тайги Западной Сибири. Автореферат диссертации ... д-ра биол. наук. Новосибирск, 1981. 56 с.

Гаджиев И.М. Эволюция почв южной тайги Западной Сибири / Науч. ред. Р.В. Ковалев; Академия наук СССР, Сибирское отделение, Институт почвоведения и агрохимии. Новосибирск: Наука, Сибирское отделение, 1982. 278 с.

Гаджиев И.М., Овчинников С.М. Почвы средней тайги Западной Сибири / Отв. ред. д-р. с.-х. наук, проф. Р.В. Ковалев; Академия наук СССР, Сибирское отделение, Институт почвоведения и агрохимии. Новосибирск: Наука, Сибирское отделение, 1977. 152 с.

Генезис, эволюция и география почв Западной Сибири / И.М. Гаджиев, В.М. Курачев, В.Н. Шоба и др.; Академия наук СССР, Сибирское отделение, Институт почвоведения и агрохимии. Новосибирск: Наука, Сибирское отделение, 1988. 223 с.

Государственная почвенная карта СССР М 1:1 000 000. Листы: О–42, Тобольск (К.А. Уфимцева, Р.В. Ковалев, Е.Н. Иванова), 1969; О–44, Колпашево, 1977 (Р.В. Ковалев, Е.Н. Иванова); О–43, Тара, 1980 (Р.В. Ковалев).

Почвоведы и агрохимики Сибири и Дальнего Востока: биографо-библиографический справочник / Институт почвоведения и агрохимии СО РАН, сост. В.А. Кульшин и др.; отв. ред. В.А. Хмелев. Новосибирск: Издательство Сибирского отделения РАН, 2004. 338 с.

Экологическая карта Кемеровской области / Администрация Кемеров. области; Кемеровский областной комитет охраны окружающей среды и природных ресурсов; Сибирское отделение РАН; Кемеровский научный центр; Институт почвоведения и агрохимии; науч. ред.: чл.-кор. РАН Г.И. Грицко. д-р биол. наук И.М. Гаджиев; ред. спец. содерж.: О.П. Андраханова и др.; сост. и подгот. к печати Новосибир. картогр. ф-кой в 1995 г.; ред. В.Д. Топчилова. Москва: Роскартография, 1995. 1 к. (2 л.).

Поступила в редакцию 13.11.2025

Принята 14.11.2025

Опубликована 18.11.2025

Сведения об авторах:

Смоленцев Борис Анатольевич – кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории географии и генезиса почв ФГБУН Институт почвоведения и агрохимии СО РАН (г. Новосибирск, Россия); smolentsev.b@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-9749-8233>

Смоленцева Елена Николаевна – научный сотрудник лаборатории географии и генезиса почв ФГБУН Институт почвоведения и агрохимии СО РАН (г. Новосибирск, Россия); parabraunerde1961@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0003-0900-4692>

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.



Ninety years since the birthday of the Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences I.M. Gadzhiev

© 2025 B. A. Smolentsev , E. N. Smolentseva 

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

The article provides basic information about the professional, organizational, and administrative activities of Ilyas Mamedovich Gadzhiev, a renowned Russian soil scientist and ecologist, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Biological Sciences, Professor, Honored Ecologist of Russia, winner of the State Prize of the Russian Federation, and the member of the Mongolian Academy of Sciences, Professor I.M. Gadzhiev worked fruitfully in the Institute of Soil Science and Agrochemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences since its founding, he dedicated his entire life and scientific talent to the development of soil science, focusing on soil genesis and evolution in Siberia and Mongolia, soil classification and cartography, and the comprehensive assessment and rational use of soil cover. He made a significant contribution to the development of soil science and related fields.

Keywords: Gadzhiev Ilyas Mamedovich; scientific activity; director of the Institute of Soil Science and Agrochemistry SB RAS; soil science.

How to cite: Smolentsev B.A., Smolentseva E.N. Ninety years since the birthday of the Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences I.M. Gadzhiev. *The Journal of Soils and Environment*. 2025. 8(4). e343. DOI: [10.31251/pos.v8i4.343](https://doi.org/10.31251/pos.v8i4.343) (in Russian with English abstract).

REFERENCES

- Gadzhiev I.M. Soils of the Vasyugan River basin and their economic use. Abstract of Dissertation ... Cand. of Biol. Sci. Novosibirsk, 1965. 28 p. (in Russian).
- Gadzhiev I.M. Evolution of soils of the southern taiga of Western Siberia. Abstract of Dissertation ... Dr. of Biol. Sci. Novosibirsk, 1981. 56 p. (in Russian).
- Gadzhiev I.M. Evolution of soils of the southern taiga of Western Siberia / R.V. Kovalev (ed.); USSR Academy of Sciences, Siberian Branch, Institute of Soil Science and Agrochemistry. Novosibirsk: Nauka, Siberian Branch, 1982. 278 p. (in Russian).
- Gadzhiev I.M., Ovchinnikov S.M. Soils of the middle taiga of Western Siberia / R.V. Kovalev (ed.); USSR Academy of Sciences, Siberian Branch, Institute of Soil Science and Agrochemistry. Novosibirsk: Nauka, Siberian Branch, 1977. 152 p. (in Russian).
- Genesis, evolution and geography of Western Siberian soils / I.M. Gadzhiev, V.M. Kurachev, V.N. Shoba et al.; USSR Academy of Sciences, Siberian Branch, Institute of Soil Science and Agrochemistry. Novosibirsk: Nauka, Siberian Branch, 1988. 223 p. (in Russian).
- State soil map of the USSR M 1:1 000 000. Sheets: O–42, Tobolsk (KA Ufimtseva, RV Kovalev, EN Ivanova), 1969; O–44, Kolpashevo, 1977 (R.V. Kovalev, E.N. Ivanova); O–43, Tara, 1980 (R.V. Kovalev). (in Russian).
- Soil scientists and agrochemists of Siberia and the Far East: biographical and bibliographical reference / Institute of Soil Science and Agrochemistry SB RAS, compiled by V.A. Kulshin et al.; editor V.A. Khmelev. Novosibirsk: Publishing House of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 2004. 338 p. (in Russian).
- Ecological map of Kemerovo region / Administration of Kemerovo region; Kemerovo Regional Committee for Environmental Protection and Natural Resources; Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences; Kemerovo Research Center; Institute of Soil Science and Agrochemistry; scientific editor: Corresponding Member of RAS G.I. Gritsko. Dr. of Biological Sciences I.M. Gadzhiev; special content editors: O.P. Andrakhanova et al.; compiled and prepared for publication by Novosibirsk Cartographic F-koy in 1995; editor V.D. Topchilov. Moscow: Roskartografiya, 1995. 1 book (2 sheets). (in Russian).

Received 13 November 2025

Accepted 14 November 2025

Published 18 November 2025

About the authors:

Boris A. Smolentsev – Candidate of Biological Sciences, Leading Researcher in the Laboratory of Soil Geography and Genesis in the Institute of Soil Science and Agrochemistry, the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Novosibirsk, Russia); smolentsev.b@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-9749-8233>

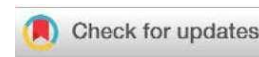
Elena N. Smolentseva – Researcher in the Laboratory of Geography and Soil Genesis in the Institute of Soil Science and Agrochemistry, the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Novosibirsk, Russia); parabraunerde1961@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0003-0900-4692>

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.v8i4.345>

Памяти Василия Сергеевича Бойко

© 2025 А. Ю. Тимохин , М. С. Чекусов 

ФГБНУ «Омский аграрный научный центр», проспект Королева, 26, г. Омск, 644012, Россия. E-mail: timokhin@anc55.ru

В статье приводятся основные сведения о научно-исследовательской, административной и педагогической деятельности главного научного сотрудника Омского аграрного научного центра, доктора сельскохозяйственных наук Василия Сергеевича Бойко. Дана краткая информация о его деятельности в период учебы в Томском государственном университете, работы в лаборатории орошаемого земледелия Сибирского НИИ сельского хозяйства и Омском аграрном научном центре. Показан вклад ученого в изучение орошаемых черноземных почв юга Западной Сибири и решение проблемы их агрохимической оценки. Освещены направления исследования по изучению системы почвоохранного, ресурсосберегающего орошаемого земледелия.

Ключевые слова: Бойко В.С.; орошаемое кормопроизводство; земледелие; Западная Сибирь; агрохимия; многолетние травы; почва.

Цитирование: Тимохин А.Ю., Чекусов М.С. Памяти Василия Сергеевича Бойко // Почвы и окружающая среда. 2025. Том 8. № 4. е345. DOI: [10.31251/pos.v8i4.345](https://doi.org/10.31251/pos.v8i4.345)



Рисунок 1. Доктор сельскохозяйственных наук Василий Сергеевич Бойко (1958–2025 гг.). Фото из архива Омского АНЦ.

Третьего октября 2025 года ушел из жизни Василий Сергеевич Бойко – главный научный сотрудник агротехнологического центра ФГБНУ «Омский АНЦ», доктор сельскохозяйственных наук, доцент, известный российский специалист в области земледелия, в том числе орошаемого, агрохимии, мелиоративного почвоведения и кормопроизводства (рис. 1).

В.С. Бойко родился 5 августа 1958 г. в с. Веселоярск Рубцовского района Алтайского края. В 1975 г. он закончил Веселоярскую среднюю школу и поступил в Томский государственный университет на биолого-почвенный факультет. После его окончания с отличием по специальности «Почвоведение и агрохимия» был направлен по распределению в Управление сельского хозяйства Омского облисполкома для работы на Омской областной станции химизации сельского хозяйства; здесь с 1980 по 1981 гг. Василий Сергеевич работал старшим инженером в отделе почвенно-агрохимических изысканий.

В 1978 г. в Сибирском научно-исследовательском институте сельского хозяйства (в настоящее время ФГБНУ «Омский АНЦ») была организована лаборатория орошаемого земледелия, которую возглавил Вильгельм Фридрихович Гоф. Для реализации данного научного направления на территории межхозяйственной Пушкинской оросительной системы в ОПХ «Омское» (Омская

область, Омский район) был заложен восьмипольный орошаемый стационар. Целью создания лаборатории являлось научное сопровождение агро-мелиоративного комплекса на основе разработки организационных мер и технологий, стабилизирующих воспроизводство плодородия почвы и продуктивность пашни на уровне 6,0–6,5 т корм. ед./га и 5–7 т/га зерна яровых, озимых и кормовых культур. В эту лабораторию в 1981 г. поступил на работу молодой сотрудник, аспирант В.С. Бойко (рис. 2).



Рисунок 2. Коллектив лаборатории орошаемого земледелия, 1982 г. (второй ряд, крайний справа аспирант В.С. Бойко, слева от него – заведующий лабораторией орошаемого земледелия, доктор сельскохозяйственных наук В.Ф. Гоф). Фото из архива Омского АНЦ.

Коллектив лаборатории разрабатывал технологические системы выращивания на орошаемых землях кормовых и частично зерновых культур в двух четырехпольных стационарных севооборотах. В опытах изучались вопросы формирования почвоохранного водосберегающего орошения, способ и глубина обработки зяби, дозы удобрения в расчете на планируемую прибавку урожайности. Учеными лаборатории, в том числе В.С. Бойко, разработаны технологические регламенты (карты, инструкции) выращивания различных сельскохозяйственных культур в условиях орошения. Изучены основные элементы агротехнологий в расчете на максимальное использование природных ресурсов, а также биопотенциала культур и новых интенсивных сортов при оптимизации условий среды.

В 1984 г. Василий Сергеевич окончил аспирантуру, а в 1986 г. защитил кандидатскую диссертацию на тему «Эффективность обработки почвы и удобрений при поукосном выращивании однолетних трав на орошаемой пашне в лесостепи Западной Сибири» (Бойко, 1986). В стационарных опытах (двух- и трехфакторных) в 4-х-польных севооборотах с выводным полем многолетних трав были отработаны мелиоративные приемы (обработка почвы, режимы влажности и питания, подбор сочетания культур), обеспечивающие получение в год 1,5–3 урожаев однолетних или 2–3 укосов многолетних трав. При этом составной частью исследований являлось систематическое изучение влияния приемов интенсификации и разработанных агротехнологий на показатели плодородия черноземных почв (Бойко, 1988; Бойко, Гоф, 1990; 1995).

В последующие годы В.С. Бойко работал младшим, старшим, ведущим научным сотрудником. С 1996 по 2014 гг. возглавлял лабораторию орошаемого земледелия. За 30-летний период исследований был накоплен богатый экспериментальный материал по технологиям выращивания бобовых и мятликовых многолетних трав, однолетних кормовых культур в одновидовых и смешанных агрофитоценозах, а также яровых и озимых зерновых культур (Коленченко и др., 2007). Некоторые позиции разработанного агрокомплекса защищены патентами на способы выращивания культур (озимая пшеница, кукуруза, многолетние травы). Для орошаемых черноземных почв лесостепи Западной Сибири разработана малозатратная технология выращивания ярового ячменя для пивоварения, позволяющая в любой по гидротермическим условиям год получать 4,0–4,5 т/га зерна, соответствующего по технологическим показателям требованиям, предъявляемым к пивоваренным сортам, при сборе 2,6–2,8 т/га зерна без орошения и удобрений (Бойко, Сницарь, 2002).

Василий Сергеевич разработал эффективный способ формирования многолетних травостоев. В предлагаемом способе покровную культуру сеют широкоявно, а злаковую поперек или по диагонали. Злаковую культуру (кострец) высевает в 1 и 2 рядка через 60 см. С одновременным посевом злаковой культуры производят посев в междурядье бобовой культуры. В качестве бобовой культуры высевает люцерну. Люцерну высевает не только в междурядье, но и в рядах костреца. Сбор травостоя с 1 га согласно изобретению имеет большую массу сухого вещества и увеличенное содержание в нем протеина по сравнению с известными.

В 2011 году В.С. Бойко успешно защитил диссертационную работу на соискание ученой степени доктора сельскохозяйственных наук по теме: «Интенсификация полевого кормопроизводства и воспроизводство плодородия орошаемых лугово-черноземных почв в лесостепи Западной Сибири» (Бойко, 2011). Оппонентами диссертационной работы были академик РАН А.Н. Власенко, доктора сельскохозяйственных наук В.И. Усенко и Л.В. Березин, ведущая организация – ГНУ Алтайский научно-исследовательский институт сельского хозяйства. По результатам многолетних исследований Василием Сергеевичем выявлены параметры водного режима почв, орошения и водопотребления кормовых культур на длительно орошаемой лугово-черноземной почве, обеспечивающие получение высоких урожаев и сохранение благоприятного мелиоративного состояния в специфических условиях лесостепи Западной Сибири, обусловленных преобладанием длительно сезонно промерзающих почв с летним оттаиванием нижней части профиля. Усовершенствованы технологические приемы возделывания многолетних и однолетних кормовых культур в одновидовых и смешанных посевах, позволяющие максимально реализовать уровень их потенциальной продуктивности. Разработаны приемы оптимизации питания растений, обеспечивающие сохранение плодородия лугово-черноземных почв при длительном применении удобрений в сочетании с систематическим орошением и рациональной структурой использования пашни (Биологическая активность ..., 2019; Бойко, 2019).

Основные предложения и результаты диссертационной работы прошли производственную проверку в НПО «Омское» и «Новоуральское», СПК «Пушкинский», СПК «Ермак», СПК «Лидер» и других хозяйствах Омской области (рис. 3, 4). Это обеспечило стабильность и эффективность регионального растениеводства и животноводства при сохранении и повышении плодородия почв сельскохозяйственных угодий.



Рисунок 3. Василий Сергеевич Бойко на приемке посевов подсолнечника, 2009 г. Фото из архива В.С. Бойко.



Рисунок 4. Приемка производственных посевов, 2009 года, В.Г. Холмов и В.С. Бойко. Фото из архива Омского АНЦ.

Актуальность и практическая значимость выполненных В.С. Бойко научных исследований проявилась и в том, что они востребованы в производстве и позволили научно обосновать необходимость реализуемой в настоящее время программы восстановления и развития мелиоративной отрасли в Омской области. До 2020 г. проведена реконструкция 5 крупных оросительных систем, в том числе Пушкинской, на территории которой расположен научный стационар, намечено участие региона в продолжающейся программе по восстановлению мелиоративной отрасли до 2030 г.

Материалы исследований лаборатории орошаемого земледелия, некоторые из сотрудников которой представлены на рисунке 5, обобщены в докторской (Бойко, 2011) и семи кандидатских диссертациях по специальностям «Общее земледелие, растениеводство», «Мелиорация», «Почвоведение», «Агрохимия».

С 2007 по 2017 гг. В.С. Бойко совмещал руководство лабораторией с заведованием отделом земледелия и кормопроизводства СибНИИСХ, а с апреля 2015 г. по декабрь 2017 г. являлся заместителем директора по научной работе. С января 2018 г. по март 2019 г. был врио директора ФГБНУ «Омский аграрный научный центр», созданного на базе ФГБНУ СибНИИСХ, а с марта 2019 г. по 2025 г. – заместителем директора по научной работе данного центра.

Под руководством В.С. Бойко была усовершенствована система земледелия на мелиорируемых землях Омской области, в которой отражены наиболее эффективные способы мелиорации, опыт и перспективы интенсивного использования орошаемых и осушенных земель (Усовершенствование системы ..., 2018). В 2020 году Василием Сергеевичем организована и выполнена работа по подготовке и изданию «Системы адаптивного земледелия Омской области», отражающая современные взгляды на все элементы системы земледелия Западной Сибири (Система адаптивного ..., 2020). В 2024 году при непосредственном его участии издана книга «Научное земледелие Сибири: события и люди» (Научное земледелие ..., 2024), где изложена история создания, становления и развития научной деятельности отдела земледелия Сибирского НИИ сельского хозяйства, представлены сведения, об основных разработках, ведущих ученых в структурных подразделениях отдела.

За период научно-педагогической деятельности Василием Сергеевичем Бойко опубликовано, в том числе в соавторстве, более 300 печатных работ, из них 8 монографий и книг, 2 учебных пособия, 38 методических указаний. Он автор двух изобретений: «Способ возделывания многолетних трав» (Бойко, 2003) и «Способ возделывания ярового ячменя» (Тимохин и др., 2025).

Наряду с научной деятельностью Василий Сергеевич вносил значительный вклад в подготовку кадров высшего профессионального образования для АПК области, осуществляя преподавательскую деятельность в должности профессора Омского ГАУ им. П.А. Столыпина. Многие годы он участвовал в работе ГАК Омского ГАУ и Алтайского ГАУ в качестве председателя.



Рисунок 5. Коллектив лаборатории орошаемого земледелия со студентами-практикантами, 2013 г. Крайний слева С.П. Гавар, в центре В.С. Бойко, крайний справа А.Ю. Тимохин. Фото А.Ю. Тимохина.

Василий Сергеевич активно участвовал в подготовке высококвалифицированных научных кадров, был членом диссертационного совета при Красноярском ГАУ по специальности 06.01.01 – общее земледелие. Под его научным руководством защитились кандидаты сельскохозяйственных наук К.Э. Коленченко «Режим орошения и удобрение козятника восточного на лугово-черноземных почвах лесостепной зоны Западной Сибири» (Коленченко, 2002) и А.Ю. Тимохин «Повышение продуктивности зернобобовых культур на лугово-черноземных почвах Омского Прииртышья» (Тимохин, 2017), а также Ph.D (доктор) в Республике Казахстан – Л.К. Табынбаева «Влияние абсорбента «Аквасорб» на продуктивность зерновых культур в условиях предгорно-степной зоны юго-востока Казахстана» (2018).

В последние годы В.С. Бойко руководил аспирантской подготовкой Т.Н. Нижельского «Повышение продуктивности агроценозов однолетних кормовых культур в лесостепи Западной Сибири», В. Бабия «Совершенствование агротехнологии твердой яровой пшеницы в лесостепи Западной Сибири», М.С. Шаповала «Оптимизация приёмов повышения продуктивности ярового ячменя в южной лесостепи Западной Сибири»; соискателя М.Ю. Горбовой «Совершенствование агротехнологии льна-долгунца в подтаежной зоне Западной Сибири», Ph.D (доктор) Р.Н. Еркуатова «Ресурсосберегающая технология возделывания сои в условиях юга Казахстана», Н.О. Торганбаева «Возделывание озимой пшеницы по технологии прямого посева (нулевая) с применением биопрепаратов и стимуляторов роста растений на богарных землях южного Казахстана».

Он активно участвовал в издательском процессе, был деятельным членом редколлегии научного журнала «Почвы и окружающая среда», входящего в Перечень ВАК РФ, проводя большую работу по рецензированию и редактированию поступающих статей.

В.С. Бойко являлся заместителем председателя Ученого совета Омского аграрного научного центра. Был членом регионального экспертного совета РНФ Омской области, экспертом РАН, объединенного ученого Совета по сельскохозяйственным наукам СО РАН, экспертного совета ВАК по агрономии и лесному хозяйству.

За научно-производственную деятельность Василий Сергеевич был награжден Почетными грамотами Президиума СО РАСХН, РАН, Министерства сельского хозяйства и продовольствия Омской области, Благодарностью Минсельхоза России и Губернатора Омской области, медалью С.И. Манякина «За особые заслуги в развитии Омской области». В 2023 г. ему было присвоено звание – Ветеран СО РАН, в 2024 г. – Почетное звание «Заслуженный деятель науки Омской области».

Василий Сергеевич был скромным, принципиальным, безгранично преданным науке, неутомимым и трудолюбивым исследователем, отличался доброжелательностью, открытостью и порядочностью, заслуженно пользуясь большим уважением коллег и друзей. Он всегда был окружен молодежью – аспирантами, студентами, которым всегда старался помочь в их научной работе.

Светлая память о Василии Сергеевиче сохранится в наших сердцах.

ЛИТЕРАТУРА

- Биологическая активность лугово-чернозёмных почв Омского Прииртышья / О.Ф. Хамова, Л.В. Юшкевич, Н.А. Воронкова и др. Омск: Омскбланкиздат, 2019. 94 с.
- Бойко В.С. Эффективность обработки почвы и удобрений при поукосном выращивании однолетних трав на орошаемой пашне в лесостепи Западной Сибири. Автореферат диссертации ... кандидата с.-х. наук. Алма-Ата, 1986. 26 с.
- Бойко В.С. Интенсивная технология возделывания и использования рапса в Западной Сибири: методические рекомендации. Новосибирск: Редакционно-полиграфическое объединение СО ВАСХНИЛ, 1988. 92 с.
- Бойко В.С. Способ возделывания многолетних трав // Патент № 2208921 С2 Российская Федерация, МПК А01В 79/00, А01С 7/00. Заявитель Сибирский научно-исследовательский институт сельского хозяйства. Заявка № 99109733/13 от 05.05.1999; опубл. 27.07.2003.
- Бойко В.С. Интенсификация полевого кормопроизводства и воспроизводство плодородия орошаемых лугово-черноземных почв в лесостепи Западной Сибири. Автореферат диссертации ... доктора с.-х. наук. Барнаул, 2011. 39 с.
- Бойко В.С. Полевое кормопроизводство на орошаемых черноземах в лесостепи Западной Сибири. Омск: ИП Макшеевой Е.А., 2019. 312 с.
- Бойко В.С., Гоф В.Ф. Промежуточные культуры в орошаемом земледелии Западной Сибири // Вестник сельскохозяйственной науки. 1990. № 12. С. 134–137.
- Бойко В.С., Гоф В.Ф. Формирование двух урожаев на корм в звене донник-просо при орошении // Сибирский вестник сельскохозяйственной науки. 1995. № 3–4. С. 34–36.
- Бойко В.С., Сницарь А.Е. Агротехнологические приёмы повышения продуктивности орошаемых земель. Омск: Омский государственный аграрный университет имени П.А. Столыпина, 2002. 160 с.
- Коленченко К.Э. Режим орошения и удобрения козлятника восточного на лугово-черноземных почвах лесостепной зоны Западной Сибири. Автореферат диссертации ... кандидата с.-х. наук. Волгоград, 2002. 15 с.
- Коленченко К.Э., Бойко В.С., Русаков В.Н. Козлятник восточный на орошаемых землях Западной Сибири. Омск: Издательство ФГОУ ВПО ОмГАУ, 2007. 112 с.
- Научное земледелие Сибири: события и люди: к 100-летию основания отдела земледелия СибНИИСХоза / В.С. Бойко, Л.В. Юшкевич, Н.А. Воронкова и др. Омск: Омский аграрный научный центр, 2024. 124 с.
- Система адаптивного земледелия Омской области / И.Ф. Храмов, В.С. Бойко, Л.В. Юшкевич и др. Омск: ИП Макшеевой Е.А., 2020. 522 с.
- Тимохин А.Ю. Повышение продуктивности зернобобовых культур на лугово-черноземных почвах Омского Прииртышья. Автореферат диссертации ... кандидата с.-х. наук. Красноярск, 2017. 20 с.
- Тимохин А.Ю., Ледовский Е.Н., Юшкевич Л.В., Тукмачева Е.В., Паршуткин Ю.Ю., Балабанова Н.Ф., Шулико Н.Н., Бойко В.С., Василевский В.Д., Ющенко Д.Н., Николаев П.Н. Способ возделывания ярового ячменя // Патент № 2834668 С1 Российская Федерация, МПК А01G 22/20, А01В 79/02. Заявитель Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Омский аграрный научный центр». Заявка № 2024112953 от 14.05.2024; опубл. 12.02.2025.
- Усовершенствование системы земледелия на мелиорируемых землях Омской области / В.С. Бойко, А.Ю. Тимохин, С.П. Гавар и др. Омск: Издательство ИП Макшеевой Е.А., 2018. 32 с.

Поступила в редакцию 26.11.2025

Принята 26.11.2025

Опубликована 27.11.2025

Сведения об авторах:

Тимохин Артем Юрьевич – кандидат сельскохозяйственных наук, ведущий научный сотрудник ФГБНУ «Омский аграрный научный центр», агротехнологический центр (г. Омск, Россия); timokhin@anc55.ru; <https://orcid.org/0000-0002-5120-4068>

Чекусов Максим Сергеевич – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник ФГБНУ «Омский аграрный научный центр», агротехнологический центр (г. Омск, Россия); mchekusov@anc55.ru; <https://orcid.org/0000-0002-1241-6762>

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.



In memory of Vasily Sergeevich Boiko

© 2025 A. Yu. Timokhin , M. S. Chekusov 

Omsk Agricultural Scientific Center, Koroleva Avenue, 26, Omsk, Russia. E-mail: timokhin@anc55.ru

This article presents the main research and teaching work of Vasily Sergeyevich Boiko, Doctor of Agricultural Sciences and Principal Researcher at the Omsk Agricultural Research Center. It also provides a brief overview of his work during the studies at Tomsk State University, and then at the irrigated agriculture laboratory of the Siberian Research Institute of Agriculture and at the Omsk Agricultural Research Center. The article highlights V.S. Boiko's contribution to the study of irrigated chernozem soils in the south of West Siberia and their agrochemical assessment, alongside with his research in the field of soil-conserving and resource-saving irrigated agriculture.

Keywords: Boiko V.S.; irrigated forage production; agriculture; West Siberia; agrochemistry; perennial grasses; soil.

How to cite: Timokhin A.Yu., Chekusov M.S. In memory of Vasily Sergeevich Boiko. *The Journal of Soils and Environment*. 2025. 8(4). e345. DOI: [10.31251/pos.v8i4.345](https://doi.org/10.31251/pos.v8i4.345) (in Russian with English abstract).

REFERENCES

- Biological activity of meadow-chernozem soils of the Omsk Irtysh region / O.F. Khamova, L.V. Yushkevich, N.A. Voronkova et al. Omsk: Omskblankizdat, 2019. 94 p. (in Russian).
- Boiko V.S. Efficiency of soil cultivation and fertilizers during post-harvest cultivation of annual grasses on irrigated arable land in the forest-steppe of Western Siberia. Abstract of Dissertation ... Cand. of Agricultural Sci. Almaty, 1986. 26 p. (in Russian).
- Boiko V.S. Intensive technology of cultivation and use of rapeseed in Western Siberia: methodological recommendations. Novosibirsk: Editorial and printing association of the Siberian Branch of the All-Union Academy of Agricultural Sciences, 1988. 92 p. (in Russian).
- Bojko V.S. Perennial grass cultivation method. Patent No. 2208921 C2 Russian Federation, IPC A01B 79/00, A01C 7/00. Applicant: Siberian Research Institute of Agriculture. Application No. 99109733/13 dated 05.05.1999; published 27.07.2003
- Boiko V.S. Intensification of field forage production and restoration of fertility of irrigated meadow-chernozem soils in the forest-steppe of Western Siberia. Abstract of Dissertation ... Dr. of Agricultural Sci. Barnaul, 2011. 39 p. (in Russian).
- Boiko V.S. Field forage production on irrigated chernozems in the forest-steppe of Western Siberia. Omsk: IP Maksheevoy E.A., 2019. 312 p. (in Russian).
- Boiko V.S., Gof V.F. Catch crops in irrigated agriculture of Western Siberia. *Vestnik sel'skokhozyaystvennoy nauki*. 1990. No. 12. P. 134–137. (in Russian).
- Boiko V.S., Gof V.F. Formation of two crop yields for forage in the sweet clover-millet link under irrigation. *Siberian Herald of Agricultural Science*. 1995. No. 3–4. P. 34–36. (in Russian).
- Boiko V.S., Snitsar A.E. Agromeliorative methods for increasing the productivity of irrigated lands. Omsk: Omsk State Agrarian University named after P.A. Stolypin, 2002. 160 p. (in Russian).
- Kolenchenko K.E. Irrigation and fertilization regime of eastern galega on meadow-chernozem soils of the forest-steppe zone of Western Siberia. Abstract of Dissertation ... Cand. of Agricultural Sci. Volgograd, 2002. 15 p. (in Russian).
- Kolenchenko K.E., Boiko V.S., Rusakov V.N. Eastern goat's rue on irrigated lands of Western Siberia. Omsk: Publishing house of FSEI of HPE OmskSAU, 2007. 112 p. (in Russian).
- Scientific agriculture of Siberia: events and people: to the 100th anniversary of the founding of the agriculture department of the SibNIISKhoz / V.S. Boiko, L.V. Yushkevich, N.A. Voronkova et al. Omsk: Omsk Agrarian Research Center, 2024. 124 p. (in Russian).
- Adaptive farming system of Omsk region / I.F. Khramtsov, V.S. Boiko, L.V. Yushkevich et al. Omsk: IP Maksheevoy E.A., 2020. 522 p. (in Russian).
- Timokhin A.Yu. Increasing the productivity of grain legumes on meadow-chernozem soils of the Omsk Irtysh region. Abstract of Dissertation ... Cand. of Agricultural Sci. Krasnoyarsk, 2017. 20 p. (in Russian).

Timokhin A.Iu., Ledovskii E.N., Iushkevich L.V., Tukmacheva E.V., Parshutkin Iu.Iu., Balabanova N.F., Shuliko N.N., Boiko V.S., Vasilevskii V.D., Iushchenko D.N., Nikolaev P.N. Method of cultivation of spring barley. Patent No. 2834668 C1 Russian Federation, IPC A01G 22/20, A01B 79/02. Applicant: Omsk Agricultural Scientific Center. Application No. 2024112953 dated 14.05.2024; published 12.02.2025. (in Russian).

Improving the farming system on reclaimed lands of the Omsk region / V.S. Boiko, A.Yu. Timokhin, S.P. Gavar et al. Omsk: Publishing house of IP Maksheeva E.A., 2018. 32 p. (in Russian).

Received 26 November 2025

Accepted 26 November 2025

Published 27 November 2025

About the authors:

Artem Yu. Timokhin – Candidate of Agricultural Sciences, Leading Researcher in the Omsk Agricultural Scientific Center, Agrotechnological Center (Omsk, Russia); timokhin@anc55.ru; <https://orcid.org/0000-0002-5120-4068>

Maksim S. Chekusov – Candidate of Engineering Sciences, Leading Researcher in the Omsk Agricultural Scientific Center, Agrotechnological Center (Omsk, Russia); mchekusov@anc55.ru; <https://orcid.org/0000-0002-1241-6762>

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/)