ISSN 2618-6802 (online)

Почвы и окружающая среда

Научный журнал

Том 8. Выпуск 1

2025

https://soils-journal.ru

The Journal of Soils and Environment

Scientific Journal

Volume 8. Issue 1

2025

ISSN 2618-6802 (online)

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

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

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

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

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

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

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

Будажапов 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 Павлинович – 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 okružaûŝaâ 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

ISSN 2618-6802 (online)

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)

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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 okružaûŝaâ 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

ISSN 2618-6802 (online)

Содержание

Органическое вещество и биохимия почв

Дергачева М.И. Органическое вещество почв: его значимость в решении проблем почвоведения и сопредельных наук e316

Лодыгин Е.Д., Шамрикова Е.В. Оценка протолитических свойств органических полиэлектролитов почв методом *p*K-спектроскопии e299

Холодов В.А., Зиганшина А.Р., Данченко Н.Н., Никитин Д.А., Ярославцева Н.В., Данилова-Данильян Е.М., Фарходов Ю.Р. Водоэкстрагируемое органическое вещество и биологическая активность агродерново-подзолистых почв малого водосбора после снеготаяния e301

Комаров А.А., Безуглова О.С. Гумусообразование как процесс трансформации растительных остатков e307

Поляков В.И., Абакумов Е.В. Микроморфологическое строение органической и минеральной части тундровых почв дельты реки Лены e306

Якименко О.С., Нестеров П.В., Степанов А.А., Панова И.Г., Чернов В.Е., Ярославов А.А. Влияние гуматов калия, ксантановой камеди и бинарных композиций на их основе на свойства дерново-подзолистой почвы в модельных экспериментах e302

Токарева А.В., Уфимцев В.И., Соколова Н.А., Соколов Д.А. Особенности формирования и углероддепонирующая способность подстилок лесных и травяных техногенных экосистем отвалов отходов добычи антрацита e309

Коронатова Н.Г. Изменение элементного состава и содержания низкомолекулярных органических соединений в ходе экспериментальной деструкции торфа в южно-таёжных болотах Западной Сибири e308

Ефремова Т.Т., Ефремов С.П., Аврова А.Ф. Регрессионные модели связи каталазной активности и водного режима – критерии качества осушенных почв болотных сосняков Западной Сибири e297

ISSN 2618-6802 (online)

Contents

Soil Organic Matter and Biochemistry

Dergacheva M.I. Soil organic matter: its importance in solving the problems of soil science and related sciences e316

Lodygin E.D., Shamrikova E.V. Assessment of protolytic properties of soil organic polyelectrolytes by pK-spectroscopy e299

Kholodov V.A., Ziganshina A.R., Danchenko N.N., Nikitin D.A., Yaroslavtseva N.V., Danilova-Danilyan E.M., Farkhodov Y.R. Water-extractable organic matter and biological activity of Retisol of a small water-shed after snowmelt e301

Komarov A.A., Bezuglova O.S. Humus formation as a process of plant residues transformation e307

Polyakov V.I., Abakumov E.V. Micromorphological features of organic and mineral parts of tundra soils in the Lena river delta e306

Yakimenko O.S., Nesterov P.V., Stepanov A.A., Panova I.G., Chernov V.E., Yaroslavov A.A. Effect of potassium humates, xanthan gum and their combinations on the properties of soddy-podzolic soil in model experiments e302

Tokareva A.V., Ufimtsev V.I., Sokolova N.A., Sokolov D.A. Litter formation and its carbon deposition capacity in forest and grass man-made ecosystems of anthracite mining coal mining spoils e309

Koronatova N.G. Changes in the elemental composition and content of low molecular organic compounds during experimental peat destruction in the southern taiga bogs (West Siberia) e308

Efremova T.T., Efremov S.P., Avrova A.F. Regression models of catalase activity and water regime as criteria for quality assessing of the drained soils of mire pine forests in West Siberia e297

УДК 631.4
https://doi.org/10.31251/pos.v8i1.316

Органическое вещество почв: его значимость в решении проблем почвоведения и сопредельных наук

© 2025 М. И. Дергачева

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

В работе дано краткое представление о роли почвенного органического вещества (ПОВ) в решении проблем почвоведения и сопредельных наук, а также о трудностях, возможностях и пробелах в исследовании ПОВ. Анонсирован первый выпуск журнала за 2025 год, посвященный разным аспектам в изучении ПОВ.

Ключевые слова: *органические вещества почв; полисемантичность; проблемы; влияние меняющейся среды.*

Цитирование: *Дергачева М.И. Органическое вещество почв: его значимость в решении проблем почвоведения и сопредельных наук // Почвы и окружающая среда. 2025. Том 8. № 1. e316. DOI: 10.31251/pos.v8i1.316*

Настоящий номер журнала «Почвы и окружающая среда» отражает разные аспекты очень сложной и до сих пор дискуссионной научной проблемы, связанной с выявлением закономерностей участия и поведения почвенного органического вещества (**ПОВ**) в природных процессах, а также возможностям использования информации, связанной с этими веществами, при решении разнообразных вопросов в рамках почвоведения и сопредельных наук.

Органическое вещество почв всегда привлекало внимание специалистов разных научных направлений, поскольку оно выполняет широкий круг функций, обеспечивающих, в конечном итоге, устойчивое существование биосферы. Среди них можно отметить роль органических веществ почв в генезисе, формировании основных свойств, участии в основных режимах и круговоротах разных элементов, в обеспечении и поддержании плодородия, миграции, аккумуляции, депонирования веществ, в сохранении и передаче информации и во многих других природных процессах разного уровня. В последние десятилетия внимание к этому компоненту почв вновь существенно возросло в связи с глобальным изменением климата и возможностями, в связи с этим, повышения выделений «парниковых газов», что может существенно повлиять на климат и состояние экосистем на значительных территориях, на изменение разных режимов почв и, как следствие, свойств почв, в частности, плодородия.

Количество работ, характеризующих содержание, состав органического вещества в почвах, его трансформацию под влиянием естественных и антропогенных процессов так велико, что, практически, труднообозримо в пределах небольших исследовательских статей. Но имеется большое количество монографий и обзорных оригинальных статей, сопоставление информации которых позволяет проследить развитие и современное состояние проблемы изученности, методической разработанности исследовательского процесса и роли органического вещества в естественных природных и рукотворных процессах. Анализ имеющихся публикаций показал, что до сих пор проблема познания органического вещества почв остается *дискуссионной,* причина чего кроется, с одной стороны, в многообразии и сложности составляющих этого компонента почв и поэтому необходимости использования широкого набора аналитических и инструментальных методов при его изучении, с другой – в полисемантичности самого термина «органическое вещество почв», обусловливающей разночтение толкований и неоднозначность выводов о его составе, состоянии, поведении в меняющейся среде и разноуровневых функциях в биосфере. Особо следует отметить кардинально разное отношение к правомочности выделения, пониманию сути и реальности существования гумусовых веществ, которые большинство исследователей относят к ПОВ.

Хотя существует многообразие в формулировках о сути понятия «органическое вещество почв», в конечном итоге их можно свести к относительно краткому определению, вытекающему из работ ученых – классиков почвоведения: органическое вещество почв – это совокупность негумусовых (разной степени преобразованности растительных, животных и микробных тканей) и гумусовых (специфических, образующихся в процессе гумификации) веществ, или иначе – это все скопления органических веществ, исключая живые организмы. При этом, наиболее распространенное

в органической химии определение термина «органические вещества» включает почти все химические соединения, в состав которых входят атомы углерода, связанные с атомами других химических элементов.

Разнообразие формулировок, определяющих понятие «органическое вещество почв» велико, но окончательного определения понятийного объема этого термина, которое устраивало бы всех исследователей, решающих разнообразные проблемы, связанные с этим почвенным компонентом, пока не существует.

При решении практических задач органическое вещество почв принято разделять на лабильную (мобильную) и стабильную части, каждая из которых играет специфические роли в почвенных процессах. При выявлении особенностей состояния и изменчивости органического вещества почв при антропогенных нагрузках, как и при оценке влияния разных кратковременных изменений естественной природной среды, очень большое значение имеют исследования, связанные с изучением лабильной части органического вещества почв; при решении задач, связанных с выявлением поведения почв в длительные геологически соизмеримые отрезки времени, важнее получение информации о так называемой стабильной части ПОВ – гумусовой составляющей почв. Последняя участвует в формировании памяти почв, обладает информационной значимостью при диагностике условий их формирования и способствует решению проблем эволюции природной среды в разные периоды палеогеографической истории на территориях разного уровня. Сложность состоит в том, что многообразие трактовок понятийного объема термина «органическое вещество почв» приводит зачастую к неоднозначным выводам и невозможности обобщения материалов разных авторов.

Несмотря на наличие большого количества разнообразных исследований, посвященных органическому веществу почв, из-за обозначенных выше проблем остается еще много вопросов, требующих дальнейших разработок: поиск новых методов, приемов или модифицирование уже используемых подходов к более точному разделению ПОВ на отдельные составляющие, детализация изучения состава последних, их молекулярной структуры, организации природного и лабораторного моделирования разных частных процессов, использования отдельных составляющих органического вещества почв при решении проблем состояния и устойчивости природных объектов и многие другие.

Представленные в настоящем выпуске журнала «Почвы и окружающая среда» исследовательские работы будут способствовать ликвидации некоторых белых пятен в решении проблем, связанных с ролью ПОВ в процессах почвообразования, трансформации при изменении природной обстановки или при антропогенных воздействиях.

Точки зрения авторов на тот или иной вопрос могут не совпадать с мнением редактора и(или) рецензентов, однако мы рады представить авторское видение отдельных проблем, показать разные подходы к получению и интерпретации материалов изучения органического вещества почв и их применения при решении разных вопросов, нередко основанные на разном понимании термина ПОВ и вытекающих из этого методологических разногласий.

Мы уже неоднократно подчеркивали, что публикации и обсуждение результатов исследовательских работ, содержащих разные точки зрения на интерпретацию одних и тех же материалов, очень важны для развития любого научного направления, поскольку дают ценную информацию и, в конечном итоге, будут способствовать установлению определенных закономерностей поведения органического вещества почв в меняющейся естественным и антропогенном путями природной обстановке.

Поступила в редакцию 19.05.2025
Принята 21.05.2025
Опубликована 25.05.2025

Сведения об авторе:

Дергачева Мария Ивановна – доктор биологических наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории биогеоценологии ФГБУН Институт почвоведения и агрохимии СО РАН (г. Новосибирск, Россия**);** mid555@yandex.com; dergacheva@issa-siberia.ru; https://orcid.org/0000-0002-8344-0591

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

Статья доступна по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License

Soil organic matter: its importance in solving the problems of soil science and related sciences

© 2025 M. I. Dergacheva

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

The aim of the study: *To give a brief idea of the role of soil organic matter in solving thebproblems of soil science and related sciences, as well as underscore the difficulties, opportunities and gaps in soil organic matter research and to announce the first issue of the 2025 volume devoted to soil organic matter studies.*

Keywords: *soil organic matter; polysemy; problems; influence of a changing environment.*

How to cite: *Dergacheva M.I. Soil organic matter: its importance in solving the problems of soil science and related sciences // The Journal of Soils and Environment. 2025. 8(1). e316. DOI: 10.31251/pos.v8i1.316 (in Russian with English abstract).*

Received 19May 2025
Accepted 21 May 2025
Published 25 May 2025

About the author:

Maria I. Dergacheva – Doctor of Biological Sciences, Professor, Principal Researcher in the Laboratory of Biogeocenology of the Institute of Soil Science and Agrochemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Novosibirsk, Russia); mid555@yandex.ru; https://orcid.org/0000-0002-8344-0591

The author read and approved the final manuscript

The article is available under Creative Commons Attribution 4.0 License

УДК 631.417
https://doi.org/10.31251/pos.v8i1.299

Check for updates

Оценка протолитических свойств органических полиэлектролитов почв методом p*K*-спектроскопии

© 2025 Е. Д. Лодыгин, Е. В. Шамрикова

Институт биологии Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук, ул. Коммунистическая, 28, г. Сыктывкар, 167982, Россия. E-mail: lodigin@ib.komisc.ru

Цель исследования. *Проверить возможность использования метода pK-спектроскопии для оценки кислотно-основных свойств гуминовых веществ и водорастворимых фракций почв.*

Место и время проведения. *Исследованные препараты фульвокислот выделены из органогенных горизонтов торфянисто-подзолистой поверхностно-оглеенной (Eutric Albic Stagnic Histic Retisol (Loamic)), целинной и пахотной подзолистых почв (Eutric Albic Retisols (Loamic)). Почвы расположены на территории средней тайги (Максимовский стационар Института биологии ФИЦ КНЦ УрО РАН, расположенный в 8 км к западу от г. Сыктывкар и поле Сыктывкарского совхоза в 5 км к юго-западу от г. Сыктывкар). Период отбора почв – с 1 по 30 августа 2014 года. Для изучения протолитических свойств жидкой фазы почвы отобраны образцы органогенных горизонтов трех почв: дерново-подзолистая неоглеенная (Eutric Albic Retisol (Loamic)), дерново-подзолистая глееватая (Distric Gleyic Retisol (Loamic) и дерново-подзолистая глеевая (Eutric Albic Retisol). Почвы расположены на расстоянии 1 км к северо-западу от села Крутотыла Прилузского района (Республика Коми, Россия). Период отбора почв – с 1 по 10 июля 2018 года.*

Методы. *Потенциометрическое титрование растворов органических полиэлектролитов почв проводили при температуре 25±1 °C. ЭДС титрованных растворов измеряли на иономере pH-150 с помощью стеклянного электрода ЭСЛ-15-11. Аликвоты водных растворов фульвокислот и почвенных вытяжек титровали растворами HCl или NaOH. Титрование проводили в диапазонах pH от начальной точки титрования до 3,0 при титровании раствором кислоты и до 10,0 при титровании раствором основания. Титрование растворов органических соединений проводили в 3–5-кратной повторности. Для расчета pK-спектров систем по кривым потенциометрического титрования использовали компьютерную программу «PKSVD».*

Основные результаты. *Результаты апробации метода pK-спектроскопии показали, что данный метод является более наглядным и информативным, чем традиционный метод непрерывного потенциометрического титрования. Программа «PKSVD» позволяет рассчитывать pK-спектры с достаточно высокой точностью для сложных природных полиэлектролитов, таких как фульвокислоты и водорастворимые органические вещества почв. Использование программы «SPLINE» для сглаживания экспериментальной зависимости позволяет улучшить результаты построения pK-спектра. Использование метода pK-спектроскопии позволило определить значения констант кислотности групп сложных природных систем, рассчитать число кислотных групп, получить новые результаты как фундаментального, так и прикладного характера. В исследованных органических полиэлектролитах почв выявлено наличие от трех до пяти ионогенных групп со значениями pK от 3,2 до 9,6.*

Заключение. *Метод pK-спектроскопии, использующий линейный регрессионный анализ с ограничениями на неотрицательность решений, открывает широкие возможности для потенциометрического анализа сложных протолитических систем, в том числе различных объектов окружающей среды. Этот метод значительно расширяет представления о физико-химических свойствах гумусовых веществ и почвенного органического вещества.*

Ключевые слова: *кислотно-основные свойства; титрование; pK-спектр; почва; фульвокислоты; водорастворимые органические вещества.*

Цитирование: *Лодыгин Е.Д., Шамрикова Е.В. Оценка протолитических свойств органических полиэлектролитов почв методом pK-спектроскопии // Почвы и окружающая среда. 2025. Том 8. № 1. e299. DOI: 10.31251/pos.v8i1.299*

ВВЕДЕНИЕ

Кислотно-основная буферность почв в значительной степени является продуктом формирования почв и представляет собой фундаментальное свойство, контролирующее подвижность химических элементов, включая многие питательные вещества и поллютанты в почвах и ландшафтах. Реакция среды оказывает существенное влияние на протекающие в почвах окислительно-восстановительные процессы, реакции комплексообразования, осаждения, растворения и др. (Ванчикова и др., 2021; Bondareva, Kudryasheva, 2021).

Изучение протолитических равновесий в сложных природных системах, таких как почвы (Wang et al., 2018; Matveeva et al., 2024), их гранулометрические фракции (Алексеева и др., 2003), гуминовые вещества (Данченко и др., 1998; Шамрикова, 2013; Garcia-Gil et al., 2004) и сложные смеси органических соединений (Shamsipur et al., 2002), как правило, проводится потенциометрическим методом. Потенциометрическое титрование широко используется в аналитической химии для определения концентрации веществ в растворах. Потенциометрическое титрование почвенных образцов проводят двумя способами, которые условно называют непрерывным (НПТ) и равновесным потенциометрическим титрованием (РПТ). Единых методов определения кислотно-основной буферности для обоих вариантов не существует, но при использовании НПТ значения pH измеряются через несколько минут после добавления титранта, а при РПТ – через более длительный период времени, измеряемый часами и днями.

Метод НПТ позволяет регистрировать только быстро протекающие буферные реакции. К ним относятся гомогенные реакции в растворах, большинство реакций катионного обмена, а также протонирование-депротонирование pH-зависимых сорбционных центров на поверхности гумусовых веществ или почвенных минералов (Русакова и др., 2012). Для многих буферных систем, присутствующих в почве, равновесие в системе почва-раствор не успевает установиться в процессе НПТ. В то же время преимуществом этого метода является возможность добавлять титрант небольшими порциями и, соответственно, достаточно подробно изучать буферные реакции (Lodygin, Shamrikova, 2021).

При использовании РПТ более полно регистрируются реакции катионного обмена и реакции медленного растворения некоторых труднорастворимых компонентов, таких как гуминовые кислоты или силикаты (Максимова и др., 2010). Ограничения метода заключаются в том, что невозможно получить информацию о буферных реакциях с такой степенью детализации, как в случае НПТ, поскольку титрант добавляется в систему большими порциями. Кроме того, при более длительном взаимодействии с титрантом в системе почва-раствор могут происходить вторичные реакции, которые усложняют интерпретацию результатов титрования. Для некоторых наиболее труднорастворимых компонентов равновесие не успевает установиться даже при проведении РПТ (Соколова, 2020; Lodygin, Shamrikova, 2021).

Основная проблема, возникающая при интерпретации результатов обоих методов, заключается в том, что почва представляет собой полидисперсную и многокомпонентную систему. Важнейшим компонентом почвы является органическое вещество, представляющее собой сложную комбинацию растительных и животных остатков, находящихся на различных стадиях разложения, и специфических почвенных органических веществ, называемых гумусом. Гуминовые (ГК) и фульвокислоты (ФК) содержат различные функциональные группы как кислотного, так и основного характера. При этом ФК имеют относительно низкую молекулярную массу, интенсивно взаимодействуют с почвенными минералами и легко мигрируют по почвенному профилю, участвуя в процессах выщелачивания и подзолообразования. Кроме того, органическое вещество почвы содержит широкий спектр низкомолекулярных соединений: органические кислоты, углеводы, аминокислоты, фенолы, спирты и т.д. (Шамрикова и др., 2019; Lodygin, Shamrikova, 2021). Поэтому кривая титрования сложных смесей органических полиэлектролитов часто представляет собой пологую линию без заметных точек перегиба и платообразных участков. Надежная идентификация буферных реакций, происходящих в процессе НПТ и РПТ, требует проведения специальных модельных экспериментов, в которых в процессе титрования наблюдаются изменения различных почвенно-химических характеристик. Однако выявить кислотно-основные группы, определяющие химические свойства субстрата, таким способом практически невозможно (Ryazanov, Dudkin, 2009). В настоящее время математические методы становятся важным инструментом для понимания объектов окружающей среды (Zhang et al., 2013). Для обработки кривых потенциометрического титрования предложено множество вычислительных методов. Однако все они характеризуются либо низкой стабильностью растворов и, как правило, применимы только к простейшим (двухкомпонентным) системам, либо требуют предварительной информации о значениях констант диссоциации компонентов (Lodygin, Shamrikova, 2021).

В последнее время для потенциометрического анализа сложных протолитических систем предлагается использовать методы обработки данных, позволяющие по значениям pK (–lgKa) кислотной диссоциации из кривой кислотно-основного титрования вычислить функцию распределения концентраций ионогенных групп титруемого объекта. Эта функция распределения называется pK-спектром, а сам подход – pK-спектроскопией. В этом случае решения находят не в виде

дискретных констант диссоциации, а в виде функции распределения концентраций ионогенных групп по непрерывному спектру констант диссоциации (Данченко и др., 1998). Такое распределение, в отличие от классического метода потенциометрического анализа, позволяет исследовать сложные смеси кислот и оснований с достаточно близкими значениями констант диссоциации и, одновременно, определять как концентрации компонентов, так и их p*K*-значения.

Метод, основанный на таком распределении (метод p*K*-спектроскопии), является перспективным при изучении сложных кислотно-основных систем. Он был успешно применен для изучения протолитических свойств суспензий γ-Al_2O_3 (Ситников и др., 2014) – систем, для которых нет надежных данных о функциональном составе, а классические методы анализа трудно применимы и не всегда дают адекватную информацию об их структуре. Концентрации ионогенных групп в изученных субстратах $c(pK_i)$ могут быть найдены путем решения системы уравнений, описывающих протолитическое равновесие при различных значениях pH (в процессе титрования). Однако следует иметь в виду, что такая задача относится к классу некорректных (в математическом смысле) задач, решение которых чрезвычайно чувствительно к малым ошибкам в исходных экспериментальных данных, то есть к ошибкам в функции титрования (Ryazanov, Dudkin, 2009). Устойчивость решения к экспериментальным ошибкам возрастает, если используется априорная информация о полученных результатах; в частности, очевидно, что значения $c(pK_i)$ должны быть положительными. При решении этой системы уравнений используется алгоритм «NNLS» (Boutsidis, Drineas, 2009), в котором эта система уравнений решается методом наименьших квадратов с ограничением на неотрицательность решений (Lodygin, Shamrikova, 2021). В данной работе мы использовали аналогичную программу «PKSVD», написанную на языке Turbo Pascal 7.0.

Цель работы – проверить возможность использования метода p*K*-спектроскопии для оценки кислотно-основных свойств фульвокислот и водорастворимых фракций почв.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Препараты ФК выделяли из органогенных горизонтов торфянисто-подзолистой поверхностно-оглеенной (Eutric Albic Stagnic Histic Retisol (Loamic)), целинной и пахотной подзолистых почв (Eutric Albic Retisols (Loamic)) по методике Международного общества по изучению гумусовых веществ (Swift, 1996). Участки целинных почв заложены на катене: подзолистая и торфянисто-подзолистая поверхностно-оглеенная почвы. Высокое положение катены в рельефе позволяет оценить влияние степени увлажнения на кислотно-основные свойства гумусовых веществ. Разрез подзолистой почвы расположен в 8 км к западу от г. Сыктывкара (Республика Коми, Россия) на вершине водораздельного холма высотой 1,5 м (61°39'44,6" с.ш., 50°41'10,4" в.д.; 160 м над уровнем моря). Растительность представляет собой чернично-зеленомошный березово-еловый лес с большим количеством поваленных деревьев. Разрез торфянисто-подзолистой поверхностно-оглеенной почвы расположен на расстоянии 74 м от предыдущего (61°39'42,4" с.ш., 50°41'8,4" в.д.; 155 м над уровнем моря). Растительность представляет собой мохово-сфагновый березово-еловый лес. Разрез пахотной подзолистой почвы расположен на полях Сыктывкарского совхоза, который находится в 5 км к юго-западу от Сыктывкара, на водоразделе рек Сысола и Важель-ю (61°38'46.1" с.ш., 50°44'20.7" в.д.; 145 м над уровнем моря). Рельеф равнинный с небольшими холмами. Период освоения составляет около 40 лет. Участок осушается крытой дренажной системой. Засеян горохо-овсяной смесью (Lodygin, Shamrikova, 2021).

Образец почвы был высушен до воздушно-сухого состояния и обработан смесью растворов NaOH и $Na_4P_2O_7$, молярная концентрация обоих компонентов в растворах составляла 0,1 ммоль·дм$^{-3}$. Для коагуляции коллоидных частиц к щелочному раствору добавляли раствор Na_2SO_4 (ω = 20%) и центрифугировали в течение 2 ч. при скорости вращения 5000 об/мин. Далее ГК осаждали раствором серной кислоты до pH=1,0. ФК очищали на активированном угле АГ-3 (ОАО «Сорбент», Пермь, Россия) и обессоливали, пропуская через катионит КУ-2 (Уральская химическая компания, Челябинск, Россия) в H^+-форме. Массовые концентрации ФК в элюатах определяли гравиметрически при выпаривании аликвоты раствора (Рязанов и др., 2006).

Для изучения протолитических свойств жидкой фазы почвы были отобраны образцы органогенных горизонтов трех почв: дерново-подзолистая неоглеенная (Eutric Albic Retisol (Loamic)), дерново-подзолистая глееватая (Distric Gleyic Retisol (Loamic) и дерново-подзолистая глеевая (Eutric Albic Retisol). Разрезы расположены на расстоянии 1 км к северо-западу от села Крутотыла Прилузского района (Республика Коми, Россия). Первая почва сформирована на вершине холма высотой 1,5 м (59°38'25,3" с.ш., 49°22'40,8" в.д.; 170 м над уровнем моря). Растительность представляет

собой осиново-березово-еловый лес с черникой, брусникой и зелеными мхами (Lodygin, Shamrikova, 2021). Дерново-подзолистая глееватая почва расположена на расстоянии 50 м от предыдущего разреза (59°36'23.4" с.ш., 49°22'37,1" в.д.; 164 м над уровнем моря). Состав древостоя остался прежним. В почвенном покрове преобладают черника и зеленые мхи. Дерново-подзолистая глеевая почва развита в микролощине между небольшими плоскими возвышенностями в 60 м от второго участка (59°38'41.6" с.ш., 49°22'52.4" в.д.; 152 м над уровнем моря). Растительность представляет собой березово-елово-сфагново-политриховый лес.

Водные экстракты из воздушно-сухих образцов почвы, просеянных через сито с d=0,1 мм, готовили следующим образом: три образца почвы массой 2,0 г заливали 50,0 см^3 дистиллированной воды. Суспензии встряхивали в ротаторе в течение 15 мин., оставляли на ночь, встряхивали еще 15 минут и фильтровали через бумажный фильтр «синяя лента». Для выяснения природы водорастворимых компонентов, не попавших в водный экстракт после однократной обработки элюантом, фильтр с субстратом промывали дистиллированной водой до достижения объема «промывных вод» 20,0 см^3.

Потенциометрическое титрование растворов проводили при температуре 25±1°С. ЭДС титрованных растворов измеряли на иономере pH-150 с помощью стеклянного электрода ЭСЛ-15-11 (Завод измерительной аппаратуры, Гомель, Беларусь). В качестве титранта растворов ФК использовали раствор NaOH с концентрацией c = 0,0088±0,0011 ммоль·дм$^{-3}$. Аликвоты водных вытяжек из почвенных образцов и промывных вод титровали растворами HCl или NaOH с молярной концентрацией 0,0200±0,0026 ммоль·дм$^{-3}$, приготовленными из фиксаналов (MercK, Германия). Все растворы готовили на бидистилляте. Значения pH регистрировали через 2 мин. после добавления очередной порции титранта. Титрование проводили в диапазонах pH от начальной точки титрования до 3,0 при титровании раствором кислоты и до 10,0 при титровании раствором основания. Титрование растворов органических соединений проводили в 3–5-кратной повторности. Рассчитывали средние значения и границы доверительных интервалов, значимость различий оценивали при P = 0,95.

Компьютерная программа «PKSVD» для расчета pK-спектров систем по кривым потенциометрического титрования, использованная в данной работе, была разработана доктором химических наук М.А. Рязановым (Рязанов и др., 2001). Построение pK-спектров включало семь этапов. На первом этапе рассчитывалась кривая титрования (функция), зависимость отношения номера кислотной группы и массы образца (n/m) от pH системы. При работе с природными полиэлектролитами можно использовать различные подходы. В одном случае, когда субстрат имеет слабокислую или слабощелочную реакцию, можно проводить титрование как раствором кислоты, так и раствором щелочи. В результате каждая экспериментальная зависимость $n/m = f$ (pH) включает два фрагмента $n(OH^-) / m = f$ (pH) и $n(H^+) / m = f$ (pH) (рис. 1 а). Второй вариант приемлем при изучении субстратов с сильнокислой реакцией. В этом случае титрование проводят только раствором щелочи (Lodygin, Shamrikova, 2021).

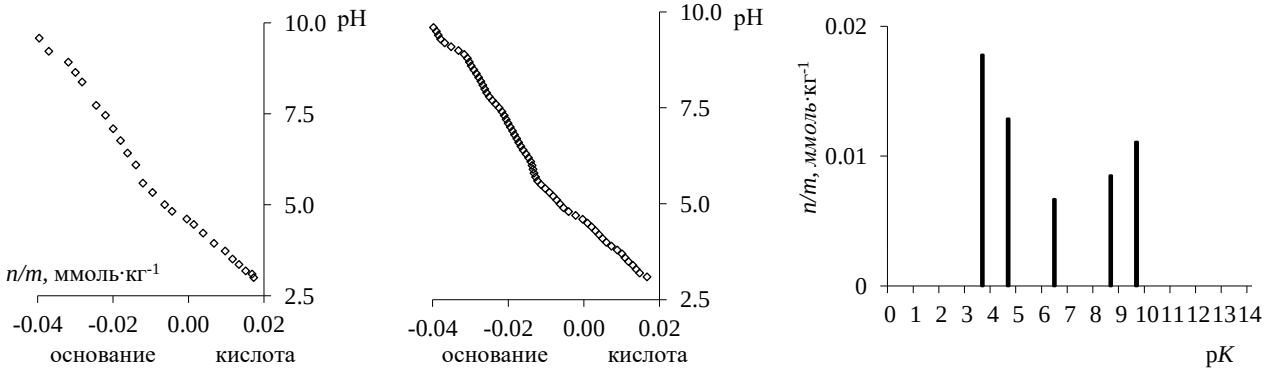


Рисунок 1. Пример экспериментальной (а) и сглаженной (б) кривых титрования, а также и pK-спектра (в). Отрицательные значения n/m связаны с введением «–» в расчетную формулу.

Для уменьшения влияния погрешностей на результаты расчетов (в связи с чувствительностью данного метода расчета pK-спектра к ошибкам) использовали программу «SPLINE», позволяющую сгладить экспериментальную зависимость $\alpha = f$(pH) и, используя интерполяцию, уменьшить значение ΔpK до 0,1 (Рязанов и др., 2001). В этой процедуре три реплицированные кривые титрования,

полученные в повторяющихся условиях, преобразуются (сглаживаются) и вычисляются их координаты на заданном интервале ΔpH (Tikhonov, Arsenin, 2012). В результате из трех исходных экспериментальных кривых титрования были получены три сглаженные кривые титрования, что позволило рассчитать стандартное отклонение объема титранта в каждой точке pH кривых титрования (s_k^2), найти сглаженную усредненную кривую титрования (рис. 1 б) и определить ее стандартное отклонение:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_k^K s_k^2}{K}}, \quad (1)$$

где K – количество точек на сглаженной усредненной кривой титрования.

Заключительным этапом было использование компьютерной программы «PKSVD» для построения pK-спектров. Расчет значений pK для pK-спектров проводился по формуле нахождения средневзвешенного значения:

$$\overline{\mathrm{p}K} = \frac{\sum_{i=1}^N x_{\mathrm{p}K_i} \cdot \mathrm{p}K_i}{\sum_{i=1}^N x_{\mathrm{p}K_i}}, \quad (2)$$

где $x_{\mathrm{p}K_i} = \frac{c_{\mathrm{p}K_i}}{\sum_{i=1}^M c_{\mathrm{p}K_i}}$ – близлежащие ненулевые значения мольных долей для данного pK, интерпретируемые нами как единый пик; pK_i – соответствующие значения pK; $M = (\mathrm{p}K_{max} - \mathrm{p}K_{min}) / \Delta\mathrm{p}K$ – число сегментов с шириной ΔpK (интервал базиса pK) в данном интервале pK; N – число близлежащих ненулевых значений q_i.

Диапазон pK был ограничен от 0 до 14, а интервал изменения pK был принят равным 0,1–0,25. При меньшем интервале пики могут расщепляться (Ryazanov, Dudkin, 2009; Lodygin, Shamrikova, 2021). Спектры pK были представлены в виде распределения числа кислотных групп на единицу массы (n_i/m), имеющих одинаковые значения pK (рис. 1 б), а также мольных долей (x_i, %) кислотных групп в соответствии со значениями pK:

$$x_i = \frac{n_i/m}{n/m} \cdot 100, \text{ где } n/m = \sum_{i=1}^I n_i/m \quad (3)$$

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

ФК – природные полиэлектролиты сложного переменного состава. Они характеризуются широким разнообразием функциональных групп различной кислотности, от сильнокислых (pK < 3) до очень слабокислых (pK > 10). С точки зрения химической природы большую долю кислотных групп составляют карбоксильные и фенольные (Чуков и др., 2018). В природных объектах (почвы, почвенные растворы, поверхностные воды) количество групп и их константы кислотности определяют интенсивность реакций обмена, присоединения, нейтрализации, адсорбции органических соединений, а также возможность образования комплексных соединений с ионами металлов. В связи с этим изучение протолитических свойств позволяет оценить вклад гумусовых веществ в формирование ионопроводящих почвенных структур, миграцию элементов в земной коре и т.д. (Славинская, 2004).

По данным потенциометрического титрования растворов ФК были рассчитаны pK-спектры (рис. 2). В них отчетливо видно от трех до четырех полос с максимумом в области pK от 2,9±0,3 до 10,5±0,3, что свидетельствует о наличии в исследуемых ФК различных групп, различающихся по значениям pK и определяющих кислотно-основные свойства ФК.

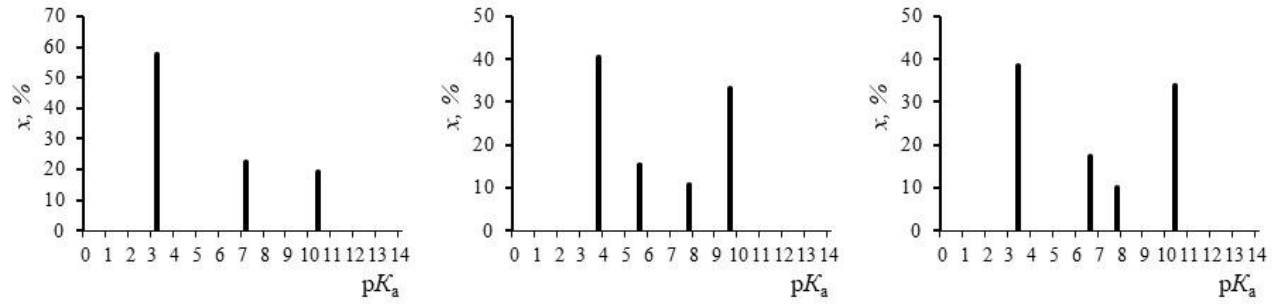


Рисунок 2. pK-спектры ФК, выделенных из органогенных горизонтов (Oe) торфянисто-подзолистой поверхностно-оглеенной (а), целинной (б) и пахотной (в) подзолистых почв.

Для изучения протолитических свойств жидкой фазы почв были использованы образцы органогенных горизонтов трех дерново-подзолистых почв. Как видно из рисунка 3, сглаженные кривые титрования водных вытяжек и промывных вод существенно различаются.

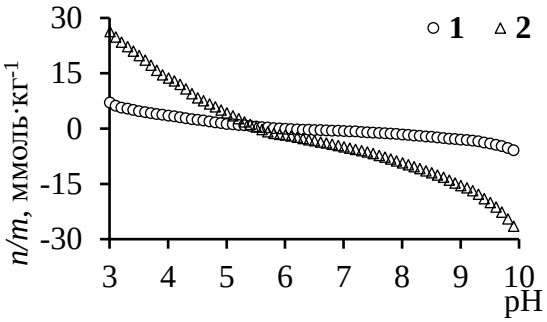


Рисунок 3. Сглаженные усредненные кривые титрования водной вытяжки (1) и промывных вод (2) дерново-подзолистой глееватой почвы.

В p*K*-спектрах выделяются пять полос с одинаковыми диапазонами значений p*K*: 3,5–3,8, 4,6–4,9, 6,4–7,1, 8,6–8,9 и 9,6–9,8 (рис. 4). Карбоксильные группы (–COOH), имеющие p*K* 3,5–3,8, входят в состав низкомолекулярных кислот, например, муравьиной, яблочной, гликолевой, молочной и др. ФК содержат карбоксильные группы, которые характеризуются значениями p*K* от 2,9 до 7,8 (табл. 2) и, в зависимости от положения в молекуле, могут обладать как более сильными, так и более слабыми кислотными свойствами (Рязанов и др., 2001). Это также наблюдается у гидроксалат- и дигидроцитрат-анионов, масляной, фумаровой и других кислот. Карбоновые и малеиновые кислоты могут образовывать третью полосу в p*K*-спектре. Аминогруппы аминокислот, а также –OH-группы фенолов и фенольных кислот имеют p*K* более 8,0.

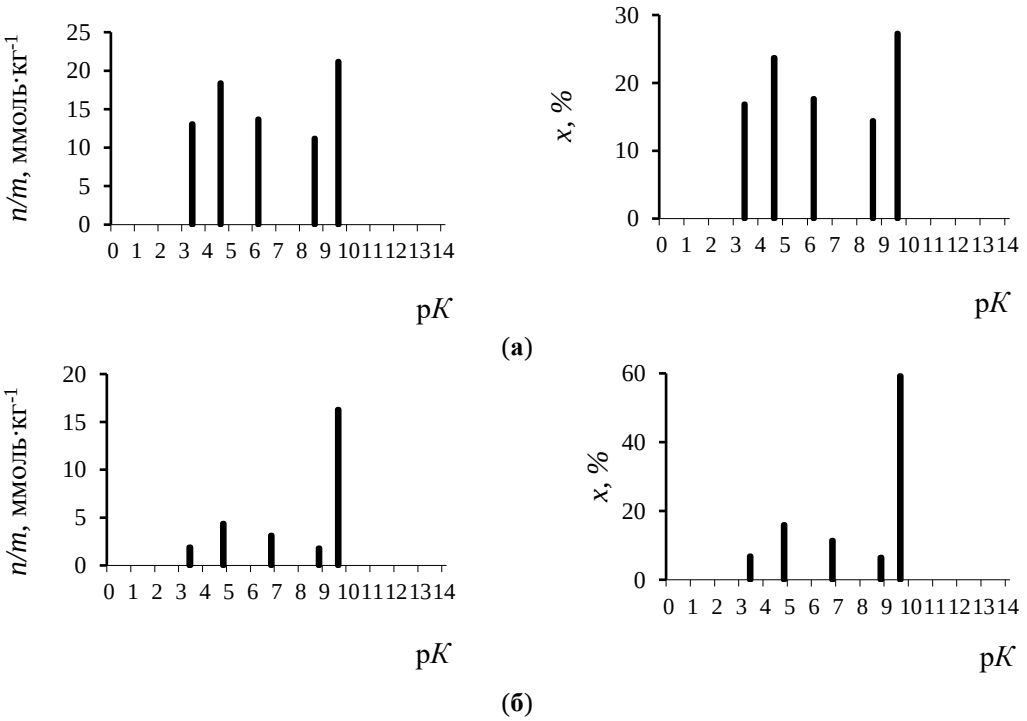


Рисунок 4. p*K*-спектры водных вытяжек (а) и промывных вод (б) органогенного горизонта дерново-подзолистой глееватой почвы: *n*/*m* – количество кислотных групп, *x* – мольная доля.

Соединения алюминия, представленные металлоорганическими комплексными соединениями, также могут участвовать в протолитических равновесиях в широком диапазоне pH. При низких значениях pH основность комплексных ионов снижается и при титровании водных вытяжек кислотным соединением происходит ступенчатое протонирование комплексного иона с образованием Al^{3+}. При увеличении значений pH более 5 основность металлоорганических комплексов возрастает вплоть до образования и выпадения в осадок $Al(OH)_3$. При pH > 7,5 осадок растворяется и образуются

отрицательно заряженные аквагидроксокомплексы алюминия. Аналогично может происходить разрушение Fe- и Mn-органических комплексных соединений, если таковые присутствуют в почве (Шамрикова, 2013). Максимальное общее количество кислотных групп органических соединений, перешедших в водный экстракт, содержится в дерново-подзолистой неоглеенной, а минимальное – в дерново-подзолистой глеевой, наиболее увлажненной почве (табл. 1).

Таблица 1

Содержание кислотных групп в соединениях, экстрагированных дистиллированной водой

Почва	Общее число групп, n/m, ммоль·кг$^{-1}$			Мольная доля групп, перешедших в водную вытяжку, x, %
	Водные вытяжки	Промывные воды	Сумма	
Дерново-подзолистая неоглеенная	78	28	105	74
Дерново-подзолистая глееватая	110	45	155	71
Дерново-подзолистая глеевая	51	15	65	78
Характеристика погрешности, ± $\Delta n/m$, ммоль·кг$^{-1}$	±6	±4	±5	–

ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ pK-спектров (рис. 2) позволяет сделать вывод о сходном наборе карбоксильных и фенольных групп в структуре ФК, находящихся в одной почве. Основные характеристики pK-спектров ФК приведены в таблице 2. Наличие такого широкого спектра групп различной кислотности в препаратах ФК свидетельствует о присутствии в их структуре карбоксильных и фенольных функциональных групп, занимающих различные позиции в углеродном скелете ФК.

Самые низкие значения pK = 2,9 имеют наиболее кислые карбоксильные группы, которые находятся в орто-положении с гидроксильными или другими карбоксильными группами в бензольном кольце. Чуть менее кислотными (pK = 3,2–3,8) являются карбоксильные группы, находящиеся в мета- или пара-положении с вышеуказанными группами в бензольном кольце или в β-положении в алифатической цепи. Карбоксильные группы жирных кислот имеют значения pK = 4,9–7,8, как и карбоксильные группы, имеющие в непосредственной близости нуклеофильную группу, но диссоциирующие на второй или третьей ступени. Максимальные значения pK = 9,4–10,5 имеют гидроксильные группы фенольных фрагментов ФК. Наличие карбоксильных и фенольных групп в этих позициях углеродного скелета ФК подтверждено многими исследователями (Чуков и др., 2018; Enev et al., 2021).

Таблица 2

Характеристики pK-спектров фульвокислот

Горизонт	Параметр	Номер группы					
		1	2	3	4	5	6
Торфянисто-подзолистая поверхностно-оглеенная							
Oe	pK	3,2±0,3	-	-	7,1±0,4	-	10,4±0,3
	x, % *	57,95	-	-	22,71	-	19,34
Eh	pK	3,4±0,4	-	-	7,1±0,3	9,5±0,7	10,5±0,3
	x, %	57,80	-	-	24,63	0,0550	12,07
B	pK	4,0±0,3	-	-	7,3±0,4	-	10,4±0,3
	x, %	30,05	-	-	26,53	-	43,42
Целинная подзолистая							
Oe	pK	3,8±0,3	5,6±0,4	-	7,8+0,7	9,5±0,5	-
	x, %	40,65	15,30	-	0,1088	33,17	-
Eh	pK	2,9±0,3	4,9±0,4	6,2±0,3	-	9,7±0,3	-
	x, %	54,65	10,08	15,23	-	20,04	-
B	pK	-	5,0±0,2	6,8±0,7	-	9,4+0,8	10,5±0,3
	x, %	-	30,67	16,44	-	3,64	49,25
Пахотная подзолистая							
Oe	pK	3,4±0,3	-	6,7±0,4	7,8±0,3	-	10,4±0,4
	x, %	38,60	-	17,32	10,24	-	33,84

Примечание.

* x – мольная доля групп с заданным pK.

Как видно из таблицы 2, доля карбоксильных групп (имеющих p$K \leq 8$) увеличивается в горизонтах Eh в обеих целинных почвах и далее уменьшается в горизонтах B. Полученные данные свидетельствуют о том, что ФК из подзолистого горизонта наиболее обогащены карбоксильными группами и, следовательно, лучше растворяются в воде и участвуют в реакциях комплексообразования с катионами Ca^{2+}, Mg^{2+}, Fe^{3+}, Al^{3+} и др. Относительное уменьшение количества кислых групп и рост фенольных фрагментов при переходе от органогенных горизонтов к минеральному (B) можно объяснить микробиологической деструкцией молекул ФК и отщеплением карбоксильных групп. Лучшая аэрация горизонта E подзолистой почвы по сравнению с полугидроморфной торфянисто-подзолистой поверхностно-оглеенной вызывает увеличение количества кислородсодержащих групп (гидроксильных и карбоксильных) в составе ФК, а также их кислотности (уменьшаются значения pK); это, в свою очередь, приводит к интенсификации процесса выщелачивания минералов, что и составляет суть процесса подзолообразования (Максимова и др., 2010).

Фенольные фрагменты более устойчивы к разложению и, поэтому, накапливаются в структуре ФК. Скудные данные по изучению кислотно-основных характеристик гумусовых веществ методом pK-спектроскопии указывают на наличие в структуре ФК трех-четырех ионогенных групп с различными значениями pK (Данченко и др., 1998).

В результате проведенных исследований установлено, что окультуривание и сельскохозяйственное использование почв практически не изменяет общее количество кислотных групп в структуре ФК по сравнению с целинными аналогами (табл. 3). Однако существенно изменяется их качественный состав, а именно в ФК из горизонта Oe снижается доля сильнокислотных групп с 55 до 39 % и появляются пики со значениями pK 6,7±0,4 и 7,8±0,3, соответствующие среднекислотным карбоксильным группам. Таким образом, полученные данные свидетельствуют о том, что ФК из горизонта Oe обладают более слабыми кислотными свойствами и менее агрессивны по сравнению с ФК органогенных горизонтов целинных почв.

Поскольку метод pK-спектроскопии позволяет определить относительное содержание карбоксильных и фенольных групп в структуре ФК, было проведено сравнение полученных результатов с содержанием этих групп, полученным ранее методом ^{13}C-ЯМР-спектроскопии (Lodygin et al., 2017). Из таблицы 3 видно, что расхождение между результатами анализа содержания карбоксильных групп в составе ФК, полученными разными методами, незначимо. Рассчитанный коэффициент корреляции между содержанием –COOH-групп, полученным методом ^{13}C-ЯМР-спектроскопии и методом pK-спектроскопии, составляет 0,992 (P = 0,95; n = 5).

Таблица 3

Относительное содержание кислотно-основных групп в составе фульвокислот

Горизонт	Доля –COOH групп, %		Расхождение		Значимость расхождения
	Результат, полученный ^{13}C-ЯМР спектроскопией	Результат, полученный pK-спектроскопией	Фактическое, $\lvert X_1 - X_2 \rvert$	Допустимое, $t_{0,95}\sqrt{\Delta_1^2 + \Delta_2^2}$	
Торфянисто-подзолистая поверхностно-оглеенная					
Oe	0,72±0,11	0,67±0,05	0,05	0,52	незначимо
Eh	0,86±0,13	0,80±0,06	0,06	0,62	незначимо
Целинная подзолистая					
Oe	0,86±0,13	0,81±0,07	0,05	0,63	незначимо
Eh	0,89±0,13	0,82±0,07	0,07	0,63	незначимо
Пахотная подзолистая					
Oe	0,73±0,11	0,66±0,05	0,07	0,52	незначимо

При однократной обработке почвы дистиллированной водой в раствор перешло только 70–80% групп водорастворимых органических соединений от их общего количества. Следует отметить, что при такой обработке почвы соединения, содержащие группы с pK 9,6–9,8, извлекаются только на 60% из образцов дерново-подзолистой неоглеенной и дерново-подзолистой глееватой и на 70% из дерново-подзолистой глеевой. В большей степени (85–90%) переходят в раствор соединения, чьи ионогенные группы образуют четвертую полосу (pK 8,6–8,9). Общие закономерности перехода соединений первых трех групп из разных типов почв в водный раствор не установлены.

Однократной обработки почвы дистиллированной водой недостаточно для извлечения водорастворимых органических соединений, так как состав смеси соединений, перешедших в раствор

и оставшихся во влажном остатке, различен. Соединения, содержащие группы с p*K* 9,6–9,8, наиболее прочно удерживаются почвой при однократной обработке дистиллированной водой (Шамрикова, 2013). Определение состава и свойств водорастворимых соединений на основе результатов исследования однократных водных вытяжек может привести к необоснованным выводам (табл. 4).

Таблица 4

Мольные доли (*x*) кислотных групп в промывных водах от их общего количества, содержащегося в водных вытяжках и промывных водах, в соответствии с диапазонами p*K*

Номер полосы в p*K*-спектре	Диапазон значений p*K*	Дерново-подзолистая неоглеенная	Дерново-подзолистая глееватая	Дерново-подзолистая глеевая
		x, %		
1	3,5–3,8	13	19	28
2	4,6–4,9	19	24	15
3	6,4–7,1	18	27	21
4	8,6–8,9	15	9	15
5	9,6–9,8	43	38	28

Количественная оценка состава смеси водорастворимых органических соединений почв была проведена с учетом результатов исследования, как вытяжек, так и промывных вод. Во всех изученных почвах накапливаются соединения, содержащие группы с p*K* 9,6–9,8, что согласуется с ранее полученными результатами (Гармаш и др., 1998; Шамрикова, 2013). Доля от всех типов кислотных групп в дерново-подзолистой неоглеенной, дерново-подзолистой глееватой и дерново-подзолистой глеевой почвах составляет 40, 50 и 25%, соответственно. Обращает на себя внимание большое значение доверительного интервала погрешности для количества групп в указанном диапазоне p*K* (табл. 5). Вероятно, это связано с наиболее устойчивым удержанием почвой соединений, содержащих эти группы, и их затрудненным переходом в жидкую фазу.

Распределение кислотных групп по первым четырем полосам спектра в образцах дерново-подзолистой глееватой и дерново-подзолистой глеевой почв одинаково (r = 0,93, P = 0,95). В органогенном горизонте автоморфной почвы отмечается низкая доля групп с p*K* 3,5–3,8. Этот вывод согласуется с данными, полученными при изучении состава низкомолекулярных кислот (рис. 5 а, б). Выявленные закономерности могут быть связаны с мезорельефом ключевой зоны. Вероятно, новообразованные органические соединения необратимо вытесняются с боковым стоком, накапливаясь в дерново-подзолистой глеевой почве, чему способствуют осадки и снеготаяние. Кроме того, данные p*K*-спектроскопии согласуются с данными, полученными при изучении состава низкомолекулярных кислот почв методами газовой хроматографии и хромато-масс-спектроскопии (Шамрикова и др., 2015).

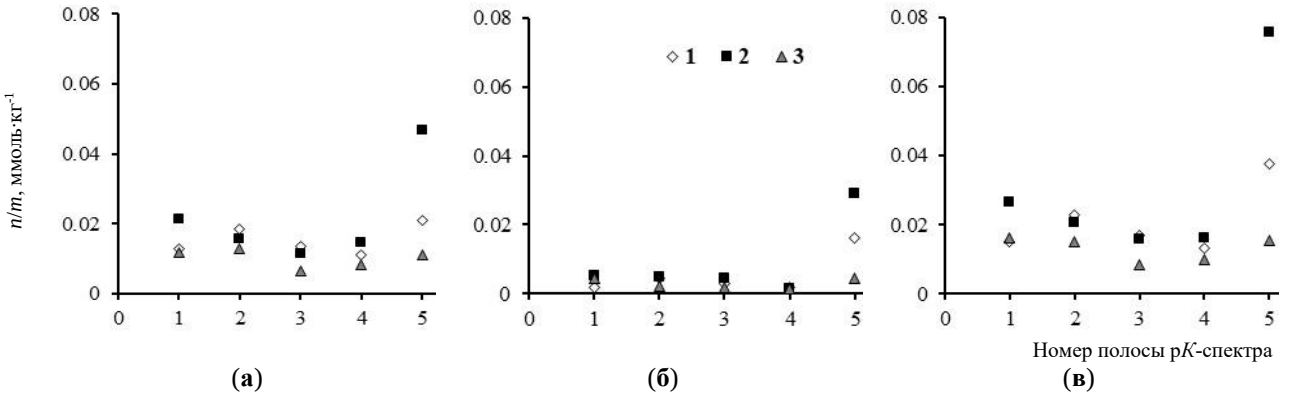


Рисунок 5. Количество кислотных групп (n/m) водных экстрактов (а), промывных вод (б) и их общее количество (в) в образцах органогенных горизонтов в интервалах p*K*: 1 – дерново-подзолистая неоглеенная почва; 2 – дерново-подзолистая глееватая почва; 3 – дерново-подзолистая глеевая почва.

В частности, показано, что некоторое увеличение влажности почвы, характерное для дерново-подзолистой глеевой почвы (рис. 5 в), по сравнению с автоморфной (дерново-подзолистой неоглеенной) почвой, способствует накоплению низкомолекулярных кислот. Они содержат фенольные

соединения (pK > 9) и наиболее сильные алифатические оксикислоты (pK < 4,0). Эта особенность объясняется замедлением реакций дегидратации оксикислот до ненасыщенных и окисления до поликислот в условиях повышенной влажности (Шамрикова и др., 2019). Некоторые исследователи связывают накопление ароматических кислот с биологическим фактором: деятельностью микроорганизмов, разложением растительных остатков и корневых экссудатов (Yu et al., 2019; Yang et al., 2020).

Таким образом, при отделении водной вытяжки от твердой фракции водорастворимые органические соединения на 20–30% удерживаются влажной почвой и не переходят в раствор. Соотношение компонентов в экстракте и в осадке различно, соединения с pK 9,6–9,8 в основном удерживаются влажным остатком почвы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Программа «PKSVD» позволяет рассчитывать pK-спектры с достаточно высокой точностью для сложных природных полиэлектролитов, таких как фульвокислоты и водорастворимые органические вещества почв. Использование программы «SPLINE» для сглаживания экспериментальной зависимости позволяет улучшить результаты построения pK-спектра. Использование метода pK-спектроскопии позволило определить значения констант кислотности групп сложных природных систем, рассчитать число кислотных групп, получить новые результаты как фундаментального, так и прикладного характера.

Метод pK-спектроскопии, использующий линейный регрессионный анализ с ограничениями на неотрицательность решений, открывает широкие возможности для потенциометрического анализа сложных протолитических систем, в том числе различных объектов окружающей среды. Этот метод значительно расширяет представления о физико-химических свойствах гумусовых веществ и почвенного органического вещества.

ФИНАНСОВАЯ ПОДДЕРЖКА

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации рамках госбюджетной темы отдела почвоведения Института биологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН «Почвы и почвенные ресурсы Европейского Северо-Востока России в условиях современных климатических изменений, антропогенного пресса и социально-экономических вызовов» (№ 125021902454-1).

ЛИТЕРАТУРА

Алексеева С.А., Дронова Т.Я., Ладонин Д.В., Соколова Т.А. Буферность к кислоте элювиальных горизонтов торфянисто-подзолисто-глееватой почвы и выделенных из нее гранулометрических фракций // Вестник Московского университета. Серия 17. Почвоведение. 2003. № 2. С. 3–8.

Ванчикова Е.В., Шамрикова Е.В., Королев М.А., Кызъюрова Е.В., Михайлов В.И. Исследование кислотности сильнокислых почв pH_{KCl} < 3,3, содержащих обменные ионы железа (III) // Почвоведение. 2021. № 2. С. 183–195. https://doi.org/10.31857/S0032180X21020155

Гармаш А.В., Воробъева О.Н., Кудрявцев А.В., Данченко Н.Н. Потенциометрический анализ полиэлектролитов методом pK-спектроскопии с использованием линейной регрессии // Журнал аналитической химии. 1998. Том 53. № 4. С. 411–417.

Данченко Н.Н., Перминова И.В., Гармаш А.В., Кудрявцев А.В. Определение карбоксильной кислотности гумусовых кислот титриметрическими методами // Вестник Московского университета. Серия 17. Почвоведение. 1998. Том 39. № 2. С. 127–131.

Максимова Ю.Г., Маряхина Н.Н., Толпешта И.И., Соколова Т.А. Кислотно-основная буферность подзолистых почв и ее изменение под влиянием обработок реактивами Мера-Джексона и Тамма // Почвоведение. 2010. № 10. С. 1208–1220.

Русакова Е.С., Ишкова И.В., Толпешта И.И., Соколова Т.А. Кислотно-основная буферность почв транзитных и транзитно-аккумулятивных позиций ненарушенных ландшафтов южной тайги // Почвоведение. 2012. № 5. С. 562–573.

Рязанов М.А., Лодыгин Е.Д., Безносиков В.А., Злобин Д.А. Использование метода pK-спектроскопии для оценки кислотно-основных свойств фульвокислот // Почвоведение. 2001. № 8. С. 934–941.

Рязанов М.А., Шамрикова Е.В., Ванчикова Е.В., Казаков В.Г. Исследование кислотно-основных свойств водорастворимых органических соединений почв методом pK-спектроскопии // Вестник Института биологии Коми научного центра Уральского отделения РАН. 2006. № 2 (100). С. 27–29.

Ситников П.А., Кучин А.В., Рязанов М.А., Белых А.Г., Васенева И.Н., Федосеев М.С., Терешатов В.В. Влияние кислотно-основных свойств поверхности оксидов на их реакционную способность при взаимодействии с эпоксидными соединениями // Журнал общей химии. 2014. Том 84. № 5. С. 717–722.

Славинская Г.В. Константы ионизации фульвокислот // Почвоведение. 2004. № 1. С. 68–70.

Соколова Т.А. Низкомолекулярные органические кислоты в почвах: источники, состав, содержание, функции в почвах (обзор) // Почвоведение. 2020. № 5. С. 559–575. https://doi.org/10.31857/S0032180X20050159

Чуков С.Н., Лодыгин Е.Д., Абакумов Е.В. Использование ^{13}C ЯМР-спектроскопии в исследовании органического вещества почв (обзор) // Почвоведение. 2018. № 8. С. 952–964. https://doi.org/10.1134/S0032180X18080026

Шамрикова Е.В. Кислотность почв таежной и тундровой зон Европейского Северо-Востока России. СПб: Наука, 2013. 157 с.

Шамрикова Е.В., Каверин Д.А., Пастухов А.В., Лаптева Е.М., Кубик О.С., Пунегов В.В. Водорастворимые органические кислоты торфяных мерзлотных почв юго-востока Большеземельской тундры // Почвоведение. 2015. № 3. С. 288–295. https://doi.org/10.7868/S0032180X15030107

Шамрикова Е.В., Кубик О.С., Денева С.В., Пунегов В.В. Состав водорастворимой фракции почв побережья Баренцева моря: органический углерод и азот, низкомолекулярные компоненты // Почвоведение. 2019. № 11. С. 1322–1338. https://doi.org/10.1134/S0032180X19110108

Bondareva L., Kudryasheva N. Direct and indirect detoxification effects of humic substances // Agronomy. 2021. Vol. 11. No. 2. P. 198. https://doi.org/10.3390/agronomy11020198

Boutsidis C., Drineas P. Random projections for the nonnegative least-squares problem // Linear Algebra and its Applications. 2009. Vol. 431. No. 5–7. P. 760–771. https://doi.org/10.1016/j.laa.2009.03.026

Enev V., Sedlacek P., Kubikova L., Sovova S., Doskocil L., Klucakova M., Pekar M. Polarity-based sequential extraction as a simple tool to reveal the structural complexity of humic acids // Agronomy. 2021. Vol. 11. No. 3. P. 587. https://doi.org/10.3390/agronomy11030587

Garcia-Gil J.C., Ceppi, S.B., Velasco M.I, Polo A., Senesi N. Long-term effects of amendment with municipal solid waste compost on the elemental and acidic functional group composition and pH-buffer capacity of soil humic acids // Geoderma. 2004. Vol. 121. No. 1–2. P. 135–142. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2003.11.004

Lodygin E., Beznosikov V., Abakumov E. Humic substances elemental composition of selected taiga and tundra soils from Russian European North-East // Polish Polar Research. 2017. Vol. 38. No. 2. P. 125–147. https://doi.org/10.1515/popore-2017-0007

Lodygin E., Shamrikova E. Use of the pK spectroscopy method in the study of protolytic properties of humic substances and other soil polyelectrolytes // Agronomy. 2021. Vol. 11. No. 6. P. 1051. https://doi.org/10.3390/agronomy11061051

Matveeva N.V., Garmash A.V., Shishkin M.A., Dymov A.A., Rogova O.B., Volkov D.S., Proskurnin M.A. Fast high-resolution pKa spectrotitrimetry for quantification of surface functional groups of Retisols // Soil Systems. 2024. Vol. 8. No. 2. P. 63. https://doi.org/10.3390/soilsystems8020063

Ryazanov M.A., Dudkin B.N. Acid-base properties of the surface of the α-Al_2O_3 suspension // Russian Journal of Physical Chemistry A. 2009. Vol. 83. P. 2318–2321. https://doi.org/10.1134/s0036024409130238

Shamsipur M., Hemmateenejad B., Akhond M. Multicomponent acid–base titration by principal component-artificial neural network calibration // Analytica Chimica Acta. 2002. Vol. 461. No. 1. P. 147–153. https://doi.org/10.1016/s0003-2670(02)00236-2

Swift R.S. Organic matter characterizationю In book: Methods of soil analysis: Part 3 Chemical Methods, 5.3. Madison: Soil Science Society of America, 1996. P. 1018–1020. https://doi.org/10.2136/sssabookser5.3.c35

Tikhonov A.N., Arsenin V.Ya. Solution of ill-posed problems // Society for Industrial and Applied Mathematics. 2012. Vol. 21. P. 266–267.

Wang Y., Cheng P., Li F., Liu T., Cheng K., Yang J., Lu Y. Variable charges of a red soil from different depths: Acid-base buffer capacity and surface complexation model // Applied Clay Science. 2018. Vol. 159. P. 107–115. https://doi.org/10.1016/j.clay.2017.08.003

Yang Y., Wang Y., Peng Y., Cheng P., Li F., Liu T. Acid-base buffering characteristics of non-calcareous soils: Correlation with physicochemical properties and surface complexation constants // Geoderma. 2020. Vol 360. P. 114005. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.114005

Yu C., Devlin J., Bi E. Bonding of monocarboxylic acids, monophenols and nonpolar compounds onto goethite // Chemosphere. 2019. Vol. 214. P. 158–167. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.09.080

Поступила в редакцию 14.02.2025
Принята 21.03.2025
Опубликована 25.03.2025

Сведения об авторах:

Лодыгин Евгений Дмитриевич – доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник отдела почвоведения Института биологии ФГБУН Федерального исследовательского центра «Коми научный центр Уральского отделения Российской академии наук» (г. Сыктывкар, Россия); lodigin@ib.komisc.ru

Шамрикова Елена Вячеславовна – доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник отдела почвоведения Института биологии ФГБУН Федерального исследовательского центра «Коми научный центр Уральского отделения Российской академии наук» (г. Сыктывкар, Россия); shamrikovaelena@yandex.ru

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Статья доступна по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License

Assessment of protolytic properties of soil organic polyelectrolytes by p*K*-spectroscopy

© 2025 E. D. Lodygin, E. V. Shamrikova

Institute of Biology of Komi Scientific Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Kommunisticheskaya str., 28, Syktyvkar, Russia. E-mail: lodigin@ib.komisc.ru

The aim of the study *was to test the possibility of using the pK spectroscopy to evaluate the acid-base properties of humic substances and water-soluble soil fractions.*

Location and time of the study. *The studied preparations of fulvic acids were isolated from the organogenic horizons of peaty-podzolic surface-gley soil (Eutric Albic Stagnic Histic Retisol (Loamic)), virgin and arable podzolic soils (Eutric Albic Retisols (Loamic)). The soils are located in the middle taiga zone (Maximovsky station of the Institute of Biology, 8 km west of Syktyvkar and the field of Syktyvkar state farm, 5 km south-west of Syktyvkar). Soils were sampled from 1 to 30 August 2014. To study the protolytic properties of the soil liquid phase, samples of the organogenic horizons of three soils were also taken in July 2018: sod-podzolic non-gleyed (Eutric Albic Retisol (Loamic)), sod-podzolic gleyed (Distric Gleyic Retisol (Loamic)) and sod-podzolic gleyed (Eutric Albic Retisol). The soils are located 1 km north-west of Krutotyla village, Priluzsky district (Komi Republic, Russia).*

Methods*. Potentiometric titration of soil organic polyelectrolyte solutions was carried out at 25±1 °C. The EMF of the titrated solutions was measured on a pH-150 ionometer using an ESL-15-11 glass electrode. Aliquots of aqueous solutions of fulvic acids and soil extracts were titrated with HCl or NaOH solutions. Titration was carried out in pH ranges from the starting point of titration to 3.0 when titrating with acid solution and to 10.0 when titrating with base solution. Titration of solutions of organic compounds was carried out in 3–5 replicates. The pK-spectra of the systems were calculated from the potentiometric titration curves using the "PKSVD" computer program.*

Results. *The results of the pK-spectroscopy testing showed that this method was more illustrative and informative than the traditional method of continuous potentiometric titration. The "PKSVD" programme allows pK-spectra to be calculated with sufficient accuracy for complex natural polyelectrolytes such as fulvic acids and water-soluble organic substances of soils. The use of the "SPLINE" programme for experimental relathinship smoothing allows the results of pK-spectra construction to be improved. The application of the pK-spectroscopy method allowed to determine the values of acidity constants for groups of complex natural systems, to calculate the number of acid groups and to obtain new results of both fundamental and applied character. The organic polyelectrolytes of the soils studied revealed the presence of three to five ionogenic groups with pK values ranging from 3.2 to 9.6.*

Conclusions. *The method of pK-spectroscopy using linear regression analysis with restrictions on non-negativity of solutions opens wide possibilities for potentiometric analysis of complex protolytic systems, including various environmental objects. This method significantly extends the understanding of the physico-chemical properties of humic substances and soil organic matter.*

Keywords: *acid-base properties; titration; pK-spectrum; soil; fulvic acids; water-soluble organic matter.*

How to cite: *Lodygin E.D., Shamrikova E.V. Assessment of protolytic properties of soil organic polyelectrolytes by pK-spectroscopy. The Journal of Soils and Environment. 2025. 8(1). e299. DOI: 10.31251/pos.v8i1.299 (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. 125021902454-1).

REFERENCES

Alekseeva S.A., Dronova T.Ya., Ladonin D.V., Sokolova T.A. Acid buffering of eluvial horizons of a peaty podzolic gley soil and particle size fractions separated from it. Vestnik Moskovskogo Universiteta. Seriya 17. Pochvovedenie (Lomonosov Soil Science Journal). 2003. No. 2. P. 3–8. (in Russian).

Vanchikova E.V., Shamrikova E.V., Korolev M.A., Kyzyurova E.V., Mikhailov V.I. Application of model systems containing exchangeable iron (III) to study acidity characteristics of strongly acid soils (pH_{KCl} < 3.3). Eurasian Soil Science. 2021. Vol. 54. No. 2. P. 189–200. https://doi.org/10.1134/s1064229321020150

Garmash A.V., Vorob'eva O.N., Kudryavtsev A.V., Danchenko N.N. Potentiometric analysis of polyelectrolytes by pK spectroscopy using linear regression analysis. Journal of Analytical Chemistry. 1998. Vol. 53. No. 4. P. 361–367.

Danchenko N.N., Perminova I.V., Garmash A.V., Kudryavtsev A.V. Determination of carboxylic acidity of humic acids by titrimetric methods. Vestnik Moskovskogo Universiteta. Seriya 17. Pochvovedenie (Lomonosov Soil Science Journal). 1998. Vol. 39. P. 127–131. (in Russian).

Maksimova Y.G., Maryakhina N.N., Tolpeshta I.I., Sokolova T.A. The acid-base buffer capacity of podzolic soils and its changes under the impact of treatment with the Mehra-Jackson and Tamm reagents. Eurasian Soil Science. 2010. Vol. 43. No. 10. P. 1120–1131. https://doi.org/10.1134/s1064229310100054

Rusakova E.S., Ishkova I.V., Tolpeshta I.I., Sokolova T.A. Acid-base buffering of soils in transitional and transition-alaccumulative positions of undisturbed southern-taiga landscapes. Eurasian Soil Science. 2012. Vol. 45. No. 5. P. 503–513. https://doi.org/10.1134/s1064229312050110

Ryazanov M.A., Lodygin E.D., Beznosikov V.A., Zlobin D.A. Evaluation of the acid-base properties of fulvic acids using pK spectroscopy. Eurasian Soil Science. 2001. Vol. 34. No. 8. P. 830–836.

Ryazanov M.A., Shamrikova E.V., Vanchikova E.V., Kazakov V.G. Study of acid-base properties of water-soluble organic compounds of soils by the method of pK-spectroscopy. Vestnik of Institute of Biology of Komi Scientific Center of Ural Branch of RAS. 2006. No. 2 (100). P. 27–29. (in Russian).

Sitnikov P.A., Kuchin A.V., Ryazanov M.A., Belykh A.G., Vaseneva I.N., Fedoseev M.S., Tereshatov V.V. Influence of acid-base properties of oxides surface on their reactivity towards epoxy compounds. Russian Journal of General Chemistry. 2014. Vol. 84. No. 5. P. 810–815. https://doi.org/10.1134/s107036321405003x

Slavinskaya G.V. Ionization constants of fulvic acids. Eurasian Soil Science. 2004. Vol. 37. No. 1. P. 57–59.

Sokolova T.A. Low-molecular-weight organic acids in soils: sources, composition, concentrations, and functions: A review. Eurasian Soil Science. 2020. Vol. 53. No. 5. P. 580–594. https://doi.org/10.1134/s1064229320050154

Chukov S.N., Lodygin E.D., Abakumov E.V. Application of 13C NMR spectroscopy to the study of soil organic matter: a review of publications. Eurasian Soil Science. 2018. Vol. 51. No. 8. P. 889–900. https://doi.org/10.1134/s1064229318080021

Shamrikova E.V. Soil acidity in the taiga and tundra zones of the European North-East of Russia. St. Petersburg: Nauka Publ., 2013. 157 p. (in Russian).

Shamrikova E.V., Kaverin D.A., Pastukhov A.V., Lapteva E.M., Kubik O.S., Punegov V.V. Water Soluble Organic Acids in Cryomorphic Peat Soils of the Southeastern Bol'shezemel'skaya Tundra. Eurasian Soil Science. 2015. Vol. 48. No. 3. P. 250–256. https://doi.org/10.1134/S1064229315030102

Shamrikova E.V., Kubik O.S., Deneva S.V., Punegov V.V. Composition of the water-soluble soil fraction on the Barents Sea coast: organic carbon and nitrogen, low-molecular weight components. Eurasian Soil Science. 2019. Vol. 52. No. 11. P. 1347–1362. https://doi.org/10.1134/s1064229319110103

Bondareva L., Kudryasheva N. Direct and indirect detoxification effects of humic substances. Agronomy. 2021. Vol. 11. No. 2. P. 198. https://doi.org/10.3390/agronomy11020198

Boutsidis C., Drineas P. Random projections for the nonnegative least-squares problem. Linear Algebra and its Applications. 2009. Vol. 431. No. 5–7. P. 760–771. https://doi.org/10.1016/j.laa.2009.03.026

Enev V., Sedlacek P., Kubikova L., Sovova S., Doskocil L., Klucakova M., Pekar M. Polarity-based sequential extraction as a simple tool to reveal the structural complexity of humic acids. Agronomy. 2021. Vol. 11. No. 3. P. 587. https://doi.org/10.3390/agronomy11030587

Garcia-Gil J.C., Ceppi, S.B., Velasco M.I, Polo A., Senesi N. Long-term effects of amendment with municipal solid waste compost on the elemental and acidic functional group composition and pH-buffer capacity of soil humic acids. Geoderma. 2004. Vol. 121. No. 1–2. P. 135–142. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2003.11.004

Lodygin E., Beznosikov V., Abakumov E. Humic substances elemental composition of selected taiga and tundra soils from Russian European North-East. Polish Polar Research. 2017. Vol. 38. No. 2. P. 125–147. https://doi.org/10.1515/popore-2017-0007

Lodygin E., Shamrikova E. Use of the pK spectroscopy method in the study of protolytic properties of humic substances and other soil polyelectrolytes. Agronomy. 2021. Vol. 11. No. 6. P. 1051. https://doi.org/10.3390/agronomy11061051

Matveeva N.V., Garmash A.V., Shishkin M.A., Dymov A.A., Rogova O.B., Volkov D.S., Proskurnin M.A. Fast high-resolution pKa spectrotitrimetry for quantification of surface functional groups of Retisols. Soil Systems. 2024. Vol. 8. No. 2. P. 63. https://doi.org/10.3390/soilsystems8020063

Ryazanov M.A., Dudkin B.N. Acid-base properties of the surface of the α-Al_2O_3 suspension. Russian Journal of Physical Chemistry A. 2009. Vol. 83. P. 2318–2321. https://doi.org/10.1134/s0036024409130238

Shamsipur M., Hemmateenejad B., Akhond M. Multicomponent acid–base titration by principal component-artificial neural network calibration. Analytica Chimica Acta. 2002. Vol. 461. No. 1. P. 147–153. https://doi.org/10.1016/s0003-2670(02)00236-2

Swift R.S. Organic matter characterizationю In book: Methods of soil analysis: Part 3 Chemical Methods, 5.3. Madison: Soil Science Society of America, 1996. P. 1018–1020. https://doi.org/10.2136/sssabookser5.3.c35

Tikhonov A.N., Arsenin V.Ya. Solution of ill-posed problems. Society for Industrial and Applied Mathematics. 2012. Vol. 21. P. 266–267.

Wang Y., Cheng P., Li F., Liu T., Cheng K., Yang J., Lu Y. Variable charges of a red soil from different depths: Acid-base buffer capacity and surface complexation model. Applied Clay Science. 2018. Vol. 159. P. 107–115. https://doi.org/10.1016/j.clay.2017.08.003

Yang Y., Wang Y., Peng Y., Cheng P., Li F., Liu T. Acid-base buffering characteristics of non-calcareous soils: Correlation with physicochemical properties and surface complexation constants. Geoderma. 2020. Vol 360. P. 114005. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.114005

Yu C., Devlin J., Bi E. Bonding of monocarboxylic acids, monophenols and nonpolar compounds onto goethite. Chemosphere. 2019. Vol. 214. P. 158–167. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.09.080

Received 14 February 2025
Accepted 21 March 2025
Published 25 March 2025

About the authors:

Evgeny D. Lodygin – Doctor of Biological Sciences, Leading Researcher in the Department of Soil Science in the Institute of Biology, Federal Research Centre "Komi Scientific Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences" (Syktyvkar, Russia); lodigin@ib.komisc.ru

Elena V. Shamrikova – Doctor of Biological Sciences, Leading Researcher in the Department of Soil Science in the Institute of Biology, Federal Research Centre "Komi Scientific Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences" (Syktyvkar, Russia); shamrikovaelena@yandex.ru

The authors read and approved the final manuscript

The article is available under Creative Commons Attribution 4.0 License

УДК 631.42
https://doi.org/10.31251/pos.v8i1.301

Check for updates

Водоэкстрагируемое органическое вещество и биологическая активность агродерново-подзолистых почв малого водосбора после снеготаяния

© 2025 В. А. Холодов, А. Р. Зиганшина, Н. Н. Данченко, Д. А. Никитин, Н. В. Ярославцева, Е. М. Данилова-Данильян, Ю. Р. Фарходов

ФГБНУ ФИЦ «Почвенный институт им. В.В. Докучаева», Пыжевский пер., 7, стр. 2, г. Москва, 119017, Россия

E-mail: vkholod@mail.ru

Цель исследования. *Оценить изменения количества и состава водоэкстрагируемого органического вещества (ВЭОВ) в агродерново-подзолистых почвах на малом водосборе после схода снежного покрова в зависимости от локализации почв на элементах мезорельефа и их биологической активности.*

Место и время проведения. *Россия, Московская область, муниципальный округ Шаховская, вблизи дер. Андреевское, 09.04.2023 (отбор проб).*

Методы. *В образцах, отобранных после завершения снеготаяния и до начала активной вегетации, определили pH, содержание водоэкстрагируемых органического углерода и азота, а также измерили субстрат-индуцированное и базальное дыхание почвы, биомассу почвенных прокариот и грибов с применением люминесцентной микроскопии. Для характеристики экстрагированного органического вещества использовали спектрофотометрию в ультрафиолетовом и видимом диапазонах, а также спектрофлуориметрию.*

Основные результаты. *В почве, просохшей после схода снега и до начала активной вегетации, содержание влаги в целом возрастало вниз по склону, при этом содержание водоэкстрагируемого углерода и азота с увеличением влажности снижалось. Анализ оптических показателей показал, что с увеличением содержания ВЭОВ в почве его преобразованность микроорганизмами снижается. Это сопровождается уменьшением молекулярной массы и снижением активности ароматических и донорно-акцепторных структур; в то же время базальное дыхание микроорганизмов возрастает при увеличении влажности.*

Заключение. *Установленную обратную зависимость содержания растворённого органического вещества в агродерново-подзолистой почве, просохшей после схода снега, можно объяснить его активным разложением по мере увеличения влажности, прайминг эффектом зимних лизатов и отсутствием влияния высших растений.*

Ключевые слова: *водоэкстрагируемое органическое вещество почвы; спектрофотометрия; спектрофлуориметрия; субстрат-индуцированное дыхание; базальное дыхание; микробная биомасса.*

Цитирование: *Холодов В.А., Зиганшина А.Р., Данченко Н.Н., Никитин Д.А., Ярославцева Н.В., Данилова-Данильян Е.М., Фарходов Ю.Р. Водоэкстрагируемое органическое вещество и биологическая активность агродерново-подзолистых почв малого водосбора после снеготаяния // Почвы и окружающая среда. 2025. Том 8. № 1. e301. DOI: 10.31251/pos.v8i1.301*

ВВЕДЕНИЕ

Органическое вещество (ОВ) почвы является основой ее буферной системы и плодородия (Холодов и др., 2023). Фракция **растворенного органического вещества (РОВ)** – наиболее подвижная составляющая ОВ. Оно взаимодействует с почвенной биотой, твердой фазой почвы, участвует в переносе веществ, играет значимую роль в локальном и глобальном круговороте углерода (Караванова, 2013; Kalbitz et al., 2000). Состав РОВ весьма сложен, содержит более тысячи соединений. К ним относятся специфические почвенные соединения — гуминовые и фульвокислоты, а также аминокислоты, белки, углеводы, растворимые фенольные соединения, карбоновые и ароматические кислоты, амиды, альдегиды, кетоны и спирты (Караванова, 2013).

Эта фракция ОВ почвы более чувствительна к видам использования почвы и особенностям обработки сельскохозяйственных культур, чем ОВ в целом или другие его группы (Roper et al., 2010). Состав РОВ относительно оперативно откликается на переходы землепользования от леса к агроэкосистемам и способен отражать наличие пропашных культур (van Gaelen et al., 2014). В целом, РОВ весьма перспективный индикатор состояния почв.

Следует отметить, для почвы РОВ – это скорее теоретическое понятие, потому что извлечь его, не смещая равновесий почвенного раствора, невозможно. В связи с этим, обычно изучают

водоэкстрагируемое органическое вещество (**ВЭОВ**). Оптимальным подходом к изучению ВЭОВ является изучение его оптических свойств: спектров поглощения и флуоресценции в ультрафиолетовом (УФ) и видимом диапазонах. Простота и дешевизна подхода сочетается с достаточно большой информативностью. Например, при помощи такого подхода было показано, что оптические свойства различных фракций чернозема зависят от вида землепользования и размера агрегатов (Холодов и др., 2017, 2020; Куликова и др., 2024).

Агродерново-подзолистые почвы России имеют большой потенциал для повышения общей урожайности в нашей стране. Многие угодья, заброшенные в 1990-х годах, теперь возвращены или планируются к введению в сельскохозяйственное производство (Национальный доклад ..., 2023; Митин и др., 2024). При этом в рамках создания технологий, обеспечивающих безопасность и контроль качества сельскохозяйственного сырья и пищевых продуктов, необходима экологизация сельскохозяйственного производства. Поэтому стратегические планы развития сельского хозяйства должны включать обоснование рационального использования природных ресурсов (Кирюшин, 2023). В то же время, РОВ почв агроландшафтов Нечерноземной зоны России изучено недостаточно. Более того, для этой территории практически не известно изменение оптических свойств РОВ в зависимости от сезонов. Отдельный интерес представляет поведение РОВ в период сразу после снеготаяния. В это время активизируется биологическая активность почв, но влияние корней высших растений ещё минимально, что позволяет не рассматривать этот мощнейший фактор воздействия на гумусовые горизонты.

Для получения адекватных сведений о таком лабильном, в плане доступности микроорганизмам, субстрате, как РОВ, необходима оценка их уровня воздействия на него. Кроме того, наши предварительные эксперименты показали, что свежие, воздушно-сухие и длительно увлажняемые образцы демонстрируют разный выход ВЭОВ (Данилин и др., 2024; Danilin et al., 2025). В связи с этим, для изучения РОВ наиболее перспективно использовать свежеотобранные образцы, из которых ВЭОВ можно выделять с учетом содержания влаги.

Цель работы – оценить изменения количества и состава водоэкстрагируемого органического вещества в агродерново-подзолистых почвах на малом водосборе после схода снежного покрова в зависимости от локализации почв на элементах мезорельефа и их биологической активности.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом исследования являлось ВЭОВ катены (от плакора до поймы ручья) агродерново-подзолистых почв, расположенной в Шаховском районе Московской области у д. Андреевское. Катена представляет собой характерную для региона типичную группу агродерново-подзолистых почв разной степени гидроморфизма, закономерно сменяющуюся поймено-луговыми почвами. До 1991 г. поле обрабатывалось, затем использовалось как сенокос. Для исследования были выделены элементы мезорельефа: плакор, склон, понижение перед поймой ручья и пойма. Образцы отбирали в трех повторностях через 20 м на одной изолинии по направлению стока (рис. 1, табл.).

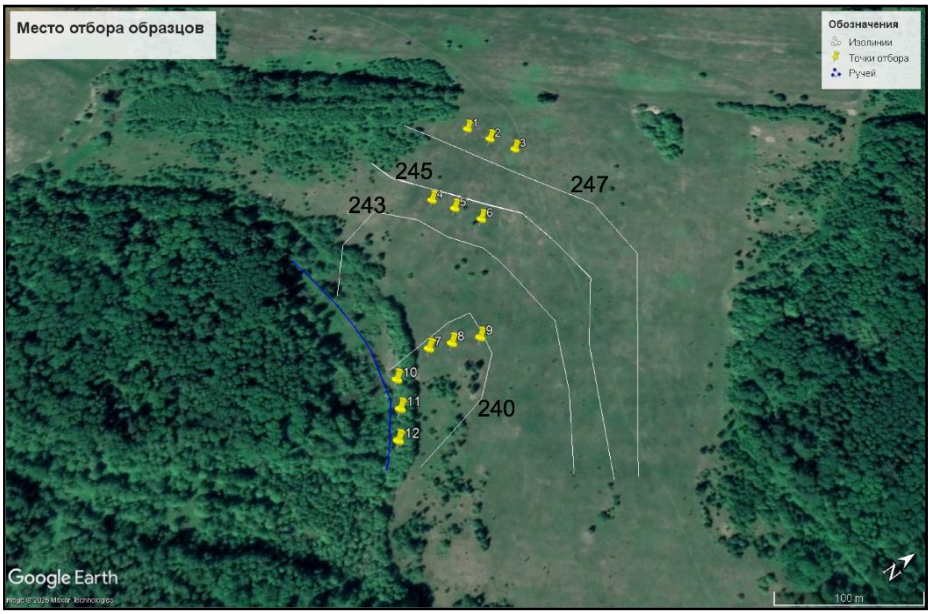


Рисунок 1. Схема отбора образцов.

Таблица

Координаты, высота и приуроченность к элементам рельефа точек отбора почвенных образцов

№	Координаты		Высота, м	Элемент мезорельефа
	с.ш.	в.д.		
1	55,983866	35,610465	247	Плакор
2	55,983957	35,610815	247	Плакор
3	55,984061	35,611188	247	Плакор
4	55,983211	35,611201	244	Склон
5	55,983312	35,611513	244	Склон
6	55,983423	35,611886	244	Склон
7	55,982439	35,613108	240	Понижение перед поймой
8	55,982601	35,61322	240	Понижение перед поймой
9	55,982798	35,61337	240	Понижение перед поймой
10	55,982113	35,61323	240	Пойма
11	55,982008	35,61359	240	Пойма
12	55,981866	35,613928	240	Пойма

Образцы были отобраны 09 апреля 2023 года через неделю после снеготаяния. Отбор проводили из верхнего слоя (0–10 см) гумусово-аккумулятивного горизонта. Каждый индивидуальный образец анализировали отдельно, для этого его делили на три части: в первой определяли влажность, из второй выделяли ВЭОВ, а третью использовали для оценки грибной и микробной биомассы, а также базального и субстрат-индуцированного дыхания.

Влажность определяли весовым способом по разности масс в образце до и после высушивания при 105°C.

Для выделения ВЭОВ на основе данных о влажности рассчитывали такой объем добавляемой для получения вытяжки воды, чтобы отношение масс абсолютно сухой почвы и воды было 1:5. Такой подход позволяет получать сопоставимые результаты для образцов с разной влажностью без высушивания, что весьма важно, так как предварительное высушивание почвы влияет как на ее биологические показатели, так и на характеристики РОВ.

Подробно подходы для выделения и характеристики ВЭОВ были описаны ранее (Холодов и др., 2024а, 2024б). Вытяжку получали, смешивая навеску почвы с водой I типа (с удельным сопротивлением >18 МОм×см), встряхивали 16 часов при помощи орбитального шейкера, центрифугировали, супернатант дополнительно пропускали через целлюлозный гидрофильный фильтр 0,22 мкм. Аликвоты, предназначенные для определения содержания растворенного органического углерода и азота, подкисляли до pH 2 соляной кислотой для вытеснения CO_2; кроме того, в вытяжках дополнительно определяли pH.

Измерение содержания **водоэкстрагируемого органического углерода** (**ВЭОС**) и **азота** (**ВЭN**) проводили на анализаторе Shimadzu TOC-L CSN (ISO 8245:1999).

Оптические свойства ВЭОВ изучали методами спектроскопии в УФ-видимом диапазоне и флуоресцентной спектроскопии. УФ-видимые спектры получали на спектрофотометре Shimadzu UV-

1800 сканированием от 200 до 800 нм. Спектры использовали для расчета оптических дескрипторов $SUVA_{254}$, E2/E3, E4/E6, $S_{275–295}$, $S_{350–400}$, и S_R (Холодов и др., 2024а, 2024б).

Спектры флуоресценции снимали при длинах возбуждения 220–480 нм с шагом 2 нм, эмиссию флуоресценции фиксировали от 300 до 550 нм; ширина щели при возбуждении и фиксировании эмиссии – 5 нм. Съемку проводили на спектрофлуориметре Shimadzu Rf 6000., скорость сканирования 60000 нм/мин. Для обработки спектров использовали пакет StaRdom для языка R. Обработку проводили согласно рекомендациям (Murphy et al., 2013; Pucher et al., 2019; https://cran.r-project.org/web//packages/staRdom/vignettes/PARAFAC_analysis_of_EEM.html). На основе полученных данных рассчитывали величину общепринятых пиков и индексов: C, A, M, T (Coble, 1996), HIX (Ohno, 2002), FI (Coble, 1996), BIX (Куликова и др., 2024).

Третью часть образцов использовали для оценки биологических показателей. С этой целью определяли физиологические параметры (интенсивность дыхания) и показатели биомассы основных представителей почвенной микробиоты.

Субстрат-индуцированное дыхание (СИД) оценивали по скорости начального максимального дыхания микроорганизмов после обогащения образца глюкозой (Гавриленко и др., 2011). Навеску образца (1 г) помещали в пенициллиновый флакон объем 10 мл, добавляли раствор глюкозы (концентрация 10 мг/г), герметично закрывали и фиксировали время. Обогащенный глюкозой образец почвы инкубировали 4 ч при +22°C, затем исследовали газовую фазу с помощью газоанализатора LI-COR «LI-850» для регистрации CO_2.

Базальное дыхание (БД) определяли по скорости выделения CO_2 почвой за 24 ч инкубации при температуре +22°C и 60% полной влагоемкости (Гавриленко и др., 2011). Измерения БД выполняли так же как СИД, только вместо раствора глюкозы в почву вносили воду (0,2 мл/г почвы). До начала измерений СИД и БД образцы почвы увлажняли до 50–55% полной влагоемкости и инкубировали в течение 7 суток при +5°C.

На основании результатов БД и СИД рассчитан “метаболический” или “дыхательный” коэффициент (qCO_2 = БД/СИД), который отражает эффективность преобразования гетеротрофными микроорганизмами органического углерода ($C_{орг}$) в микробную биомассу и, поэтому, может быть использован в качестве индикатора изменений качества почвы. Коэффициент qCO_2 и скорость минерализации $C_{орг}$ в почве имеют решающее значение для углеродного цикла в наземных экосистемах.

Биомассу прокариот оценивали с помощью метода люминесцентной микроскопии с применением флуоресцентного красителя акридина оранжевого (микроскоп "Биомед 5 ПР ЛЮМ", Россия) при увеличении 1000× с масляной иммерсией (Никитин и др., 2019). Десорбцию клеток с почвы проводили при помощи ультразвуковой установки УЗДН-1 (2 мин, при максимальной мощности, частота 22 кГц). Расчет числа клеток прокариот на 1 г субстрата производили по формуле:

$$N = S_1 \times a \times n/V \times S_2 \times C \quad (1),$$

где N – число клеток в 1 г субстрата; S_1 – площадь препарата (мкм^2); a – количество клеток в одном поле зрения (усреднение производится по всем препаратам); n – показатель разведения бактериальной смеси (мл); V – объем капли, наносимой на стекло (мл); S_2 – площадь поля зрения микроскопа (мкм^2); C – навеска субстрата (г). В итоге получали массу актиномицетов (Ас, мкг/г) и остальных бактерий (Вас, мкг/г) .

Биомассу грибов определяли методом люминесцентной микроскопии с применением флуоресцентного красителя калькофлуора белого (Никитин и др., 2019). Учет спор и длины мицелия осуществляли на люминесцентном микроскопе "Биомед 5 ПР ЛЮМ" (Россия) при увеличении 400×. Десорбцию клеток с почвы проводили при помощи вортекса "MSV-3500" (Латвия) при скорости 3500 об./мин в течение 10 мин. Расчет количества грибных клеток на 1 г субстрата производили по формуле:

$$M = ((4\times a \times n) / p) \times 10^{10} \quad (2),$$

где M – количество клеток в 1 г почвы; a – среднее число клеток в поле зрения; p – площадь поля зрения (мкм^2); n – показатель разведения.

Длину грибного мицелия в 1 г образца (NMA) определяли по формуле:

$$NMA = S_1 \times a \times n/V \times S_2 \times c \times 10^6 \quad (3),$$

где: S_1 – площадь препарата (мкм^2); a – средняя длина фрагментов мицелия в поле зрения (мкм); n – показатель разведения суспензии (мл); v – объем капли, наносимой на стекло (мл); V – объем капли, наносимой на стекло (мл); S_2 – площадь поля зрения микроскопа (мкм^2); c – навеска образца (г). Расчет грибной биомассы (мг/г почвы) осуществляли, полагая, что плотность спор равна 0,837

г/см^3, а плотность мицелия – 0,628 г/см^3. Отдельно рассчитывали содержание спор с размерами 2, 3, 5 и 7 мкм. Их размеры оценивали объект-микрометром (линейкой с определенной ценой деления).

Для обработки результатов использовали статистические пакеты из языка R и программу Gretl.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Полученные нами значения изменения влажности (W, %) и количественных показателей ВЭОВ – содержания водоэкстрагируемого органического углерода и водоэкстрагируемого азота – проиллюстрированы ниже (рис. 2).

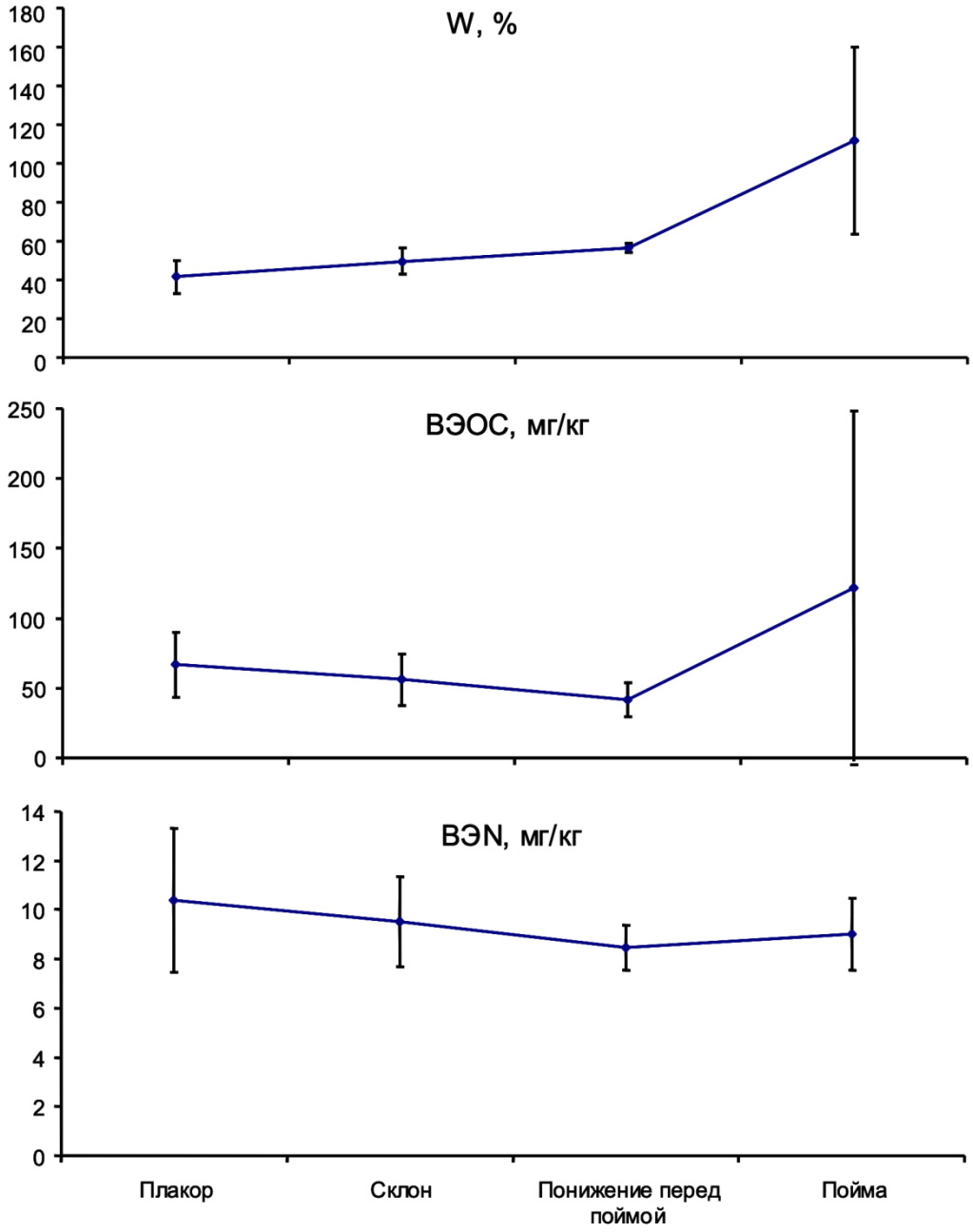


Рисунок 2. Изменение влажности (W) и содержания органического углерода (ВЭОС) и азота (ВЭN) в водоэкстрагируемом органическом веществе почв по катене.

Влажность образцов почвы варьировала от 36 до 140% (масс.). На рисунке видна тенденция увеличения влажности вниз по склону, что закономерно для недельного срока после схода снега, когда образцы были отобраны. Однако, в районе поймы был слишком большой разброс показателей – видимо, сказывается влияние ручья и грунтовых вод. Содержание ВЭОС изменялось от 43 до 268 мг/кг почвы при средней величине 72 мг/кг. Эти данные близки к ранее полученным для черноземной полосы. Так, для черноземов разного вида использования и степени смытости было отмечено

варьирование 75–600 мг/кг (Холодов и др., 2020, 2022, 2024а, 2024б). Содержание азота в водной вытяжке изменялось от 7,6 до 13,5 мг/кг почвы. В целом, эти значения были примерно в два раза меньше, чем ранее установленные для черноземов разной степени смытости (Холодов и др., 2024а).

Тенденция содержания ВЭОС и ВЭN была противоположна изменению влажности: их количество в почве уменьшалось вниз по склону, но при этом разброс в пойме, особенно ВЭОС, был чрезвычайно высоким, что указывает на влияние РОВ ручья.

Оптические индексы поглощения и флуоресценции были использованы для классификации объектов в пространстве главных компонент (ГК) (рис. 3А). Аналогично для классификации объектов использовали биологические показатели (рис. 3Б).

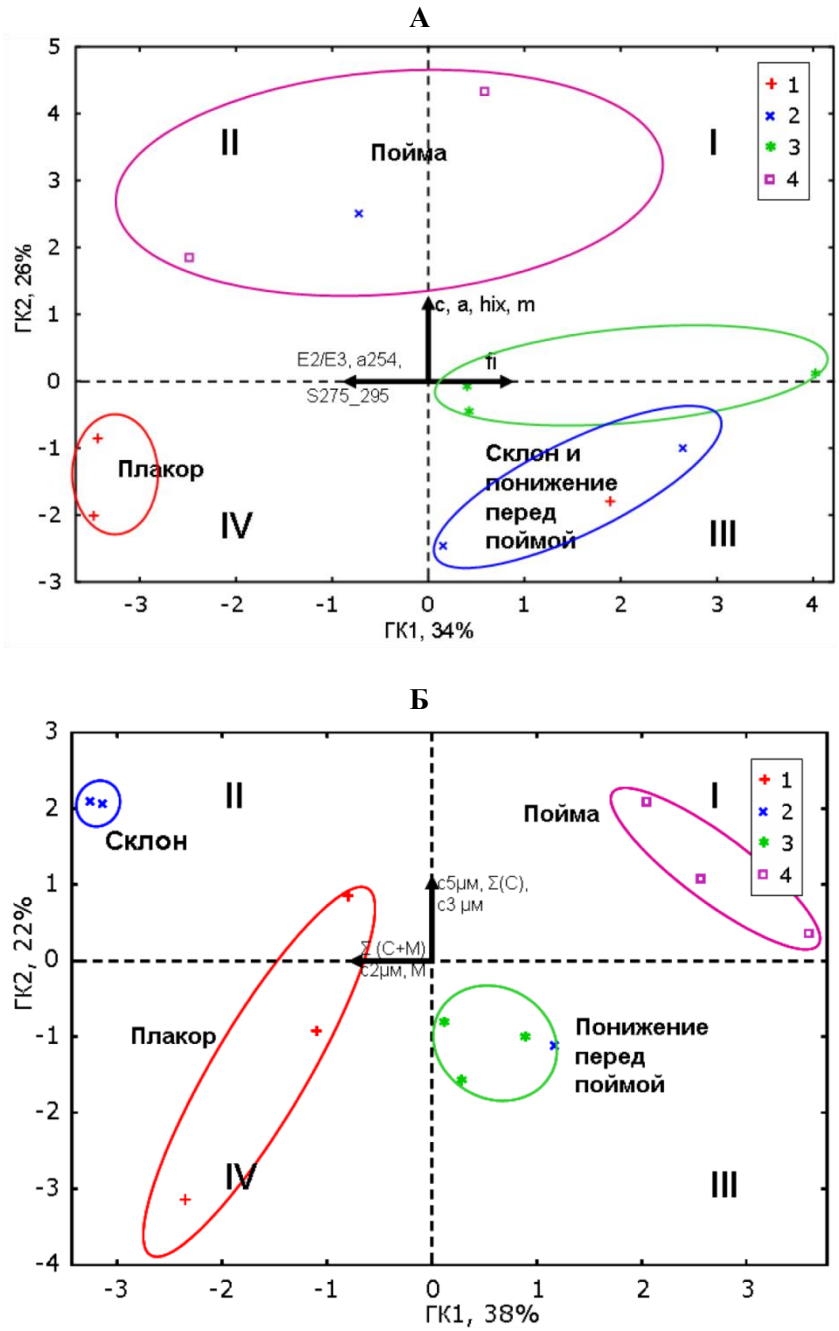


Рисунок 3. Распределение образцов в пространстве первых двух главных компонент в зависимости от оптических свойств ВЭОВ (А) и биологических показателей (Б) почв. Арабскими цифрами обозначены: 1 – плакор, 2 – склон, 3 – понижение перед поймой, 4 – пойма; римскими – четверти графика.

Как видно из распределений (рис. 3), и оптические, и биологические показатели достаточно хорошо разделяют изучаемые объекты. Оптические показатели ВЭОВ демонстрируют, что наибольшими отличиями обладает ВЭОВ плакора, а остальные объекты ближе друг к другу.

Обращает на себя внимание большой разброс значений показателей для образцов из поймы и близость образцов со склона и понижения после поймы – обе эти подвыборки занимают III четверть пространства ГК; видимо, сказывается влияние ОВ из ручья. По первой главной компоненте (ГК1) на основе величин собственных векторов наибольшее разделяющее значение имеют E2/E3, поглощение на длине волны 254 нм (a254) и $S_{275–295}$: они вызывают сдвиг в отрицательную зону. В целом, это отражает увеличения ароматичности ВЭОВ и снижение молекулярной массы, а также уменьшение внутренней сопряженности молекул (Peuravuori, Pihlaja, 1997; Korshin et al., 1997; Sharpless et al., 2014; Vecchio, Blough, 2004; Helms et al., 2008). Кроме того, сдвиг в область положительных значений по ГК1 вызывает увеличение индекса FI, что указывает на рост микробной составляющей в ВЭОВ (McKnight et al., 2001). Следует отметить, что объекты по второй главной компоненте (ГК2) расположены в ряду: склон — понижение перед поймой — пойма в порядке увеличения показателей C, A, HIX и M. Эти показатели, в целом, отражают увеличение содержания гуминовых веществ (Coble 1996; Ohno, 2002).

Биологические показатели хорошо разделяют почвы всех четырех элементов мезорельефа (рис. 3Б). Основное, что обращает на себя внимание при анализе собственных векторов рассмотренных биологических показателей, это отсутствие существенного влияния на расположение объектов некоторых бактериологических физиологических показателей: базального и субстрат-индуцированного дыхания и микробной биомассы. Наибольший вклад в различия между элементами рельефа вносили показатели, связанные с биомассой почвенных грибов. Причем различия по ГК1 связаны с суммой массы спор и мицелия, содержанием спор с размером 2 мкм и массой мицелия. Наибольший вклад в ГК2 вносят общая масса спор и содержание спор 3 и 5 мкм. Вероятно, почвенные грибы больше зависимы от локальных почвенных условий с невысокой динамикой, формирующихся в зависимости от мезорельефа (содержание углерода, pH, и т.п.), а углерод микробной биомассы, базальное и субстрат-индуцированное дыхание, как более лабильные показатели, меньше связаны с локальной средой, приуроченной к рельефу, но больше отзываются на колебания температуры и влажности.

Полученные данные были использованы для поиска взаимосвязей между содержанием ВЭОС, ВЭN, влажностью, оптическими свойствами ВЭОВ и биологическими показателями почв. Выше (рис. 2) был показан большой разброс во влажности и ВЭОС в образцах из поймы; в связи с этим, при поиске корреляций они не рассматривались.

При анализе зависимости содержания ВЭОС от влажности неожиданно была обнаружена значимая обратная корреляция (рис. 4).

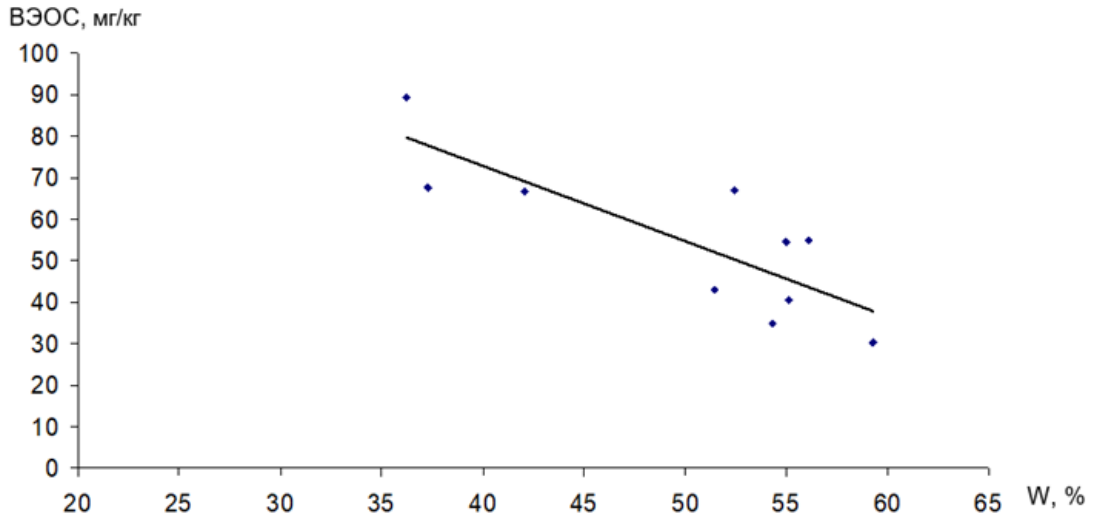


Рисунок 4. Зависимость содержания органического углерода в водной вытяжке (ВЭОС) от влажности почвенных образцов (W).

Изначально ожидалось, что с увеличением влажности образцов, будет возрастать растворимость почвенного органического вещества (ПОВ) и, соответственно, наблюдаться прямая зависимость ВЭОС от влажности. Однако была установлена противоположная зависимость. Полученные результаты согласуются с ранее установленной схожей зависимостью, описанной в

работе (Zsolnay, Görlitz, 1994). В то же время, есть сообщения об отсутствии корреляции влажности и содержания ВЭОС (Seddaiu et al., 2023). Из полученного множества оптических индексов, для шести были обнаружены значимые корреляции с содержанием ВЭОС в почве (рис. 5).

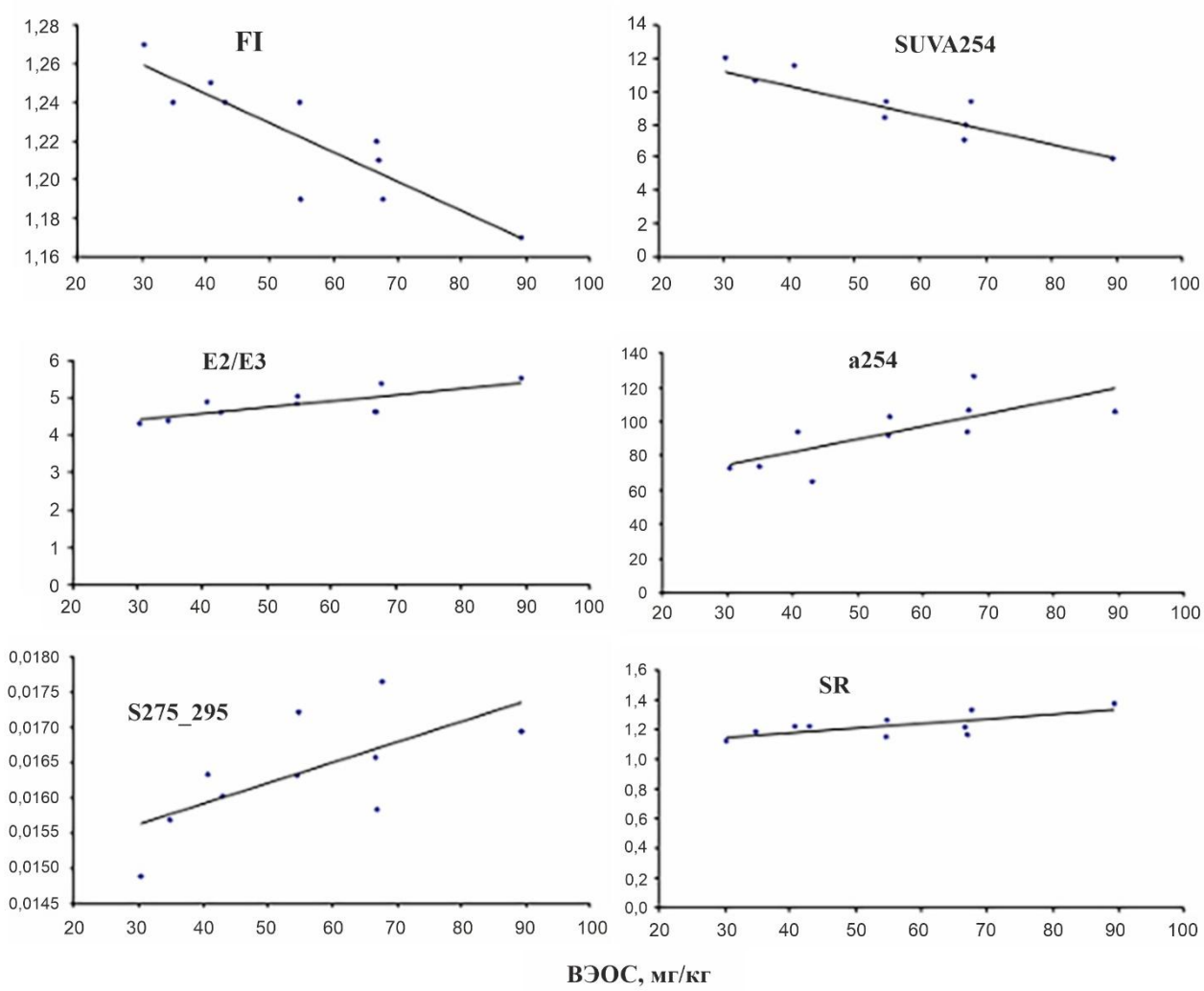


Рисунок 5. Зависимость оптических индексов от содержания водоэкстрагируемого углерода в почве.

В первую очередь следует отметить индекс флуоресценции FI. В приложении к почве можно считать, что он тем выше, чем больше в ВЭОВ микробных производных (McKnight et al., 2001). В рассматриваемом случае, коэффициент снижается с увеличением содержания ВЭОС. Аналогично, при увеличении в ВЭОВ содержания углерода, снижается относительная ароматичность ВЭОВ (параметр SUVA254), хотя общее содержание ароматических структур увеличивается, согласно абсорбции при 254 нм (a254). Таким образом, степень микробной трансформации ВЭОВ снижается с увеличением его экстракционного выхода. При этом увеличивается присутствие растворенных компонентов растений лигниновой природы – с этим можно связать рост a254, маркера веществ лигнинового происхождения (Mann et al., 2016), совместно в ВЭОС.

Кроме того, следует отметить положительную корреляцию между ВЭОС и отношением E2/E3, которое обратно связано с активностью ароматических и донорно-акцепторных структур (Korshin et al., 1997; Vecchio, Blough, 2004; Sharpless et al., 2014). Увеличение $S_{275–295}$ и S_R можно связать со снижением молекулярной массы ВЭОВ (Helms et al., 2008).

При строгом корреляционном анализе не было обнаружено связи между содержанием ВЭОС и проявлениями биологической активности. Однако при внимательном изучении корреляционных полей, все же можно выявить некоторые закономерности (рис. 6). Если убрать из выборки наибольшую величину БД, то взаимосвязи для остальных величин становятся значимыми: БД снижается при увеличении содержания ВЭОС и увеличивается совместно с влажностью. Происхождение РОВ в почвах изучено недостаточно, особенно в плане соотношения источников.

Для плакорных почв считается, что РОВ имеет три основных источника: биогенные растительные остатки и выделения почвенной биоты (метаболиты, экссудаты и др.), специфическое почвенное ОВ и атмосферные осадки (Kalbitz et al., 2000; Yano et al., 2005). При этом в работах (Fröberg et al., 2003; Hagedorn et al., 2004; de Troyer et al., 2011) показано, что растворимая составляющая растительных остатков не аккумулируется в РОВ, а практически полностью минерализуется до CO_2. В то же время, при исследовании разложения меченых 14C листьев в условиях проливных дождей и низких температур показано, что значимая часть их углерода переходит в РОВ, которое переносится или вымывается, превышая потери за счет микробного метаболизма (Uselman et al., 2007).

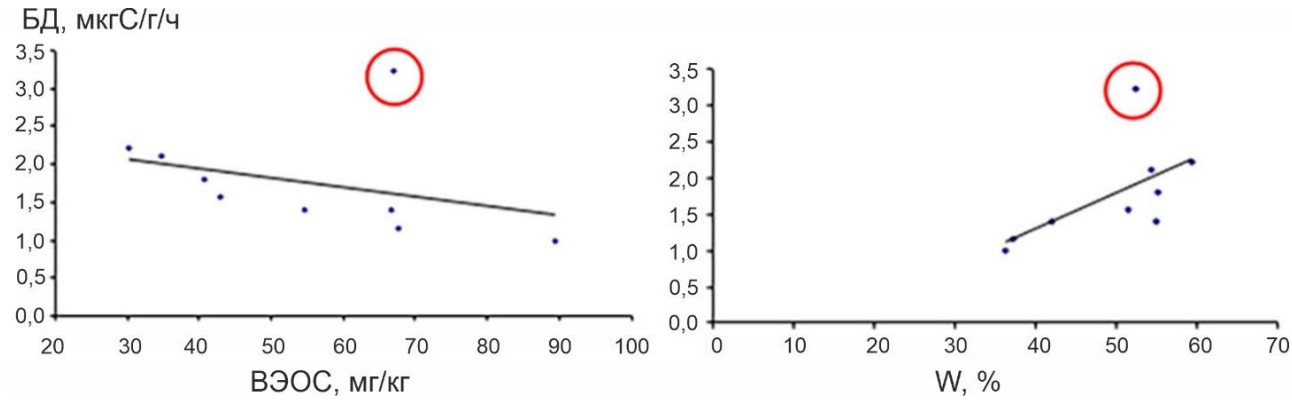


Рисунок 6. Зависимость базального дыхания (БД) от содержания водоэкстрагируемого углерода (ВЭОС) в почве и от почвенной влажности (W). Красным обведено максимальное значение БД, при выбраковке которого корреляционные взаимосвязи становятся значимыми.

Полученные закономерности позволяют описать поведение РОВ в агродерново-подзолистых почвах после снеготаяния. После схода снежного покрова и начала высушивания почв, еще до развития растений, биологическая активность в гумусово-аккумулятивных горизонтах почв катены зависит от влажности; в диапазоне полевой влагоемкости она возрастает совместно с увеличением увлажненности. После зимы в составе почвенного раствора много легкодоступных органических веществ – лизатов бактериальных и растительных клеток, образовавшихся в результате замораживания и оттаивания; они и стимулируют биологическую активность. Стимуляция приводит не только к переработке легкодоступных субстратов, но и менее доступного ОВ – к затравочному эффекту или прайминг эффекту (Chen et al., 2019). На фоне отсутствия поступления экссудатов это хорошо заметно в снижении содержания ВЭОС с возрастанием БД и влажности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На агродерново-подзолистых почвах в пределах малого водосбора достаточно ясно видна зависимость содержания и состава ВЭОВ от приуроченности к элементам рельефа. Среди основных биологических показателей к рельефу четко приурочена биомасса грибов, что, по-видимому, отражает их меньшую подвижность по сравнению с бактериями. При этом основные показатели биомассы, как грибов, так и бактерий, не связаны с содержанием и свойствами ВЭОВ. В то же время можно выявить связь между базальным дыханием, влажностью почвы, содержанием и составом ВЭОВ.

Резюмируя выявленные взаимосвязи между базальным дыханием, влажностью почвы, содержанием и оптическими свойствами ВЭОВ, можно описать его поведение после снеготаяния при отсутствии влияния жизнедеятельности высших растений. В просохших (ниже полной полевой влагоемкости) после снеготаяния агродерново-подзолистых почвах содержание ВЭОВ обратно связано с влажностью почвы, что объясняется отсутствием влияния высших растений и прайминг эффектом зимних лизатов; при этом по мере разложения ВЭОВ увеличивается доля углерода микробного происхождения.

ФИНАНСОВАЯ ПОДДЕРЖКА

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 24-26-00293).

ЛИТЕРАТУРА

Гавриленко Е.Г., Сусьян Е.А., Ананьева Н.Д., Макаров О.А. Пространственное варьирование содержания углерода микробной биомассы и микробного дыхания почв южного Подмосковья // Почвоведение. 2011. № 10. С. 1231–1245.

Данилин И.В., Холодов В.А., Зиганшина А.Р., Данченко Н.Н., Буряк А.Д., Фарходов Ю.Р., Ярославцева Н.В. Влияние доступности почвенной влаги на свойства растворенного органического вещества и содержание микробного углерода в ризосфере *Poa pratensis* L. // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2024. С. 73–104. https://doi.org/10.19047/0136-1694-2024-SPYC-73-104

Караванова Е.И. Водорастворимые органические вещества: фракционный состав и возможности их сорбции твердой фазой лесных почв // Почвоведение. 2013 № 8. С. 924–936. https://doi.org/10.7868/S0032180X13080042

Кирюшин В.И. Задачи оптимизации землепользования в России // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2023. № 116. С. 5–25. https://doi.org/10.19047/0136-1694-2023-116-5-25

Куликова Н.А., Холодов В.А., Фарходов Ю.Р., Зиганшина А.Р., Заварзина А.Г., Карпухин М.М. Растворенное органическое вещество черноземов различного вида использования: взаимосвязь структурных особенностей и минерального состава // Вестник Московского университета. 2024. Серия 17. Почвоведение. Том 74. № 1. С. 24–32. https://doi.org/10.55959/MSU0137-0944-17-2024-79-1-24-32

Митин С.Г., Сысоев Г.В., Старостин И.А., Ещин А.В. Технико-технологическое обеспечение вовлечения в оборот залежных земель // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2024. № 118. С. 276–308. https://doi.org/10.19047/0136-1694-2024-118-276-308

Национальный доклад о ходе и результатах реализации в 2022 году Государственной программы развития сельского хозяйства и регулирования рынков сельскохозяйственной продукции, сырья и продовольствия. Москва: Министерство сельского хозяйства Российской Федерации, 2023. 159 с.

Никитин Д.А., Семёнов М.В., Семиколенных А.А., Максимова И.А., Качалкин А.В., Иванова А.Е. Биомасса грибов и видовое разнообразие культивируемой микобиоты почв и субстратов о. Нортбрук (Земля Франца-Иосифа) // Микология и фитопатология. 2019. Том 53. № 4. С. 210–222. https://doi.org/10.1134/S002636481904010X

Холодов В.А., Иванов В.А., Фарходов Ю.Р., Сафронова Н.А., Артемьева З.С., Ярославцева Н.В. Оптические характеристики фракций органического вещества агрегатов типичных черноземов // Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева. 2017. № 90. С. 56–72. https://doi.org/10.19047/0136-1694-2017-90-56-72

Холодов В.А., Ярославцева Н.В., Фарходов Ю.Р., Яшин М.А., Лазарев В.И., Ильин Б.С., Филиппова О.И., Воликов А.Б., Иванов А.Л. Оптические характеристики экстрагируемых фракций органического вещества типичных черноземов в многолетних полевых опытах // Почвоведение. 2020. № 6. С. 691–702. https://doi.org/10.31857/S0032180X20060052

Холодов В.А., Фарходов Ю.Р., Ярославцева Н.В., Данченко Н.Н., Ильин Б.С., Лазарев В.И. Водоэкстрагируемый и микробный углерод черноземов разного вида использования // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2022. № 112. С. 122–133. https://doi.org/10.19047/0136-1694-2022-112-122-133

Холодов В.А., Рогова О.Б., Лебедева М.П., Варламов Е.Б., Волков Д.С., Зиганшина А.Р., Ярославцева Н.В. Органическое вещество и минеральная матрица почв: современные подходы, определения терминов и методы изучения (обзор) // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2023. № 117. С. 52–100. https://doi.org/10.19047/0136-1694-2023-117-52-100

Холодов В.А., Ярославцева Н.В., Зиганшина А.Р., Данченко Н.Н., Фарходов Ю.Р., Максимович С.В., Жидкин А.П. Водоэкстрагируемое органическое вещество почв разной степени смытости и намытости на малом водосборе в центральной лесостепи Среднерусской возвышенности: распахиваемые почвы // Почвоведение. 2024а. № 6. С. 783–796. https://doi.org/10.31857/S0032180X24060019

Холодов В.А., Ярославцева Н.В., Зиганшина А.Р., Данченко Н.Н., Данилин И.В., Фарходов Ю.Р., Жидкин А.П. Водоэкстрагируемое органическое вещество почв разной степени смытости и намытости на малом водосборе в центральной лесостепи Среднерусской возвышенности: намытые почвы в днище балки // Почвоведение. 2024б. № 7. С. 921–935. https://doi.org/10.31857/S0032180X24070018

Chen L., Liu L., Qin S., Yang G., Fang K., Zhu B., Kuzyakov Y., Chen P., Xu Y., Yang Y. Regulation of priming effect by soil organic matter stability over a broad geographic scale // Nature Communications. 2019. Vol. 10. Article number 5112. https://doi.org/10.1038/s41467-019-13119-z

Coble P.G. Characterization of marine and terrestrial DOM in seawater using excitation-emission matrix spectroscopy // Marine Chemistry. 1996. Vol. 51. No. 4. P. 325–346. https://doi.org/10.1016/0304-4203(95)00062-3

Danilin I.V., Danchenko N.N., Ziganshina A.R., Farkhodov Yu. R., Yaroslavtseva N.V., Kholodov V.A. Divergent response of Chernozem organic matter towards short-term water stress in Poa pratensis L. rhizosphere and bulk soil in pot experiments: A spectroscopic study // Soil and Tillage Research. 2025. Vol. 245. P. 106285 https://doi.org/10.1016/j.still.2024.106285

de Troyer I., Amery F., Van Moorleghem C., Smolders E., Merckx R. Tracing the source and fate of dissolved organic matter in soil after incorporation of a 13C labelled residue: a batch incubation study // Soil Biology and Biochemistry. 2011. Vol. 43. No. 3. P. 513–519. https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2010.11.016

Fröberg M., Berggren D., Bergkvist B., Bryant C., Knicker H. Contributions of Oi, Oe and Oa horizons to dissolved organic matter in forest floor leachates // Geoderma. 2003. Vol. 113. No. 3–4. P. 311–322. https://doi.org/10.1016/S0016-7061(02)00367-1

Hagedorn F., Saurer M., Blaser P. A 13C tracer study to identify the origin of dissolved organic carbon in forested mineral soils // European Journal of Soil Science. 2004. Vol. 55. No. 1. P. 91–100. https://doi.org/10.1046/j.1365-2389.2003.00578.x

Helms J.R., Stubbins A., Ritchie J.D., Minor E.C., Kieber D.J., Mopper K. Absorption spectral slopes and slope ratios as indicators of molecular weight, source, and photobleaching of chromophoric dissolved organic matter // Limnology and Oceanography. 2008. Vol. 53. No. 3. P. 955–969. https://doi.org/10.4319/lo.2008.53.3.0955

ISO 8245:1999 Water quality – Guidelines for the determination of total organic carbon (TOC) and dissolved organic carbon (DOC). https:/standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/6d1a2e37-7c6b-4be3-bf46248010a9c257/iso-8245-1999

Kalbitz K., Solinger S., Park J.H., Michalzik B., Matzner E. Controls on the dynamics of dissolved organic matter in soils: a review // Soil Science. 2000. Vol. 165. No. 4. P. 277–304.

Korshin G.V., Li C.-W., Benjamin M.M. Monitoring the properties of natural organic matter through UV spectroscopy: a consistent theory // Water Resources. 1997. Vol. 31. No. 7. P. 1787–1795. https://doi.org/10.1016/S0043-1354(97)00006-7

Mann P.J., Spencer R.G.M., Hernes P.J., Six J., Aiken G.R., Tank S.E., McClelland J.W., Butler K.D., Dyda R.Y., Holmes R.M. Pan-Arctic Trends in Terrestrial Dissolved Organic Matter from Optical Measurements // Frontiers in Earth Science. 2016. Vol. 4. P. 1–18. https://doi.org/10.3389/feart.2016.00025

McKnight D.M., Boyer E.W., Westerhoff P.K., Doran P.T., Kulbe T., Andersen D.T. Spectrofluorometric characterization of dissolved organic matter for indication of precursor organic material and aromaticity // Limnology and Oceanography. 2001. Vol. 46. No. 1. P. 38–48. https://doi.org/10.4319/lo.2001.46.1.0038

Murphy K.R., Stedmon C.A., Graeber D., Bro R. Fluorescence spectroscopy and multi-way techniques. PARAFAC // Analytical Methods. 2013. Vol. 5 (23). P. 6557–6566. https://doi.org/10.1039/C3AY41160E

Ohno T. Fluorescence Inner-Filtering Correction for Determining the Humification Index of Dissolved Organic Matter // Environmental Science & Technology. 2002. Vol. 36 (4). P. 742–746. https://doi.org/10.1021/es0155276

Peuravuori J., Pihlaja K. Molecular size distribution and spectroscopic properties of aquatic humic substances // Analytica Chimica Acta. 1997. Vol. 337. No. 2. P. 133–149. https://doi.org/10.1016/S0003-2670(96)00412-6

Pucher M., Wünsch U., Weigelhofer G., Murphy K., Hein T., Graeber D. staRdom: Versatile software for analyzing spectroscopic data of dissolved organic matter in R // Water (Switzerland). 2019. Vol. 11(11). P. 2366. https://doi.org/10.3390/ w11112366

Roper M.M., Gupta V., Murphy D. Tillage practices altered labile soil organic carbon and microbial function without affecting crop yields // Australian Journal of Soil Research. 2010. Vol. 48. No. 3. P. 274–285. https://doi.org/10.1071/SR09143

Seddaiu G., Pinna M.V., Agnelli A., Cappai C., Corti G., Demurtas C.E., Pulina A., Roggero P.P. Dynamics of soluble soil organic matter in Mediterranean maize-based forage system under organic and mineral fertilization // Catena. 2023. Vol. 220. Part B. P. 106730. https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106730

Sharpless C.M., Aeschbacher M., Page S.E., Wenk J., Sander M., McNeill K. Photooxidation-induced changes in optical, electrochemical, and photochemical properties of humic substances // Environmental science & technology. 2014. Vol. 48. No. 5. P. 2688–2696. https://doi.org/10.1021/es403925g

van Gaelen N., Verschoren V., Clymans W., Poesen J., Govers G., Vanderborght J., Diels J. Controls on dissolved organic carbon export through surface runoff from loamy agricultural soils // Geoderma. 2014. Vol. 226–227. P. 387–396. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.03.018

Vecchio del R., Blough N.V. On the origin of the optical properties of humic substances // Environmental science & technology. 2004. Vol. 38. No. 14. P. 3885–3891. https://doi.org/10.1021/es049912h

Yano Y., Lajtha K., Sollins P., Caldwell B.A. Chemistry and dynamics of dissolved organic matter in a temperate coniferous forest on andic soils: effects of litter quality // Ecosystems. 2005. Vol. 8. P. 286–300. https://doi.org/10.1007/s10021-005-0022-9

Zsolnay A., Görlitz H. Water extractable organic matter in arable soils: effects of drought and long-term fertilization // Soil Biology & Biochemistry. 1994. Vol. 26. No. 9. P. 1257–1261. https://doi.org/10.1016/0038-0717(94)90151-1

Поступила в редакцию 03.03.2025
Принята 23.04.2025
Опубликована 29.04.2025

Сведения об авторах:

Холодов Владимир Алексеевич – доктор сельскохозяйственных наук, ведущий научный сотрудник, заведующий лабораторией органического вещества и биохимии почв ФГБНУ ФИЦ «Почвенный институт им. В.В. Докучаева» (г. Москва, Россия); vkholod@mail.ru; https://orcid.org/0000-0002-6896-7897

Зиганшина Алия Рустамовна – младший научный сотрудник лаборатории органического вещества и биохимии почв ФГБНУ ФИЦ «Почвенный институт им. В.В. Докучаева» (г. Москва, Россия); ziganshina_ar@esoil.ru; https://orcid.org/0000-0003-2769-5941

Данченко Наталья Николаевна – кандидат химических наук, старший научный сотрудник лаборатории органического вещества и биохимии почв ФГБНУ ФИЦ «Почвенный институт им. В.В. Докучаева» (г. Москва, Россия); nataly_danch@mail.ru; https://orcid.org/0000-0002-4358-4419

Никитин Дмитрий Алексеевич – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории микробиологии почв ФГБНУ ФИЦ «Почвенный институт им. В.В. Докучаева» (г. Москва, Россия); dimnik90@mail.ru; https://orcid.org/0000-0003-1842-1754

Ярославцева Надежда Васильевна – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории органического вещества и биохимии почв ФГБНУ ФИЦ «Почвенный институт им. В.В. Докучаева» (г. Москва, Россия); nadezhdayros@gmail.com; https://orcid.org/0000-0002-5805-4285

Данилова-Данильян Елизавета Михайловна – младший научный сотрудник лаборатории микробиологии почв ФГБНУ ФИЦ «Почвенный институт им. В.В. Докучаева» (г. Москва, Россия); danilovadanilyanlm@mail.ru; https://orcid.org/0000-0003-1657-1396

Фарходов Юлиан Робертович — научный сотрудник лаборатории органического вещества и биохимии почв ФГБНУ ФИЦ «Почвенный институт им. В.В. Докучаева» (г. Москва, Россия); yulian.farkhodov@yandex.ru; https://orcid.org/0000-0002-0210-380X

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Статья доступна по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License

Water-extractable organic matter and biological activity of Retisol of a small watershed after snowmelt

© 2025 V. A. Kholodov, A. R. Ziganshina, N. N. Danchenko, D. A. Nikitin, N. V. Yaroslavtseva, E. M. Danilova-Danilyan, Yu. R. Farkhodov

V.V. Dokuchaev Soil Science Institute, Pyzhevsky lane 7/2, Moscow, Russia. E-mail: vkholod@mail.ru

The aim of the study *was to evaluate qualitative and quantitative characteristics of water-extractable organic matter of Retisol after snowmelt at the small watershed, as related to soil mesorelief location and biological activity.*

Location and time of the study. *Near Bukholovo village, Shakhovskaya municipal district, Moscow region, Russia, 09.04.2023 (sampling).*

Methods*. We measured pH, water-extractable organic carbon (WEOC) and nitrogen content, substrate-induced and basal soil respiration and estimated soil prokaryotes and fungi biomass using luminescent microscopy. To characterize extracted 0rganic matter we used spectroscopy in the ultraviolet and visible ranges and fluorescence spectroscopy.*

Results. *In soil samples, that were collected already dry after the snowmelt and before the start of active growing, soil water content was found to increase down the slope, whereas the content of WEOC and WEON decreased with increasing moisture. Analysis of optical characteristics showed that increasing soil WEOC its extent of microbial transformation decreased. This is accompanied by the decrease in molecular mass and activity of aromatic and the donor-acceptor structures. The basal respiration increased with increased soil moisture.*

Conclusions. *The finding that dissolved organic matter in dried below field moisture capacity Retisol after snowmelt was inversely related to soil moisture can be explained by its active decomposition with increasing moisture, the effect of inter lysates and the absence of the influence of higher plants.*

Keywords: *water-extractable organic matter, UV-Vis spectroscopy; fluorescence spectroscopy; substrate-induced respiration; basal respiration, microbial biomass.*

How to cite: *Kholodov V.A., Ziganshina A.R., Danchenko N.N., Nikitin D.A., Yaroslavtseva N.V., Danilova-Danilyan E.M., Farkhodov Yu.R. Water-extractable organic matter and biological activity of Retisol of small watershed after snowmelt. The Journal of Soils and Environment. 2025. 8(1). e301. DOI: 10.31251/pos.v8i1.301 (in Russian with English abstract).*

FUNDING

The study was financially supported by the Russian Science Foundation (project No. 24-26-00293).

REFERENCES

Gavrilenko E.G., Susyan E.A., Anan'eva N.D., Makarov O.A. Spatial variability in the carbon of microbial biomass and microbial respiration in soils of the south of Moscow oblast. Eurasian Soil Science. 2011. Vol. 10. No. 10. P. 1125–1138. https://doi.org/10.1134/S106422931110005X

Danilin I.V., Kholodov V.A., Ziganshina A.R., Danchenko N.A., Buriak A.D., Farkhodov Yu.R., Yaroslavtseva N.V. Influence of soil moisture availability on dissolved organic matter properties and microbial carbon content in Poa pratensis L. rhizosphere. Dokuchaev Soil Bulletin. 2024. P. 73–104. (in Russian). https://doi.org/10.19047/0136-1694-2024-SPYC-73-104

Karavanova E. I. Dissolved organic matter: Fractional composition and sorbability by the soil solid phase (Review of literature). Eurasian Soil Science. 2013. Vol. 46. No. 8. P. 833–844. https://doi.org/10.1134/S1064229313080048

Kiryushin V.I. The goals of land use optimization in Russia. Dokuchaev Soil Bulletin. 2023. No. 116. P. 5–25. (in Russian). https://doi.org/10.19047/0136-1694-2023-116-5-25

Kulikova N.A., Kholodov V.A., Farkhodov Y.R., Ziganshina A.R., Zavarzina A.G., Karpukhin M.M. Dissolved Organic Matter of Chernozems of Different Uses: The Relationship of Structural Features and Mineral Composition. Lomonosov Soil Science Journal. 2024. Vol. 74. No. 1. P. 24–32. (in Russian). https://doi.org/10.55959/MSU0137-0944-17-2024-79-1-24-32

Mitin S.G., Sysoev G.V., Starostin I.A., Eshchin A.V. Technical and technological support for the involvement of fallow lands in agriculture. Dokuchaev Soil Bulletin. 2024. No. 118. P. 276–308. (in Russian). https://doi.org/10.19047/0136-1694-2024-118-276-308

National report on the progress and results of the implementation in 2022 of the State program for the development of agriculture and regulation of agricultural products, raw materials and food markets. Moscow: Ministry of Agriculture of the Russian Federation, 2023. 159 p. (in Russian).

Nikitin D.A., Semenov M.V., Semikolennykh A.A., Maksimova I.A., Kachalkin A.V., Ivanova A.E. Biomass of fungi and species diversity of the cultivated mycobiota of soils and substrates in Northbrook island (Franz Josef land) // Mycology and Phytopathology. 2019. Vol. 53. No. 4. P. 210–222. (in Russian). https://doi.org/10.1134/S002636481904010X

Kholodov V.A., Ivanov V.A., Farkhodov Ju.R., Safronova N.A., Artemyeva Z.S., Jaroslavceva N.V. The optical characteristics of aggregates organic matter fractions in typical chernozems. Dokuchaev Soil Bulletin. 2017. No. 90. P. 56–72. (in Russian). https://doi.org/10.19047/0136-1694-2017-90-56-72

Kholodov V.A., Yaroslavtseva N.V., Farkhodov Y.R., Yashin M.A., Ivanov A.L., Lazarev V.I., Iliyn B.S., Philippova O.I., Volikov A.B. Optical Properties of the Extractable Organic Matter Fractions in Typical Chernozems of Long-Term Field Experiments. Eurasian Soil Science. 2020. Vol. 53. No. 6. P. 739–748. https://doi.org/10.1134/S1064229320060058

Kholodov V.A., Farkhodov Yu.R., Yaroslavtseva N.V., Danchenko N.N., Ilyin B.S., Lazarev V.I. Dissolved organic matter and microbial carbon of Protocalcic Chernozems of different land management. Dokuchaev Soil Bulletin. 2022. No. 112. P. 122–133. (in Russian). https://doi.org/10.19047/0136-1694-2022-112-122-133

Kholodov V. A., Rogova O. B., Lebedeva M. P., Varlamov E. B., Volkov D. S., Ziganshina A. R., Yaroslavtseva N. V. Organic matter and mineral matrix of soils: modern approaches, definitions of terms and methods of study (review). Dokuchaev Soil Bulletin. 2023. No. 117. P. 52–100. (in Russian). https://doi.org/10.19047/0136-1694-2023-117-52-100

Kholodov V.A., Yaroslavtseva N.V., Ziganshina A.R., Danchenko N.N., Farkhodov Y.R., Maksimovich S.V., Zhidkin A.P. Water-Extractable Organic Matter of Soils with Different Degrees of Erosion-Induced Degradation and Sedimenta-tion in a Small Catchment in the Central Forest-Steppe Part of the Central Russian Upland: Tilled Soils. Eurasian Soil Science. 2024a. Vol. 57. No. 6. P. 889–902. https://doi.org/10.1134/s1064229324600052

Kholodov V.A., Yaroslavtseva N.V., Ziganshina A.R., Danchenko N.N., Danilin I.V., Farkhodov Yu.R., Zhidkin A.P. Water-Extractable Organic Matter of the Soils with Different Degrees of Erosion and Sedimentation in a Small Catch-ment in the Central Forest-Steppe of the Central Russian Upland: Soil Sediments on the Dry Valley Bottom. Eurasian Soil Science. 2024б. Vol. 57. No. 7. P. 1097–1109. https://doi.org/10.1134/S1064229324600325

Chen L., Liu L., Qin S., Yang G., Fang K., Zhu B., Kuzyakov Y., Chen P., Xu Y., Yang Y. Regulation of priming effect by soil organic matter stability over a broad geographic scale. Nature Communications. 2019. Vol. 10. Article number 5112. https://doi.org/10.1038/s41467-019-13119-z

Coble P.G. Characterization of marine and terrestrial DOM in seawater using excitation-emission matrix spectroscopy. Marine Chemistry. 1996. Vol. 51. No. 4. P. 325–346. https://doi.org/10.1016/0304-4203(95)00062-3

Danilin I.V., Danchenko N.N., Ziganshina A.R., Farkhodov Yu. R., Yaroslavtseva N.V., Kholodov V.A. Divergent response of Chernozem organic matter towards short-term water stress in Poa pratensis L. rhizosphere and bulk soil in pot experiments: A spectroscopic study. Soil and Tillage Research. 2025. Vol. 245. P. 106285 https://doi.org/10.1016/j.still.2024.106285

de Troyer I., Amery F., Van Moorleghem C., Smolders E., Merckx R. Tracing the source and fate of dissolved organic matter in soil after incorporation of a 13C labelled residue: a batch incubation study. Soil Biology and Biochemistry. 2011. Vol. 43. No. 3. P. 513–519. https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2010.11.016

Fröberg M., Berggren D., Bergkvist B., Bryant C., Knicker H. Contributions of Oi, Oe and Oa horizons to dissolved organic matter in forest floor leachates. Geoderma. 2003. Vol. 113. No. 3–4. P. 311–322. https://doi.org/10.1016/S0016-7061(02)00367-1

Hagedorn F., Saurer M., Blaser P. A 13C tracer study to identify the origin of dissolved organic carbon in forested mineral soils. European Journal of Soil Science. 2004. Vol. 55. No. 1. P. 91–100. https://doi.org/10.1046/j.1365-2389.2003.00578.x

Helms J.R., Stubbins A., Ritchie J.D., Minor E.C., Kieber D.J., Mopper K. Absorption spectral slopes and slope ratios as indicators of molecular weight, source, and photobleaching of chromophoric dissolved organic matter. Limnology and Oceanography. 2008. Vol. 53. No. 3. P. 955–969. https://doi.org/10.4319/lo.2008

ISO 8245:1999 Water quality – Guidelines for the determination of total organic carbon (TOC) and dissolved organic carbon (DOC). https:/standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/6d1a2e37-7c6b-4be3-bf46248010a9c257/iso-8245-1999

Kalbitz K., Solinger S., Park J.H., Michalzik B., Matzner E. Controls on the dynamics of dissolved organic matter in soils: a review. Soil Science. 2000. Vol. 165. No. 4. P. 277–304.

Korshin G.V., Li C.-W., Benjamin M.M. Monitoring the properties of natural organic matter through UV spectroscopy: a consistent theory. Water Resources. 1997. Vol. 31. No. 7. P. 1787–1795. https://doi.org/10.1016/S0043-1354(97)00006-7

Mann P.J., Spencer R.G.M., Hernes P.J., Six J., Aiken G.R., Tank S.E., McClelland J.W., Butler K.D., Dyda R.Y., Holmes R.M. Pan-Arctic Trends in Terrestrial Dissolved Organic Matter from Optical Measurements. Frontiers in Earth Science. 2016. Vol. 4. P. 1–18. https://doi.org/10.3389/feart.2016.00025

McKnight D.M., Boyer E.W., Westerhoff P.K., Doran P.T., Kulbe T., Andersen D.T. Spectrofluorometric characterization of dissolved organic matter for indication of precursor organic material and aromaticity. Limnology and Oceanography. 2001. Vol. 46. No. 1. P. 38–48. https://doi.org/10.4319/lo.2001.46.1.0038

Murphy K.R., Stedmon C.A., Graeber D., Bro R. Fluorescence spectroscopy and multi-way techniques. PARAFAC. Analytical Methods. 2013. Vol. 5 (23). P. 6557–6566. https://doi.org/10.1039/C3AY41160E

Ohno T. Fluorescence Inner-Filtering Correction for Determining the Humification Index of Dissolved Organic Matter. Environmental Science & Technology. 2002. Vol. 36 (4). P. 742–746. https://doi.org/10.1021/es0155276

Peuravuori J., Pihlaja K. Molecular size distribution and spectroscopic properties of aquatic humic substances. Analytica Chimica Acta. 1997. Vol. 337. No. 2. P. 133–149. https://doi.org/10.1016/S0003-2670(96)00412-6

Pucher M., Wünsch U., Weigelhofer G., Murphy K., Hein T., Graeber D. staRdom: Versatile software for analyzing spectroscopic data of dissolved organic matter in R. Water (Switzerland). 2019. Vol. 11(11). P. 2366. https://doi.org/10.3390/ w11112366

Roper M.M., Gupta V., Murphy D. Tillage practices altered labile soil organic carbon and microbial function without affecting crop yields. Australian Journal of Soil Research. 2010. Vol. 48. No. 3. P. 274–285. https://doi.org/10.1071/SR09143

Seddaiu G., Pinna M.V., Agnelli A., Cappai C., Corti G., Demurtas C.E., Pulina A., Roggero P.P. Dynamics of soluble soil organic matter in Mediterranean maize-based forage system under organic and mineral fertilization. Catena. 2023. Vol. 220. Part B. P. 106730. https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106730

Sharpless C.M., Aeschbacher M., Page S.E., Wenk J., Sander M., McNeill K. Photooxidation-induced changes in optical, electrochemical, and photochemical properties of humic substances. Environmental science & technology. 2014. Vol. 48. No. 5. P. 2688–2696. https://doi.org/10.1021/es403925g

van Gaelen N., Verschoren V., Clymans W., Poesen J., Govers G., Vanderborght J., Diels J. Controls on dissolved organic carbon export through surface runoff from loamy agricultural soils. Geoderma. 2014. Vol. 226–227. P. 387–396. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.03.018

Vecchio del R., Blough N.V. On the origin of the optical properties of humic substances. Environmental science & technology. 2004. Vol. 38. No. 14. P. 3885–3891. https://doi.org/10.1021/es049912h

Yano Y., Lajtha K., Sollins P., Caldwell B.A. Chemistry and dynamics of dissolved organic matter in a temperate coniferous forest on andic soils: effects of litter quality. Ecosystems. 2005. Vol. 8. P. 286–300. https://doi.org/10.1007/s10021-005-0022-9

Zsolnay A., Görlitz H. Water extractable organic matter in arable soils: effects of drought and long-term fertilization // Soil Biology & Biochemistry. 1994. Vol. 26. No. 9. P. 1257–1261. https://doi.org/10.1016/0038-0717(94)90151-1

Received 03 March 2025
Accepted 23 April 2025
Published 29 April 2025

About the authors:

Vladimir A. Kholodov – Doctor of Science in Agricultuire, leading researcher and the head of Lab of Soil Organic matter and Biochemistry of V.V. Dokuchaev Soil Science Institute (Moscow, Russia); vkholod@mail.ru; https://orcid.org/0000-0002-6896-7897

Alia R. Ziganshina – Master of Ecology, junior researcher of Lab of Soil Organic matter and Biochemistry of V.V. Dokuchaev Soil Science Institute (Moscow, Russia); ziganshina_ar@esoil.ru; https://orcid.org/0000-0003-2769-5941

Natalia N. Danchenko – Doctor of Philosophy in Chemistry, senior researcher Lab of Soil Organic matter and Biochemistry of V.V. Dokuchaev Soil Science Institute (Moscow, Russia); nataly_danch@mail.ru; https://orcid.org/0000-0002-4358-4419

Dmitry A. Nikitin – Doctor of Philosophy in Biology, senior researcher of Soil Microbiology Laboratory of V.V. Dokuchaev Soil Science Institute (Moscow, Russia); dimnik90@mail.ru; https://orcid.org/0000-0003-1842-1754

Nadezhda V. Yaroslavtseva – Doctor of Philosophy in Biology, senior researcher of Lab of Soil Organic matter and Biochemistry of V.V. Dokuchaev Soil Science Institute (Moscow, Russia); nadezhdayros@gmail.com; https://orcid.org/0000-0002-5805-4285

Elizaveta M. Danilova-Danilyan – junior researcher of Microbiology Laboratory of V.V. Dokuchaev Soil Science Institute (Moscow, Russia); danilovadanilyanlm@mail.ru; https://orcid.org/0000-0003-1657-1396

Yulian R. Farkhodov – Doctor of Philosophy in Biology, researcher of Lab of Soil Organic matter and Biochemistry of V.V. Dokuchaev Soil Science Institute (Moscow, Russia); yulian.farkhodov@yandex.ru; https://orcid.org/0000-0002-0210-380X

The authors read and approved the final manuscript

The article is available under Creative Commons Attribution 4.0 License

УДК 631.417
https://doi.org/10.31251/pos.v8i1.307

Check for updates

Гумусообразование как процесс трансформации растительных остатков

© 2025 А. А. Комаров [1], О. С. Безуглова [2]

[1]*ФГБНУ «Агрофизический научно-исследовательский институт», Гражданский просп., д. 14, г. Санкт-Петербург, 195220, Россия. E-mail: Zelenydar@mail.ru*
[2]*ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет», ул. Большая Садовая, 105/42, г. Ростов-на-Дону, 344006, Россия. E-mail: lola314@mail.ru*

Цель исследования. *Подтвердить с помощью четких математических моделей специфичность гумусовых кислот, извлекаемых из разных субстратов различными экстрагентами.*
Методы. *В статье представлен анализ результатов применения классических методов выделения гумусовых кислот в процессе трансформации растительных остатков, оцененный с помощью математических моделей. Подобный синтез знаний биохимии органического вещества почв и математического моделирования позволил сформировать доказательную базу специфичности гумуса. Путем применения современного программного обеспечения OriginPro в качестве пакета инструментов для анализа данных и подготовки высококачественных визуализаций представлен анализ экспериментов по разложению исходных гумусообразователей – растительных остатков. Модельные исследования по гумификации растительных остатков (лиственной массы клевера) проводили в контролируемых условиях в дерново-подзолистой легкосуглинистой почве и в кварцевом песке. Для экстракции гумусовых веществ применяли дистиллированную воду и 0,1 М раствор пирофосфата натрия. Определение углерода гумуса проводили методом мокрого сжигания (по Тюрину) с титрометрическим окончанием. Фракционно-групповой состав гумуса определяли по методике И.В. Тюрина, модифицированной Л.Н. Александровой.*
Основные результаты. *Представлено экспериментальное доказательство специфичности гумусовых веществ, основанное на особенностях их извлечения из почвы с помощью различных экстрагентов и описываемое четкой математической моделью. Обсуждается вопрос о природе гумуса с позиций биохимии почв и анализа математических моделей трансформации растительных остатков в специфические соединения гумуса. Показано, что общим для процесса гумусообразования в почвенной и инертной средах является то, что динамика формирования гумусовых соединений в процессе трансформации органических остатков на ранних этапах хорошо аппроксимируется простым линейным трендом, причем накопление гуминовых кислот и фульвокислот в разных средах идет практически с одинаковой скоростью. В дальнейшем, по мере уменьшения массы органического субстрата, процесс трансформации переходит в стадию насыщения.*
Заключение. *На основании изучения процессов гумусообразования в инертной и почвенной средах экспериментально выявлена зависимость количества образующихся в процессе трансформации растительных остатков гумусовых кислот от минералогического (и химического) состава среды. Показано, что способ выделения гумусовых веществ с помощью различных экстрагентов из почвы и инертной среды (кварцевый песок) не только не опровергает самого существования специфических гумусовых соединений, а, наоборот, раскрывает особенности формирования их отдельных групп. При этом во всех случаях динамика формирования гумусовых соединений в процессе трансформации органических веществ хорошо аппроксимируется простой линейной моделью. Установлено, что на ранних этапах трансформации органического вещества скорость количественного возрастания гуминовых кислот и фульвокислот практически одинакова в разных средах.*

Ключевые слова: *гумус; гуминовые кислоты; фульвокислоты; дерново-подзолистая почва; кварцевый песок; растительные остатки; гумусообразование.*

Цитирование: *Комаров А.А., Безуглова О.С. Гумусообразование как процесс трансформации растительных остатков // Почвы и окружающая среда. 2025. Том 8. № 1. e307. DOI: 10.31251/pos.v8i1.307*

ВВЕДЕНИЕ

Дискуссии по проблемам гумуса не затихают с момента идентификации этого уникального природного вещества. Скорее всего, они не иссякнут до тех пор, пока будет продолжаться жизнь на планете, где гумус исполняет роль стабилизатора всех наземных экосистем. Это обоснованно, так как гумус является одним из самых сложных природных образований на Земле. Несмотря на прилагаемые усилия до сих пор еще не существует четких химических формул для гуминовых кислот (**ГК**), а все известные модели имеют гипотетический характер. Они позволяют в той или иной степени объяснить известные на сегодняшний день свойства гуминовых кислот, но не дают адекватного отображения их структуры, расположения атомов и атомных групп. Наибольшую известность получили схемы

строения ГК, изложенные в ряде работ (Касаточкин,1953; Мистерски, Логинов, 1959; Kleinhempel, 1970; Орлов, 1977, 1992; Orlov, 1992, 1995; Schnitzer, 1991; Stevenson, 1994; и др.), ставших классическими. Со временем пришло понимание, что предлагаемые схемы в значительной степени упрощают строение ГК, но представление о наличии в этих природных образованиях бензолполикарбоновых кислот и других ароматических компонентов, дополненных цепочными структурами боковых радикалов, как правило, неароматического строения, позволило продвинуться дальше в их познании.

Значительным шагом вперед стало понимание, что почвенный гумус представляет собой динамичную открытую диссипативную систему гумусовых веществ (**ГВ**), подчиняющуюся цикличности, которая периодически в одно и то же время приводит эту систему к вполне определенному, стабильному в данных условиях состоянию (Дергачева, 1984, 2021).

Алессандро Пикколо (Piccolo, 2001, 2002) отталкиваясь от положений и принципов организации соединений супрамолекулярной химии, разработанных Ж.-М. Леном (1998), экспериментально показал, что гуминовые кислоты состоят из низкомолекулярных органических соединений, связанных множественными нековалентными межмолекулярными связями, и имеют супрамолекулярную природу. Развитие этого направления в нашей стране с учетом имеющихся заделов в области супрамолекулярной химии представляется чрезвычайно актуальным (Вацадзе и др., 2022).

Идея об ассоциации самоорганизующихся гетерогенных и относительно небольших молекул, получающихся в результате деградации и разложения мертвого биологического материала, была своеобразно воспринята некоторыми учеными (Lehmann, Kleber, 2015). При этом они радикализировали взгляды на органическое вещество в почве, категорически отбрасывая само понятие «гуминовые вещества» и делая акцент на недоказанности их существования в силу изменения природных соединений процедурами выделения и проявления по этой причине их артефактной сущности. По мнению этих авторов органическое вещество почвы представляет собой континуум продуктов постепенного разложения органических соединений, вследствие чего оно состоит из сложной смеси идентифицируемых биополимеров и не является химически сложным гуминовым материалом с качественно новыми свойствами. Однако для таких кардинальных выводов необходимы более существенные доказательства, чем просто критика метода извлечения ГК из почвы. Как справедливо оценивает эту концепцию А. Пикколо (Piccolo, 2016), аналогичным образом можно отбросить характеристику биомолекул (например, ДНК) только потому, что для их исследования был применен особый вид экстракции. Вызывает возражение отказ этих авторов от понятия ***гумус***еще и потому, что их понимание почвенного органического вещества, как континуума постепенно разлагающихся органических соединений, не подкреплено научно обоснованным альтернативным объяснением химической природы и реакционной способности гуминовых кислот и не объясняет четко проявляющиеся в природе географические закономерности гумусообразования.

Накопленный к настоящему времени обширный массив данных, полученных разными авторами с использованием разнообразных методов, убеждает в обратном: почвенное органическое вещество представляет собой устойчивое в конкретных гидротермических и физико-химических условиях образование. Если бы это была простая смесь (континуум) продуктов постепенно разлагающегося органического опада, то результаты определений были бы непредсказуемыми, географические закономерности в их составе и свойствах было бы невозможно отследить. В действительности сейчас, когда научная мысль и инструментальные возможности вплотную подошли к измерению архитектурных характеристик гуминовых кислот, мы видим, что полученные с использованием электронной микроскопии и рентгеноструктурного анализа результаты сопоставимы.

Так, например, с помощью трансмиссионного электронного микроскопирования и рентгенографии (Baalousha et al., 2005), показано, что надмолекулярная структура гуминовой кислоты представляет собой фибриллы, образующиеся при соединении молекул диаметром около 20 нм, которые авторы называют основой с некоторыми изолированными крупными макромолекулами (30–200 нм). При этом авторы предупреждают, что возможные артефакты, появление которых не исключено при подготовке препаратов ГК к микроскопированию и рентгенографии, могут препятствовать значимости таких наблюдений.

Однако существуют методы идентификации специфических соединений гумуса, основанные на иных принципах, чем экстрагирование. Например, Г.Н. Федотов, С.А. Шоба (2015), также применившие в своих исследованиях электронное микроскопирование, установили наличие в почвах частиц органической природы размером 2–4 нм, которые представляют собой фульвокислоты, и частиц размером 8–12 нм, которые могут относиться, как к фульвокислотам, так и к гуминовым кислотам. В

этом исследовании особую ценность представляет тот факт, что его авторы работали с гелевыми пленками гуминовых веществ, собирающимися на поверхности воды при капиллярном увлажнении высушенных почвенных агрегатов. Иными словами, для выделения ГК авторы не применяли никаких химических обработок – ни жестких, ни мягких, позволяющих предполагать появление ГК в результате распада единой гумусовой матрицы под воздействием химических реагентов.

Применение рентгеноструктурного анализа позволило обнаружить наличие особой матричной структуры гуминовых кислот, включающей от двух до четырех слоев конденсированных систем ароматического типа, дополненных сетью цепочных фрагментов различной степени упорядоченности и протяженности (Bezuglova, 2019). Параметры этой структуры в различных по генезису почвах и в генетических горизонтах одной почвы различны. Однако межплоскостные расстояния фиксируются четко и лежат в пределах от 0,349 до 0,371 нм, а толщина пакета углеродных сеток тем больше, чем выше степень бензоидности гуминовых кислот. Протяженность такого пакета варьирует от 1,8 до 2,34 нм и эта величина вполне сопоставима с результатами, полученными методом электронного микроскопирования (Федотов, Шоба, 2015). Таким образом, на основании многочисленных экспериментальных данных можно считать убедительным факт существования специфических гуминовых кислот. Однако в приведенных выше результатах инструментальных исследований речь идет о надмолекулярной структуре ГК, а численного описания строения ГК количеством атомов в молекуле, числом и типами связей между ними до сих пор нет.

Оппонентами (Lehmann, Kleber, 2015) поставлены, но не разрешены вопросы по поводу влияния экстрагентов на природу почвенного гумуса. К тому же основным доводом в пользу понимания гуминовых веществ как континуума разлагающихся органических остатков, остается упрек в артефактной сущности этих извлекаемых из почв «более или менее темноокрашенных, азотсодержащих высокомолекулярных соединений» (Orlov, 1992, с. 189). Все это позволяет ряду ученых на протяжении многих лет снова и снова отрицать специфичность продуктов гумусообразования. Именно поэтому цель данной работы – подтвердить с помощью четких математических моделей специфичность гумусовых кислот, извлекаемых из разных субстратов различными экстрагентами.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве доказательной базы особенностей формирования специфических гумусовых веществ использовались материалы, полученные одним из авторов с применением разнообразных аналитических и инструментальных методов, на основе подходов, разработанных Л.Н. Александровой (1970, 1980), в ходе модельных экспериментов, в которых оценивались особенности влияния условий почвообразования на характер и скорость гумусообразования в почве и в инертной среде. Использовались верхний 0–20 см гумусовый горизонт (пахотный слой) дерново-подзолистой легкосуглинистой почвы / Umbric Albeluvisols (IUSS Working Group WRB, 2022) и инертный субстрат – кварцевый песок. Соотношение органической и минеральной частей в экспериментах было 1:10. В качестве органической массы (источников гумуса) вносились разнообразные растительные остатки: листья и корни клевера, хвоя и др. (Александрова, 1970). В данной работе описываются результаты, полученные при использовании в качестве растительных остатков лиственной массы клевера лугового (*Trifolium praténse*). Эксперимент проводили в течение 2-х лет в контролируемых аэробных условиях: температурный режим 22–25°С, условия увлажнения 60% от полной полевой влагоемкости. В ходе эксперимента определяли содержание углерода гумуса и его фракционно-групповой состав. Образцы отбирали на 3, 7, 17, 30 и 180 сутки, а также через 6, 12 и 24 месяца с начала эксперимента. Содержание углерода оценивалось при мокром озолении раствором бихромата калия в присутствии серной кислоты, избыток окислителя учитывали титрометрически с оксифенилантраниловой кислотой – метод Тюрина в модификации Симакова (Аринушкина, 1970). Образующиеся в процессе трансформации растительных остатков промежуточные продукты разложения и гумусовые вещества извлекались последовательно водой и 0,1 М раствором пирофосфата натрия с pH = 9,6. В каждой фракции гуминовые кислоты осаждались H_2SO_4 при pH = 1. Метод фракционирования, предложенный Л.Н. Александровой, представляет собой модификацию метода Тюрина. Он подробно описан в диссертации М.Ф. Люжина (1968). Таким образом, для извлечения гуминовых веществ применялись не только щелочные экстрагенты, но и вода.

Для анализа результатов экспериментов использовалось программное обеспечение OriginPro, версия 7,5 (www.originlab.com), широко практикуемое в научных кругах и государственных лабораториях по всему миру. К сожалению, этот инструментарий мало используется в отечественном

почвоведении. Базис исследований представлен в методическом руководстве В.Ф. Дричко, А.А. Изосимова (2011) и публикациях С.Е. Витковской (2015, 2016). В частности, анализ процессов, характеризующихся ростом и накоплением, проводится с построением модели роста с насыщением. Такая модель не предполагает ограничение функции (т.е. отсутствие насыщения) и неприменима, когда значение функции достигает «слишком большого значения». Примером модели может служить рост населения в определенный период времени до наступления насыщения. В данной работе использован такой же подход, но относительно прирастания содержания углерода гуминовых кислот ($С_{ГК}$) за единицу времени в процессе трансформации органического вещества. Если рассмотреть нарастание (изменение) показателя приращения, в нашем случае $С_{ГК}$, при трансформации исходных гумусообразователей за единицу времени, то здесь можно использовать показатель «удельной скорости роста…». Величина эта зависит от скорости клеточного деления и может служить для сравнения скоростей разных видов и сортов.

Динамику изменения оцениваемых показателей можно аппроксимировать линейной моделью. Так, в работе С.Е. Витковской (2015) приведена модель выноса элементов питания (калия, азота, фосфора и кальция), представленная в виде:

$$W(t) = Wo + bt, \text{ где}$$

W(t) – вынос элемента растениями на момент времени t;
Wo – вынос растениями 1-го отбора (начало процесса);
bt – скорость выноса элемента растениями, г/сут.

Эта модель аналогична представленной нами во всем, за исключением маркировки основного показателя:

$$C(t) = C_0 + bt, \text{ где}$$

C(t) – содержание $С_{ГК}$ в субстрате на момент времени t,
C_0 – содержание $С_{ГК}$ в субстрате в начальный период времени, мг/100 г,
bt – скорость возрастания содержания $С_{ГК}$ в субстрате, мг/100 г·сут.$^{-1}$.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Экспериментальные модели, доказывающие формирование гуминовых кислот и фульвокислот в процессе гумусообразования, представлены на рисунках 1 и 2, а их параметры – в таблицах 1 и 2.

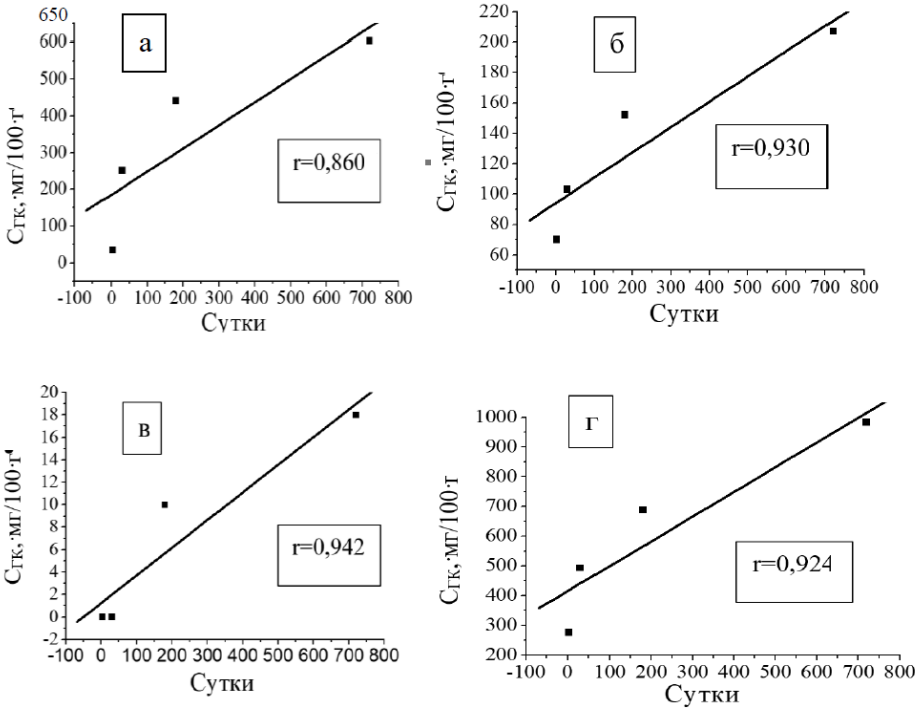


Рисунок 1. Содержание углерода гуминовых кислот в процессе трансформации органического вещества в зависимости от среды/экстрагента: а – песок/вода; б – песок/$Na_4P_20_7$; в – почва/вода; г – почва/$Na_4P_20_7$.

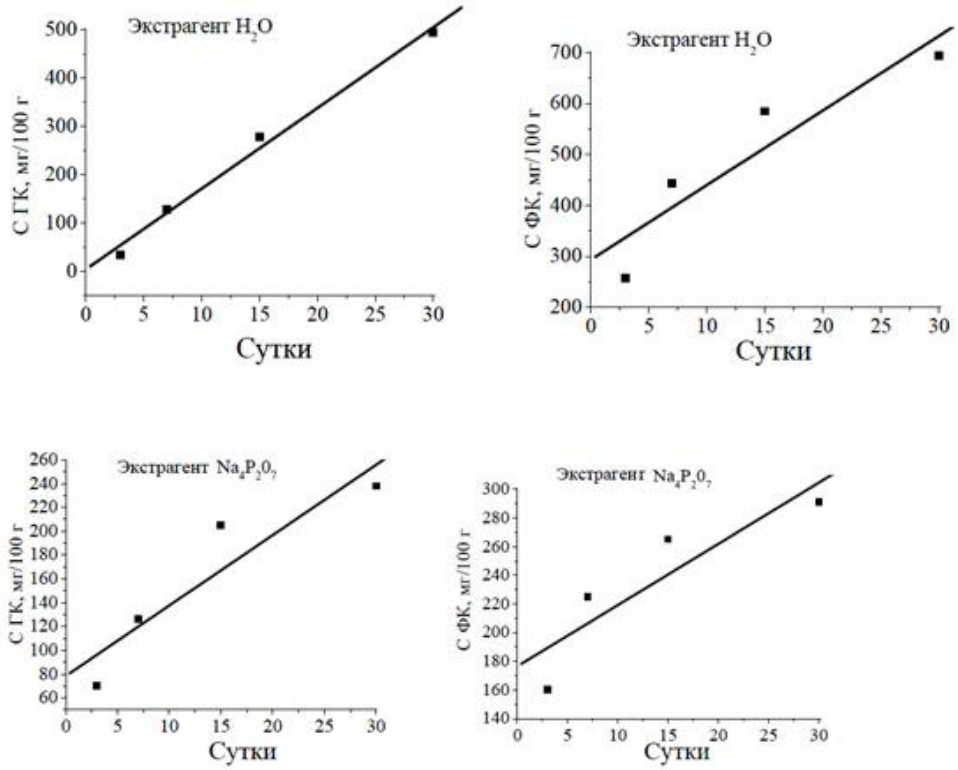


Рисунок 2. Динамика формирования гуминовых веществ (ГК и ФК) в инертном субстрате.

На рис. 1 показано, что трансформация растительных остатков клевера в почвенной среде и в инертном субстрате протекает неодинаково, однако проявляется единая направленность процесса – формирование специфических гумусовых веществ. Эти данные хорошо согласуются с литературными: в экспериментах по разложению растительной массы клевера в песке и в суглинке, из песка всегда извлекалось водорастворимого гумуса больше, чем из суглинистого субстрата (Мальцева, Пинский, 2022).

В рассматриваемом нами эксперименте с течением времени (от 3 до 720 суток) наблюдалось интенсивное накопление новообразованных гумусовых веществ, которое фиксировали по количеству ГК, извлекаемых разными экстрагентами – водой и раствором пирофосфата натрия. Особенно отчетливо этот процесс фиксируется на ранних стадиях инкубации (до 180 суток). В то же время интенсивность накопления ГК, описываемая стандартной моделью насыщения (табл. 1), со временем снижалась.

Таблица 1

Параметры модели номер 1, характеризующей возрастание содержания $C_{ГК}$, мг/100 г, в период 3–720 суток после закладки опыта

Параметры*	Среда/экстрагент			
	песок/вода	песок/$Na_4P_2O_7$	почва/вода	почва/ $Na_4P_2O_7$
R	0,860	0,930	0,942	0,924
C_0	185 ± 98	94 ± 17	1,26 ± 2,8	416 ± 90
bt	0,63 ± 0,26	0,17 ± 0,05	0,62 ± 0,006	0,84 ± 0,24

Примечание.

*R – коэффициент корреляции (накопления $C_{ГК}$ во времени); C_0 – содержание $C_{ГК}$ в субстрате в начальный период времени, мг/100 г; bt – скорость увеличения $C_{ГК}$ в субстрате, мг/100 г·сут.$^{-1}$. Представлены (здесь и в табл. 2) среднее значение и стандартное отклонение (M ± s).

Важно отметить следующее: в процессе трансформации органического вещества, как в инертной, так и в почвенной среде наблюдалось накопление специфических гумусовых веществ – гуминовых кислот, которые извлекались как щелочными, так и водными экстрагентами. Причем, как видно на рис. 1, водой экстрагировалось значительно большее их количество из песка (до 603 мг $C_{ГК}$ на 100 г сухого вещества), чем из почвы – всего 18 мг $C_{ГК}$.

Проведя оценку представленных результатов с помощью математических моделей, можно выделить особенности трансформационных преобразований органического вещества в специфические гуминовые соединения. На начальных этапах трансформации органического вещества динамика экстракции ГК хорошо аппроксимируется линейным трендом (рис. 1) и формулой:

$$C(t)= C_0 + bt,$$

где C(t) – содержание $C_{ГК}$ в субстрате на момент времени t, C_0 – содержание $C_{ГК}$ в субстрате в начальный период времени, мг/100 г, bt – скорость возрастания содержания $C_{ГК}$ в субстрате, мг/100 г·сут.$^{-1}$.

Известно, что трансформация растительных остатков в гумус во времени чаще описывается нелинейными моделями, охватывающими сложные режимы поведения биокосных систем за пределами равновесия (Бондаренко и др., 1985; Ионенко и др., 1986; Полуэктов и др., 1980; Моделирование динамики …, 2001).

Логика использования линейной функции обусловлена целесообразностью с максимально возможной простотой продемонстрировать изменение исходного органического материала в специфические соединения гумуса – гуминовые кислоты, где приращение функции (процесс гумификации) всегда пропорционально приращению аргумента (нарастанию содержания ГК). Для этой цели и были выбраны модели с различными временными интервалами, позволяющими получить значимые функции с высоким уровнем достоверности (рис. 1 и 2). Последнее с математической достоверностью доказывает особенность формирования специфических гумусовых веществ – гуминовых кислот – из исходного органического субстрата. При этом для исходного состояния гумифицирующегося материала вполне возможно употребить термин «континуум». Это очевидно, поскольку исходными гумусообразователями могут быть разнообразные по своему составу остатки растений (корни, листья, стебли и т.д.), а также органические и органо-минеральные субстраты на основе растительных остатков, представляющие собой, по сути, неоднородную смесь различных органических компонентов. Здесь важно выделить не то, какие по разнообразию компоненты присутствуют в «континууме», а то, что их объединяет, что в них общего. Общим для всех по разнообразию наземных растительных остатков является наличие в них сополимеризованных фенольных фрагментов, входящих в скелетную структуру лигнина, в том числе даже его негидролизуемых соединений (Комаров, 2003, 2006; Ковалев, 2016; Komarov, 2005).

Скорость накопления гуминовых кислот при использовании различных растворителей является важным показателем особенностей гумусообразования в разных субстратах. Так, скорость накопления ГК в песке и в почве при экстрагировании их водой была практически одинаковой: 0,62–0,63 мг/100 г·сут.$^{-1}$ (рис. 1 а, в). Однако при экстракции пирофосфатом натрия скорости накопления ГК в песке и почве существенно различались: от 0,17 мг/100 г·сут.$^{-1}$ в песке до 0,84 мг/100 г·сут.$^{-1}$ в почве (рис. 1 б, г).

Таким образом, экстракция гуминовых кислот, как щелочным агентом, позволяющим извлечь из субстрата с большей сорбционной емкостью (легкосуглинистая почва) большее количество ГК, чем из песка, так и дистиллированной водой, неспособной кардинально изменять нативную суть гумуса и в силу этого экстрагирующей одинаковое количество ГК из разных субстратов, доказывает специфическую природу гумуса и его действующего начала – гуминовых кислот. А сам метод фракционирования гумуса на группы и фракции по отношению к растворителям и по силе связи с минеральной частью почвы, предложенный И.В. Тюриным (1937), в различных его модификациях (Пономарева, Плотникова (1968), Кононова, Бельчикова (1968), Александрова (1970) и др.) до сих пор не утратил как экологического основания, так и значения для фундаментальных исследований в химии и биохимии почв.

Сложность выделения и идентификации ГК из почв состоит в том, что это не инертный, а постоянно изменяющийся неоднородный по химическому, физическому, биологическому и иному составу природный компонент. Поэтому выделенные из почвы с помощью различных реагентов гумусовые компоненты (под которыми в данном случае мы имеем в виду гуминовые кислоты и фульвокислоты) не имеют четко заданного состава и в каждый конкретный момент действительно отличаются от изначального состояния. Кроме того, гумусовые вещества, образовавшиеся в почве, постоянно трансформируются в почвенной среде, вступая во взаимодействие с минеральной частью почвы, различными промежуточными продуктами минерализации растительных и животных остатков,

образуя разнообразные органоминеральные производные. Эксперименты показали, что из почвы дистиллированной водой ГК в значимых количествах начинают извлекаться только на 180 сутки (всего 10 мг С), в то время как пирофосфатом натрия к этому времени их извлекается почти в 70 раз больше (рис. 1 в, г). Из инертного песчаного субстрата, напротив, вода извлекает значительно больше ГК, чем щелочной экстрагент. Все это указывает не только на специфику извлечения ГК с помощью различных реагентов из разных сред, но и на особенность их взаимодействия с минеральной основой почвы, в ходе которого формируются органоминеральные комплексы и происходит закрепление гумусовых кислот почвенной минеральной матрицей.

Поскольку новообразованные гумусовые вещества формируются уже на ранних стадиях процесса гумусообразования, в тех же условиях модельных лабораторных опытов при оптимальной влажности и температуре на 3, 7, 17 и 30 день оценивалась динамика их накопления в почвенной среде (дерново-подзолистая легкосуглинистая почва) и инертной среде (кварцевый песок). В качестве исходного гумусообразователя использовалась наземная масса клевера. Установлено, что при инкубации растительных остатков в инертной среде дистиллированной водой извлекалось значительно больше как гуминовых кислот, так и фульвокислот, чем при экстракции их пирофосфатом натрия (рис. 2, табл. 2). Данный факт Л.Н. Александрова (1970) объясняла тем, что при гумификации растительных остатков в песке новообразованные гумусовые кислоты длительное время остаются растворимыми в воде и после экстракции легко разделяются при действии кислоты на осаждаемую ($С_{ГК}$) и неосаждаемую ($С_{ФК}$) группы. Этот опыт показывает, что при гумификации растительных остатков уже на начальных стадиях процесса также образуются специфические гумусовые вещества, включая как гуминовые кислоты, так и фульвокислоты, извлекаемые, как 0,1 М раствором пирофосфата натрия, так и водой.

Таблица 2

Параметры модели 2, характеризующей возрастание содержания гуминовых кислот и фульвокислот, мг/100 г в период 3–30 суток после закладки опыта

Параметры*	ГВ/экстрагент			
	ГК/вода	ФК/вода	ГК/ $Na_4P_20_7$	ФК/ $Na_4P_20_7$
R	0,995	0,925	0,926	0,892
C_0	4 ± 19	293 ± 73	78 ± 29	176 ± 26
bt	17 ± 1	15 ± 4	6 ± 2	4 ± 2

Примечание.

*R – коэффициент корреляции (накопления $С_{ГК}$ и $С_{ФК}$ во времени); C_0 – содержание $С_{ГК}$ или $С_{фК}$ в субстрате в начальный период времени, мг/100 г; bt – скорость возрастания содержания $С_{ГК}$ или $С_{фК}$ в субстрате, мг/100 г·сут.$^{-1}$.

Модель, описывающая процесс трансформации органического вещества в инертном субстрате (рис. 2), демонстрирует особенность накопления фракций гуминовых кислот и фульвокислот. Причем, скорость накопления как гуминовых кислот, так и фульвокислот при извлечении их водой примерно одинакова и составляла 17 и 15 мг/100 г·сут.$^{-1}$. Показательно, что при извлечении гумусовых веществ с помощью $Na_4P_2O_7$ скорость накопления ГК составила всего 6 мг/100 г·сут.$^{-1}$, а ФК – 4 мг/100 г·сут.$^{-1}$, что было значительно (в 4 раза) меньше, чем при извлечении их водой.

При трансформации растительных остатков в почве и извлечении образующихся соединений водой практически не извлекаются гуминовые кислоты, однако хорошо извлекаются фульвокислоты. В то же время щелочная вытяжка способствует большему извлечению гуминовых кислот, а не фульвокислот (табл. 2, рис. 2). Отсюда следуют особенности формирования гумусовых соединений из органических остатков: в системе гумусовых кислот со временем появляются фракции, легко осаждающиеся при взаимодействии с обменным кальцием и переходящие в раствор только в виде гуматов натрия. По этому поводу Л.Н. Александрова (1970, с. 73) отмечала: «Если гумификация развивается в массе суглинка, богатого обменным кальцием, некоторая часть гумусовых кислот теряет растворимость в воде, но легко экстрагируется 0,1 М раствором $Na_4P_2O_7$».

Другая часть кислот образует растворимые в воде соли и в силу этого легко экстрагируется водой. Таким образом, способ выделения гумусовых веществ с помощью различных экстрагентов из почвенной среды не только не опровергает самого существования специфических гумусовых соединений, а, наоборот, раскрывает особенности вычленения их отдельных фракций. Так, один из

путей образования фульвокислот в почве – постепенное отщепление их от новообразованных гуминовых кислот, имеющих в силу своей "незрелости" еще очень неустойчивые молекулы, легко подвергающиеся частичной деструкции при взаимодействии с минеральной частью почвы.

ОБСУЖДЕНИЕ

Рассуждая об особенностях формирования специфических соединений гумуса И.В. Перминова (2008) с позиций химии поясняет, что применительно к гуминовым веществам «исчезает понятие молекулы – мы можем говорить только о молекулярном ансамбле, каждый параметр которого описывается распределением». Однако по образному выражению И.В. Перминовой, этот «хаос только кажущийся», ибо «диапазон вариаций атомных отношений основных составляющих элементов (C, H, O и N) не столь уж широк. При этом он отчетливо зависит от источника происхождения гуминовых веществ» (Перминова, 2008, с. 52). Максимальное содержание кислорода и кислородсодержащих функциональных групп наблюдается в веществах, полученных в процессе окислительно-гидролитических трансформации из воды; дальше их содержание снижается в ряду: «вода – почва – торф – уголь». В обратной последовательности увеличивается содержание ароматического углерода. По сути, ГВ являются широко распространенными в окружающей среде «самоорганизующимися природными полиэлектролитами» (Perminova, 2013, с. 735) – таково мнение химика.

Попробуем рассмотреть этот вопрос с позиций почвоведа. С одной стороны, гумус – это специфический продукт почвы, обеспечивающий её плодородие. Так, Л.Н. Александрова (1980) считала, что гумус формируется только в почве и не образуется под слоем воды (сапропель), в процессе торфообразования, углефикации и в ходе иных не почвенных процессов. Однако дальнейшие исследования показали, что гуминовые вещества широко распространены в природе, а особенности их состава и свойств позволили предположить, что они образуются также в торфах, бурых углях, сапропеле и других естественных объектах (Орлов, 1977; Попов, 2004; Перминова, 2008). Даже у почвоведов есть разные точки зрения, не говоря о позициях химиков, физиологов, растениеводов и представителей других наук. Действительно, процесс гумификации настолько сложен, что современная наука не выработала единых взглядов на его характер. Существуют несколько концепций, объясняющих образование гумуса, однако все они основываются на том, что гуминовые вещества – специфическое природное соединение.

Напомним, что в соответствии с конденсационной и полимеризационной концепциями формирование специфических ГВ рассматривается в процессе постепенной поликонденсации и полимеризации промежуточных продуктов разложения органических веществ, образующихся при первоначальной деструкции попадающих в почву органических остатков до простых мономеров (Кононова, 1963; Flaig, 1965; Kononova, 1966).

Иных взглядов на формирование гумуса придерживались И.В. Тюрин и Л.Н. Александрова, а также их ученики. Ими развивалась концепция последовательного биохимического окисления высокомолекулярных продуктов разложения органических остатков (прежде всего лигнина) в специфические гумусовые вещества. Концепция получила экспериментальное подтверждение в работе А.А. Комарова (2005). Изучение в течение пяти лет специфики формирования гумусовых веществ, образующихся в процессе многолетней трансформации органогенного субстрата (компоста на основе торфа), показало, что органическое вещество субстрата проходит три стадии трансформации: гидролиз органических продуктов → начальная трансформация → гумификация лигниновых структур (Bezuglova et al., 2022). На третьей стадии, начиная с 3 года наблюдений, отмечено резкое изменение в соотношении трех главных групп гумуса в пользу гуминовых кислот за счет уменьшения количества не до конца гумифицировавшихся на предыдущих этапах лигниновых структур, составлявших основную массу негидролизуемого остатка. В полном соответствии с термодинамической теорией гумификации (Orlov, 1995) система стремится к своему динамично стабильному состоянию, происходит сополимеризация ароматических структур, уплотнение ядра гумусовых веществ, и постепенное "созревание" гумуса. В данном эксперименте разложение органического субстрата (листовой массы клевера) продолжалось только два года, но скорость трансформации была заметно выше и уже на начальных стадиях процесса были выявлены специфические гумусовые вещества, включая как гуминовые кислоты, так и фульвокислоты, извлекаемые как 0.1 М раствором пирофосфата натрия, так и водой.

Есть и другие гипотезы формирования гумуса, например, биологические концепции гумусообразования (В.Р. Вильямс, Ф.Ю. Гельцер, Д.Г. Звягинцев и др.), которые рассматривают ГВ как продукты жизнедеятельности микроорганизмов. Однако они не имеют до сих пор

экспериментального подтверждения, прежде всего потому, что основа ароматического ядра гумуса – сополимеризованные фенолы – могут быть продуктами лишь растений, формирующих особые растительные полимеры на основе лигнина.

Вероятно, данная работа, как и исследования, проведенные авторами привлеченных публикационных материалов, не поставят окончательную точку в дискутируемой теме. Вместе с тем, разностороннее обсуждение проблемы гумусообразования как с позиций супрамолекулярной химии, так и с привлечением классических методов исследований и математического моделирования всегда будет актуальным.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании изучения процессов гумусообразования в инертной и почвенной средах экспериментально выявлена зависимость количества образующихся в процессе трансформации растительных остатков гумусовых кислот от минералогического (и химического) состава среды. В инертной среде формирующаяся система гумусовых веществ характеризуется высокой растворимостью в воде и после экстракции легко расчленяется при действии кислоты на осаждаемую ($С_{ГК}$) и не осаждаемую ($С_{ФК}$) части. В системе гумусовых веществ, образующихся в почве, часть кислот связывается с минеральной матрицей и, прежде всего, кальцием, теряя способность к растворению в воде, но извлекается из почвы щелочной экстракцией. Таким образом, способ выделения гумусовых веществ с помощью различных экстрагентов из почвенной среды не только не опровергает самого существования специфических гумусовых соединений, а, наоборот, раскрывает особенности выделения их отдельных групп. При этом общим является то, что динамика формирования гумусовых соединений в процессе трансформации органического вещества хорошо аппроксимируется простой линейной моделью. Установлено, что на ранних этапах трансформации органического вещества скорость возрастания содержания гуминовых кислот и фульвокислот практически одинакова в разных средах.

ЛИТЕРАТУРА

Александрова Л.Н. Гумусовые вещества почвы (их образование, состав, свойства и значение в почвообразовании и плодородии) // Записки Ленинградского сельскохозяйственного института. Ленинград, Пушкин, 1970. Том 142. С. 142–234.

Александрова Л.Н. Органическое вещество почвы и процессы его трансформации. Ленинград, 1980. 287 с.

Аринушкина Е.В. Руководство по химическому анализу почв. Москва: МГУ, 1970. 244 с.

Бондаренко Н.Ф., Журавлев О.С., Швытов И.А. Моделирование трансформации органических веществ в почвах // Моделирование биогеоценотических процессов. Москва: Наука, 1985. С.136–141.

Вацадзе С.З., Максимов А.Л. Бухтияров В.И. Супрамолекулярные эффекты и системы в катализе. Обзор // Доклады Российской академии наук. Химия, науки о материалах. 2022. Том 502. С. 3–31. https://doi.org/10.31857/S2686953522010101

Витковская С.Е. Закономерности динамики выноса питательных веществ растениями ячменя в полевом опыте // Агрохимия. 2015. № 5. С. 38–45.

Витковская С.Е. Распределение макро- и микроэлементов системе почва – растение в зависимости от видовых особенностей вики (*ViciaSativa*) и овса (*AvenaSativa*) //Агрохимия. 2016. № 1. С. 27–37.

Дергачева М.И. Органическое вещество почв: статика и динамика (на примере Западной Сибири). Новосибирск, 1984. 152 с.

Дергачева М.И. Традиции и новаторство в Учении о гумусе почв // Почвы и окружающая среда. 2021. Том 4. № 4. e172. https://doi.org/10.31251/pos.v4i4.172

Дричко В.Ф., Изосимова А.А. Методика определения удельных скоростей роста растений и выноса ими химических элементов из почвы. Методические рекомендации. Санкт-Петербург: АФИ, 2011. 24 с.

Ионенко В.И., Бацула А.А., Головачев Е.А. О кинетике процесса гумификации // Почвоведение. 1986. № 2. С. 25–33.

Касаточкин В.И. О строении карбонизованных веществ // Известия АН СССР. Отдел технических наук. 1953. № 10. С. 1401–1406.

Ковалев И.В. Биохимия лигнина в почвах: Диссертация … д. с.-х. наук. Москва: Почвенный институт им. В.В. Докучаева, 2016. 398 с.

Комаров А.А. Особенность минерализации гидролизного лигнина в условиях различных фитоценозов // Агрохимия. 2003. № 12. С. 5–13.

Комаров А.А. Моделирование процесса трансформации гидролизного лигнина и выделение лигно-гуминовых кислот // Почвоведение. 2005. № 6. С. 664–671.

Комаров А.А. Экспериментальное подтверждение справедливости гипотезы гумификации Л.Н. Александровой путем модельных экспериментов // Материалы Всероссийской научной конференции, посвященной 100-летию кафедры почвоведения имени Л.Н. Александровой, 2006. С. 54–55.

Кононова М.М. Органическое вещество почвы. Москва: Изд-во АН СССР, 1963. 314 с.

Кононова М.М., Бельчикова Н.П. Ускоренные методы определения состава гумуса минеральных почв // Почвоведение. 1961. № 10. С. 75–87.

Лен Ж.-М. Супрамолекулярная химия. Концепции и перспективы. Новосибирск: Наука, Сиб. отд. РАН, 1998. 333 с. (Перевод с английского: Lehn J.-M. Supramolecular Chemistry. Concepts and Perspectives. Weinheim, 1995).

Люжин М.Ф. Минерализация и гумификация растительных остатков в почве: Автореферат диссертации … канд. с.-х. наук. Ленинград-Пушкин, 1968. 24 с.

Мальцева А.Н. Пинский Д.Л. Влияние минеральной среды на динамику органического вещества в процессе разложения растительных остатков в модельном эксперименте // Экология родного края: проблемы и пути их решения. Материалы XVII Всероссийской научно-практической конференции с международным участием Книга 1. Киров, 2022. С. 399–402.

Мистерски В., Логинов В. Исследование некоторых физико-химических свойств гуминовых кислот // Почвоведение. 1959. № 2. С. С. 39–51.

Моделирование динамики органического вещества почв / А.В. Смагин, Н.Б. Садовникова, М.В. Смагина и др. Москва: Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова Издательский Дом (типография), 2001. 120 с.

Орлов Д.С. Кинетическая теория гумификации и схема вероятного строения гуминовых кислот // Научные доклады Высшей школы. Биологические науки. 1977. № 9. С. 5–16.

Орлов Д.С. Химия почв. Москва: Изд-во Моск. ун-та, 1992. 401 с.

Перминова И.В. Гуминовые вещества – вызов химикам XXI века // Химия и жизнь. 2008. № 1. С.50–55.

Полуэктов Р.А., Пых Ю.А., Швытов А.А. Динамические модели экологических систем. Ленинград: Гидрометеоиздат, 1980. 288 с.

Пономарева В.В. Плотникова И.А. Методика и некоторые результаты фракционирования гумуса черноземов // Почвоведение. 1968. № 11. С. 104–117.

Тюрин И.В. Органическое вещество и его роль в почвообразовании и плодородии. Москва, Ленинград: Сельхозгиз, 1937. 287 с.

Федотов Г.Н., Шоба С.А. О природе гумусовых веществ // Почвоведение. 2015. № 12. С. 1424–1432. https://doi.org/10.7868/S0032180X15120060

Baalousha M., Motelica-Heino M., Galaup S., Le Coustumer P. Supramolecular structure of humic acids by TEM with improved sample preparation and staining // Microscopy Research and Technique. 2005. Vol. 66. No. 6. P. 299–306. https://doi.org/10.1002/jemt.20173

Bezuglova O., Komarov A., Komarov A. Identification of humic substances on the transformation of an organic substrate // Eurasian Journal of Soil Science. 2022. Vol. 11. No. 1. P. 10–16. https://doi.org/10.18393/EJSS.974224

Bezuglova O. Molecular structure of humus acids in soils // Journal of Plant Nutrition and Soil Science. 2019. Vol. 182. No. 4. P. 676–682. https://doi.org/10.1002/jpln.201900043

IUSS Working Group WRB. World Reference Base for Soil Resources. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. 4th edition. International Union of Soil Sciences (IUSS), Vienna, Austria, 2022. 236 p.

Flaig W. Effect of lignin degradation products on plant growth // Isotopes and radiation in soil plant nutrition studies. Intern. atomicenergyagency. Vienna, 1965. P. 3–19.

Kleinhempel D. Ein Beitrag zur Theorie des Huminstoffzustandes // Archives of Agronomy and Soil Science. 1970. Vol. 14. No. 1. P. 3–14. https://doi.org/10.1080/03650347009412655

Kononova M.M. Soil Organic Matter. Its Nature, Its Role in Soil Formation and in Soil Fertility. 2nd Edition. Published by Pergamon Press, 1966. 544 p. https://doi.org/10.1016/C2013-0-05430-8

Lehmann J., Kleber M. The contentious nature of soil organic matter // Nature. 2015. Vol. 528. P. 60–68. https://doi.org/10.1038/nature16069

Orlov D.S. Soil Chemistry. Oxford & IBH Publishing Co. Pvt. Ltd. 1992. 390 p.

Orlov D.S. Humic Substances of Soils and General Theory of Humifiction. Oxford & IBH Publishing Co. Pvt. Ltd. 1995. 323 p.

Perminova I.V. Humic substances-assisted synthesis of nanoparticles in nature and in the lab. Conference paper: Functions of Natural Organic Matter in Changing Environment. J. Xu, J. Wu, Y. He (eds.): Springer, Dordrecht, 2013. P. 735–740. https://doi.org/10.1007/978-94-007-5634-2_133

Piccolo A. The supramolecular structure of humic substances // Soil Science. 2001. Vol. 166. No. 11. P. 810–832.

Piccolo A. The supramolecular structure of humic substances. A novel understanding of humus chemistry and implications in soil science // Advances in Agronomy. 2002. Vol. 75. P. 57–134. https://doi.org/10.1016/S0065-2113(02)75003-7

Piccolo A. In memoriam Prof. F.J. Stevenson and the Question of humic substances in soil // Chemical and Biological Technologies in Agriculture. 2016. Vol. 3. Article number 23. https://doi.org/10.1186/s40538-016-0076-2

Schnitzer M. Soil organic matter – the next 75 years // Soil Science. 1991. Vol. 151(1). P. 41–58.

Stevenson F.J. Humus Chemistry: Genesis, Composition, Reactions. Wiley-Inter-Science, New York, 1994. 438 p.

Поступила в редакцию 27.03.2025
Принята 22.04.2025
Опубликована 07.05.2025

Сведения об авторах:

Комаров Андрей Алексеевич – доктор сельско-хозяйственных наук, главный научный сотрудник, ФГБНУ «Агрофизический научно-исследовательский институт», зав. сектором агромониторинга (г. Санкт-Петербург, Россия); Zelenydar@mail.ru; http://orcid.org/0000-0003-1430-0509.

Безуглова Ольга Степановна – доктор биологических наук, профессор, профессор кафедры почвоведения и оценки земельных ресурсов ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет» (г. Ростов-на-Дону, Россия); lola314@mail.ru; https://orcid.org/ 0000-0003-4180-4008

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Статья доступна по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License

Humus formation as a process of plant residues transformation

© 2025 A. A. Komarov [1], O. S. Bezuglova [2]

[1]Agrophysical Research Institute, Grazhdanskiy pr., 14, Saint-Petersburg, Russia. E-mail: Zelenydar@mail.ru

[2]Southern Federal University, Bolshaya Sadovaya Str., 105/42, Rostov-on-Don, Russia. E-mail: lola314@mail.ru

The study aims *to confirm the specificity of humic acids extracted from various substrates with different extractants, by applying mathematical models.*

Methods*. The article analyses some classical methods used for isolating humic acids during the plant residues transformation; the methods were assessed by mathematical modeling. Such interdisciplinary approach, i.e. combining soil organic matter biochemistry and mathematical modeling, helped establishing an evidence base for humus specificity. Using up-to-date OriginPro software for data analysis and high-quality visualization, the study analyzes earlier published results of the experiments investigating the decomposition of plant residues as primary humus precursors. Model experiments examining the humification of plant residues (clover leaf biomass) were conducted under controlled conditions in sod-podzolic light loamy soil and quartz sand. Humic substances were extracted using distilled water and 0.1 M sodium pyrophosphate solution. Humus carbon content was determined by the wet combustion method with titrimetric determination.*

Results. *The study provided experimental evidence of humic substances specificity, based on the differences in their extraction from soils by various extractants, and modeled mathematically. The nature of humus is discussed*

from the perspectives of soil biochemistry and mathematical modeling of plant residue transformation into specific humic compounds. It was shown that, in both soil and inert media, the early-stage dynamics of humic compound formation was well approximated by a simple linear trend. Moreover, the accumulation rates of humic and fulvic acids were nearly identical across environments. As the mass of the organic substrate decreased, the transformation process transitioned to a saturation phase.

Conclusions. *Experimental data revealed that the amount of humic acids formed during plant residues transformation depended on the mineralogical and chemical composition of the medium. It was demonstrated that using different extractants to extract humic substances from soil and inert media (quartz sand) not only supported the notion of the existence of specific humic compounds, but also highlights the distinct formation pathways of their individual groups. Notably, there was revealed a shared feature across environments, i.e. that the humic compounds formation during organic matter transformation was well approximated by a simple linear model. It was found that at early transformation stages the rates of increase in humic and fulvic acid content were almost identical in both soil and inert media.*

Keywords: *humus; humic acids; fulvic acids; sod-podzolic soil; quartz sand; plant residues; humus formation.*

How to cite: *Komarov A.A., Bezuglova O.S. Humus formation as a process of plant residues transformation. The Journal of Soils and Environment. 2025. 8(1). e307. DOI: 10.31251/pos.v8i1.307 (in Russian with English abstract).*

REFERENCES

Aleksandrova L.N. Humic substances of the soil (their formation, composition, properties and significance in soil formation and fertility). Notes of the Leningrad Agricultural Institute. Leningrad, Pushkin, 1970. Vol. 142. P. 142–234. (in Russian).

Aleksandrova L.N. Soil organic matter and its transformation processes. Leningrad, 1980. 287 p. (in Russian).

Arinushkina E.V. Handbook of chemical analysis of soils. Moscow: Moscow State University, 1970. 244 p. (in Russian).

Bondarenko N.F., Zhuravlev O.S., Shvytov I.A. Modeling the transformation of organic matter in soils. In book: Modeling of biogeocenotic processes. Moscow: Nauka Publ., 1985. P. 136–141. (in Russian).

Vatsadze S.Z., Maximov A.L., Bukhtiyarov V.I. Supramolecular effects and systems in catalysis. Doklady Chemistry. 2022. Vol. 502. No. 1. P. 1–27. https://doi.org/10.1134/S0012500822010013

Vitkovskaya S.E. Dynamic laws of the nutrient removal by barley plants in the field experiment. Agrohimiya. 2015. No. 5. P. 38–45. (in Russian).

Vitkovskaya S.E. The distribution of macro- and microelements in soil-plant system according specific features of vetch (*Vicia Sativa*) and oats (*Avena Sativa*). Agrohimiya. 2016. No. 1. P. 27–37. (in Russian).

Dergacheva M.I. Soil organic matter: statics and dynamics (using Western Siberia as an example). Novosibirsk, 1984. 152 p. (in Russian).

Dergacheva M.I. Traditions and innovation in the Doctrine of soil humus. The Journal of Soils and Environment. 2021. Vol. 4. No. 4. e172. (in Russian). https://doi.org/10.31251/pos.v4i4.172

Drichko V.F., Izosimova A.A. Methodology for determining specific plant growth rates and their removal of chemical elements from the soil. Methodical recommendations. St. Petersburg: AFI, 2011. 24 p. (in Russian).

Ionenko V.I., Batsula A.A., Golovachev E.A. On the kinetics of the humification process. Pochvovedenie. 1986. No. 2. P. 25–33. (in Russian).

Kasatochkin V.I. On the structure of carbonized substances. Izvestiya AN SSSR. Department of Technical Sciences. 1953. No. 10. P. 1401–1406. (in Russian).

Kovalev I.V. Biochemistry of lignin in soils: Dissertation … Dr. of Agricultural Sci. Moscow: Dokuchaev Soil Institute, 2016. 398 p. (in Russian).

Komarov A.A. Mineralization of hydrolytic lignin in different agroecological conditions. Agrohimiya. 2003. No. 12. P. 5–13. (in Russian).

Komarov A.A. Simulation of hydrolytic lignin transformation and the isolation of lignohumic acids. Eurasian Soil Science. 2005. Vol. 38. No. 6. P. 586–592.

Komarov A.A. Experimental confirmation of the validity of L.N. Alexandrova's humification hypothesis by model experiments. Proceedings of the All-Russian scientific conf. dedicated to the 100th anniversary of the L.N. Alexandrova Soil Science Department, 2006. P. 54–55. (in Russian).

Kononova M.M. Soil organic matter. Moscow: Publishing House of the USSR Academy of Sciences, 1963. 314 p. (in Russian).

Kononova M.M., Belchikova N.P. Accelerated methods for determining the humus composition of mineral soils. Pochvovedenie. 1961. No. 10. P. 75–87. (in Russian).

Lehn J.-M. Supramolecular Chemistry. Concepts and Perspectives. Novosibirsk: Nauka Publ., Siberian Enterprise of the Russian Academy of Sciences, 1998. 334 p. (Translated from English: Lehn J.-M. Supramolecular Chemistry. Concepts and Perspectives. Weinheim, 1995).

Lyuzhin M.F. Mineralization and humification of plant residues in the soil: Abstract of Dissertation … Cand. of Agricultural Sci. Leningrad-Pushkin, 1968. 24 p. (in Russian).

Maltseva A.N. Pinsky D.L. Influence of the mineral environment on the dynamics of organic matter during the decomposition of plant residues in a model experiment. In book: Ecology of the native land: problems and ways to solve them. Proceedings of the XVII All-Russian scientific and practical conference with international participation Book 1. Kirov, 2022. P. 399–402. (in Russian).

Mistersky V., Loginov V. The study of some physical and chemical properties of humic acids. Pochvovedenie. 1959. No. 2. P. 39–51. (in Russian).

Modeling of the dynamics of organic matter in soils / AV., N.B. Sadovnikova, M.V. Smagina et al. Moscow: Moscow State University Press, 2001. 120 p. (in Russian).

Orlov D.S. Kinetic theory of humification and a scheme of the probable structure of humic acids. Nauchnyye Doklady Vysshey Shkoly. Biologicheskiye Nauki. 1977. No. 9. P. 5–16. (in Russian).

Orlov D.S. Soil chemistry. Moscow: Publishing house of Moscow University, 1992. 401 p. (in Russian).

Perminova I.V. Humic substances – a challenge to chemists of the 21st century. Khimiya i zhizn'. 2008. No. 1. P. 50–55. (in Russian).

Poluektov R.A., Pykh Yu.A., Shvytov A.A. Dynamic models of ecological systems. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1980. 288 p. (in Russian).

Ponomareva V.V., Plotnikova I.A. Methodology and some results of fractionation of humus of chernozems. Pochvovedenie. 1968. No. 11. P. 104–117. (in Russian).

Tyurin I.V. Organic matter and its role in soil formation and fertility. Moscow, Leningrad: Selkhozgiz Publ., 1937. 287 p. (in Russian).

Fedotov G.N., Shoba S.A. On the nature of humic substances. Eurasian Soil Science. 2015. Vol. 48. No. 12. P. 1292–1299. https://doi.org/10.1134/S1064229315120066

Baalousha M., Motelica-Heino M., Galaup S., Le Coustumer P. Supramolecular structure of humic acids by TEM with improved sample preparation and staining. Microscopy Research and Technique. 2005. Vol. 66. No. 6. P. 299–306. https://doi.org/10.1002/jemt.20173

Bezuglova O., Komarov A., Komarov A. Identification of humic substances on the transformation of an organic substrate. Eurasian Journal of Soil Science. 2022. Vol. 11. No. 1. P. 10–16. https://doi.org/10.18393/EJSS.974224

Bezuglova O. Molecular structure of humus acids in soils. Journal of Plant Nutrition and Soil Science. 2019. Vol. 182. No. 4. P. 676–682. https://doi.org/10.1002/jpln.201900043

IUSS Working Group WRB. World Reference Base for Soil Resources. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. 4th edition. International Union of Soil Sciences (IUSS), Vienna, Austria, 2022. 236 p.

FlaigW. Effect of lignin degradation products on plant growth. Isotopes and radiation in soil plant nutrition studies. Intern. atomicenergyagency. Vienna, 1965. P. 3–19.

Kleinhempel D. Ein Beitrag zur Theorie des Huminstoffzustandes. Archives of Agronomy and Soil Science. 1970. Vol. 14. No. 1. P. 3–14. https://doi.org/10.1080/03650347009412655

Kononova M.M. Soil Organic Matter. Its Nature, Its Role in Soil Formation and in Soil Fertility. 2nd Edition. Published by Pergamon Press, 1966. 544 p. https://doi.org/10.1016/C2013-0-05430-8

Lehmann J., Kleber M. The contentious nature of soil organic matter. Nature. 2015. Vol. 528. P. 60–68. https://doi.org/10.1038/nature16069

Orlov D.S. Soil Chemistry. Oxford & IBH Publishing Co. Pvt. Ltd. 1992. 390 p.

Orlov D.S. Humic Substances of Soils and General Theory of Humifiction. Oxford & IBH Publishing Co. Pvt. Ltd. 1995. 323 p.

Perminova I.V. Humic substances-assisted synthesis of nanoparticles in nature and in the lab. Conference paper: Functions of Natural Organic Matter in Changing Environment. J. Xu, J. Wu, Y. He (eds.): Springer, Dordrecht, 2013. P. 735–740. https://doi.org/10.1007/978-94-007-5634-2_133

Piccolo A. In memoriam Prof. F.J. Stevenson and the Question of humic substances in soil. Chemical and Biological Technologies in Agriculture. 2016. Vol. 3. Article number 23. https://doi.org/10.1186/s40538-016-0076-2

Piccolo A. The supramolecular structure of humic substances. Soil Science. 2001. Vol. 166. No. 11. P. 810–832.

Piccolo A. The supramolecular structure of humic substances. A novel understanding of humus chemistry and implications in soil science. Advances in Agronomy. 2002. Vol. 75. P. 57–134. https://doi.org/10.1016/S0065-2113(02)75003-7

Schnitzer M. Soil organic matter – the next 75 years. Soil Science. 1991. Vol. 151(1). P. 41–58.

Stevenson F.J. Humus Chemistry: Genesis, Composition, Reactions. Wiley-Inter-Science, New York, 1994. 438 p.

Received 27 March 2025
Accepted 22 April 2025
Published 07 May 2025

About the authors:

Andrey A. Komarov – Doctor of Agricultural Sciences, Chief Researcher, Agrophysical Research Institute, Head of Agricultural Monitoring Sector (St. Petersburg, Russia); Zelenydar@mail.ru; http://orcid.org/0000-0003-1430-0509.

Olga S. Bezuglova – Doctor of Biological Sciences, Professor, Professor of the Department of Soil Science and Land Resources Assessment of the Laboratory of Agrochemistry, Southern Federal University (Rostov-on-Don, Russia); lola314@mail.ru; https://orcid.org/ 0000-0003-4180-4008.

The authors read and approved the final manuscript

The article is available under Creative Commons Attribution 4.0 License

УДК 631.4
https://doi.org/10.31251/pos.v8i1.306

Check for updates

Микроморфологическое строение органической и минеральной части тундровых почв дельты реки Лены

© 2025 В. И. Поляков , Е. В. Абакумов

ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет», 16-ая линия ВО, д. 29, Санкт-Петербург, 199178, Россия. E-mail: slavon6985@gmail.com; e_abakumov@mail.ru

Цель исследования. *Определить особенности микроморфологического строения тундровых почв дельты реки Лены и формирования в них устойчивых органоминеральных агрегатов.*
Место и время проведения. *Остров Самойловский и молодой остров Ивовый, дельта реки Лены, Якутия, Россия. Полевые работы проводились в летний полевой сезон 2021 года.*
Методы. *В работе использовались общепринятые методы микроморфологического анализа почв; определение минералов осуществлялось на поляризационном микроскопе Leica DM750P; расчет органоминеральных агрегатов производился в программном комплексе ImageJ ver. 1.54m.*
Основные результаты. *Выявлены основные закономерности влияния криогенеза и деятельности реки на формирование почв на ее первой террасе. На микроморфологическом уровне установлено, что почвы, подверженные влиянию реки, характеризуются наличием крупных органоминеральных агрегатов, состоящих из тонкодисперсного органического материала, кварца, слюды, а также неразложившихся растительных остатков. Формирование органоминеральных агрегатов в почвах высокой поймы Лены обусловлено активными процессами гумификации растительных остатков и слабым влиянием криогенеза. Почвы, формирующиеся вне влияния реки на первой террасе, характеризуются наличием большого количества неразложившихся растительных остатков, что указывает на слабые процессы трансформации органического вещества. В условиях деградации полигональных структур, отмечаются активные процессы криогенного массообмена, которые приводят к разрушению органоминеральной матрицы почв и высвобождению органического вещества из мерзлого состояния. Оценка физической стабилизации почвенного органического вещества показала, что деградация полигональных структур может привести к сокращению стабильного пула углерода в почвах за счет активного проявления криогенных процессов, тем самым увеличивая потенциальный лабильный пул углерода, который может быть подвержен биодеградации.*
Заключение. *В результате действия речных и криогенных процессов в дельте реки Лены отмечена существенная трансформация почв, которая связана с особенностями накопления органических веществ и формирования почвенной органоминеральной матрицы. Анализ состава почв на уровне их микростроения показал, что в находящихся под активным влиянием реки почвах происходит формирование органоминеральных агрегатов, несмотря на низкую степень проработанности почвенного материала. В почвах, неподверженных ежегодному затоплению, в результате действия термокарстовых процессов отмечается высвобождение почвенного органического вещества, что увеличивает риск его биодеградации. Деградация мерзлоты и полигональных структур обусловливает уязвимость криогенных почв к потере углерода в условиях изменения климата.*

Ключевые слова: *органоминеральные агрегаты; минеральная матрица почвы; стабилизация органического вещества; почвы дельты Лены; Якутия; Арктика.*

Цитирование: *Поляков В.И., Абакумов Е.В. Микроморфологическое строение органической и минеральной части тундровых почв дельты реки Лены // Почвы и окружающая среда. 2025. Том 8. № 1. e306. DOI: 10.31251/pos.v8i1.306*

ВВЕДЕНИЕ

Высокоширотная Арктика подвержена более активному изменению климата по отношению к низким широтам (Schuur et al., 2015; Post et al., 2019; Szymański et al., 2022). Это выражается в таянии льда, деградации многолетнемерзлых пород (ММП) (Overland, Wang, 2013), более высокой продуктивности растений, а также изменении трофических цепей (Национальный доклад …, 2024; Sanders et al., 2022). Арктические почвы представляют собой крупнейшее хранилище углерода на планете; его формирование и высвобождение в существенной степени определяется климатом (Tarnocai et al., 2009). По различным оценкам в почвах Арктики на глубине до 3 метров находится от 1000 до 1300 Пг почвенного органического вещества (ПОВ) и 40–67 Пг азота (Hugelius et al., 2020; Mishra et al., 2021). Формирование почв в Арктике происходит под влиянием низких температур, короткого вегетационного периода, а также низкой биологической активности (Jílková et al., 2021). В

связи с этим происходит активное накопление грубых форм гумуса в почве и их дальнейшая консервация под действием низких температур (Dao et al., 2018). На сегодняшний день арктические почвы в большей степени являются секвестратором углерода, однако в результате изменения климата накопленное здесь органическое вещество может быть подвержено активной биодеградации, внося существенный вклад в изменение климата на планете (Loisel et al., 2014). Согласно одной из гипотез, почвы могут секвестрировать лишь определенный объем углерода (Six et al., 2002); данный показатель зависит от гранулометрического состава, содержания агрегатов различного размера, плотности почвы (Baldock, Skjemstad, 2000; Kleber et al., 2015). При достижении определенного уровня насыщения почвы углеродом, его дальнейшее поступление в почву вместе с растительными остатками не будет приводит к его увеличению (Six et al., 2002). В условиях увеличения продуктивности наземных экосистем Арктики существуют риски, что в уже насыщенную углеродом почву будет попадать существенное количество растительного опада, который, не накапливаясь в почве, будет подвержен минерализации с образованием климатически-активных газов (Natali et al., 2019; Plaza et al., 2019). Существует большое количество работ, посвященных изучению содержания и запасов углерода, однако до сих пор имеется небольшое количество данных в отношении качества и устойчивости ПОВ к биодеградации в Арктике (Polyakov et al., 2023a). Так, одним из методов оценки физической устойчивости (стабилизации) ПОВ является анализ содержания и размеров почвенных агрегатов (Семенов и др., 2020), которые отличаются по форме и размеру, а также содержанию ПОВ. Принято различать микроагрегаты (<250 мкм) и макроагрегаты (250-2000 мкм), а также мегаагрегаты (>2000 мкм) (Oades, Waters, 1991; Sarker et al., 2018); данные новообразования имеют различную степень устойчивости. Считается, что микроагрегаты являются более устойчивыми новообразованиями по отношению к макроагрегатам и мегаагрегатам, что обусловлено меньшей доступностью органического вещества для микроорганизмов, а также наличием различных ферментов (Семенов и др., 2020; Szymański et al., 2022). Оценка физической стабилизации ПОВ, основанная на расчете строения почвенных агрегатов, относительно широко применяется для изучения пахотных почв, что обусловлено деградацией земель и высвобождением биогенных элементов (Singh, Benbi, 2021; Islam et al., 2022). В Арктике более распространен метод анализа молекулярной стабилизации органического вещества. Так, по данным различных авторов, было установлено, что ПОВ из-за действия криогенеза характеризуется относительно гетерогенным молекулярным составом гуминовых кислот и, соответственно, различной устойчивостью к биодеградации (Василевич и др., 2019; Лодыгин, Василевич, 2021; Polyakov et al., 2023b). Устойчивость ПОВ зависит от температуры почвы, воздуха, биогенных элементов, микробной активности, молекулярного состава и минералогического состава почв (Dai et al., 2002; Szymański, 2017). Минералогический состав почв играет важную роль в стабилизации ПОВ, поскольку вторичные минералы, оксиды железа, алюминия и марганца участвуют в формировании устойчивых органоминеральных агрегатов, которые являются труднодоступными для почвенных микроорганизмов (Szymański et al., 2022).

В этой связи, целью нашей работы являлось определение особенностей микроморфологического строения тундровых почв дельты реки Лены и формирования в них устойчивых органоминеральных агрегатов. Для достижения данной цели были поставлены следующие задачи: 1 – определить особенности формирования и микростроения почв, развивающихся под активным влиянием реки, и почв не подвергающихся периодическому затоплению; 2 – оценить степень физической стабилизации органического вещества изученных почв.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Район исследования. Объектом исследования являлись почвы первой террасы дельты реки Лены, которая является крупнейшей северной речной дельтой в мире, расположенной в арктическом регионе с площадью около 30 000 км^2. Она находится в зоне с арктическим континентальным климатом. Климатические характеристики приведены по наблюдениям с полярных метеостанций Тикси, Столб и Усть-Оленек (Boike et al., 2019). Среднегодовая температура воздуха составляет −13 °C, средняя температура в январе понижается до −32 °C, а средняя температура в июле составляет +6,5 °C. Годовое количество осадков – 190 мм. Большая часть территории характеризуется наличием верхней границы многолетнемерзлых пород (**ММП**) на глубине от 20 см до 1 м. В дельте реки Лены преобладает мохово-лишайниковая растительность: моховые сообщества доминируют на суглинистых, а лишайниковые – на грубоскелетных почвах. Фитоценоз на исследованных территориях характеризуется комплексным строением; так, на открытых территориях представлены

мохово-лишайниковые сообщества, которые сменяются осоково-лишайниковыми сообществами вблизи озер. Район исследования показан на рисунке 1.

Рисунок 1. Район исследования. Дельта реки Лены.

Исследования проводились: 1) на первой террасе дельты реки Лены (о. Самойловский), данный участок может подвергаться затоплению раз в несколько десятков лет во время весеннего половодья; 2) на высокой пойме реки (о. Ивовый), данная территория подвергается периодическому затоплению во время весеннего половодья (табл. 1). Территория первой террасы характеризуется плоским рельефом с небольшими возвышенностями и сложена песчаными аллювиальными отложениями. Участки, которые длительное время развиваются под действием термокарстовых процессов, характеризуются развитием полигонального рельефа (рис. 2). Размер полигонов составляет несколько метров в поперечном сечении.

Таблица 1

Описание исследованных почв на островах Самойловский и Ивовый

№	Горизонт	Глубина, см	Описание	Координаты, ландшафт	Название почвы
S1-7	O	0-6	Моховая подстилка.	72°22’18.2” с.ш. 126°29’18.1” в.д. Не затапливаемая выровненная поверхность, о. Самойловский	Торфяно-криозем на аллювиальных отложениях / Histic Cryosol
	T	6-27	Грубый органический материал, присутствуют горизонтально расположенные линзы минерального материала толщиной менее 1 см, присутствуют охристые пленки на поверхности минералов.		
	CR	27-35	Серый, бесструктурный, массивный, супесчаный, включение органических остатков в виде отдельных		

			пятен, а также вихревого рисунка, заполняется водой.		
Si1	AY	0-20	Серый, суглинистый, присутствуют горизонтально расположенные линзы песка, комковатая структура, массивный.	72°30’51.3” с.ш. 126°31’34.7” в.д. Выровненная поверхность молодого острова, о. Ивовый.	Серогумусовая на аллювиальных песках / Umbric Cryosol (Fluvic)
	C	20-45	Светло серый песок, горизонтально расположенные линзы суглинистого материала более темного цвета		
VAL P1	O	0-10	Моховая подстилка.	72°23’08.0” с.ш. 126°29’04.1” в.д. Валиковый полигон, о. Самойловский	Криозем грубогумусовый на аллювиальных отложениях / Histic Cryosol
	AO	10-20	Темно-коричневый, супесчаный, бесструктурный, массивный, включение неразложившихся органических остатков в виде пятен.		
	CR	20-37	Серый, бесструктурный, включения железистых конкреций в виде отдельных пятен.		
VG1	0-10	O	Моховая подстилка.	72°22’23.6” с.ш. 126°31’22.6” в.д. Вогнутый полигон, о. Самойловский	Криозем на аллювиальных отложениях / Turbic Cryosol
	10-26	CR	Серый, супесчаный, бесструктурный, массивный, включения неразложившихся растительных остатков в виде в виде отдельных пятен, а также вихревого рисунка.		
VP1	O	0-2	Моховая подстилка.	72°22’01.7” с.ш. 126°29’17.9” в.д. Выпуклый полигон, о. Самойловский	Криозем грубогумусовый на аллювиальных отложениях / Histic Cryosol
	AO	2-20	Темно-коричневый, супесчаный, бесструктурный, массивный, включение неразложившихся органических остатков в виде отдельных пятен.		
	CR	20-45	Серый, супесчаный, бесструктурный, включения неразложившихся растительных остатков в виде отдельных пятен, а также вихревого рисунка.		
ZP2	O	0-3	Моховая подстилка.	72°23’16.2” с.ш. 126°29’27.8” в.д. Зарождающийся полигон, о. Самойловский	Торфяно-криозем на аллювиальных отложениях / Histic Cryosol
	T	3-11	Грубый органический материал, включения горизонтально расположенных линз песка толщиной менее 1 см.		
	CR	11-20	Серый, бесструктурный, массивный, легкий суглинок, присутствуют охристые пленки на поверхности минералов.		
	C	20-75	Светлый песок, бесструктурный, горизонтально расположенные линзы суглинистого материала, заливается водой с 75 см.		

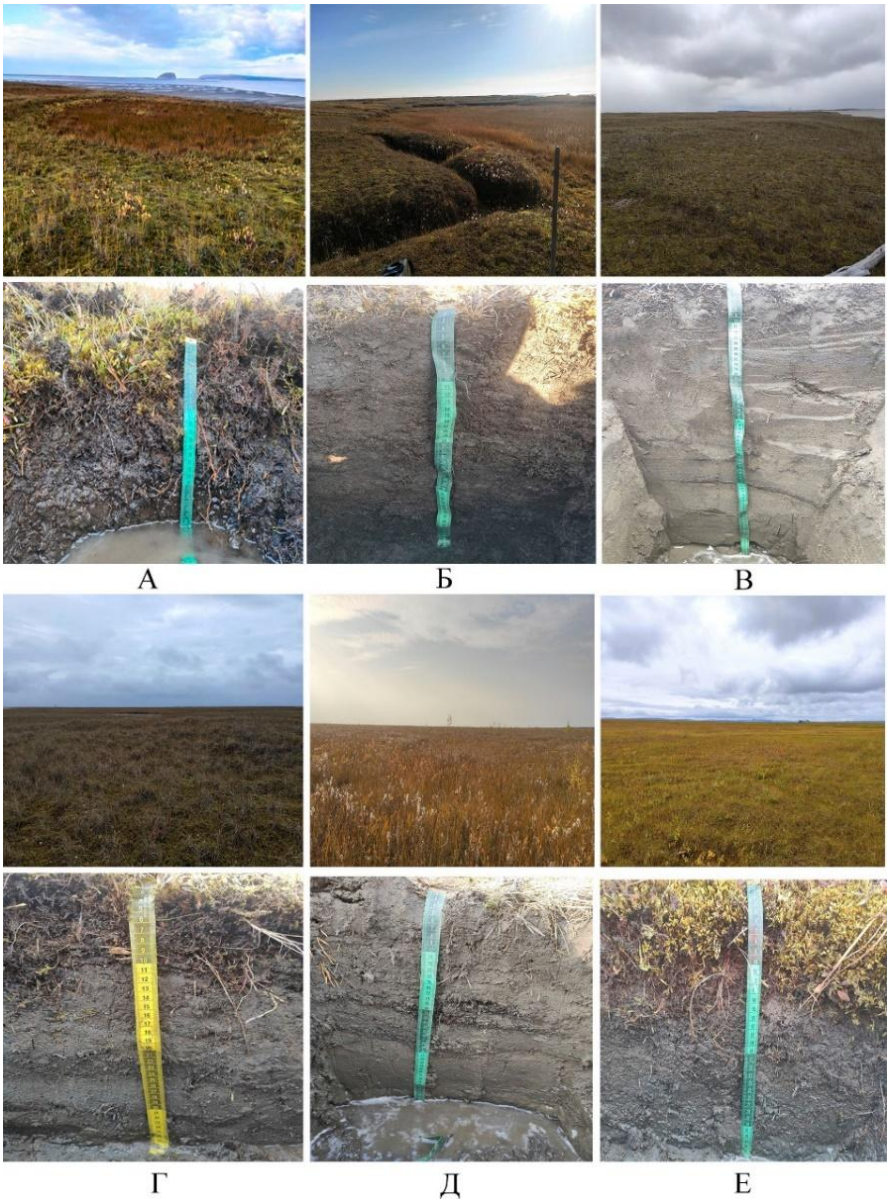


Рисунок 2. Исследованные почвы: А – криозем на аллювиальных отложениях (VG1); Б – криозем грубогумусовый на аллювиальных отложениях (VP1); В – торфяно-криозем на аллювиальных отложениях (ZP2); Г – торфяно-криозем на аллювиальных отложениях (VALP1); Д – серогумусовая на аллювиальных песках (Si1); Е – торфяно-криозем на аллювиальных отложениях (S1-7). Индексы почв соответствуют индексам, представленным в таблице 1, где приведено описание исследованных почв.

Стратегия отбора образцов почв. Отбор почв осуществлялся из верхних органоминеральных горизонтов, где происходят наиболее активные процессы гумификации органического вещества. Выбор почв на острове Самойловский осуществлялся на различных стадиях формирования полигональной тундры, а именно: на зарождающихся полигонах, которые характеризуются отсутствием валиков по бокам полигона и плоской поверхностью; вогнутых полигонах, которые отличаются наличием валиков по бокам полигона и выраженным днищем, заполненным водой; валиковых полигонах с широким валиковым пространством вокруг полигональных ванн; выпуклых полигонах, представляющих собой конечную стадию деградации полигональных структур и характеризующихся отсутствием понижения в центре полигона (Kartoziia, 2019).

Почвенный температурный режим. Среднегодовая температура активного слоя почв составляет –8,4°С, данный слой наиболее подвержен процессам промерзания-оттаивания. Так, в течение года температура активного слоя может изменяться в пределах от +20°С до –35°С. Промерзание почвы начинается в сентябре, а оттаивание – в середине мая.

Лабораторные методы. Шлифы для микроморфологического анализа были получены из почвенных микромонолитов, отобранных в полевых условиях. Образцы высушивали и пропитывали эпоксидной смолой. Полученные шлифы анализировали на поляризационном микроскопе (Leica DM750P, Германия) с программным обеспечением LAS 4.9 в параллельных и скрещенных николях. Площадь шлифов составляет 500 мм^2. Содержание агрегатов в шлифах анализировали с помощью программного обеспечения ImageJ 1.54g (National Institutes of Health, США). Для создания цифровой копии полноразмерного шлифа, съемка производилась при увеличении 2.5х в параллельных николях, для каждого шлифа было подготовлено около 50 снимков, которые в дальнейшем были объединены. При помощи программы Photoshop CS 6 (Adobe Inc., США) снимки объединялись, а изображение сглаживались путем подбора контрастности и удаления артефактов, получаемых при съемке (неравномерное распределение света по краям снимков). В программном обеспечении ImageJ 1.54g был установлен масштаб, изображение было переведено в бинарную форму, что необходимо для точного расчета агрегатов, убраны шумы, в виде мелких объектов, а также заполнены полости внутри агрегатов, занятые минералами. После этого был произведен расчет всех агрегатов в почвенных шлифах, которые были разделены на микроагрегаты и макроагрегаты. Терминология, используемая в данной работе, была опубликована М.И. Герасимовой с соавторами (2011) и G. Stoops (2020), подробно описавших микроструктуру почвы.

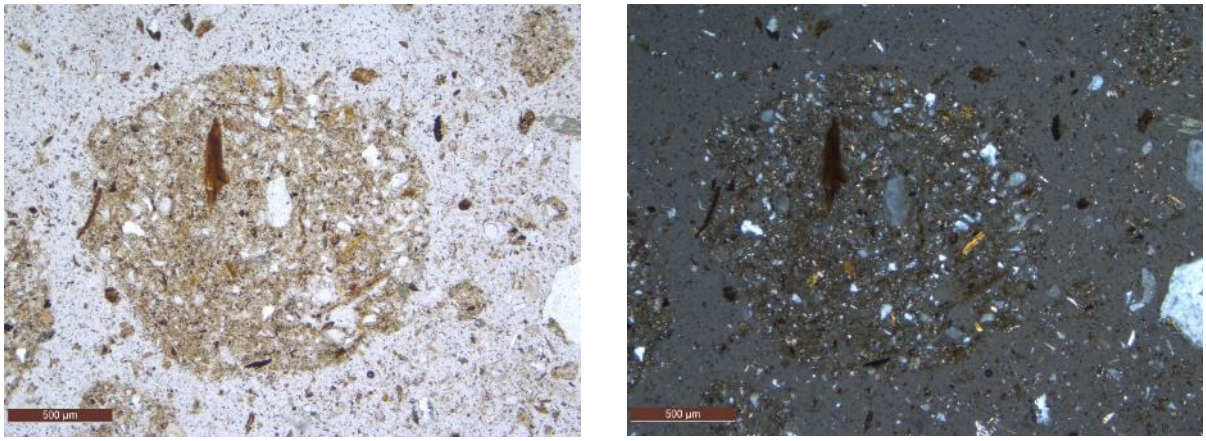
РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Влияние криогенеза на формирование почв различных геоморфологических элементов дельты реки Лены. Развитие почв и пространственную организацию почвенного покрова в дельтах рек в значительной степени определяют процессы накопления аллювия, формирования дельтового рельефа, а также деградация криогенных форм рельефа. В дельте реки Лены принято выделять три геоморфологические террасы, которые развивались в период от позднего плейстоцена до наших дней. Формирование наиболее молодых почв (Si1) связано с активным накоплением гумуса в верхних гумусоаккумулятивных горизонтах, периодическим затоплением и привносом биогенных элементов рекой в почву. Здесь формируются травяно-кустарниковые растительные сообщества с преобладанием осоки и ивы. В данных почвах не отмечается активное проявление криогенных процессов, таких как криогенный массообмен, морозное пучение, растрескивание, что обусловлено отепляющим воздействием реки. Верхняя граница мерзлоты наблюдается с 50 см. На территориях, вышедших из зоны активного речного влияния, отмечается трансформация почв под действием криогенеза, а также сукцессия растительных сообществ в сторону зональных вариантов. В результате сукцессии отмечается смена растительных сообществ на мохово-лишайниковые. Низкая биологическая активность приводит к формированию торфяных горизонтов, которые подстилаются криогенными горизонтами CR. Образование мохово-лишайникового покрова и торфяного горизонта в почвах приводит к формированию специфического температурного режима почв, при котором происходит поднятие верхней границы мерзлоты до 20–30 см. В почвах отмечается развитие криогенных процессов, выраженных в криогенном массообмене. Длительное воздействие криогенеза приводит к формированию полигональной тундры, которая в настоящее время подвергается деградации из-за отепляющего влияния реки. Река Лена оказывает существенное влияние на деградацию ММП, что выражается в береговой термоабразии, а также развитии термокарстовых процессов. В ходе влияния термокарстовых процессов происходит деградация полигональной тундры и трансформация мерзлотных почв, которая отражается как в морфологических, так и микроморфологических изменениях.

Микроморфологичекая структура исследованных почв. Активное влияние реки приводит к накоплению существенного количества аллювиального материала, который вовлекается в процесс почвообразования. Шлиф почвы, формирующейся в зоне активного затопления на высокой пойме, представлен на рисунке 3.

В результате анализа шлифов было отмечено, что микростроение почвенной массы, формирующейся в зоне затопления, характеризуется наличием зерен кварца, слюды, неразложившихся органических остатков, органоминеральных агрегатов, состоящих из кварца, слюды, органических веществ и глинистой плазмы. Зерна кварца имеют признаки окатанности, что обусловлено активным влиянием реки. Органоминеральные агрегаты имеют округло-блоковую и комковатую форму с инкорпорированными растительными остатками различной степени трансформации. Различная степень трансформации обусловлена как привносом свежих растительных остатков рекой, с растительным опадом, так и трансформацией растительных остатков в результате

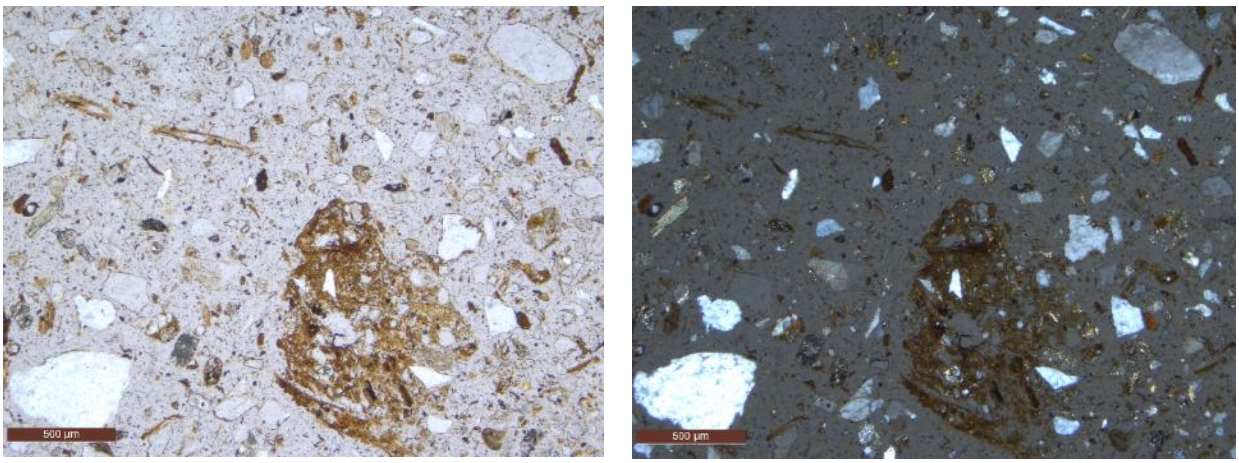
процессов гумификации. В почвенных шлифах не отмечается наличие железоорганических пленок на поверхности минералов. Наличие крупных зерен кварца указывает на периодический привнос свежих аллювиальных отложений.



А Б

Рисунок 3. Микроморфологическое строение горизонта AY серогумусовой почвы на аллювиальных песках (Si1) в параллельных (А) и скрещенных (Б) николях. На рисунке изображен коагуляционный агрегат округлой формы.

Почвы, вышедшие из зоны активного речного влияния на первой террасе, характеризуются более длительным развитием по отношению к почвам, формирующимся на высокой пойме. Шлифы почв, формирующихся вне зоны затопления, представлены на рисунках 4–5. Почвы характеризуются более длительными процессами почвообразования и влияния криогенеза.

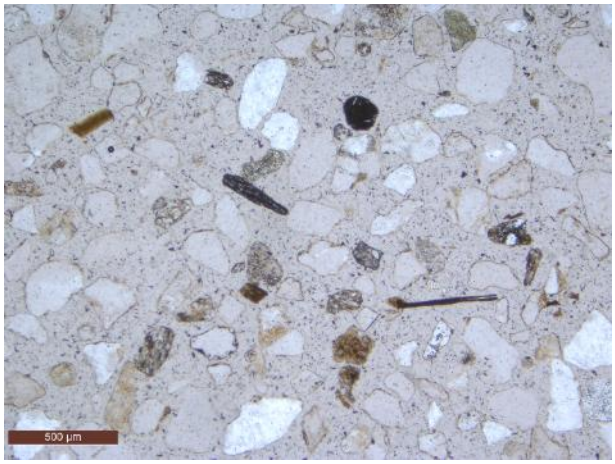


А Б

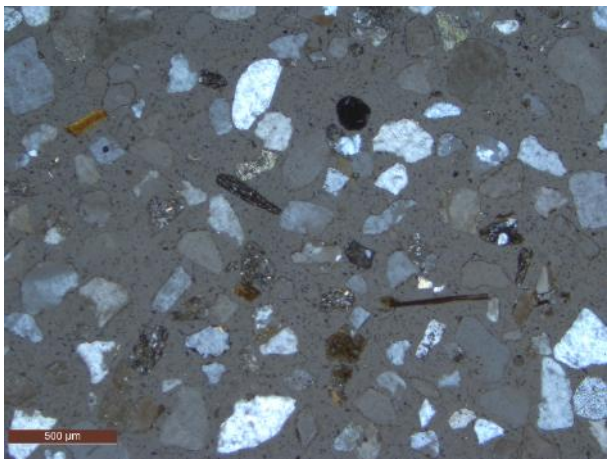
Рисунок 4. Микроморфологическое строение горизонта CR торфяно-криозема на аллювиальных отложениях (S 1-7) в параллельных (А) и скрещенных (Б) николях. На рисунке представлен грубый гумус, зерна кварца, а также слюда.

В изученном шлифе торфяно-криозема (S1-7) отмечается относительно высокое содержание зерен кварца различного размера, что обусловлено влиянием реки. Микростроение почвенной массы представлено зернами кварца, а также агрегатами с округло-блоковой формой. Агрегаты состоят из хорошо разложившегося органического вещества с инкорпорированными в него зернами кварца и существенного количества аморфного тонкодисперсного органического вещества. Относительно высокое содержание крупных зерен кварца может быть объяснено привносом материала под действием криогенного массообмена из материнской породы, а также под влиянием реки.

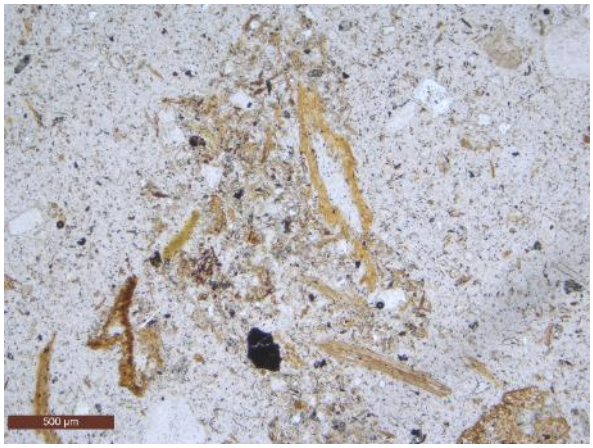
В результате анализа микростроения почвенной массы на различных стадиях формирования полигонов было выявлено, что на ранних стадиях формирования полигонов отмечается слабая проработанность материала; она выражается в присутствии неразложившихся растительных остатков, слюд, а также большого количества зерен кварца, на поверхности которых отмечено наличие трещин, возникающих в результате процессов промерзания и оттаивания. В ходе деградации полигональных структур отмечается формирование агрегатов, состоящих из большого количества зерен кварца, различной степени выветривания, а также ПОВ, состоящего как из неразложившихся растительных остатков, так и тонкодисперсного органического вещества.



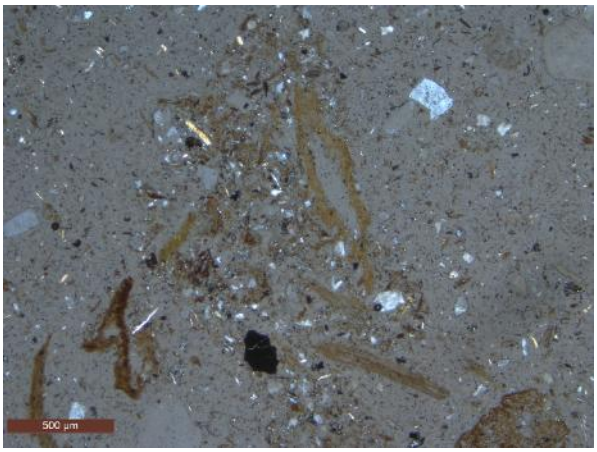
А



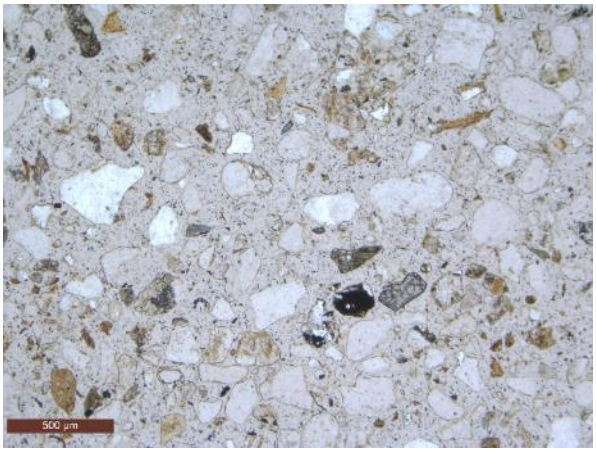
Б



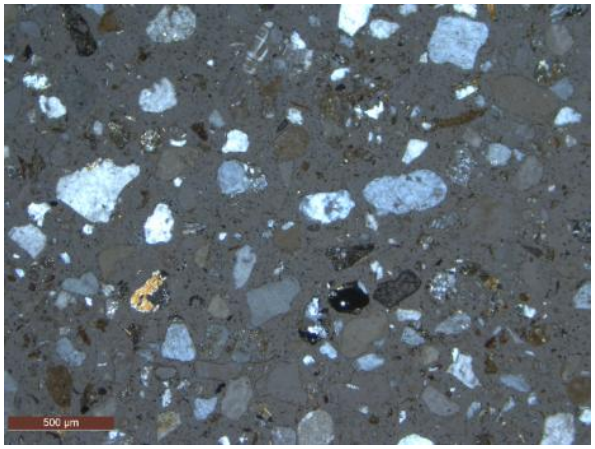
В



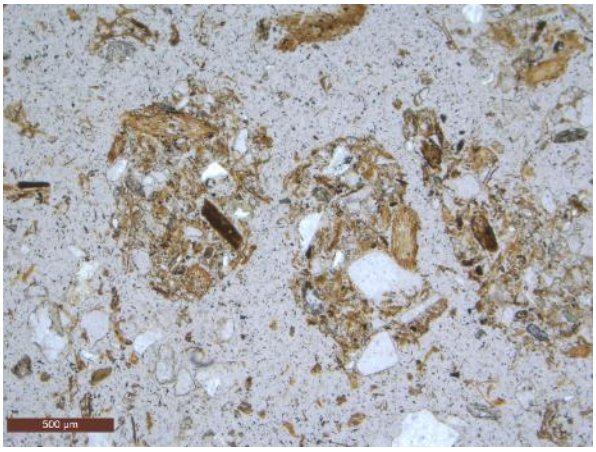
Г



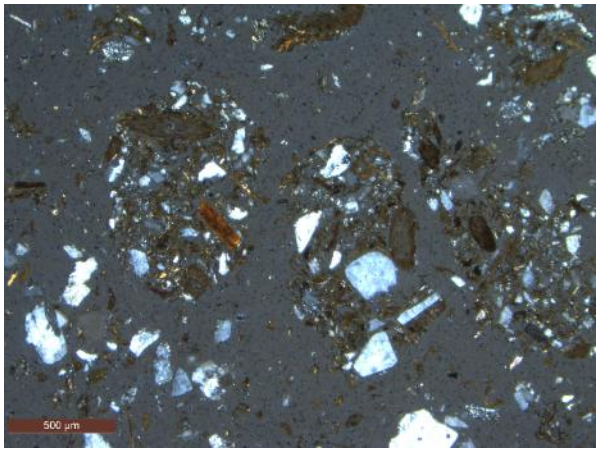
Д



Е



Ж



З

Рисунок 5. Микроморфологическое строение ZP2 CR (А–Б), VG1 CR (В–Г), VALP1 AO (Д–Е), VP1 AO (Ж–З) в параллельных (А, В, Д, Ж) и скрещенных (Б, Г, Е, З) николях. На рисунках А–Б представлены зерна кварца и слюда. На рисунках В–Г показан коагуляционный агрегат неправильной формы, состоящий из органического вещества различной степени трансформации, зерен кварца, а также слюды. На рисунках Д–Е наблюдается хорошо трансформированное органическое вещество, зерна кварца, полевой шпат, а также слюда. На рисунках Ж–З продемонстрировано большое количество коагуляционных агрегатов округлой формы, а также зерна кварца и слюда.

Высокая пойма и первая терраса реки являются наиболее молодыми частями дельты реки Лены, где основные процессы, влияющие на развитие почв, характеризуются гумусонакоплением и накоплением аллохтонного материала. Здесь формируются гумусоаккумулятивные горизонты (AO, AY), а с увеличением времени нахождения вне условий затопления развиваются криогенные горизонты CR. С увеличением возраста почв отмечается более активное влияние криогенных процессов, снижение роли биологического выветривания и возрастание физического (криоэлювигенез), в результате которого происходит разрушение минеральной части почв под действием процессов промерзания и оттаивания.

Оценка физической стабилизации почвенного органического вещества исследованных почв. Результаты расчета параметров микростроения почв представлены в таблице 2.

Таблица 2

Параметры микростроения органоминеральных агрегатов

Образец почв			ZP2	VG1	VP1	Si1
Пространство (%), занятое органическим веществом в шлифах почв			1,6	5,6	12,3	10,8
Микроаггрегаты, <250 µm	Площадь, µm^2	min	2,14	2,75	7,84	67,1
		max	14489	155899	28373	36922
		Среднее	1154	871,6	2240	3237
	Fx среднее		45,9	39,4	64,9	75,8
	Rdn		0,6	0,5	0,6	0,6
	n		1982	9382	3717	5811
Макроаггрегаты, 250-2000 µm	Площадь, mm^2	min	0,006	0,002	0,005	0,008
		max	0,02	0,12	0,28	1,56
		Среднее	0,07	0,02	0,04	0,04
	Fx среднее		311,7	350,1	440,9	397,1
	Rdn		0,3	0,3	0,5	0,49
	n		5	118	397	672

Примечание.
Fx – диаметр Ферре, µm; Rdn – индекс округлости (0–1).

Наибольшее содержание органического вещества было обнаружено в образце криозема грубогумусового (VP1), что обусловлено активными темпами накопления грубых форм гумуса в почве. При этом в варианте зарождающегося полигона (ZP2) отмечено наименьшее содержание органического вещества в микростроении, что указывает на слабые процессы перераспределения органического вещества по профилю, накопление органического вещества происходит преимущественно в торфяном горизонте. В результате процессов трансформации полигонов (пучение, растрескивание) происходит перераспределение по профилю почв органического вещества, которое может быть подвержено биодеградации.

Анализ содержания микроагрегатов показал, что наибольшее их количество отмечено в образце почв из вогнутого полигона (VG1), который находится на ранней стадии деградации. Это может указывать как на разрушение макроагрегатов, так и на процесс гумификации растительных остатков, что приводит к стабилизации органического вещества. Высокий уровень содержания микроагрегатов также отмечен в почве затапливаемых территорий (Si1), что обусловлено активными процессами трансформации органического вещества. Это подтверждается тем, что в образце почв с затапливаемых территорий отмечено наибольшее содержание макроагрегатов, которые формируются в условиях активной гумификации. Отмечено увеличение содержания макроагрегатов в исследованных шлифах в результате деградации полигональных структур, указывающее на уменьшение стабильного пула углерода в почвах подверженных деградации.

Согласно полученным данным, во всех изученных почвах и отложениях преобладают микроагрегаты (<250 μm). Доминирование данной фракции указывает на характерный этап физической стабилизации и увеличения времени нахождения органического вещества в составе агрегатов (Semenov et al., 2020). Относительно большое содержание макроагрегатов может быть результатом взаимодействии грубых форм гумуса с минеральной матрицей почв; данные агрегаты активно колонизируются микроорганизмами и могут быть подвержены биодеградации (Six, Paustian, 2014). Исследования показывают, что взаимодействие ПОВ с минералами и формирование почвенных агрегатов является важным механизмом, замедляющим трансформацию органического вещества (Six et al., 2002). Однако активность данного процесса варьирует в зависимости от типа почвы, влажности и температуры (Jílková et al., 2021). Криотурбация, характерная для арктических почв, оказывает двойственное влияние на трансформацию органических веществ (Gubin, 2016), способствуя как перемешиванию ПОВ, так и разрушению агрегатов (Lupachev et al., 2017). Понимание этих сложных взаимодействий необходимо для прогнозирования динамики ПОВ и разработки стратегии смягчения выбросов углерода из арктических почв в условиях меняющегося климата (Bruhwiler et al., 2021).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенного исследования было выявлено, что влияние реки и криогенеза приводит к существенной трансформации почв и ландшафтов в дельте реки Лены. Это выражается в темпах трансформации органоминеральной матрицы почв, формировании органоминеральных агрегатов, а также степени проявления почвенного криогенеза. Анализ микростроения почв показал, что почвы, находящиеся под активным влиянием реки, характеризуются формированием агрегатов, состоящих из органического материала с различной степенью разложения, зерен кварца, слюды и полевого шпата. Наличие крупных зерен кварца и слюды указывает на относительно низкую степень проработанности материла, а также на аллювиальный привнос данных минералов; однако активные процессы гумификации и поступление в почву продуктов разложения органического вещества приводят к формированию органоминеральных агрегатов. Почвы, вышедшие из-под активного влияния реки, характеризуются гетерогенным строением, которое зависит от активности криогенеза и степени деградации ММП. Высвобождение органоминерального материала из мерзлого состояния может существенным образом влиять на трансформацию ландшафта и приводить к потере ПОВ. Оценка параметров микростроения органоминеральных агрегатов показала, что деградация ММП и развитие термокарстовых процессов может приводить к снижению стабильного пула углерода и высвобождению из мерзлого состояния ПОВ, которое может быть подвержено биодеградации.

ФИНАНСОВАЯ ПОДДЕРЖКА

Работа выполнена при поддержке СПбГУ (проект № 123042000071-8).

ЛИТЕРАТУРА

Василевич Р.С., Безносиков В.А., Лодыгин Е.Д. Молекулярная структура гумусовых веществ мерзлотных бугристых торфяников лесотундры // Почвоведение. 2019. № 3. С. 317–329. https://doi.org/10.1134/S0032180X19010167

Герасимова М.И., Ковда И.В., Лебедева М.П., Турсина Т.В. Микроморфологические термины как отражение современного состояния исследований микростроения почв // Почвоведение. 2011. № 7. С. 804–817.

Лодыгин Е.Д., Василевич Р.С. Молекулярно-массовое распределение гумусовых кислот таёжных почв // Почвы и окружающая среда. 2021. Том 4. № 4. С. e160. https://doi.org/10.31251/pos.v4i4.160

Национальный доклад «Глобальный климат и почвенный покров России: арктическая зона, мерзлотные почвы – будущему России (сельское и лесное хозяйство)» / под редакцией Р.С.-Х. Эдельгериева и А.Л. Иванова. Том 4. Москва: ФГБНУ ФИЦ «Почвенный институт им. В.В. Докучаева», 2024. 672 с.

Семенов В.М., Лебедева Т.Н., Паутова Н.Б., Хромычкина Д.П., Ковалев И.В., Ковалева Н.О. Взаимосвязь размера агрегатов, содержания дисперсного органического вещества и разложения растительных остатков в почве // Почвоведение. 2020. № 4. С. 430–443. https://doi.org/10.31857/S0032180X20040139

Baldock J.A., Skjemstad J.O. Role of the soil matrix and minerals in protecting natural organic materials against biological attack // Organic geochemistry. 2000. Vol. 31. No. 7–8. P. 697–710. https://doi.org/10.1016/S0146-6380(00)00049-8

Boike J., Nitzbon J., Anders K., Grigoriev M., Bolshiyanov D., Langer M., Lange S., Bornemann N., Morgenstern A., Schreiber P., Wille C., Chadburn S., Gouttevin I., Burke E., Kutzbach L. A 16-year record (2002–2017) of permafrost, active-layer, and meteorological conditions at the Samoylov Island Arctic permafrost research site, Lena River delta, northern Siberia: An opportunity to validate remote-sensing data and land surface, snow, and permafrost models // Earth System Science Data. 2019. Vol. 11. P. 261–299. https://doi.org/10.5194/essd-11-261-2019

Bruhwiler L., Parmentier FJ.W., Crill P., Leonard M., Palmer P. I. The Arctic Carbon Cycle and Its Response to Changing Climate // Curr Clim Change Rep. 2021. Vol. 7. P. 14–34. https://doi.org/10.1007/s40641-020-00169-5

Dai X.Y., Ping C.L., Michaelson G.J. Characterizing soil organic matter in Arctic tundra soils by different analytical approaches // Organic Geochemistry. 2002. Vol. 33. No. 4. P. 407–419. https://doi.org/10.1016/S0146-6380(02)00012-8

Dao T.T., Gentsch N., Mikutta R., Sauheitl L., Shibistova O., Wild B., Schnecker J., Bárta J., Čapek P., Gittel A., Lashchinskiy N., Urich T., Šantrůčková H., Richter A., Guggenberger G. Fate of carbohydrates and lignin in north-east Siberian permafrost soils // Soil Biology and Biochemistry. 2018. Vol. 116. P. 311–322. https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2017.10.032

Gubin S.V. Role of cryogenic processes in the organization of soils at macro-, meso- and micro-levels // Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева. 2016. №. 86. P. 53–63. https://doi.org/10.19047/0136-1694-2016-86-53-63

Hugelius G., Loisel J., Chadburn S., Jackson R.B., Jones M., MacDonald G., Marushchak M., Olefeldt D., Packalen M., Siewert M.B., Treat C., Turetsky M., Voigt C., Yu Z. Large stocks of peatland carbon and nitrogen are vulnerable to permafrost thaw // Proceedings of the National Academy of Sciences. 2020. Vol. 117. No. 34. P. 20438–20446. https://doi.org/10.1073/pnas.1916387117

Islam M.R., Singh B., Dijkstra F.A. Stabilisation of soil organic matter: interactions between clay and microbes // Biogeochemistry. 2022. Vol. 160. P. 145–158. https://doi.org/10.1007/s10533-022-00956-2

Jílková V., Devetter M., Bryndová M., Hájek T., Kotas P., Luláková P., Meador T., Navrátilová D., Saccone P., Macek P. Carbon sequestration related to soil physical and chemical properties in the high Arctic // Global Biogeochemical Cycles. 2021. Vol. 35. No. 9. ID. e2020GB006877. https://doi.org/10.1029/2020GB006877

Kartoziia A. Assessment of the Ice Wedge Polygon Current State by Means of UAV Imagery Analysis (Samoylov Island, the Lena Delta) // Remote Sensing. 2019. Vol. 11(13). ID. 1627. https://doi.org/10.3390/rs11131627

Kleber M., Eusterhues K., Keiluweit M., Mikutta C., Mikutta R., Nico P.S. Mineral-organic associations: formation, properties, and relevance in soil environments // Advances in Agronomy. 2015. Vol. 130. P. 1–140. https://doi.org/10.1016/bs.agron.2014.10.005

Loisel J., Yu Z., Beilman D., Camill P., Alm J., Amesbury M.J., Anderson D., Andersson S., Bochicchio C., Barber K., Belyea L.R., Bunbury J., Chambers F.M., Charman D.J., De Vleeschouwer F. A database and synthesis of northern peatland soil properties and Holocene carbon and nitrogen accumulation // Holocene. 2014. Vol. 24. No. 9. P. 1028–1042. https://doi.org/10.1177/0959683614538073

Lupachev A., Abakumov E., Gubin S. The Influence of Cryogenic Mass Exchange on the Composition and Stabilization Rate of Soil Organic Matter in Cryosols of the Kolyma Lowland (North Yakutia, Russia) // Geosciences. 2017. Vol. 7. No. 2. P. 24. https://doi.org/10.3390/geosciences7020024

Mishra U., Hugelius G., Shelef E., Yang Y., Strauss J., Lupachev A., Harden J.W., Jastrow J.D., Ping C.-L., Riley W.J., Schuur E.A.G., Matamala R., Siewert M., Nave L.E., Koven C.D., Fuchs M., Palmtag J., Kuhry P., Treat C.C., Zubrzycki S., Hoffman F.M., Elberling B., Camill P., Veremeeva A., Orr A. Spatial heterogeneity and environmental predictors of permafrost region soil organic carbon stocks // Science advances. 2021. Vol. 7. No. 9. ID. eaaz5236. https://doi.org/10.1126/sciadv.aaz5236

Natali S.M., Watts J.D., Rogers B.M., Potter S., Ludwig S.M., Selbmann A.-K., Sullivan P.F., Abbott B.W., Arndt K.A., Birch L., Björkman M.P., Bloom A.A., Celis G., Christensen T.R., Christiansen C.T., Commane R., Cooper E.J., Crill P., Czimczik C., Davydov S., Du J., Egan J.E., Elberling B.O., Euskirchen E.S., Friborg T., Genet H., Göckede M., Goodrich J.P., Grogan P., Helbig M., Jafarov E.E., Jastrow J.D., Kalhori A.A.M., Kim Y., Malhotra A. Large loss of CO_2 in winter observed across the northern permafrost region // Nature Climate Change. 2019. Vol. 9. P. 852–857. https://doi.org/10.1038/s41558-019-0592-8

Oades J.M., Waters A.G. Aggregate hierarchy in soils // Australian Journal of Soil Research. 1991. Vol. 29. No. 6. P. 815–828. https://doi.org/10.1071/SR9910815

Overland J.E., Wang M. When will the summer Arctic be nearly sea ice free? // Geophysical Research Letters. 2013. Vol. 40. No. 10. P. 2097–2101. https://doi.org/10.1002/grl.50316

Plaza C., Pegoraro E., Bracho R., Celis G., Crummer K.G., Hutchings J.A., Hicks Pries C.E., Mauritz M., Natali S.M., Salmon V.G., Schädel C., Webb E.E., Schuur E.A.G. Direct observation of permafrost degradation and rapid soil carbon loss in tundra // Nature Geoscience. 2019. Vol. 12. No. 8. P. 627–631. https://doi.org/10.1038/s41561-019-0387-6

Polyakov V., Abakumov E., Lodygin E., Vasilevich R. Molecular Weight Distribution of Humic Acids Isolated from Buried Soils and Yedoma Sediments // Agronomy. 2023a. Vol. 13. No. 6. ID 1483. https://doi.org/10.3390/agronomy13061483

Polyakov V., Lupachev A., Gubin S., Abakumov E. Soil Organic Matter of Tidal Marsh Permafrost-Affected Soils of Kolyma Lowland // Agronomy. 2023b. Vol. 13. No. 1. ID. 48. https://doi.org/10.3390/agronomy13010048

Post E., Alley R.B., Christensen T.R., Macias-Fauria M., Forbes B.C., Gooseff M.N., Iler A., Kerby J.T., Laidre K.L., Mann M.E., Olofsson J., Stroeve J.C., Ulmer F., Virginia R.A., Wang M. The polar regions in a 2°C warmer world // Science Advances. 2019. Vol. 5. No. 12. ID. eaaw9883 https://doi.org/10.1126/sciadv.aaw9883

Sanders T., Fiencke C., Fuchs M., Haugk C., Juhls B., Mollenhauer G., Ogneva O., Overduin P., Palmtag J., Povazhniy V., Strauss J., Tuerena R., Zell N., Dähnke K. Seasonal nitrogen fluxes of the Lena River Delta // Ambio. 2022. Vol. 51. P. 423–438. https://doi.org/10.1007/s13280-021-01665-0

Sarker J.R., Singh B.P., Cowie A.L., Fang Y., Collins D., Dougherty W.J., Singh B.K. Carbon and nutrient mineralisation dynamics in aggregate-size classes from different tillage systems after input of canola and wheat residues // Soil Biology and Biochemistry. 2018. Vol. 116. P. 22–38. https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2017.09.030

Schuur E.A.G., McGuire A.D., Schädel C., Grosse G., Harden J.W., Hayes D.J., Hugelius G., Koven C.D., Kuhry P., Lawrence D.M., Natali S.M., Olefeldt D., Romanovsky V.E., Schaefer K., Turetsky M.R., Treat C.C., Vonk J.E. Climate change and the permafrost carbon feedback // Nature. 2015. Vol. 520 (7546). P. 171–179. https://doi.org/10.1038/nature14338

Singh P., Benbi D.K. Physical and chemical stabilization of soil organic matter in cropland ecosystems under rice–wheat, maize–wheat and cotton–wheat cropping systems in northwestern India // Carbon Management. 2021. Vol. 12. No. 6. P. 603–621. https://doi.org/10.1080/17583004.2021.1992505

Six J., Conant R.T., Paul E.A., Paustian K. Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturation of soils // Plant and Soil. 2002. Vol. 241. P. 155–176. https://doi.org/10.1023/A:1016125726789

Six J., Paustian K. Aggregate-associated soil organic matter as an ecosystem property and a measurement tool // Soil Biology and Biochemistry. 2014. Vol. 68. P. A4–A9. https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2013.06.014

Stoops G. Guidelines for Analysis and Description of Soil and Regolith Thin Sections. NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2020. 248 p.

Szymański S. Chemistry and spectroscopic properties of surface horizons of Arctic soils under different types of tundra vegetation – a case study from the Fuglebergsletta coastal plain (SW Spitsbergen) // Catena. 2017. Vol. 156. P. 325–337. https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.04.024

Szymański W., Drewnik M., Stolarczyk M., Musielok L., Gus-Stolarczyk M., Skiba M. Occurrence and stability of organic intercalation in clay minerals from permafrost-affected soils in the High Arctic – A case study from Spitsbergen (Svalbard) // Geoderma. 2022. Vol. 408. ID. 115591. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115591

Tarnocai C.J., Canadell G., Schuur E.A.G., Kuhry P., Mazhitova G., Zimov S. Soil organic carbon pools in the northern circumpolar permafrost region // Global Biogeochemical Cycles. 2009. Vol. 23. No. 2. P. 1–11. https://doi.org/10.1029/2008GB003327

Поступила в редакцию 21.03.2025
Принята 14.05.2025
Опубликована 17.05.2025

Сведения об авторах:

Поляков Вячеслав Игоревич – младший научный сотрудник, ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет», кафедра прикладной экологии (Санкт-Петербург, Россия); slavon6985@gmail.com; https://orcid.org/0000-0001-6171-3221

Абакумов Евгений Васильевич – доктор биологических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Санкт Петербургский государственный университет», кафедра прикладной экологии (Санкт-Петербург, Россия); e_abakumov@mail.ru; https://orcid.org/0000-0002-5248-9018

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Статья доступна по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License

Micromorphological features of organic and mineral parts of tundra soils in the Lena river delta

© 2025 V. I. Polyakov , E. V. Abakumov

Saint Petersburg State University, Department of Applied Ecology, 29 16th Line V.O., Saint Petersburg, Russia

E-mail: slavon6985@gmail.com; e_abakumov@mail.ru

The aim of the study *was to define the unique micromorphological properties and mechanisms responsible for the development of stable organomineral pedofeauteres in the soils of the Lena River Delta.*
Location and time of the study. *The study area is located on Samoylovsky Island and a newly formed, Ivovyi island in the Lena River Delta, Yakutia, Russia. Fieldwork was conducted during the summer field season of 2021.*
Methods*. Standard micromorphological methods were employed for soil analysis. Determination of minerals took place on polarisation microscope Leica DM750P, calculation of organomineral particles took place in software complex ImageJ ver. 1.54m.*
Results. *This study identified key patterns in the influence of cryogenesis and river activity on soil formation within the first terrace of the Lena River delta. On micromorphological level it was revealed that soils under river influence are characterized by large organomineral aggregates composed of thin organic matter, quartz, mica, and undecomposed plant residues. The formation of these organomineral aggregates is attributed to active humification of plant residues and a limited influence of cryogenesis. Soils out of the active floodplain exhibit a prevalence of undecomposed plant residues, indicating slow rates of organic matter transformation. Under the conditions of degradation of polygonal structures, active processes of cryogenic mass exchange and cracking are observed, which lead to the destruction of the organomineral matrix of soils and release of organic matter from the frozen state. According to the assessment of physical stabilisation of SOM, it was found that the degradation of polygonal structures can lead to a reduction in the stable carbon pool in soils due to the active occurrence of cryogenic processes, thus increasing the potential labile carbon pool, which can be subject to biodegradation.*
Conclusions. *As a result of the river action and cryogenic processes in the Lena River delta there is a significant transformation of soils, which is associated with the features of organic matter accumulation and formation of organomineral matrix of soils. The analysis of soil microstructure composition has shown that in soils under the active influence of the river the formation of organomineral pedofeatures takes place, despite the low degree of elaboration of the material. In soils out of annual flooding, thermokarst processes result in the release of soil organic matter, which increases the risk of biodegradation. Permafrost degradation demonstrates the vulnerability of cryogenic soils to carbon loss under climate change.*

Keywords: *organomineral aggregates; soil mineral matrix; organic matter stabilisation; soils of the Lena Delta; Yakutia; Arctic.*

How to cite: *Polyakov V.I., Abakumov E.V. Micromorphological features of organic and mineral parts of tundra soils in the Lena river delta. The Journal of Soils and Environment. 2025. 8(1). e306. DOI: 10.31251/pos.v8i1.306 (in Russian with English abstract).*

FUNDING

The study was financially supported by St. Petersburg State University (project No. 123042000071-8).

REFERENCES

Vasilevich R.S., Beznosikov V.A., Lodygin E.D. Molecular structure of humus substances in permafrost peat mounds in forest-tundra. Eurasian Soil Science. 2019. Vol. 52. No. 3. P. 283–295. https://doi.org/10.1134/S1064229319010150

Gerasimova M.I., Kovda I.V., Lebedeva M.P., Tursina T.V. Micromorphological terms: The state of the art in soil microfabric research. Eurasian Soil Science. 2011. Vol. 44. No. 7. P. 739–752. https://doi.org/10.1134/S1064229311070052

Lodygin E.D., Vasilevich R.S. Molecular-mass distribution of humus acids of taiga soils. The Journal of Soils and Environment. 2021. Vol. 4. № 4. P. e160. (in Russian). https://doi.org/10.31251/pos.v4i4.160

National report "Global climate and soil cover of Russia: Arctic zone, permafrost soils – to the future of Russia (agriculture and forestry)" / edited by R.S.-Kh. Edelgeriev and A.L. Ivanov. Vol. 4. Moscow: Soil Institute named by V.V. Dokuchaev, 2024. 672 p. (in Russian).

Semenov V.M., Lebedeva T.N., Pautova N.B., Khromychkina D.P., Kovalev I.V., Kovaleva N.O. Relationships between the Size of Aggregates, Particulate Organic Matter Content, and Decomposition of Plant Residues in Soil. Eurasian Soil Science. 2020. Vol. 53. No. 4. P. 454–466. https://doi.org/10.1134/S1064229320040134

Baldock J.A., Skjemstad J.O. Role of the soil matrix and minerals in protecting natural organic materials against biological attack. Organic geochemistry. 2000. Vol. 31. No. 7–8. P. 697–710. https://doi.org/10.1016/S0146-6380(00)00049-8

Boike J., Nitzbon J., Anders K., Grigoriev M., Bolshiyanov D., Langer M., Lange S., Bornemann N., Morgenstern A., Schreiber P., Wille C., Chadburn S., Gouttevin I., Burke E., Kutzbach L. A 16-year record (2002–2017) of permafrost, active-layer, and meteorological conditions at the Samoylov Island Arctic permafrost research site, Lena River delta, northern Siberia: An opportunity to validate remote-sensing data and land surface, snow, and permafrost models. Earth System Science Data. 2019. Vol. 11. P. 261–299. https://doi.org/10.5194/essd-11-261-2019

Bruhwiler L., Parmentier FJ.W., Crill P., Leonard M., Palmer P. I. The Arctic Carbon Cycle and Its Response to Changing Climate. Curr Clim Change Rep. 2021. Vol. 7. P. 14–34. https://doi.org/10.1007/s40641-020-00169-5

Dai X.Y., Ping C.L., Michaelson G.J. Characterizing soil organic matter in Arctic tundra soils by different analytical approaches. Organic Geochemistry. 2002. Vol. 33. No. 4. P. 407–419. https://doi.org/10.1016/S0146-6380(02)00012-8

Dao T.T., Gentsch N., Mikutta R., Sauheitl L., Shibistova O., Wild B., Schnecker J., Bárta J., Čapek P., Gittel A., Lashchinskiy N., Urich T., Šantrůčková H., Richter A., Guggenberger G. Fate of carbohydrates and lignin in north-east Siberian permafrost soils. Soil Biology and Biochemistry. 2018. Vol. 116. P. 311–322. https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2017.10.032

Gubin S.V. Role of cryogenic processes in the organization of soils at macro-, meso- and micro-levels. Dokuchaev Soil Bulletin (Byulleten Pochvennogo instituta im. V.V. Dokuchaeva). 2016. No. 86. P. 53–63. https://doi.org/10.19047/0136-1694-2016-86-53-63

Hugelius G., Loisel J., Chadburn S., Jackson R.B., Jones M., MacDonald G., Marushchak M., Olefeldt D., Packalen M., Siewert M.B., Treat C., Turetsky M., Voigt C., Yu Z. Large stocks of peatland carbon and nitrogen are vulnerable to permafrost thaw. Proceedings of the National Academy of Sciences. 2020. Vol. 117. No. 34. P. 20438–20446. https://doi.org/10.1073/pnas.1916387117

Islam M.R., Singh B., Dijkstra F.A. Stabilisation of soil organic matter: interactions between clay and microbes. Biogeochemistry. 2022. Vol. 160. P. 145–158. https://doi.org/10.1007/s10533-022-00956-2

Jílková V., Devetter M., Bryndová M., Hájek T., Kotas P., Luláková P., Meador T., Navrátilová D., Saccone P., Macek P. Carbon sequestration related to soil physical and chemical properties in the high Arctic. Global Biogeochemical Cycles. 2021. Vol. 35. No. 9. ID. e2020GB006877. https://doi.org/10.1029/2020GB006877

Kartoziia A. Assessment of the Ice Wedge Polygon Current State by Means of UAV Imagery Analysis (Samoylov Island, the Lena Delta). Remote Sensing. 2019. Vol. 11(13). ID. 1627. https://doi.org/10.3390/rs11131627

Kleber M., Eusterhues K., Keiluweit M., Mikutta C., Mikutta R., Nico P.S. Mineral-organic associations: formation, properties, and relevance in soil environments. Advances in Agronomy. 2015. Vol. 130. P. 1–140. https://doi.org/10.1016/bs.agron.2014.10.005

Loisel J., Yu Z., Beilman D., Camill P., Alm J., Amesbury M.J., Anderson D., Andersson S., Bochicchio C., Barber K., Belyea L.R., Bunbury J., Chambers F.M., Charman D.J., De Vleeschouwer F. A database and synthesis of northern peatland soil properties and Holocene carbon and nitrogen accumulation. Holocene. 2014. Vol. 24. No. 9. P. 1028–1042. https://doi.org/10.1177/0959683614538073

Lupachev A., Abakumov E., Gubin S. The Influence of Cryogenic Mass Exchange on the Composition and Stabilization Rate of Soil Organic Matter in Cryosols of the Kolyma Lowland (North Yakutia, Russia). Geosciences. 2017. Vol. 7. No. 2. P. 24. https://doi.org/10.3390/geosciences7020024

Mishra U., Hugelius G., Shelef E., Yang Y., Strauss J., Lupachev A., Harden J.W., Jastrow J.D., Ping C.-L., Riley W.J., Schuur E.A.G., Matamala R., Siewert M., Nave L.E., Koven C.D., Fuchs M., Palmtag J., Kuhry P., Treat C.C., Zubrzycki S., Hoffman F.M., Elberling B., Camill P., Veremeeva A., Orr A. Spatial heterogeneity and environmental predictors of permafrost region soil organic carbon stocks. Science advances. 2021. Vol. 7. No. 9. ID. eaaz5236. https://doi.org/10.1126/sciadv.aaz5236

Natali S.M., Watts J.D., Rogers B.M., Potter S., Ludwig S.M., Selbmann A.-K., Sullivan P.F., Abbott B.W., Arndt K.A., Birch L., Björkman M.P., Bloom A.A., Celis G., Christensen T.R., Christiansen C.T., Commane R., Cooper E.J., Crill P., Czimczik C., Davydov S., Du J., Egan J.E., Elberling B.O., Euskirchen E.S., Friborg T., Genet H., Göckede M., Goodrich J.P., Grogan P., Helbig M., Jafarov E.E., Jastrow J.D., Kalhori A.A.M., Kim Y., Malhotra A. Large loss of CO_2 in winter observed across the northern permafrost region. Nature Climate Change. 2019. Vol. 9. P. 852–857. https://doi.org/10.1038/s41558-019-0592-8

Oades J.M., Waters A.G. Aggregate hierarchy in soils. Australian Journal of Soil Research. 1991. Vol. 29. No. 6. P. 815–828. https://doi.org/10.1071/SR9910815

Overland J.E., Wang M. When will the summer Arctic be nearly sea ice free? Geophysical Research Letters. 2013. Vol. 40. No. 10. P. 2097–2101. https://doi.org/10.1002/grl.50316

Plaza C., Pegoraro E., Bracho R., Celis G., Crummer K.G., Hutchings J.A., Hicks Pries C.E., Mauritz M., Natali S.M., Salmon V.G., Schädel C., Webb E.E., Schuur E.A.G. Direct observation of permafrost degradation and rapid soil carbon loss in tundra. Nature Geoscience. 2019. Vol. 12. No. 8. P. 627–631. https://doi.org/10.1038/s41561-019-0387-6

Polyakov V., Abakumov E., Lodygin E., Vasilevich R. Molecular Weight Distribution of Humic Acids Isolated from Buried Soils and Yedoma Sediments. Agronomy. 2023a. Vol. 13. No. 6. ID 1483. https://doi.org/10.3390/agronomy13061483

Polyakov V., Lupachev A., Gubin S., Abakumov E. Soil Organic Matter of Tidal Marsh Permafrost-Affected Soils of Kolyma Lowland. Agronomy. 2023b. Vol. 13. No. 1. ID. 48. https://doi.org/10.3390/agronomy13010048

Post E., Alley R.B., Christensen T.R., Macias-Fauria M., Forbes B.C., Gooseff M.N., Iler A., Kerby J.T., Laidre K.L., Mann M.E., Olofsson J., Stroeve J.C., Ulmer F., Virginia R.A., Wang M. The polar regions in a 2°C warmer world. Science Advances. 2019. Vol. 5. No. 12. ID. eaaw9883 https://doi.org/10.1126/sciadv.aaw9883

Sanders T., Fiencke C., Fuchs M., Haugk C., Juhls B., Mollenhauer G., Ogneva O., Overduin P., Palmtag J., Povazhniy V., Strauss J., Tuerena R., Zell N., Dähnke K. Seasonal nitrogen fluxes of the Lena River Delta. Ambio. 2022. Vol. 51. P. 423–438. https://doi.org/10.1007/s13280-021-01665-0

Sarker J.R., Singh B.P., Cowie A.L., Fang Y., Collins D., Dougherty W.J., Singh B.K. Carbon and nutrient mineralisation dynamics in aggregate-size classes from different tillage systems after input of canola and wheat residues. Soil Biology and Biochemistry. 2018. Vol. 116. P. 22–38. https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2017.09.030

Schuur E.A.G., McGuire A.D., Schädel C., Grosse G., Harden J.W., Hayes D.J., Hugelius G., Koven C.D., Kuhry P., Lawrence D.M., Natali S.M., Olefeldt D., Romanovsky V.E., Schaefer K., Turetsky M.R., Treat C.C., Vonk J.E. Climate change and the permafrost carbon feedback. Nature. 2015. Vol. 520 (7546). P. 171–179. https://doi.org/10.1038/nature14338

Singh P., Benbi D.K. Physical and chemical stabilization of soil organic matter in cropland ecosystems under rice–wheat, maize–wheat and cotton–wheat cropping systems in northwestern India. Carbon Management. 2021. Vol. 12. No. 6. P. 603–621. https://doi.org/10.1080/17583004.2021.1992505

Six J., Conant R.T., Paul E.A., Paustian K. Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturation of soils. Plant and Soil. 2002. Vol. 241. P. 155–176. https://doi.org/10.1023/A:1016125726789

Six J., Paustian K. Aggregate-associated soil organic matter as an ecosystem property and a measurement tool. Soil Biology and Biochemistry. 2014. Vol. 68. P. A4–A9. https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2013.06.014

Stoops G. Guidelines for Analysis and Description of Soil and Regolith Thin Sections. NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2020. 248 p.

Szymański S. Chemistry and spectroscopic properties of surface horizons of Arctic soils under different types of tundra vegetation – a case study from the Fuglebergsletta coastal plain (SW Spitsbergen). Catena. 2017. Vol. 156. P. 325–337. https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.04.024

Szymański W., Drewnik M., Stolarczyk M., Musielok L., Gus-Stolarczyk M., Skiba M. Occurrence and stability of organic intercalation in clay minerals from permafrost-affected soils in the High Arctic – A case study from Spitsbergen (Svalbard). Geoderma. 2022. Vol. 408. ID. 115591. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115591

Tarnocai C.J., Canadell G., Schuur E.A.G., Kuhry P., Mazhitova G., Zimov S. Soil organic carbon pools in the northern circumpolar permafrost region. Global Biogeochemical Cycles. 2009. Vol. 23. No. 2. P. 1–11. https://doi.org/10.1029/2008GB003327

Received 21 March 2025
Accepted 14 May 2025
Published 17 May 2025

About the authors:

Vyacheslav I. Polyakov – junior research, Department of Applied Ecology, Saint Petersburg State University (St. Petersburg, Russia); slavon6985@gmail.com; https://orcid.org/0000-0001-6171-3221

Evgeny V. Abakumov – Doctor of Biological Sciences, Professor, Department of Applied Ecology, Saint Petersburg State University (St. Petersburg, Russia); e_abakumov@mail.ru; https://orcid.org/0000-0002-5248-9018

The authors read and approved the final manuscript

The article is available under Creative Commons Attribution 4.0 License

УДК 631.4
https://doi.org/10.31251/pos.v8i1.302

Check for updates

Влияние гуматов калия, ксантановой камеди и бинарных композиций на их основе на свойства дерново-подзолистой почвы в модельных экспериментах

© 2025 О. С. Якименко [1], П. В. Нестеров[1], А. А. Степанов[1], И. Г. Панова[2], В. Е. Чернов[2], А. А. Ярославов [2]

[1]*Факультет почвоведения ФГБОУ «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», Ленинские горы, д. 1, стр. 12, Москва, Россия. E-mail: iakim@soil.msu.ru*

[2]*Химический факультет ФГБОУ «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова» , Ленинские горы, д. 1, стр. 3, г. Москва, 119992, Россия. E-mail: yaroslav@belozersky.msu.ru*

Цель исследования. *Оценить влияние бинарных композиций на основе гетерофункционального полисахарида ксантановой камеди (КК) и трех видов гуминовых продуктов (ГП) на противоэрозионные, водоудерживающие и детоксицирующие свойства дерново-среднеподзолистой почвы в серии модельных экспериментов, в том числе с загрязнением тяжелыми металлами (ТМ), и выявить их потенциал как почвенных мелиорантов в сравнении с индивидуальными полимерами.*

Место и время проведения. *Исследования проводили в условиях модельных экспериментов в 2024 г.; использовали пахотный горизонт дерново-среднеподзолистой супесчаной несмытой почвы на покровном суглинке (Московская область).*

Методы. *Использованы четыре биополимера: КК и три ГП: «Сахалинский гумат» из угля (СГ), «Торфогель» из торфа (ТГ) и «Лигногумат» из лигносульфоната (ЛГ), а также их комбинации. Исследования проводили при двух способах обработки почвы полимерными рецептурами: разбрызгиванием растворов на поверхность почвы и смешиванием сухих препаратов со всем объемом почвенной массы. В параллельной серии в почвенно-полимерные смеси вносили растворы солей Cu, Zn, Pb в дозах 150 мг/кг почвы. В почвенно-полимерных смесях определяли влагоемкость, pH, содержание Собщ и подвижных форм ТМ в ацетатно-аммонийном буфере. Фитотоксичность почвенно-полимерных смесей оценивали в элюатном биотесте с тест-культурой Raphanus sativus.*

Основные результаты. *Обработка поверхности почвы водными рецептурами, содержащими КК, приводит к формированию верхнего структурированного композитного слоя из частиц субстрата, связанных между собой полимерными мостиками. Введение в водный раствор КК и ГП в соотношении биополимер:гумат = 2,5:1 или 1:1 не оказывает влияния на прочностные характеристики композиционных покрытий. Монокомпонентные составы и бинарные композиции, при внесении в дозе 1г/100 г, оказали стимулирующее действие на тест-культуру R.sativum, причем ЛГ был наиболее эффективным составом. Композиции с КК не показали лучшего эффекта по сравнению с индивидуальными полимерами. В условиях модельного загрязнения, среди монокомпонентных составов наибольшее снижение содержания подвижных форм Cu, Pb и Zn выявлено для гумата из угля (на 34%, 21% и 20% по сравнению с контролем). Гуматы из ТГ и ЛГ по отдельности оказались менее эффективными, но в бинарной композиции с КК их эффективность в снижении подвижности тяжелых металлов увеличилась в среднем на 10%. По результатам фитотеста, при внесении поллютантов все тестируемые рецептуры проявляли протекторные свойства, снижая токсичность ТМ для растений. Водно-физические свойства почвенно-полимерных смесей определялись эффектами КК, а химические и биологические – гуматов.*

Заключение. *КК можно рассматривать как перспективный мелиорант, оказывающий выраженный противоэрозионный эффект. В свою очередь, ГП проявляют биостимулирующий эффект, связывают ТМ и обеспечивают детоксицирующее воздействие разной степени выраженности в зависимости от состава, обусловленного источником органического вещества гуматов. В бинарных композициях указанные эффекты не обладают аддитивностью, но определяются доминирующим механизмом воздействия. Выбор оптимальной рецептуры в качестве почвоулучшителя деградированных почв будет определяться ведущим фактором деградации. Бинарные составы, вероятно, будут обладать комплексным воздействием, поэтому целесообразно проведение их дальнейших исследований в натурных условиях.*

Ключевые слова: *биополимеры; гуминовые вещества; композиционные покрытия; водостойкость; тяжелые металлы, загрязнение.*

Цитирование: *Якименко О.С., Нестеров П.В., Степанов А.А., Панова И. Г., Чернов В.Е., Ярославов А.А. Влияние гуматов калия, ксантановой камеди и бинарных композиций на их основе на свойства дерново-подзолистой почвы в модельных экспериментах // Почвы и окружающая среда. 2025. Том 8. № 1. e302. DOI: 10.31251/pos.v8i1.302*

ВВЕДЕНИЕ

Одной из важнейших проблем современности является эрозия и деградация земель. В связи с этим, активно развиваются приёмы и технологии для сохранения почв и поддержания их плодородия. Перспективным методом является использование синтетических и природных полиэлектролитов, то есть полимеров, содержащих в своем составе способные к ионизации функциональные группы (Панова и др., 2021; Delgado et al., 2024). В зависимости от химической природы и структуры макромолекул, показана их способность смягчать проявления водной и ветровой эрозии, депонировать элементы питания растений, связывать токсиканты, оптимизировать водоудерживающие свойства (Изумрудов и др., 2019; Ayeldeen et al., 2018). В частности, в качестве почвенных ремедиантов и биостимуляторов в агротехнологиях довольно широко применяются гуминовые вещества (**ГВ**) – природные полиамфолиты – в виде промышленных препаратов (Безуглова, Полиенко, 2011; Якименко, 2016; Jindo et al., 2020; Bezuglova, Klimenko 2022).

В качестве почвенных мелиорантов также потенциально возможно использование других полимеров природного происхождения (биополимеров), способных задерживать влагу и оказывать благоприятное воздействие на почвенную структуру (Аржакова и др., 2022; Jang, 2020). Такие полимеры способны к биодеструкции и не вызывают опасений, связанных с накоплением ксенобиотиков в природной среде. В частности, к таким веществам относится ксантановая камедь (**КК**) – хорошо растворимый в воде гетерополисахарид с очень высокой молекулярной массой от 1 до 50×10^6 а.е.м (Garcia-Ochoa et al., 2000). Благодаря гель-образующим свойствам и отсутствию токсичности этот полимер широко применяется в пищевой промышленности, биомедицинской инженерии и геоинженерии (Katzbauer, 1998; Kumar et al., 2018; Berninger et al., 2021).

КК получают методом аэробной ферментации сахарозы или глюкозы бактериями семейства *Xanthomomanas bacterium* (Palaniraj et al., 2011). Первичная структура макромолекулы КК (рис. 1) состоит из основной цепи линейной β-(1–4)-D-глюкозы, напоминающей цепь целлюлозы, и боковых цепей трисахарида, прикрепленных к каждой второй единице глюкозы (Faria et al., 2011). Боковые цепи включают два остатка маннозы и один остаток глюкуроновой кислоты, которые могут содержать карбоксильную и пируватную группы (Abbaszadeh et al., 2015), что придает ксантановой камеди свойства слабого анионного полиэлектролита. КК действует как полианион при pH > 4,5 и легко адсорбирует молекулы воды за счет водородных связей. Характерной чертой гребнеобразных и конформационно жестких макромолекул ксантановой камеди является способность к формированию межмолекулярных связей и физически сшитых полимерных сеток даже при небольших концентрациях. Поэтому КК проявляет водоудерживающие свойства в поровом пространстве почвенных субстратов.

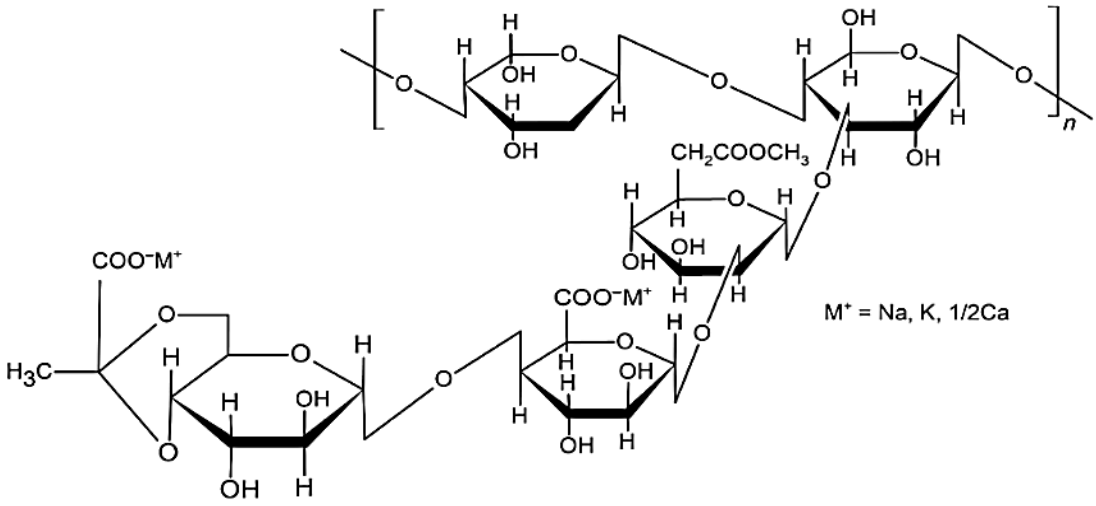


Рисунок 1. Схематическое изображение строения макромолекулы ксантановой камеди (составлена И.Г. Пановой).

В процессе биодеградации КК последовательно деструктирует до олигосахаридов, моносахаридов и, в конечном счете, воды и углекислого газа под действием ферментов, вырабатываемых микроорганизмами. Обнаружено, что за полную деполимеризацию отвечают пять ферментов: ксантанлиаза, β-D-глюканаза, β -D-глюкозидаза, ненасыщенная глюкуронилгидролаза и

α-D-маннозидаза (Nankai et al., 1999). Выработка ферментов, разлагающих КК, показана для *Bacillus* (Cadmus et al., 1982), *Paenibacillus* (Ashraf et al., 2018), *Enterobacter* (Chen et al., 2014) и *Cellumonas* (Liu et al., 2005). Скорость деградации зависит от наличия микроорганизмов, продуцирующих соответствующие ферменты, и условий окружающей среды. Например, было показано, что ксантановая камедь разлагается бактериями активной илистой почвы в течение 7 суток (Muuchova et al, 2009), но ряд исследователей (Cadmus et al., 1982) обнаружили достаточно высокую устойчивость КК к микробной деградации (до нескольких месяцев).

В агротехнологиях КК была успешно протестирована как экологичное связующее для повышения стойкости почв к водной эрозии и дефляции (Chang et al., 2015; Seo et al., 2021). Как и другие водорастворимые полимеры, КК повышает устойчивость песчаных почв к ветру за счет формирования композиционного покрытия на поверхности субстратов (Ayeldeen et al., 2018). В лабораторных экспериментах с использованием гидравлического лотка для моделирования действия водного потока было показано, что добавление КК привело к 80% снижению гидравлической эрозии песчаной почвы за счет создания на ее поверхности защитного желеобразного слоя (Nsengiyumva, Alexandridis, 2022). Внесение КК в красно-желтую почву Кореи при норме 0,5–1,0% от массы почвы позволило практически на порядок повысить ее устойчивость к размывающему действию воды за счет усиления сцепления между частицами (Chang et al., 2015). В целом современные исследования отражают высокий потенциал КК в укреплении и стабилизации почв и грунтов (Cabalar et al., 2017; Mendonça et al., 2020). К тому же фитотестирование показало, что присутствие КК в субстрате стимулирует рост растений. Подобный эффект объяснялся способностью биополимера сорбировать и удерживать воду, предотвращая ее испарение (Zhang et al., 2023; Tran et al., 2019).

Что касается ГВ, то известна их способность к стимулированию роста и развития растений и биологической активности почв (Jindo et al., 2020). Эти эффекты особенно выражены в условиях загрязнения почв (Ли и др., 2016; Степанов и др., 2018; Kulikova et al., 2005). За счет наличия кислых функциональных групп ГВ связывают катионы тяжёлых металлов (**ТМ**), тем самым снижая их токсичность для живых организмов (Bondareva, Kudryasheva 2021; Kulikova, Perminova, 2021). В то же время, промышленные гуминовые препараты, полученные из различного органического сырья (угля, торфа, органических отходов), отличаются как по составу и свойствам органического вещества, так и по степени проявления биостимулирующего и детоксицирующего эффекта (Muscolo et al., 2022; Yakimenko et al., 2018). В целом, препараты из угля, содержащие гуминовые кислоты (**ГК**) с высокой степенью полимеризации ароматического ядра и большим количеством функциональных групп, способствуют формированию почвенных агрегатов, увеличению емкости катионного обмена, доступности элементов питания и связыванию токсикантов (Сивакова и др., 2011; Степанов, Якименко 2023). В препаратах из торфа и органических отходов эти эффекты обычно выражены слабее, но за счет наличия биологически активных веществ в составе кислоторастворимой фракции они оказывают более выраженный стимулирующий эффект (Броварова, 2024).

В настоящее время активный интерес вызывают комбинированные двухкомпонентные рецептуры, которые имеют преимущество перед монокомпонентными составами из-за более выраженного оптимизирующего воздействия на свойства почв (Изумрудов и др., 2019). Например, показано (Berninger et al., 2021), что совместное использование КК с казеином повысило прочностные характеристики почвы по сравнению с нативными биополимерами, а также улучшило ее водостойкость. Мы предположили, что бинарная композиция на основе КК и ГВ будет оказывать комплексное воздействие на свойства почвы, способствуя увеличению почвенной влагоемкости, формированию водопрочных покрытий и проявлению биостимулирующего эффекта. Кроме того, учитывая возможность связывания катионов ТМ полианионами гумата и КК, было целесообразно оценить ремедиационный потенциал КК по отношению к загрязнению почв ТМ как в чистом виде, так и в составе бинарной композиции с гуматами.

Цель исследования – оценить влияние бинарных композиций на основе гетерофункционального полисахарида ксантановой камеди и трех видов гуминовых продуктов на противоэрозионные, водоудерживающие и детоксицирующие свойства дерново-среднеподзолистой почвы в серии модельных экспериментов, в том числе с загрязнением тяжелыми металлами, и выявление их потенциала как почвенных мелиорантов в сравнении с индивидуальными полимерами.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Полимерные рецептуры. В данном исследовании использовали следующие природные полиэлектролиты: гетерополисахарид ксантановая камедь и коммерческие гуминовые препараты (**ГП**) – гуматы калия различных марок, отличающиеся источником органического сырья: гумат

«Сахалинский» из угля, Торфогель из торфа и Лигногумат из лигносульфоната, а также смеси КК и гуматов в соотношении 1:1 и 2,5:1.

Ксантановую камедь (КК) фирмы Ziboxan F200 (Deosen Biochemical Ltd. (Ордос, Китай) использовали без дополнительной очистки. Полимер (формулу см. на рис. 1) представлен порошком светло-кремового цвета, растворим в холодной и горячей воде, содержит 39,2% углерода.

Гумат Сахалинский (СГ) производится методом щелочной экстракции из окисленного бурого угля (леонардита) группой компаний «Сахалинские гуматы»; представлен на рынке как органоминеральное удобрение и биостимулятор.

Лигногумат (ЛГ) представляет собой промышленный препарат гумата калия, полученный термической окислительно-гидролитической обработкой технических лигносульфонатов под высоким давлением компанией ООО «РЭТ» (Санкт-Петербург, Россия). Широко представлен на рынке в качестве стимулятора роста растений.

Торфогель (ТГ) – гуминовый препарат из торфа, разработанный и производимый компанией «Acoustic BioTechnologies LTD» по оригинальной кавитационной технологии. Представляет собой гелеобразную массу с влажностью 74–82% и высоким содержанием комплекса гуминовых веществ.

Общее содержание С в полимерах определяли методом бихроматного окисления по Тюрину. Содержание углерода гуминовых кислот в гуматах – по Тюрину в соответствующих экстрактах после разделения щелочной вытяжки (0,1 н. NaOH, 1:50) подкислением до pH = 1,5. Содержание кислых функциональных групп определяли баритовым методом по Драгуновой. Спектры поглощения растворов гуматов регистрировали в УФ-видимом диапазоне на спектрофотометре Shimadzu 1800 (Япония) в диапазоне длин волн 200–800 нм с шагом 0,5 нм.

Основные характеристики гуматов представлены в табл. 1. Хотя препараты сходны по содержанию общего углерода (30–37%), но состав органического вещества различен и представлен комплексом гуминовых веществ с преобладанием ГК в препаратах из торфа и угля (92 и 77% от $C_{общ}$ соответственно) и сочетанием ГК, фульвокислот и неспецифических органических соединений в Лигногумате (42% ГК). Наибольшее количество кислых функциональных групп содержит СГ – препарат из угля, при этом карбоксильная и фенольная кислотность представлены поровну. В препарате из торфа преобладает карбоксильная кислотность, но по сумме гидроксилов и карбоксилов гуматы ТГ и ЛГ содержат в два раза меньше кислых групп по сравнению с СГ. Различия в молекулярной структуре отражают и спектральные характеристики растворов гуматов: увеличение показателя $E_{465}^{0,001\%}$ в ряду СГ > ТГ > ЛГ свидетельствует об увеличении оптической плотности и степени сопряженности ароматического кольца.

Таблица 1

Химический состав и параметры спектров поглощения гуминовых препаратов

Показатель	Сахалинский	Лигногумат	Торфогель
Сухое вещество, %	98,1	97,9	26,2
Зольность, % к сухому веществу	30,8	29,5	37,1
$C_{общ}$, % к сухому веществу	38,0	34,7	36,9
$C_{гк}/C_{общ}$, %	76,7	41,9	91,4
Активные кислые группы, мг-экв/г			
-COOH	2,08	1,20	2,36
-OH фенольные	2,04	1,00	0,52
Сумма кислых групп	4,12	2,20	2,88
$E_{465}^{0,001\%}$	0,025	0,010	0,014
E_4/E_6	8,67	8,67	3,25

Модельные эксперименты. Исследования проводили в условиях модельных опытов при двух различных способах обработки почвы полимерными рецептурами. В серии противоэрозионных экспериментов тестируемые составы наносили разбрызгиванием растворов на поверхность почвы. В другой серии опытов по изучению влияния природных полимеров на почвенную влагоемкость, химические свойства, рост тест-культуры и связывание ТМ, составы вносили в виде сухих порошков, смешанных со всем объемом почвенной массы. В обеих сериях экспериментов использовали пахотный горизонт дерново-среднеподзолистой супесчаной несмытой почвы на покровном суглинке (Московская область, N 56º2′30,611″ E 37º10′29,993″) со следующими характеристиками: pH 6,8; $C_{общ}$ 3,0%; песок 52%, пыль 39% и ил 9%. Образцы почвы перед исследованиями растирали и просеивали через сито с размером ячеек 2 мм.

В лабораторных противоэрозионных экспериментах поверхность воздушно-сухой почвы, помещенной в пластиковые контейнеры или чашки Петри, равномерно обрабатывали водными растворами монокомпонентных или бинарных рецептур при норме внесения 3 л/м^2 согласно ранее рекомендованным протоколам (Zezin et al., 2015; Novoskoltseva et al., 2022). Схема опыта включала варианты с использованием 11 полимерных составов с использованием дистиллированной воды в качестве растворителя. Монокомпонентные рецептуры готовили на основе нативных КК и гуматов, бинарные рецептуры на основе КК и ГП при соотношении полимера и гуматов по массе 1:1 (смешение равных объемов 0,2% растворов) и 2,5:1 (смешение равных объемов 0,5% раствора КК и 0,2% растворов гуматов). В контрольном эксперименте обработку почвы проводили дистиллированной водой. Образцы сушили до постоянного веса на воздухе при комнатной температуре. После высыхания на поверхности почвы формировались почвенно-полимерные покрытия (**ППП**): сплошные корочки, которые можно было отделить от нижнего не структурированного слоя. Для ППП определяли морфологию, механическую прочность и сопротивляемость водному потоку.

В модельных экспериментах по изучению влияния природных полимеров на влагоемкость и химические характеристики почвы, а также для оценки детоксикационных свойств однокомпонентных и бинарных рецептур, почвы инкубировали с полимерами для обеспечения протекания физических и химических процессов взаимодействия полимеров с почвенной матрицей. Образцы готовили следующим образом. Навески по 100 г воздушно-сухой почвы (< 2 мм) помещали в пластиковые контейнеры, добавляли полимеры в дозе 1% по сухому веществу и тщательно перемешивали. Схема опыта включала варианты с внесением КК, гуматов (СГ, ЛГ и ТГ), а также смесей КК с гуматами в соотношении 1:1 (КК+СГ, КК+ЛГ и КК+ТГ по 0,5 г). Смеси увлажняли дистиллированной водой до 50% от полной влагоемкости и инкубировали 28 суток при комнатной температуре, повторно увлажняя через 7 суток экспозиции.

В параллельной серии подготовленных вышеописанным способом почвенно-полимерных смесей в сосуды дополнительно добавляли раствор, содержащий смесь ТМ в виде нитратов меди, цинка и свинца в дозе 150 мг/кг каждого элемента. Раствор ТМ вносили пипеткой из расчета 15 мл на 100 г почвы и тщательно перемешивали; контрольный вариант увлажняли равным объемом дистиллированной воды. Смеси инкубировали 28 суток при комнатной температуре, также повторно увлажняя дистиллированной водой через каждые 7 суток экспозиции. По окончании инкубирования отбирали пробы для дальнейших анализов, по три аналитические повторности из каждого сосуда. Повторность опыта трехкратная.

Анализы. Морфологию почвенных частиц и сформированных покрытий изучали с помощью сканирующей электронной микроскопии лаборатории электронной микроскопии биологического факультета МГУ с использованием микроскопа JEOL JSM-6380LA.

Механическую прочность сформировавшихся ППП определяли методом пластической деформации с использованием конического пластометра Ребиндера (Хайдапова, Пестонова, 2007). Прочность рассчитывали по формуле: P_l=4,4$*h_m^2 m$, где h_m глубина проникновения конуса с углом раскрытия 30°, вызываемой предельной нагрузкой с весом m (кг), перед разрушением образца (появления трещины в покрытии).

Для исследования водостойкости образцов навески почвы помещали в чашки Петри, на поверхность разбрызгивали полимерные растворы (в контроле – дистиллированную воду) и сушили в течение 3 суток. Полученные образцы с сформировавшимся структурированным ППП располагали под углом 45° и обрабатывали водой из пульверизатора в импульсном режиме в течение 10 минут. Струи воды направляли горизонтально к поверхности, общий объем воды составлял 200 мл. После высыхания рассчитывали потерю почвы при смыве. Эксперименты проводили в пятикратной повторности.

Содержание общего углерода ($C_{общ}$) в КК, гуматах Сахалинский и Лигногумат определяли методом сухого озоления на CNH-анализаторе ECS 8020 (NC Technologies, Italy). Значения полной влагоемкости (**ПВ**) и наименьшей влагоемкости (**НВ**) почвенно-полимерных смесей определяли методом трубок (Вадюнина, Корчагина, 1986). Навески воздушно-сухих смесей помешали в стеклянные трубки с полупроницаемым дном. Трубки устанавливали в емкость с водой для капиллярного насыщения субстратов влагой. После полного насыщения учитывали количество поглощенной влаги и рассчитывали ПВ, а после стекания гравитационной влаги – НВ.

В почвенно-полимерных смесях определяли содержание общего углерода по Тюрину и pH в водной суспензии (1:4). В вариантах опыта с внесением ТМ в почвенно-полимерных смесях определяли содержание подвижных форм Cu, Zn и Pb в аммонийно-ацетатном буфере (pH 4,8;

соотношение почва:раствор 1:10) методом пламенной атомно-абсорбционной спектроскопии на спектрометре Analytik Jena ContrAA 800F.

Фитотестирование образцов почвенно-полимерных смесей без внесения и с внесением ТМ проводили элюатным способом на проростках редиса *Raphanus sativum*. Семена (10 шт.) размещали в стерилизованные чашки Петри на 3 слоя фильтровальной бумаги и вносили по 7 мл водного экстракта почв вариантов опыта, в контрольные – 7 мл дистиллированной воды. Вытяжку готовили экстракцией дистиллированной водой (соотношение 1:4), встряхивали колбы в течение 2 ч и фильтровали через бумажный фильтр «белая лента». Образцы помещали в термостат (23°С) на 72 ч. По окончании экспозиции регистрировали длину корней и ростков. Опыт проводили в трех повторностях (всего 30 семян).

Во всех экспериментах достоверность различий оценивали с применением однофакторного дисперсионного анализа при уровне значимости 0,05; различия оценивали по критерию $НСР_{05}$.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Структурирующие свойства полимеров. При обработке почвы полимерными составами, а также просто водой и последующего высушивания, во всех случаях на поверхности сформировались структурированные ППП толщиной около 6–8 мм. Микрофотографии исходного субстрата и покрытия, полученного при разбрызгивании воды, показаны на рисунке 2. Почва представлена разными по размеру агрегатами, сформированными полидисперсными частицами (рис. 2 А, Б). Обработка водой приводила к распаду поверхностных формирований на более мелкие агрегаты, а также отдельные частицы, которые связываются между собой и образуют размытый сплошной слой из связанных между собой частиц (рис. 2 В, Г).

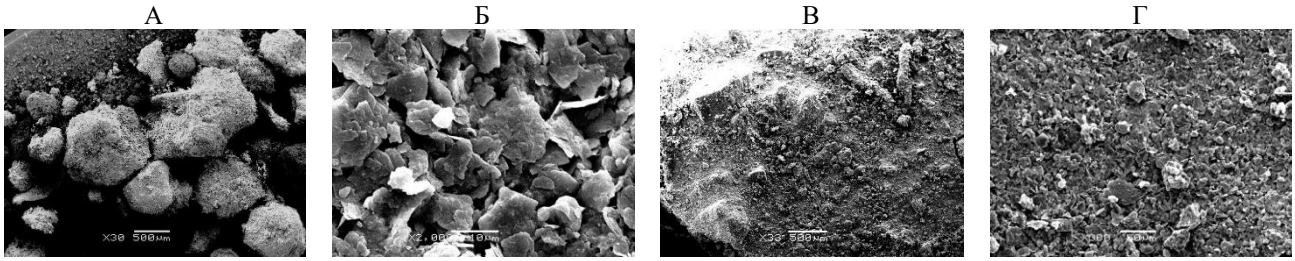


Рисунок 2. Микрофотографии дерново-среднеподзолистой почвы (А, Б) и почвенно-полимерного покрытия (ППП), полученного при разбрызгивании воды на поверхность почвы (В, Г) при различных увеличениях: А – ×30, Б – ×2000, В – ×33, Г – ×300.

Аналогичная картина наблюдалась при разбрызгивании монокомпонентных гуминовых препаратов. В отличие от этого, при использовании рецептур, содержащих КК, большая часть агрегатов на поверхности почвы сохранилась. Для примера на рисунке 3 показаны микрофотографии композиционного покрытия, полученного на основе 0,25 масс.% раствора полисахарида. На них четко визуализируются агрегированные частицы, по-видимому, склеенные между собой полимерными мостиками. Таким образом, формирующееся покрытие представляет собой единую матрицу, иерархично построенную из отдельных почвенных частиц и агрегатов на их основе (рис. 3 А–В). При этом сохраняется микропористость субстрата (рис. 3 Г).

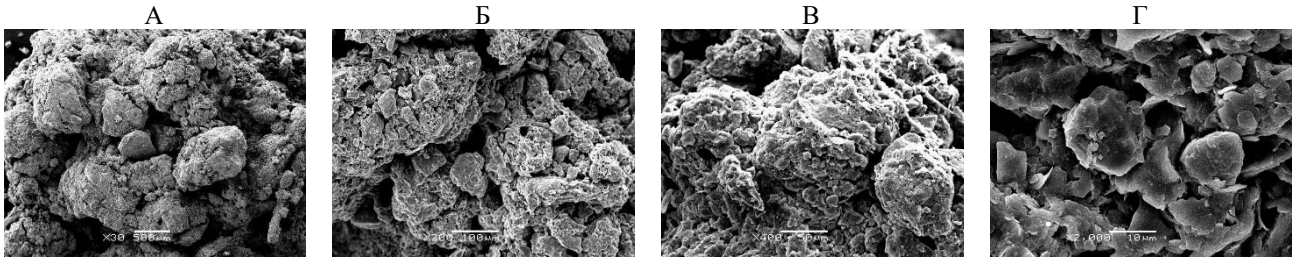


Рисунок 3. Микрофотографии композиционного покрытия, полученного при разбрызгивании 0,25 масс.% раствора ксантановой камеди на поверхность почвы при различных увеличениях: А – ×30, Б – ×200, В – ×400, Г – ×2000.

Механическая прочность сформировавшихся структурированных поверхностных слоев как функция использованных рецептур приведена на рисунке 4. Покрытие, сформировавшееся в контрольном эксперименте при обработке почвы водой, оказалось наименее прочным с показателем P_l = 0,55 кг/см^2 (рис. 4 А). Обработка 0,1 масс.% раствором КК привела к повышению прочности покрытия и величина P_l достигла 2,9 кг/см^2; повышение концентрации полимера до 0,25 масс.% сопровождалось повышением прочности композиционного покрытия, для которого P_l составило 5,7 кг/см^2. Нанесение на поверхность почвы 0,1 масс.% растворов гуминовых препаратов привело лишь к незначительному упрочнению формирующихся покрытий по сравнению с обработкой водой. При этом статистически значимого различия в значении P_l для трех типов гуматов не наблюдалось. Средний показатель пенетрационной прочности составил 0,68 кг/см^2.

При обработке почвы бинарными рецептурами (рис. 4 Б) как на основе 0,1 масс.% раствора КК и 0,1 масс.% растворов гуматов (рецептуры 6-8), так и на основе 0,25 масс.% раствора КК и 0,1 масс.% растворов гуматов (рецептуры 9-11) наблюдались две особенности: 1) прочность покрытий не зависела от природы гуматов; 2) значения P_l статистически значимо не отличались от соответствующих значений, измеренных для покрытий на основе нативного полисахарида.

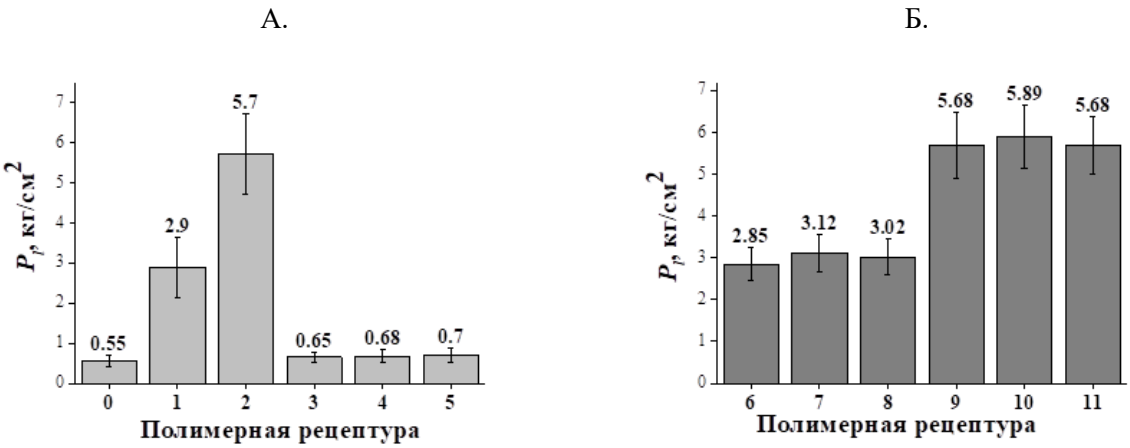


Рисунок 4. Механическая прочность покрытий, полученных после обработки почвы водой и однокомпонентными (А) и бинарными рецептурами (Б).

Обозначения: 0 – обработка водой (контроль); 1 – ксанатовая камедь (КК) 0,1%; 2 – КК 0,25%; 3 – Лигногумат (ЛГ) 0,1%; 4 – гумат Сахалинский (СГ) 0,1%; 5 – торфогель (ТГ) 0,1%; 6 – КК 0,1% + ЛГ 0,1%; 7 – КК 0,1% + СГ 0,1%; 8 – КК 0,1% + ТГ 0,1%; 9 – КК 0,25% + ЛГ 0,1%; 10 – КК 0,25% + СГ 0,1%; 11 – КК 0,25% + ТГ 0,1%.

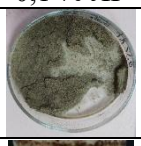
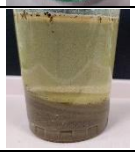
Результаты теста по оценке водостойкости почвы после обработки растворами КК, гуматов и бинарных полимер-гуминовых составов представлены в таблицах 2 и 3. В контрольном варианте модельное дождевание сопровождалось вымыванием 75% почвы из чашки Петри (табл. 2). При предварительной обработке почвы 0,1% раствором КК количество смытой почвы снизилось более чем в два раза (до 32%), а при использовании 0,25% раствора КК сопротивляемость почвы к вымыванию повысилась очень существенно: потеря массы составила лишь 3% (табл. 2). Обработка гуминовыми препаратами привела к незначительному повышению влагостойкости по сравнению с контролем: потеря почвы уменьшилась до 55–59%.

Сходные результаты показали и покрытия на основе бинарных полимер-гуминовых составов (табл. 3). В составе комбинированных рецептур влияние гуматов на противоэрозионную стабильность почвы статистически не отличалось от соответствующих вариантов с обработкой 0,1% и 0,25% растворами КК.

Об эффективности КК в концентрации 0,25% как противоэрозионного мелиоранта свидетельствует также вид смывных вод (табл. 2 и 3). Если в остальных случаях смывные воды были достаточно мутными после осаждения основной массы смытой почвы, то в случае дождевания образцов с покрытиями на основе 0,25 масс.% растворов КК, как нативного раствора (табл. 2), так и бинарных рецептур (табл. 3), смывные воды были достаточно прозрачными. Это свидетельствовало о связывании наиболее мелких фракций почвы и взвешенного органического вещества в ее составе биополимером КК в конгломераты с более крупными фракциями.

Таблица 2

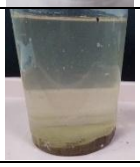
Последствия обработки водой образцов почвы, обработанных и не обработанных монокомпонентными полимерными рецептурами. Расход рецептуры 3 л/м^2

Рецептура	Контроль	0,1 % КК	0,25 % КК	0,1 % ЛГ	0,1 % СГ	0,1 % ТГ
Образец после обработки водой						
Вид смывных вод						
Количество смытой почвы, %	75±10	32±5	3±0,5	58,7±9	59±8	55±8

Примечание.
Обозначения (здесь и в табл. 3): КК – ксанатовая камедь; ЛГ – Лигногумат; СГ – гумат Сахалинский; ТГ – Торфогель.

Таблица 3

Последствия обработки водой образцов почвы, обработанных и не обработанных бинарными полимерными рецептурами. Расход рецептуры 3 л/м^2.

Рецептура	0,1 масс.% КК/0,1 масс.% ЛГ	0,1 масс.% КК/0,1 масс.% СГ	0,1 масс.% КК/0,1 масс.% ТГ	0,25 масс.% КК/0,1 масс.% ЛГ	0,25 масс.% КК/0,1 масс.% СГ	0,25 масс.% КК/0,1 масс.% ТГ
Образец после обработки водой						
Вид смывных вод						
Количество смытой почвы, %	28±4	30±4	27±3	4±0,5	3,7±0,8	3,8±0,5

Влияние полимеров на влагоемкость, химические и детоксицирующие свойства почвы. Дальнейшие исследования проводили в условиях модельного эксперимента с внесением КК, гуматов и бинарных полимер-гуминовых составов в виде сухих порошков в дозе 1% по сухому веществу, смешанных со всем объемом почвенной массы. Хотя в полученных таким образом почвенно-полимерных смесях количество полимеров превышало таковое при поверхностной обработке почв растворами полимеров, но позволило выявить закономерности их влияния на водно-физические, химические и экотоксикологические свойства почвы.

В этом модельном эксперименте внесение всех полимерных составов в объем почвы увеличивало показатели почвенной влагоемкости (табл. 4). Значения ПВ статистически значимо возрастали под воздействием КК и ее композиций с гуматами в 1,4–1,8 раз по сравнению с контролем; гуматы также увеличивали этот показатель, но различия с контролем недостоверны. Влияние на величину НВ было менее выраженным: КК увеличивало ее на 39%, а гуматы СГ и ТГ – на 25%, при этом композиции из КК и гуматов не оказывали значимого влияния на величину НВ.

Внесение всех составов повлияло на величину pH в почвенно-полимерных смесях. Исходная почва характеризовалась слабокислой реакцией среды (pH 6,8); внесение КК, ТГ и их смеси подкисляло ее до pH 6,6, тогда как составы на основе двух других гуматов (Лигногумата и Сахалинского) приводили к увеличению pH до 7–7,6 (табл. 5).

Содержание общего углерода в почвенно-полимерных смесях под воздействием полимерных составов в условиях данного эксперимента увеличилось на 0,5–0,9%, причем наименьший прирост

выявлен в варианте с чистой КК (табл. 5). Учитывая тот факт, что содержание Собщ сходно у КК и гуматов (35–39%, табл. 1), более низкие значения С в варианте с КК могут быть обусловлены неполным окислением органического вещества при проведении анализа методом мокрого озоления по Тюрину.

Таблица 4

Полная и наименьшая влагоемкость почвенно-полимерных смесей при внесении ксантановой камеди (КК) и гуминовых биостимуляторов в дозе 1 г/100 г почвы

Варианты опыта	ПВ, %		НВ, %		ПВ, % к контролю	НВ, % к контролю
	Средние	Ст. откл.	Средние	Ст. откл.		
Контроль	30,1	3,8	27,7	3,5	100	100
Лигногумат ЛГ	35,3	5,7	32,2	4,9	117	116
Сахалинский СГ	37,1	5,4	34,6	4,7	123	**125***
Торфогель ТГ	34,8	2,1	34,3	1,7	116	**124***
Ксантановая камедь КК	55,1	1,3	38,6	1,4	**183***	**139***
КК+СГ	51,7	0,9	31,0	1,3	**172***	112
КК+ЛГ	43,8	2,7	27,5	2,4	**145***	99
КК+ТГ	44,9	4,0	28,0	3,0	**149***	101
$НСР_{05}$	7,6		5,2			

Примечание.

*Результаты достоверно отличаются от контроля по критерию $НСР_{05}$.

В вариантах опыта с модельным полиэлементным загрязнением солями цинка, свинца и меди в дозах 150 мг/кг каждого элемента, внесение КК, гуматов и их композиций в большинстве вариантов привело к снижению содержания подвижных форм металлов (рис. 5). Степень выраженности этого эффекта зависела как от элемента, так и от состава полимерной рецептуры. Так, цинк наименее прочно связывался с твердой фазой почвы: в вытяжку перешло 65–83% от внесенного количества, что составило 98–124 мг/кг (рис. 5 А и табл. 7). При этом КК и два из трех гуматов (ЛГ и ТГ) не оказывали значимого влияния на содержание подвижных форм Zn, тогда как СГ и все композиции КК с гуматами снижали их количество от 123 мг/кг на контроле до 98–100 мг/кг.

Таблица 5

Содержание общего углерода и pH в почвенно-полимерных смесях при внесении ксантановой камеди (КК) и гуминовых биостимуляторов (среднее и стандартное отклонение, n=3)

Варианты опыта	pH	C %
Контроль	6,76±0,02c	3,01±0,15a
Ксантановая камедь КК	6,64±0,02a	3,49±0,11b
Лигногумат ЛГ	7,57±0,03j	3,86±0,15cd
Сахалинский СГ	7,32±0,01f	3,71±0,05c
Торфогель ТГ	6,64±0,01a	3,70±0,17c
КК+СГ	7,01±0,05d	3,82±0,17cd
КК+ЛГ	7,18±0,02e	3,82±0,13cd
КК+ТГ	6,69±0,04b	3,91±0,16d

Примечание.

Буквами указана принадлежность средних значений к гомогенной группе на основании величины НСР по Фишеру, уровень значимости $p \leq 0,05$.

Свинец более прочно закреплялся в почве, в вытяжке обнаружено 45–59% от внесенного количества (68–89 мг/кг, рис. 2 Б и табл. 7). В отличие от цинка, подвижность Pb снижал не только гумат из угля (СГ), но и чистая КК (от 87 мг/г на контроле до 69 мг/кг в КК и СГ), а также в несколько меньшей степени все композиции КК с гуматами (до 79–81 мг/кг).

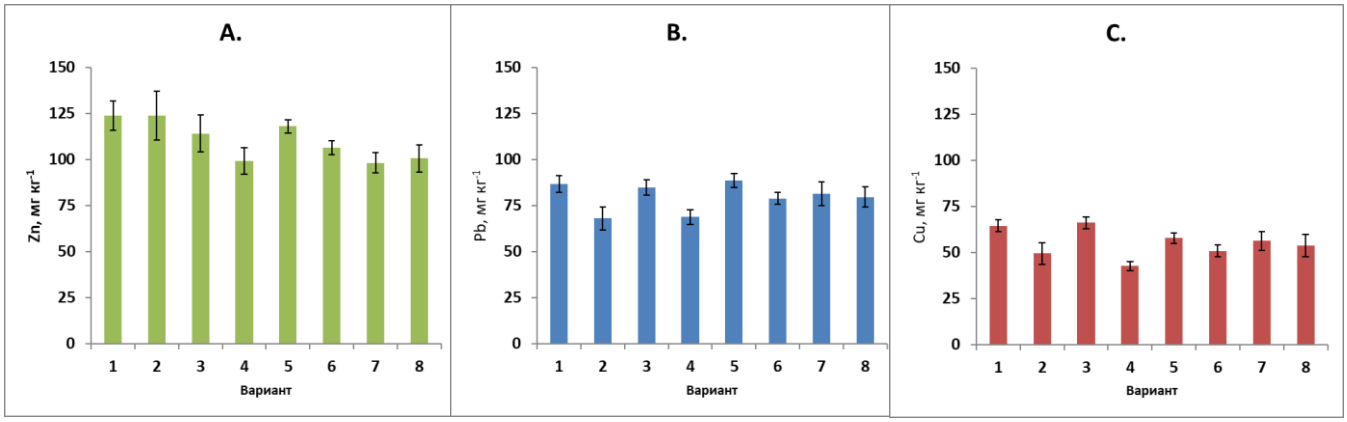


Рисунок 5. Содержание цинка (А), свинца (Б) и меди (В) в ацетатно-аммонийной вытяжке из почвенно-полимерных смесей с модельным загрязнением солями этих металлов в дозах 150 мг/кг (средние и стандартное отклонение, n=6). Обозначения: 1 – Контроль; 2 – Ксантановая камедь КК; 3 – Лигногумат ЛГ; 4 – гумат Сахалинский СГ; 5 -Торфогель ТГ; 6 – КК+СГ; 7 – КК+ЛГ; 8 – КК+ТГ.

Таблица 6

Влияние полимерных составов на развитие корней и проростков *R. sativum* в элюатном фитотесте без /с модельным загрязнением солями Cu, Zn и Pb (среднее и стандартное отклонение, n=30)

Варианты опыта	Длина, см		% к чистому контролю		% к контролю с ТМ	
	Корень	Проросток	Корень	Проросток	Корень	Проросток
Без внесения ТМ						
Контроль	2,40±0,14	0,75±0,13	100	100	н.о	н.о
Ксантановая камедь КК	2,65±0,31	1,25±0,04	111	**167***	н.о	н.о
Лигногумат ЛГ	2,90±0,55	1,64±0,37	**121***	**218***	н.о	н.о
Сахалинский СГ	3,05±0,80	1,52±0,22	**127***	**203***	н.о	н.о
Торфогель ТГ	2,74±0,25	1,27±0,08	114	**169***	н.о	н.о
КК+СГ	2,60±0,16	1,27±0,18	109	**169***	н.о	н.о
КК+ЛГ	2,36±0,22	1,58±0,04	99	**210***	н.о	н.о
КК+ТГ	2,59±0,20	0,99±0,20	108	**132***	н.о	н.о
С внесением ТМ						
Контроль + ТМ	2,87±0,35	1,19±0,11	120	158	100	100
Ксантановая камедь КК	2,59±0,18	1,06±0,04	108	141	90	89
Лигногумат ЛГ	2,50±0,07	1,24±0,18	104	165	87	104
Сахалинский СГ	2,64±0,15	1,31±0,08	110	175	92	111
Торфогель ТГ	2,810,41±	1,21±0,08	117	161	98	102
КК+СГ	2,68±0,,35	1,42±0,10	112	**189***	93	**119***
КК+ЛГ	2,34±0,10	1,63±0,18	98	**217***	81	**137***
КК+ТГ	2,17±0,29	1,17±0,14	91	156	76	99

Примечание.
*Результаты достоверно отличаются от контроля по критерию $НСР_{05}$. н.о – не определяли.

Наиболее сильное связывание катионов металлов исследуемыми составами выявлено для меди: в подвижную форму переходило только 33–44% от внесенного количества (43–66 мг/кг; рис. 2 В). В вариантах с внесением КК как в чистом виде, так и в составе композиций с гуматами содержание подвижной Cu снизилось от 64 мг/кг на контроле до 49 и 51–56 мг/кг, соответственно. Максимальное поглощение Cu обнаружено в варианте с внесением гумата из угля (СГ). Гумат из лигносульфоната (ЛГ) не оказал влияния на содержание подвижных форм Cu, как и для Zn и Pb. Внесение гумата из торфа (ТГ) способствовало некоторой иммобилизации ионов меди, в отличие от цинка и свинца.

Для оценки влияния изучаемых полимерных составов на рост растений в пробах почвенно-полимерных смесей почв проводили фитотестирование на культуре редиса *Raphanus sativum*. Результаты фитотестирования показали, что в отсутствии ТМ значимое положительное воздействие на длину корней оказывают только два из трех тестируемых гуматов – СГ из угля и ЛГ из лигносульфоната, обеспечивая прибавку на 21–27% к контролю; но все рецептуры стимулировали развитие надземной части проростков редиса (табл. 6).

По фону внесения ТМ не выявлено увеличения токсичности по отношению к проросткам *R.sativum* в сравнении с вариантами без модельного токсиканта, вероятно, в результате того, что вносимые дозы ТМ были невысокими (150 мг/кг). При сравнении вариантов обработанных полимерами с загрязненным контролем по величине длины проростков, детоксицирующий эффект показали композиции КК с гуматами СГ и ЛГ (табл. 6).

ОБСУЖДЕНИЕ

При классической поверхностной обработке дерново-подзолистой почвы водными рецептурами, содержащими природные полимеры, на ее поверхности происходит образование структурированного композитного слоя из частиц субстрата, связанных между собой полимерными мостиковыми связями. При этом сохраняется пористая структура верхнего почвенного слоя, что обеспечивает сохранение влаго- и воздухообмена в почве. Высокомолекулярный КК оказывает связующее действие, и, в отличие от гуматов, способствует выраженному упрочнению композиционных покрытий с участием мелкозернистых частиц. Гуматы при норме внесения 0,1 масс.% растворов в количестве 3 л/м^2 увеличили механическую прочность композиционного защитного слоя лишь в 1,2 раза, повысив значение P_l от 0,55 кг/см^2 до 0,68 кг/см^2. КК при той же норме внесения привела к повышению значения P_l до 2,9 кг/см^2, то есть практически в пять раз. При повышении концентрации КК в водном растворе от 0,1 масс.% до 0,25 масс.% происходит увеличение прочности покрытий до 5,7 кг/см^2. Такой эффект объясняется повышением доли биополимерного связующего, и, соответственно, скрепляющих межчастичных контактов в композиционной структуре. Введение в водный раствор полисахарида гуминовых препаратов в соотношении биополимер:гумат = 1:1 или 2,5:1 не оказывает влияния на прочностные характеристики формирующихся композиционных покрытий. В целом аналогичная тенденция наблюдается и в степени влияния монокомпонентных и бинарных рецептур на водостойкость верхнего слоя почвы. Обработка субстрата 0,1 масс.% растворами гуматов обеспечила снижение количества смытой почвы на 22%, в то время как нанесение 0,1 масс.% раствора КК снизила этот показатель на 57 %. Повышение водостойкости субстрата практически до 97% выросло при переходе к 0,25 масс.% КК рецептурам. При этом значительно улучшилось качество смывных вод, в которых практически отсутствовала окраска и мелкодисперсная взвесь. Таким образом, для противоэрозионной обработки почв и снижения вымывания легких фракций и питательных элементов могут быть рекомендованы водные рецептуры с концентрацией КК 0,25 масс.%.

Потенциал применения КК в агротехнологиях обусловлен, главным образом, ее способностью улучшать водоудерживающие характеристики почв. В работе (Wang et al., 2023) показано, что содержание насыщенной влаги в образцах, обработанных 1% ксантановой камедью, увеличилось в 1,3 раза по сравнению с контролем. В нашем эксперименте получены сходные результаты: увеличение ПВ в вариантах с КК и композициями на её основе в 1,4–1,8 раз по сравнению с контролем. Макромолекулы КК связываются с поверхностью почвенных частиц за счет водородных связей, ван-дер-ваальсовых взаимодействий и за счет электростатических связей между отрицательно заряженными сайтами частиц и полимера. За счет водородных связей КК легко адсорбирует молекулы воды и действует как водоудерживающий гидрогель. Гуминовые вещества несколько повышают показатели влагоемкости, но гибкие цепи КК формируют более прочные контакты с органоминеральными частицами почвы, чем разветвленные и конформационно жесткие частицы гуматов.

По результатам элюатного фитотеста с лабораторной тест-культурой (проростки *R. sativum*), в вариантах опыта без внесения токсикантов положительная тенденция в развитии корней заметна лишь при добавлении гуматов (табл. 6). Это согласуется с многочисленными исследованиями, показывающими биостимулирующий эффект гуминовых веществ (Броварова, 2024; Bezuglova, Klimenko 2022; Muscolo et al., 2022). Что касается КК, то ее положительное воздействие на рост тест-культуры также показано в литературе (Tran et al., 2019; Wang et al., 2023), но оно, скорее всего, обусловлено оптимизирующим влиянием на водно-физические свойства почв, в частности, способностью удерживать влагу. В условиях элюатного тестирования этот эффект не проявился.

В данных экспериментальных условиях модельного загрязнения при нейтральной и слабокислой реакции среды, тестируемые полимеры по-разному воздействовали на подвижность ТМ. Наиболее сильное связывание выявлено для меди. Известно, что медь обладает высоким сродством к органическому веществу (Кабата-Пендиас, Пендиас, 1989), поэтому более прочно связывается с органоминеральной почвенной матрицей при внесении органических мелиорантов. Среди монокомпонентных составов, КК достоверно снижала содержание подвижной меди и свинца до 77-79% к контролю, но не влияла на подвижность цинка (табл. 7). Из гуматов максимальный эффект для всех элементов оказывал препарат из угля «Сахалинский», снижая содержание подвижных форм ТМ на 20-34% к контролю. Два остальных гумата – Лигногумат и Торфогель – не оказали существенного воздействия на содержание подвижных форм ТМ. Очевидно, эти особенности обусловлены различиями в молекулярной структуре гуматов (табл. 1).

При внесении бинарных составов сохраняются те же тенденции. Уровни связывания ТМ в большинстве вариантов КК+гумат сходны с таковыми для индивидуальных полимеров.

Таблица 7

Значения pH и содержание тяжелых металлов (ТМ) в ацетатно-аммонийной вытяжке из почвенно-полимерных смесей с модельным загрязнением солями меди, цинка и свинца, % к контролю и внесенному количеству элемента (150 мг/кг)

Вариант	pH	ТМ, % к контролю			ТМ, % к внесенному количеству		
		Cu	Pb	Zn	Cu	Pb	Zn
Контроль	6,0	100	100	100	43	58	83
Ксантановая камедь КК	6,0	**77***	**79***	100	33	45	83
Лигногумат ЛГ	7,0	103	98	92*	44	56	76
Сахалинский СГ	6,4	**66***	**79***	**80***	28	46	66
Торфогель ТГ	6,0	**90***	102	95	39	59	79
КК+СГ	6,2	**79***	**91***	**86***	34	53	71
КК+ЛГ	6,5	**87***	94	**79***	37	54	65
КК+ТГ	6,0	**84***	**92***	**81***	36	53	67

Примечание.

* Значения достоверно отличаются от контроля по НСР-тесту при $p<0,05$.

Различия в сорбционной способности полимерных составов связаны с их молекулярной структурой. В целом, для ГВ характерно связывание металлов карбоксильными группами и поликатионными мостиками (Kulikova et al., 2005; Janos et al., 2010). Такой же механизм, предположительно, может проявляться и у полианиона КК. Дополнительно к этому механизму ГВ проявляют окислительно-восстановительную активность благодаря наличию высококонденсированных ароматических структур, богатых хиноновыми/гидрохиноновыми фрагментами (Kulilova, Perminova, 2021). В ряду исследованных гуматов наиболее конденсированной структурой и высоким содержанием кислых функциональных групп обладает гумат из угля «Сахалинский», что и обусловило его способность к связыванию ТМ. Гумат «Лигногумат», напротив, вовсе не снижает выход подвижных форм ТМ, несмотря на довольно высокое значение pH почвы в этом варианте опыта (7,0; табл. 7). По данным наших предыдущих исследований (Якименко и др., 2022; Yakimenko et al., 2021, 2024), этот препарат легко переходит в подвижные фракции почвенного органического вещества и содержит большое количество низкомолекулярных фенольных соединений, способных хелатировать металлы и таким образом переводить их в подвижную форму. Гумат из торфа «Торфогель» занимает промежуточное положение.

В то же время, препарат «Лигногумат» проявил наибольшую биостимулирующую активность в фитотестах (табл. 6). Причем в эксперименте без внесения токсикантов этот эффект более выражен для монокомпонентного состава, а при внесении ТМ – в составе бинарной композиции. Этот факт согласуется с другими исследованиями, подтверждающими эффективность этого гуминового препарата (Пукальчик и др., 2016; Поздняков и др., 2020).

ВЫВОДЫ

1. Обработка поверхности дерново-подзолистой среднесуглинистой почвы водными рецептурами, содержащими ксанатовую камедь (КК), и последующая сушка приводят к формированию верхнего структурированного композитного слоя из частиц субстрата, связанных между собой за счет формирования полимерных мостиков. Введение в водный раствор КК гуминовых препаратов в соотношении биополимер:гумат = 2,5:1 или 1:1 не оказывает влияния на прочностные характеристики формирующихся композиционных покрытий. Для противоэрозионной обработки суглинистой почвы наиболее эффективным является использование 0,25 масс.% растворов КК как в виде однокомпонентной рецептуры, так и в виде бинарных рецептур биополимера в комбинации с гуматами.
2. При внесении всех видов исследуемых полимеров в дозе 1 г/100 г почвы, монокомпонентные составы и бинарные композиции оказали стимулирующее действие на тест-культуру *R. sativum*, увеличивая длину корней и проростков, причем Лигногумат был наиболее эффективным составом. Композиции с КК не показали лучшего эффекта на рост проростков по сравнению с индивидуальными полимерами.
3. В условиях модельного загрязнения среди монокомпонентных составов наибольшее снижение содержания подвижных форм Cu, Pb и Zn выявлено для гумата из угля (на 34, 21 и 20% по сравнению с контролем). Гуматы из торфа и лигносульфоната по отдельности оказались менее эффективными, но в бинарной композиции с КК их эффективность в снижении подвижности тяжелых металлов увеличилась в среднем на 10%. При внесении поллютантов все тестируемые рецептуры по результатам фитотеста проявляют протекторные свойства, снижая токсичность тяжелых металлов для растений.
4. Водно-физические свойства почвенно-полимерных смесей определяются эффектами КК, а химические и биологические – гуматов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты показали, что КК можно рассматривать как перспективный мелиорант, оказывающий выраженный противоэрозионный эффект благодаря формированию верхнего структурированного композитного слоя из почвенных частиц, связанных между собой за счет формирования полимерных мостиков. Кроме этого, полисахарид оказал некоторое стимулирующее действие на рост растений, а при загрязнении ТМ связывал катионы меди и свинца за счет содержания карбоксильных групп. В свою очередь, ГП проявляют биостимулирующий эффект, связывают ТМ и обеспечивают детоксицирущее воздействие разной степени выраженности в зависимости от состава, обусловленного источником органического вещества гуматов. В бинарных композициях указанные эффекты, как правило, не обладают аддитивностью, но определяются доминирующим механизмом воздействия (например, воздействие КК как связующего, СГ как сорбента ТМ и т.д.). Таким образом, выбор оптимальной рецептуры в качестве почвоулучшителя деградированных почв будет определяться ведущим фактором деградации (водная или ветровая эрозия для КК, загрязнение поллютантами – для гумата). Бинарные составы, вероятно, будут обладать комплексным воздействием, поэтому целесообразно проведение их дальнейших исследований в натурных условиях.

ФИНАНСОВАЯ ПОДДЕРЖКА

Работа выполнена при финансовой поддержке Программы развития МГУ (проект № 23-Ш07-13).

ЛИТЕРАТУРА

Аржакова О.В., Аржаков М.С., Бадамшина Э.Р., Брюзгина Е.Б., Брюзгин Е.В., Быстрова А.В., Ваганов Г.В., Василевская В.В., Вдовиченко А.Ю., Галлямов М.О., Гумеров Р.А., Диденко А.Л., Зефиров В.В., Карпов С.В., Комаров П.В., Куличихин В.Г., Курочкин С.А., Ларин С.В., Малкин А.Я., Миленин С.А., Музафаров А.М., Молчанов В.С., Навроцкий А.В., Новаков И.А., Панарин Е.Ф., Панова И.Г., Потемкин И.И., Светличный В.М., Седуш Н.Г., Серенко О.А., Успенский С.А., Филиппова О.Е., Хохлов А.Р., Чвалун С.Н., Шейко С.С., Шибаев

А.В., Эльманович И.В., Юдин В.Е., Якиманский А.В., Ярославов А.А. Полимеры будущего // Успехи химии. 2022. Том 91. № 12. С. RCR5062. https://doi.org/10.57634/RCR5062

Безуглова О.С., Полиенко Е.А. Применение гуминовых препаратов под картофель и озимую пшеницу // Проблемы агрохимии и экологии. 2011. № 4. С. 29–32.

Броварова О.В. Биологическая активность гуминовых веществ торфа в качестве ростстимулирующих препаратов // Агрохимия. 2024. № 8. С. 50–56. https://doi.org/10.31857/S0002188124080076

Вадюнина А.Ф, Корчагина З.А. Методы исследования физических свойств почв. Москва: Агропромиздат, 1986. 416 с.

Изумрудов В.А., Мусабаева Б.Х., Касымов, Ж.С., Кливенко А.Н., Оразжанова Л.К. Интерполиэлектролитные комплексы: достижения и перспективы применения // Успехи химии. 2019. Том 88. № 10. С. 1046–1062. https://doi.org/10.1070/rcr4877

Кабата-Пендиас А., Пендиас Х. Микроэлементы в почвах и растениях. Перевод с англ. Москва: Мир, 1989. 439 с.

Ли С.П., Худайбергенова Б.М., Пулатова З.М., Прохоренко В.А. Детоксицирующие свойства гуминовых препаратов по отношению к Cd (II), Pb (II), Cu (II) // Теоретическая и прикладная экология. 2016. №. 1. С. 82–87.

Панова И.Г., Ильясов Л.О., Ярославов А.А. Поликомплексные рецептуры для защиты почв от деградации // Высокомолекулярные соединения. Серия С. 2021. Том 63. № 2. С. 232–244. https://doi.org/10.31857/S2308114721020060

Поздняков Л.А., Степанов А.Л., Гасанов М.Э., Семенов М.В., Якименко О.С., Суада А.К., Рай А.Н., Щеголькова Н.М. Влияние лигногумата на биологическую активность почвы о. Бали, Индонезия // Почвоведение. 2020. № 5. С. 601–609. https://doi.org/10.31857/S0032180X20050111

Пукальчик М.А., Терехова В.А., Якименко О.С., Акулова М.И. Сравнение ремедиационных эффектов Биочара и Лигногумата на почвы при полиметаллическом загрязнении // Теоретическая и прикладная экология. 2016. № 2. С. 79–85.

Сивакова Л.Г., Лесникова Н.П., Ким Н.М., Ротова Г.М. Физико-химические свойства гуминовых веществ торфа и бурого угля // Химия твердого топлива. 2011. № 1. С. 3–8.

Степанов А.А., Якименко О.С. Гуминовые почвомодификаторы из торфа и угля: влияние на химические и биологические свойства модельных почвосмесей // Агрохимия. 2023. № 5. С. 53–59. https://doi.org/10.31857/S0002188123050095

Степанов А. А., Шульга П. С., Госсе Д. Д., Смирнова М. Е. Применение природных гуматов для ремедиации загрязненных городских почв и стимулирования роста растений // Вестник Московского университета. Серия 17. Почвоведение. 2018. № 2. С. 30–34.

Хайдапова, Д.Д., Пестонова Е.А Прочность межчастичных связей в почвенных пастах и агрегатах // Почвоведение. 2007. № 11. С. 1330–1335.

Якименко О.С. Применение гуминовых продуктов в РФ: результаты полевых опытов (обзор литературы) // Живые и биокосные системы. 2016. № 18. http://www.jbks.ru/archive/issue-18/article-4

Якименко О. С., Зиганшина А. Р., Степанов А. А., Панова И. Г., Ярославов А. А. Влияние полиэлектролитов на органическое вещество некоторых почв в модельных экспериментах // Почвоведение. 2022. № 7. С. 929–939. https://doi.org/10.31857/S0032180X22070139

Ayeldeen M., Negm A., El Sawwaf M., Gädda T. Laboratory study of using biopolymer to reduce wind erosion // International Journal of Geotechnical Engineering. 2018. Vol. 12. No. 3. P. 228–240. https://doi.org/10.1080/19386362.2016.1264692

Abbaszadeh A., Lad M., Janin M., Morris G.A., MacNaughtan W, Sworn G., Foster T.J. A novel approach to the determination of the pyruvate and acetate distribution in xanthan // Food Hydrocolloids. 2015. Vol. 44. P. 162–171. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2014.08.014

Ashraf S., Soudi M., Amoozegar M.A., Moshtaghi Nikou M., Spröer C. Paenibacillus xanthanilyticus sp. nov., a xanthan-degrading bacterium isolated from soil // International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology. 2018. Vol. 68. No. 1. P. 76–80. https://doi.org/10.1099/ijsem.0.002453

Berninger T., Dietz N., González López Ó. Water-soluble polymers in agriculture: xanthan gum as eco-friendly alternative to synthetics // Microbial Biotechnology. 2021. Vol. 14. No. 5. P. 1881–1896. https://doi.org/10.1111/1751-7915.13867

Bezuglova O., Klimenko A. Application of humic substances in agricultural industry // Agronomy. 2022. Vol. 12. No. 3. P. 584. https://doi.org/10.3390/agronomy12030584

Bondareva L, Kudryasheva N. Direct and indirect detoxification effects of humic substances // Agronomy. 2021. Vol. 11. No. 2. P. 198. https://doi.org/10.3390/agronomy11020198

Cabalar A.F., Wiszniewski M., Skutnik Z. Effects of xanthan gum biopolymer on the permeability, odometer, unconfined compressive and triaxial shear behavior of a sand // Soil mechanics and foundation engineering. 2017. Vol. 54. P. 356–361. https://doi.org/10.1007/s11204-017-9481-1

Cadmus M.C, Jackson L.K, Burton K.A, Plattner R.D, Slodki M.E. Biodegradation of xanthan gum by *Bacillus* sp. // Applied and Environmental Microbiology. 1982. Vol. 44. No. 1. P. 5–11. https://doi.org/10.1128/aem.44.1.5-11.1982

Chang I., Prasidhi A.K., Im J., Shin H.D., Cho G.C. Soil treatment using microbial biopolymers for anti-desertification purposes // Geoderma. 2015. Vol. 253. P. 39–47. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.04.006

Chen X., Wang M., Yang F., Tang W., Li X. Isolation and characterization of xanthan-degrading Enterobacter sp. nov. LB37 for reducing the viscosity of xanthan in petroleum industry // World Journal of Microbiology and Biotechnology. 2014. Vol. 30. P. 1549–1557. https://doi.org/10.1007/s11274-013-1578-8

Delgado M.Z., Aranda F.L., Hernandez-Tenorio F., Garrido-Miranda K.A., Meléndrez M.F., Palacio D.A. Polyelectrolytes for environmental, agricultural, and medical applications // Polymers. 2024. Vol. 16. No. 10. P. 1434. https://doi.org/10.3390/polym16101434

Faria S., de Oliveira Petkowicz C.L., de Morais S.A.L., Terrones M.G.H., De Resende M.M., de Franca F.P., Cardoso V.L. Characterization of xanthan gum produced from sugar cane broth // Carbohydrate Polymers. 2011. Vol. 86. No. 2. P. 469–476. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2011.04.063

Garcia-Ochoa F., Santos V.E., Casas J.A., Gomez E. Xanthan gum: production, recovery, and properties // Biotechnology Advances. 2000. Vol. 18. No. 7. P. 549–579. https://doi.org/10.1016/S0734-9750(00)00050-1

Jang J. A review of the application of biopolymers on geotechnical engineering and the strengthening mechanisms between typical biopolymers and soils // Advances in Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 2020. No. 1. P. 1465709. https://doi.org/10.1155/2020/1465709

Janos P., Vavrova J., Herzogova L., Pilarova V. Effects of inorganic and organic amendments on the mobility (leachability) of heavy metals in contaminated soil: a sequential extraction study // Geoderma. 2010. Vol. 159. No. 3–4. P. 335–341. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2010.08.009

Jindo K.K., Olivares F.L., Malcher D.J.D.P., Sánchez- Monedero M.A., Kempenaar C., Canellas L.P. From lab to field: Role of humic substances under open-field and greenhouse conditions as biostimulant and biocontrol agent // Frontiers in Plant Science. 2020. Vol. 11. P. 426. https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00426

Katzbauer B. Properties and applications of xanthan gum // Polymer Degradation and Stability. 1998. Vol. 59. No. 1–3. P. 81–84. https://doi.org/10.1016/S0141-3910(97)00180-8

Kulikova N.A, Perminova I.V. Interactions between humic substances and microorganisms and their implications for nature-like bioremediation technologies // Molecules. 2021. Vol. 26. No. 9. P. 2706. https://doi.org/10.3390/molecules26092706

Kulikova N.A, Stepanova E.V, Koroleva O.V. Mitigating activity of humic substances: direct influence on biota. In: Use of humic substances to remediate polluted environments: from theory to practice / I.V. Perminova, K. Hatfield, N. Hertkorn (eds.). NATO Science Series, 2005. Vol. 52. P. 285–309. https://doi.org/10.1007/1-4020-3252-8_14

Kumar A., Rao K.M., Han S.S. Application of xanthan gum as polysaccharide in tissue engineering: A review // Carbohydrate Polymers. 2018. Vol. 180. P. 128–144. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2017.10.009

Liu H., Huang C., Dong W., Du Y., Bai X., Li X. Biodegradation of xanthan by newly isolated *Cellulomonas* sp. LX, releasing elicitor-active xantho-oligosaccharides-induced phytoalexin synthesis in soybean cotyledons // Process Biochemistry. 2005. Vol. 40. No. 12. P. 3701–3706. https://doi.org/10.1016/j.procbio.2005.05.006

Mendonça A., Morais P.V., Pires A.C., Chung A.P., Oliveira P.V. A review on the importance of microbial biopolymers such as xanthan gum to improve soil properties // Applied Sciences. 2020. Vol. 11. No. 1. P. 170. https://doi.org/10.3390/app11010170

Muscolo A., Sidari M., Cozzolino V., Nuzzo A., Nardi S., Piccolo A. Molecular characteristics of humic substances from different origins and their effects on growth and metabolism of *Pinus laricio callus* // Chemical and Biological Technologies in Agriculture. 2022. Vol. 9. No. 1. P. 1–18. https://doi.org/10.1186/s40538-022-00334-y

Nankai H., Hashimoto W., Miki H., Kawai S., Murata K. Microbial system for polysaccharide depolymerization: enzymatic route for xanthan depolymerization by *Bacillus* sp. strain GL1 // Applied and Environmental Microbiology. 1999. Vol. 65. No. 6. P. 2520–2526. https://doi.org/10.1128/AEM.65.6.2520-2526.1999

Novoskoltseva O.A., Loiko N.G., Nikolaev Y.A., Lisin A.O., Panova I.G., Yaroslavov A.A. Interpolyelectrolyte complexes based on hydrolyzed polyacrylonitrile for anti-erosion stabilization of soils and ground // Polymer International. 2022. Vol. 71. No. 6. P. 697–705. https://doi.org/10.1002/pi.6289

Nsengiyumva E.M., Alexandridis P. Xanthan gum in aqueous solutions: Fundamentals and applications // International Journal of Biological Macromolecules. 2022. Vol. 216. P. 583–604. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.06.189

Palaniraj A., Jayaraman V. Production, recovery and applications of xanthan gum by Xanthomonas campestris // Journal of food engineering. 2011. Vol. 106. No. 1. P. 1–12. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2011.03.035

Seo S., Lee M., Im J., Kwon Y.M., Chung M.K., Cho G., Chang I. Site application of biopolymer-based soil treatment (BPST) for slope surface protection: in-situ wet-spraying method and strengthening effect verification // Construction and Building Materials. 2021. Vol. 307. P. 124983. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124983

Tran A.T.P., Chang I., Cho G.C. Soil water retention and vegetation survivability improvement using microbial biopolymers in drylands // Geomechanics and Engineering. 2019. Vol. 17. No. 5. P. 475–483. https://doi.org/https://doi.org/10.12989/gae.2019.17.5.475

Wang S., Zhao X., Zhang J., Jiang T., Wang S., Zhao J., Meng Z. Water retention characteristics and vegetation growth of biopolymer-treated silt soils // Soil and Tillage Research. 2023. Vol. 225. P. 105544. https://doi.org/10.1016/j.still.2022.105544

Yakimenko O., Khundzhua D., Izosimov A., Yuzhakov V., Patsaeva S. Source indicator of commercial humic products: UV-Vis and fluorescence proxies // Journal of Soils and Sediments. 2018. Vol. 18. No. 4. P. 1279–1291. https://doi.org/10.1007/s11368-016-1528-9

Yakimenko O., Stepanov A., Patsaeva S., Khundzhua D., Osipova O., Gladkov O. Formation of humic-like substances during the technological process of Lignohumate® synthesis as a function of time // Separations. 2021. Vol. 8. No 7. P. 1–13. https://doi.org/10.3390/separations8070096

Yakimenko O.S., Panova I.G., Novoskoltseva O., Gruzdenko D., Pozdnyakov L., Kadulin M., Stepanov A.A., Terekhova V., Yaroslavov A. Humic substances enhance the performance of polyelectrolyte-based formulations as soil conditioners // Humic substances and green technologies (HIT-2024): ninth International Conference of the CIS IHSS on humic innovative technologies (Sailing Club “Vodnik”, Moscow Region, Russia, 25–28 October, 2024). Book of Abstracts. 2024. P. 56. http://www.humus.ru/hit-2024/abstractbook/HIT-2024-abstractbook.pdf

Zezin A.B., Mikheikin S.V., Rogacheva V.B., Zansokhova M.F., Sybachin A.V., Yaroslavov A.A. Polymeric stabilizers for protection of soil and ground against wind and water erosion // Advances in Colloid and Interface Science. 2015. Vol. 226. P. 17–23. https://doi.org/10.1016/j.cis.2015.06.006

Поступила в редакцию 03.03.2025
Принята 25.04.2025
Опубликована 03.05.2025

Сведения об авторах:

Якименко Ольга Сергеевна – кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник кафедры химии почв факультета почвоведения ФГБОУ «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова» (г. Москва, Россия); iakim@soil.msu.ru; https://orcid.org/0000-0003-0499-5482

Нестеров Павел Владимирович – магистрант кафедры химии почв факультета почвоведения ФГБОУ «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова» (г. Москва, Россия); pkontinium@yandex.ru

Степанов Андрей Анатольевич – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник кафедры химии почв факультета почвоведения ФГБОУ «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова» (г. Москва, Россия); stepan.1963@mail.ru

Панова Ирина Геннадьевна – кандидат химических наук, ведущий научный сотрудник кафедры высокомолекулярных соединений химического факультета ФГБОУ «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова» (г. Москва, Россия), igpan@mail.ru; https://orcid.org/ 0000-0002-0519-3695

Чернов Вячеслав Евгеньевич – инженер кафедры высокомолекулярных соединений химического факультета ФГБОУ «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова» (г. Москва, Россия); slavachernov111@yandex.ru

Ярославов Александр Анатольевич – доктор химических наук, чл.-корр. РАН, заведующий кафедрой высокомолекулярных соединений химического факультета ФГБОУ «Московский

государственный университет имени М.В. Ломоносова» (г. Москва, Россия), yaroslav@belozersky.msu.ru; https://orcid.org/0000-0003-1627-1270

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Статья доступна по лицензии Creative Commons Attribution 4,0 License

Effect of potassium humates, xanthan gum and their combinations on the properties of soddy-podzolic soil in model experiments

© 2025 O. S. Yakimenko [1], P. V. Nesterov[1], A. A. Stepanov[1], I. G. Panova[2], V. E. Chernov[2], A. A. Yaroslavov [2]

[1]Faculty of Soil Science, Lomonosov Moscow State University, Leninskie Gory, 1-12, Moscow, Russia. E-mail: iakim@soil.msu.ru

[2]Faculty of Chemistry, Lomonosov Moscow State University, Leninskie Gory, 1-3, Moscow, Russia. E-mail: yaroslav@belozersky.msu.ru

The aim of the study *was to evaluate the effect of binary compositions based on the heterofunctional polysaccharide xanthan gum (XG) and three kinds of humic products (HP) on the anti-erosion, water-retaining and detoxifying properties of sod-podzolic soil in a series of model experiments, including those spiked with heavy metals (HM), and to identify the potential of these combinations as soil ameliorants in comparison with the individual polymers.*

Location and time of the study. *The study was carried out in model experiments in 2024 using the arable horizon of sod- podzolic sandy loam soil (Moscow region).*

Methods*. Four biopolymers were used: XG and three potassium humates (from lignite, peat and lignosulfonate), as well as their binary compositions. For soil treatment with polymer formulations two methods were used: spraying solutions onto the soil surface and mixing dry preparations with the entire soil volume. In a parallel series, soils were spiked with Cu, Zn, and Pb salts (150 mg/kg of each element). In soil-polymer mixtures, moisture retaining capacity, pH, C total, mobile forms of HM in acetate-ammonium buffer were determined. Phytotoxicity of soil-polymer mixtures was assessed in a biotest with Raphanus sativus.*

Results. *Treatment of the soil surface with formulations containing XG resulted in the formation of a structured composite layer of substrate particles linked together by polymer bridges. The introduction of HP into an aqueous solution of XG in the ratio biopolymer:humate = 2.5:1 or 1:1 did not affect the strength of the composite coatings. When applied at a rate of 1 g/100 g, both monocomponent formulations and binary compositions provided a stimulating effect on the test culture R. sativum. Binary compositions with XG did not show a better effect compared to individual polymers. Under the conditions of model contamination, among monocomponent formulations, the greatest decrease in the content of mobile Cu, Pb and Zn was found for humate from lignite (by 34%, 21% and 20% as compared with the control). Humates from peat and lignosulfonate alone turned out to be less effective, but in a binary composition with XG, their effectiveness in reducing the HM mobility increased by an average of 10%. According to the results of the phytotest in HM-spiked treatments, all the tested formulations exhibited protective properties, mitigating the toxicity of HM for plants.*

Conclusions. *The hydro-physical properties of soil-polymer mixtures were found to be determined by the xanthan gum, whereas chemical and biological properties were determined by humates. Xanthan gum can be considered as a promising ameliorant with a pronounced anti-erosion effect. In turn, humic products exhibited a biostimulating effect, bound heavy metals and provided a detoxifying effect of varying degrees depending on the composition and the organic matter source. In binary compositions, these effects did not show additivity, but were determined by the dominant mechanism of action. The choice of the optimal formulation as a soil conditioner for degraded soils should be determined depending the leading factor of soil degradation. Binary compositions are likely to have a complex effect, so their further studies in natural conditions are expedient.*

Keywords: *biopolymers; humic substances; composite coatings; water resistance; heavy metals; contamination.*

How to cite: *Yakimenko O.S., Nesterov P.V., Stepanov A.A., Panova I.G., Chernov V.E., Yaroslavov A.A. Effect of potassium humates, xanthan gum and their combinations on the properties of sod-podzolic soil in model experiments. The Journal of Soils and Environment. 2025. 8(1). e302. DOI: 10.31251/pos.v8i1.302 (in Russian with English abstract).*

FUNDING

The study was financially supported by Lomonosov Moscow University Program of Development (project No. 23-SCH07-13).

REFERENCES

Arzhakova O.V., Arzhakov M.S., Badamshina E.R., Bryuzgina E.B.3 Bryuzgin E.V., Bystrova A.V., Vaganov G.V., Vasilevskaya V.V., Vdovichenko A.Yu., Gallyamov M.O., Gumerov R.A., Didenko A.L., Zefirov V.V., Karpov S.V., Komarov P.V., Kulichikhin V.G., Kurochkin S.A., Larin S.V., Malkin A.Ya., Milenin S.A., Muzafarov A.M., Molchanov V.S., Navrotskiy A.V., Novakov I.A., Panarin E.F., Panova I.G., Potemkin I.I., Svetlichny V.M., Sedush N.G., Serenko O.A., Uspenskii S.A., Philippova O.E., Khokhlov A.R, Chvalun S.N., Sheiko S.S., Shibaev A.V., Elmanovich I.V., Yudin V.E., Yakimansky A.V., Yaroslavov A.A. Polymers for the future. Uspekhi Khimii. 2022. Vol. 91. No. 12. P. RCR5062. (in Russian). https://doi.org/10.57634/RCR5062

Bezuglova O.S., Polienko E.A. Application of humic preparations for potato and winter wheat. Agrochemistry and Ecology Problems. 2011. No. 4. P. 29–32. (in Russian).

Brovarova O.V. The study of the biological activity of humic substances of peat as growth-stimulating drugs. Agrohimia. 2024. No. 8. P. 50–56. (in Russian). https://doi.org/10.31857/S0002188124080076

Vadyunina A.F., Korchagina Z.A. Methods of studying soil physical properties. Moscow: Agropromizdat, 1986. 416 p. (in Russian).

Izumrudov V.A., Mussabayeva B.K., Kassymova Z.S., Klivenko A.N., Orazzhanova L.K. Interpolyelectrolyte complexes: advances and prospects of application. Russian Chemical Reviews. 2019. Vol. 88. No. 10. P. 1046–1062. https://doi.org/10.1070/rcr4877

Kabata-Pendias A., Pendias H. Microelements in soils and plants. Translation from English. Moscow: Mir Publ., 1989. 439 p. (in Russian).

Li S.P., Khudaybergenova B.M., Pulatova Z.M., Prokhorenko V.A. Detoxifying properties of humic preparations with respect to Cd (II), Pb (II) and Cu (II). Theoretical and Applied Ecology. 2016. No. 1. P. 82–87. (in Russian).

Panova I.G., Ilyasov L.O., Yaroslavov A.A. Polycomplex formulations for the protection of soils against degradation. Polymer Science. Series C. 2021. Vol. 63. No. 2. P. 237–248. https://doi.org/10.1134/S1811238221020065

Pozdnyakov L.A., Stepanov A.L., Gasanov M.E., Semenov M.V., Yakimenko O.S., Suada I.K., Rai I.N., Shchegolkova N.M. Effect of Lignohumate on soil biological activity on the Bali Island, Indonesia. Eurasian Soil Science. 2020. Vol. 53. No. 5. P. 653–660. https://doi.org/10.1134/S1064229320050117

Pukalchik M.A., Terekhova V.A., Yakimenko O.S., Akulova M.I. Evaluation of biochar and lignogumate remediation effect in heavy metal-contaminated soil. Theoretical and Applied Ecology. 2016. No. 2. P. 79–85. (in Russian).

Sivakova L.G., Lesnikova N.P., Kim N.M., Rotova G.M. Physicochemical properties of the humic substances of peat and brown coal. Solid Fuel Chemistry. 2011. Vol. 45. No. 1. P. 1–6. https://doi.org/10.3103/S0361521911010125

Stepanov A.A., Yakimenko O.S. Humic-based soil modifiers from peat and coal: effect on chemical and biological properties of model soil mixtures. Agrokhimia. 2023. No. 5. P. 53–59. (in Russian). https://doi.org/10.31857/S0002188123050095

Stepanov A.A., Shulga P.S., Gosse D.D., Smirnova M.E. Natural humates application for remediation of contaminated urban soils and stimulation of plant growth. Vestnik Moskovskogo Universiteta. Seriya 17. Pochvovedenie (Lomonosov Soil Science Journal). 2018. No. 2. P. 30–34. (in Russian).

Khaidapova, D. D. Pestonova E. A. Strength of interparticle bonds in soil pastes and aggregates. Eurasian Soil Science. 2007. Vol. 40. No. 11. P. 1187–1192. https://doi.org/10.1134/S1064229307110063

Yakimenko O.S. Application of commercial humic products in Russian Federation: results of field trials (a review). Live and Bio-Abiotic Systems. 2016. No. 18. (in Russian). http://www.jbks.ru/archive/issue-18/article-4

Yakimenko O.S., Ziganshina A.R., Stepanov A.A., Panova I.G., Yaroslavov A.A. Effect of polyelectrolytes on soil organic matter in model experiments. Eurasian Soil Science. 2022. Vol. 55. No. 7. P. 988–997. https://doi.org/10.1134/S1064229322070134

Ayeldeen M., Negm A., El Sawwaf M., Gädda T. Laboratory study of using biopolymer to reduce wind erosion. International Journal of Geotechnical Engineering. 2018. Vol. 12. No. 3. P. 228–240. https://doi.org/10.1080/19386362.2016.1264692

Abbaszadeh A., Lad M., Janin M., Morris G.A., MacNaughtan W., Sworn G., Foster T.J. A novel approach to the determination of the pyruvate and acetate distribution in xanthan. Food Hydrocolloids. 2015. Vol. 44. P. 162–171. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2014.08.014

Ashraf S., Soudi M., Amoozegar M.A., Moshtaghi Nikou M., Spröer C. Paenibacillus xanthanilyticus sp. nov., a xanthan-degrading bacterium isolated from soil. International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology. 2018. Vol. 68. No. 1. P. 76–80. https://doi.org/10.1099/ijsem.0.002453

Berninger T., Dietz N., González López Ó. Water-soluble polymers in agriculture: xanthan gum as eco-friendly alternative to synthetics. Microbial Biotechnology. 2021. Vol. 14. No. 5. P. 1881–1896. https://doi.org/10.1111/1751-7915.13867

Bezuglova O., Klimenko A. Application of humic substances in agricultural industry. Agronomy. 2022. Vol. 12. No. 3. P. 584. https://doi.org/10.3390/agronomy12030584

Bondareva L, Kudryasheva N. Direct and indirect detoxification effects of humic substances. Agronomy. 2021. Vol. 11. No. 2. P. 198. https://doi.org/10.3390/agronomy11020198

Cabalar A.F., Wiszniewski M., Skutnik Z. Effects of xanthan gum biopolymer on the permeability, odometer, unconfined compressive and triaxial shear behavior of a sand. Soil mechanics and foundation engineering. 2017. Vol. 54. P. 356–361. https://doi.org/10.1007/s11204-017-9481-1

Cadmus M.C, Jackson L.K, Burton K.A, Plattner R.D, Slodki M.E. Biodegradation of xanthan gum by *Bacillus* sp. Applied and Environmental Microbiology. 1982. Vol. 44. No. 1. P. 5–11. https://doi.org/10.1128/aem.44.1.5-11.1982

Chang I., Prasidhi A.K., Im J., Shin H.D., Cho G.C. Soil treatment using microbial biopolymers for anti-desertification purposes. Geoderma. 2015. Vol. 253. P. 39–47. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.04.006

Chen X., Wang M., Yang F., Tang W., Li X. Isolation and characterization of xanthan-degrading Enterobacter sp. nov. LB37 for reducing the viscosity of xanthan in petroleum industry. World Journal of Microbiology and Biotechnology. 2014. Vol. 30. P. 1549–1557. https://doi.org/10.1007/s11274-013-1578-8

Delgado M.Z., Aranda F.L., Hernandez-Tenorio F., Garrido-Miranda K.A., Meléndrez M.F., Palacio D.A. Polyelectrolytes for environmental, agricultural, and medical applications. Polymers. 2024. Vol. 16. No. 10. P. 1434. https://doi.org/10.3390/polym16101434

Faria S., de Oliveira Petkowicz C.L., de Morais S.A.L., Terrones M.G.H., De Resende M.M., de Franca F.P., Cardoso V.L. Characterization of xanthan gum produced from sugar cane broth. Carbohydrate Polymers. 2011. Vol. 86. No. 2. P. 469–476. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2011.04.063

Garcia-Ochoa F., Santos V.E., Casas J.A., Gomez E. Xanthan gum: production, recovery, and properties. Biotechnology Advances. 2000. Vol. 18. No. 7. P. 549–579. https://doi.org/10.1016/S0734-9750(00)00050-1

Jang J. A review of the application of biopolymers on geotechnical engineering and the strengthening mechanisms between typical biopolymers and soils. Advances in Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 2020. No. 1. P. 1465709. https://doi.org/10.1155/2020/1465709

Janos P., Vavrova J., Herzogova L., Pilarova V. Effects of inorganic and organic amendments on the mobility (leachability) of heavy metals in contaminated soil: a sequential extraction study. Geoderma. 2010. Vol. 159. No. 3–4. P. 335–341. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2010.08.009

Jindo K.K., Olivares F.L., Malcher D.J.D.P., Sánchez- Monedero M.A., Kempenaar C., Canellas L.P. From lab to field: Role of humic substances under open-field and greenhouse conditions as biostimulant and biocontrol agent. Frontiers in Plant Science. 2020. Vol. 11. P. 426. https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00426

Katzbauer B. Properties and applications of xanthan gum. Polymer Degradation and Stability. 1998. Vol. 59. No. 1–3. P. 81–84. https://doi.org/10.1016/S0141-3910(97)00180-8

Kulikova N.A, Perminova I.V. Interactions between humic substances and microorganisms and their implications for nature-like bioremediation technologies. Molecules. 2021. Vol. 26. No. 9. P. 2706. https://doi.org/10.3390/molecules26092706

Kulikova N.A, Stepanova E.V, Koroleva O.V. Mitigating activity of humic substances: direct influence on biota. In: Use of humic substances to remediate polluted environments: from theory to practice / I.V. Perminova, K. Hatfield, N. Hertkorn (eds.). NATO Science Series, 2005. Vol. 52. P. 285–309. https://doi.org/10.1007/1-4020-3252-8_14

Kumar A., Rao K.M., Han S.S. Application of xanthan gum as polysaccharide in tissue engineering: A review. Carbohydrate Polymers. 2018. Vol. 180. P. 128–144. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2017.10.009

Liu H., Huang C., Dong W., Du Y., Bai X., Li X. Biodegradation of xanthan by newly isolated *Cellulomonas* sp. LX, releasing elicitor-active xantho-oligosaccharides-induced phytoalexin synthesis in soybean cotyledons. Process Biochemistry. 2005. Vol. 40. No. 12. P. 3701–3706. https://doi.org/10.1016/j.procbio.2005.05.006

Mendonça A., Morais P.V., Pires A.C., Chung A.P., Oliveira P.V. A review on the importance of microbial biopolymers such as xanthan gum to improve soil properties. Applied Sciences. 2020. Vol. 11. No. 1. P. 170. https://doi.org/10.3390/app11010170

Muscolo A., Sidari M., Cozzolino V., Nuzzo A., Nardi S., Piccolo A. Molecular characteristics of humic substances from different origins and their effects on growth and metabolism of *Pinus laricio callus*. Chemical and Biological Technologies in Agriculture. 2022. Vol. 9. No. 1. P. 1–18. https://doi.org/10.1186/s40538-022-00334-y

Nankai H., Hashimoto W., Miki H., Kawai S., Murata K. Microbial system for polysaccharide depolymerization: enzymatic route for xanthan depolymerization by *Bacillus* sp. strain GL1. Applied and Environmental Microbiology. 1999. Vol. 65. No. 6. P. 2520–2526. https://doi.org/10.1128/AEM.65.6.2520-2526.1999

Novoskoltseva O.A., Loiko N.G., Nikolaev Y.A., Lisin A.O., Panova I.G., Yaroslavov A.A. Interpolyelectrolyte complexes based on hydrolyzed polyacrylonitrile for anti-erosion stabilization of soils and ground. Polymer International. 2022. Vol. 71. No. 6. P. 697–705. https://doi.org/10.1002/pi.6289

Nsengiyumva E.M., Alexandridis P. Xanthan gum in aqueous solutions: Fundamentals and applications. International Journal of Biological Macromolecules. 2022. Vol. 216. P. 583–604. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.06.189

Palaniraj A., Jayaraman V. Production, recovery and applications of xanthan gum by *Xanthomonas campestris*. Journal of food engineering. 2011. Vol. 106. No. 1. P. 1–12. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2011.03.035

Seo S., Lee M., Im J., Kwon Y.M., Chung M.K., Cho G., Chang I. Site application of biopolymer-based soil treatment (BPST) for slope surface protection: in-situ wet-spraying method and strengthening effect verification. Construction and Building Materials. 2021. Vol. 307. P. 124983. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124983

Tran A.T.P., Chang I., Cho G.C. Soil water retention and vegetation survivability improvement using microbial biopolymers in drylands. Geomechanics and Engineering. 2019. Vol. 17. No. 5. P. 475–483. https://doi.org/https://doi.org/10.12989/gae.2019.17.5.475

Wang S., Zhao X., Zhang J., Jiang T., Wang S., Zhao J., Meng Z. Water retention characteristics and vegetation growth of biopolymer-treated silt soils. Soil and Tillage Research. 2023. Vol. 225. P. 105544. https://doi.org/10.1016/j.still.2022.105544

Yakimenko O., Khundzhua D., Izosimov A., Yuzhakov V., Patsaeva S. Source indicator of commercial humic products: UV-Vis and fluorescence proxies. Journal of Soils and Sediments. 2018. Vol. 18. No. 4. P. 1279–1291. https://doi.org/10.1007/s11368-016-1528-9

Yakimenko O., Stepanov A., Patsaeva S., Khundzhua D., Osipova O., Gladkov O. Formation of humic-like substances during the technological process of Lignohumate® synthesis as a function of time. Separations. 2021. Vol. 8. No 7. P. 1–13. https://doi.org/10.3390/separations8070096

Yakimenko O.S., Panova I.G., Novoskoltseva O., Gruzdenko D., Pozdnyakov L., Kadulin M., Stepanov A.A., Terekhova V., Yaroslavov A. Humic substances enhance the performance of polyelectrolyte-based formulations as soil conditioners. Humic substances and green technologies (HIT-2024): ninth International Conference of the CIS IHSS on humic innovative technologies (Sailing Club "Vodnik", Moscow Region, Russia, 25–28 October, 2024). Book of Abstracts. 2024. P. 56. http://www.humus.ru/hit-2024/abstractbook/HIT-2024-abstractbook.pdf

Zezin A.B., Mikheikin S.V., Rogacheva V.B., Zansokhova M.F., Sybachin A.V., Yaroslavov A.A. Polymeric stabilizers for protection of soil and ground against wind and water erosion. Advances in Colloid and Interface Science. 2015. Vol. 226. P. 17–23. https://doi.org/10.1016/j.cis.2015.06.006

Received 03 March 2025
Accepted 25 April 2025
Published 03 May 2025

About the authors:

Olga S. Yakimenko – Candidate of Biological Sciences, Leading Researcher in the Department of Soil Chemistry, Faculty of Soil Science, Lomonosov Moscow State University (Moscow, Russia); iakim@soil.msu.ru; https://orcid.org/0000-0003-0499-5482

Pavel V. Nesterov – MSc Student in the Department of Soil Chemistry, Faculty of Soil Science, Lomonosov Moscow State University (Moscow, Russia); pkontinium@yandex.ru

Andrey A. Stepanov – Candidate of Biological Sciences, Senior Researcher in the Department of Soil Chemistry, Faculty of Soil Science, Lomonosov Moscow State University (Moscow, Russia); Stepan.1963@mail.ru

Irina G. Panova – Candidate of Chemical Sciences, Leading Researcher in the Department of Polymer Sciences, Faculty of Chemistry, Lomonosov Moscow State University (Moscow, Russia), igpan@mail.ru; https://orcid.org/ 0000-0002-0519-3695

Vyacheslav E. Chernov – Engineer, Department of in the Department of Polymer Sciences, Faculty of Chemistry, Lomonosov Moscow State University (Moscow, Russia); slavachernov111@yandex.ru

Alexander A. Yaroslavov – Doctor of Chemical Sciences, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Head of the Department of Polymer Sciences, Faculty of Chemistry, Lomonosov Moscow State University (Moscow, Russia), yaroslav@belozersky.msu.ru; https://orcid.org/0000-0003-1627-1270

УДК 631.618
https://doi.org/10.31251/pos.v8i1.309

Check for updates

Особенности формирования и углероддепонирующая способность подстилок лесных и травяных техногенных экосистем отвалов отходов добычи антрацита

© 2025 А. В. Токарева[1], В. И. Уфимцев [2], Н. А. Соколова [3], Д. А. Соколов [3]

[1]ФГАОУ ВО «Новосибирский национальный исследовательский государственный университет», ул. Пирогова, 1, г. Новосибирск, 630090, Россия. E-mail: n4sty4t@yandex.ru

[2]ФГБУН ФИЦ Угля и углехимии СО РАН, пр-т Советский, 18, г. Кемерово, 650000, Россия. E-mail: uwy2079@gmail.com

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

Цель исследования. *Выявить особенности формирования и оценить углероддепонирующую способность подстилок лесных и травяных экосистем техногенных ландшафтов Горловского антрацитового месторождения.*

Место и время проведения. *Внешний породный отвал Горловского антрацитового месторождения (54.568880, 83.588956), Новосибирская область, Искитимский район, июнь–август 2024 г.*

Методы. *Репрезентативные участки исследования выбирались с таким расчетом, чтобы максимально охватить разнообразие представленных на отвале растительных сообществ. Отбор проб подстилки на участках проводили методом конверта и согласно методическим рекомендациям по отбору и анализу образцов почв «Единой национальной системы мониторинга климатически активных веществ». Образцы подстилок сушили до воздушно-сухого состояния в лаборатории, затем измельчали ножницами, тщательно диспергирования вибрационным шариковым истирателем с последующей гомогенизацией; в подготовленных пробах определяли содержание углерода и азота на CHNS/O-анализаторе 2400 Series II Perkin Elmer. Статистическую обработку результатов выполняли при помощи пакетов программ Microsoft Excel и PAST V2.17.*

Основные результаты. *В техногенных экосистемах, в силу разнообразия эдафических условий и возраста участков, формируемые подстилки характеризуются неоднородностью по составу, строению и запасам органического вещества и углерода. Выявленные особенности подстилок имеют приуроченность к определенным типам эмбриоземов и произрастающим на них растениям, которые группируются в пионерные, простые и сложные лесные и травянистые сообщества. Минимальные мощность (до 1 см) и запасы органического вещества (до 1,59 т/га) отмечены в фрагментарных подстилках пионерных растительных сообществ инициальных эмбриоземов. Небольшой мощностью, но максимальными запасами сухой массы характеризуются подстилки сложных фитоценозов и травяных экосистем дерновых эмбриоземов. Содержание углерода в подстилках варьирует в широком диапазоне значений (от 9,4 до 48,4 %, в среднем 36,7%) и отличается в зависимости от типа и состава растительных сообществ и эдафических условий. В целом, запасы углерода в подстилках травяных и лесных техногенных экосистем находятся в интервале 0,26–3,26 т С/га и увеличиваются в ряду пионерные < простые травянистые ≤ сложные травянистые < простые лесные = сложные лесные сообщества. В подстилках почв исследуемых отвалов не происходит обогащения азотом их нижней части, что, вероятно, связано со слабой освоенностью биотой.*

Ключевые слова: *рекультивация; эмбриоземы; почвы техногенных ландшафтов; секвестрация углерода; Technosol.*

Цитирование: *Токарева А.В., Уфимцев В.И., Соколова Н.А., Соколов Д.А. Особенности формирования и углероддепонирующая способность подстилок лесных и травяных техногенных экосистем отвалов отходов добычи антрацита // Почвы и окружающая среда. 2025. Том 8. № 1. e309.* DOI: 10.31251/pos.v8i1.309

ВВЕДЕНИЕ

Круговорот углерода — сложный и многоступенчатый процесс, непрерывно протекающий в экосистемах, обеспечивающий их функционирование и устойчивость к внешним воздействиям (Базилевич, Титлянова, 2008). В настоящее время, в связи с увеличением в атмосфере концентрации климатически активных газов, исследованиям, посвященным круговороту углерода, уделяется повышенное внимание (Кудеяров, 2022). Среди них особый интерес проявляется к вопросам оценки углероддепонирующей способности экосистем (Королева, Шунькина, 2014; Bar-On et al., 2025). Согласно методологии Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК)

выделяют пять основных резервуаров накопления углерода: надземная биомасса, подземная биомасса, подстилка, валежная древесина и углерод почвы (Penman et al., 2003). Однако в отличие от пулов фитомассы и почвенного углерода, которые рассматриваются в большом количестве научных работ, его запасы в мертвой древесине и подстилке изучаются не столь активно (Честных и др., 2007; Трефилова и др., 2021; Байтурина и др., 2023).

Подстилка, являясь важным компонентом наземных экосистем, помимо депонирования углерода, выполняет в них множество важных функций. Она принимает участие в процессах гумусообразования, регулирует температурный и водный режимы почв, а также служит местом обитания для многих беспозвоночных животных. В подстилке минерализуется и/или трансформируется большое количество органических веществ, поступающих с растительным опадом. Поэтому данный слой почвы является важным звеном в цикле биогенных элементов, в том числе углерода (Титлянова, Шибарева, 2012).

В настоящее время под влиянием антропогенного воздействия многие наземные экосистемы в промышленных регионах претерпевают сильные изменения в структуре и условиях функционирования. Не является исключением и Новосибирская область, где в настоящее время открытым способом добываются большие объемы антрацитовых углей. Такая добыча оказывает разрушительное воздействие на природные экосистемы, приводя к деградации или полному исчезновению естественных резервуаров углерода. Минимизация негативных экологических последствий возможна при разработке высокоэффективных природоподобных технологий рекультивации, в том числе ориентированных на повышение углероддепонирующей способности формируемых техногенных экосистем. Для разработки эффективных программ по восстановлению природных экосистем в условиях антропогенного воздействия широко используются данные о количественных запасах углерода в различных природных пулах. Учитывая современные масштабы открытой угледобычи (Sokolov et al., 2021), данные исследования важны при создании глобальных и национальных программ по уменьшению концентрации углерода в атмосфере (Oliver et al., 2014; Волков, 2015; Абакумов и др., 2022). Поэтому изучение природных резервуаров углерода в компонентах техногенных экосистем, в том числе подстилке, в настоящее время является важной и актуальной задачей.

В этой связи, целью нашего исследования являлось выявление особенностей формирования и оценка углероддепонирующей способности подстилок лесных и травяных экосистем техногенных ландшафтов Горловского антрацитового месторождения.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследования проводились в Искитимском районе Новосибирской области на территории Нагорного отвала Горловского антрацитового месторождения (54,568880 с.ш., 83,588956 в.д.). Согласно агроклиматическому районированию Новосибирской области, район исследований отнесен к умеренно теплому, достаточно увлажненному (гидротермический коэффициент по Селянинову для района находится в пределах 1,0–1,2). Среднее годовое количество осадков составляет 400-450 мм, из них 170–190 мм выпадает в период активной вегетации (Агроклиматические ресурсы …, 1971). Сумма активных температур ($\sum t > 10°C$) составляет 1750–1800°С (Почвенно-климатический атлас …, 1978). В связи с темной поверхносттью субстрата и отсутствием растительности на большей части отвала, сумма биологически активных температур на его поверхности может превышать региональные фоновые значения на 1000°С. Экспозиция склонов отвала также влияет на теплообеспеченность: $\sum t > 10°C$ на плакорах и южных склонах на 500°С больше, чем на северных и восточных склонах (Соколова, 2023).

Исследуемый отвал, образованный из отходов угледобычи, представляет собой гору, местами возвышающуюся над прилегающими территориями на высоту до 70 метров. Он вытянут в северо-восточном направлении почти на 2 км, а его ширина достигает 1 км. Отвал террасирован; нижние террасы сформированы в 1970-х годах в начале разработки месторождения. Каждая терраса выше и на 10–20 лет моложе нижележащей. Формирование верхнего яруса было закончено в 2018 году. Субстрат поверхности отвала по большей части представлен хаотичной смесью плотных осадочных пород (аргиллитов, алевролитов и песчаников), реже рыхлыми породами (глинами мел-палеогеновой коры выветривания). Рельеф террас либо горизонтальный спланированный, либо мелкобугристый. Отмеченная дифференциация возраста участков отвала, пород, слагающих их поверхность, рельефа, который также осложняется разнообразием экспозиции, длины и крутизны различных склонов определяет разнокачественность условий восстановления растительного и почвенного покровов. Ранее

было показано, что на исследуемом отвале формируются разнообразные травяные и лесные экосистемы (Sokolova et al., 2021; Скотарева и др., 2024) с характерным для каждого участка почвенным покровом (Соколова и др., 2020; Андроханов, Соколова, 2022).

Репрезентативные участки исследования выбирались с таким расчетом, чтобы максимально охватить разнообразие представленных на отвале растительных сообществ. Их описание и отбор образцов подстилки проводили в июне и августе 2024 г. (рис. 1). Также в работе использовали материалы, полученные ранее при изучении скорости и направленности развития почв и растительных сообществ на отвалах Горловского антрацитового месторождения (Скотарева и др., 2024; Sokolova et al., 2021).

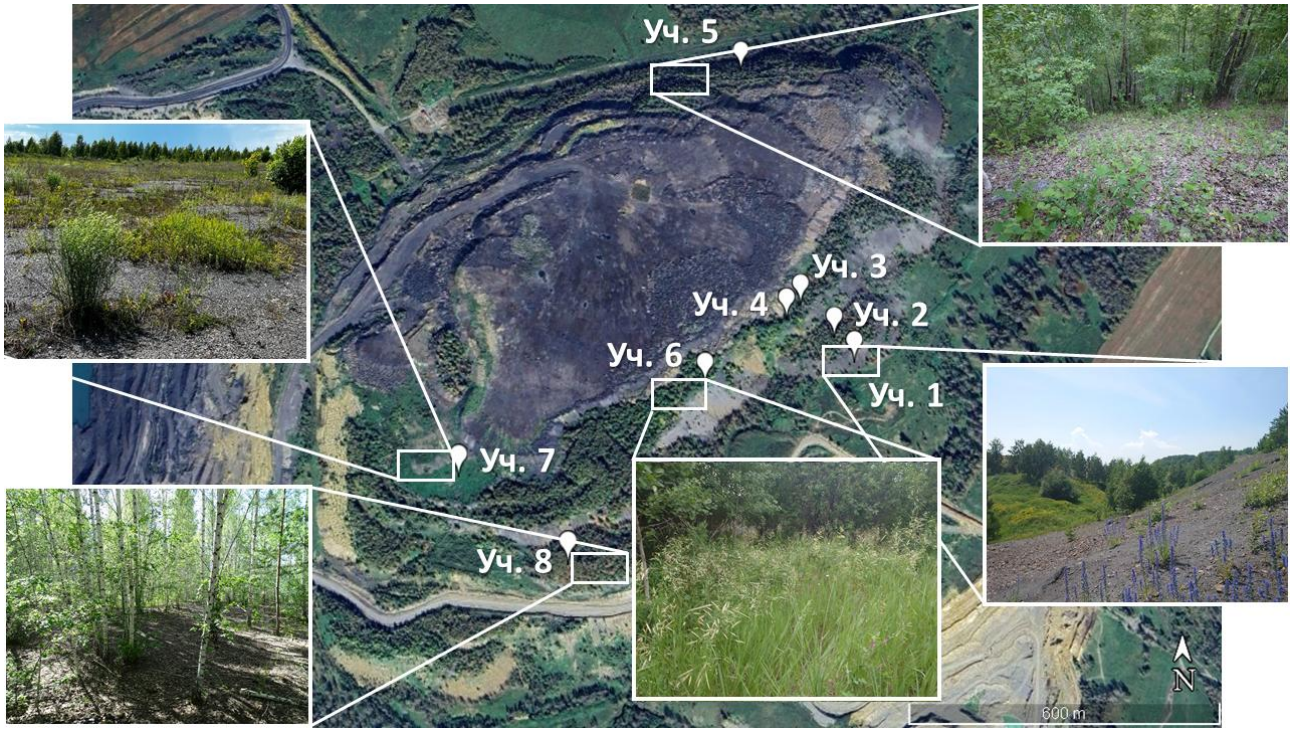


Рисунок 1. Карта-схема расположения исследуемых участков.

Почвенный покров исследуемых участков представлен эмбриоземами. Согласно коррелятивной международной системе WRB (IUSS Working Group …, 2022), почвы отвала соответствуют реферативной группе Technosol. Более детальная дифференциация почв проведена при помощи классификации почв техногенных ландшафтов, разработанной сотрудниками Института почвоведения и агрохимии (ИПА) СО РАН (Курачев, Андроханов, 2002). На ключевых участках были выделены типы инициальных, органо-аккумулятивных и дерновых эмбриоземов. Классификационная принадлежность подтипов эмбриоземов определялась по характеру типодиагностических и, в том числе, подстилочных горизонтов. Оценку свойств почв и поверхности отвалов, определяющих особенности формирования растительного покрова, проводили традиционными для почвоведения методами, подробно описанными в работе (Скотарева и др., 2024).

Отбор проб подстилки на участках проводили методом конверта и согласно методическим рекомендациям по отбору и анализу образцов почв «Единой национальной системы мониторинга климатически активных веществ» (Методика полевых …, 2023). Единственное отличие заключается в том, что пробы подстилки брали при помощи не деревянной рамки, а пластикового цилиндра диаметром и высотой 100 мм. Разбор проб подстилки проводили после сушки до воздушно-сухого состояния в лаборатории рекультивации почв ИПА СО РАН. Учитывая фрагментарность, разнообразие в травяных и лесных сообществах, при разборе подстилки не разделяли на подгоризонты OF и OH. Отдельно учитывался только подгоризонт OL – состоящий, как правило, из прошлогоднего опада. После сушки, измельчения ножницами, тщательного диспергирования вибрационным шариковым истирателем и последующей гомогенизации в пробах подстилки определяли содержание углерода и азота на CHNS/O-анализаторе 2400 Series II Perkin Elmer. Статистическую обработку результатов выполняли с помощью пакетов программ Microsoft Excel и PAST V2.17.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Общеизвестно, что подстилка формируются из продуктов опада наземных ярусов биоценоза. По этой причине ее свойства, в частности химический состав, зависит, главным образом, от состава доминирующих растительных форм, присущих определенной территории. Исследуемые техногенные ландшафты характеризуются высокой неоднородностью эдафических условий (табл. 1), что вместе с дифференциацией определяет высокую вариабельность представленных фитоценозов не только в пространстве, но во времени.

Таблица 1

Основные химические и физические свойства исследуемых почв и мелкозема

№ участка	Глубина, см	pH	Углерод органического вещества (Сорг.), %	Углерод общий (Собщ.), %	Азот общий (Nобщ.), %	Плотность, г/см^3	Содержание фракций	
							<0,01 мм, %	<1 мм, %
1	0–10 10–20	8,5 8,4	1,1/0,1* 1,2/0,1	4,7/0,4 4,4/0,2	0,35/0,032 0,33/0,015	1,8 2,1	0,7 0,4	8,9 4,7
2	0–10 10–20	7,9 7,9	3,8/2,1 3,1/1,0	21,3/11,7 9,9/3,2	0,63/0,31 0,44/0,11	1,6 1,9	13,5 10,3	55,3 32,4
3	0–10 10–20	6,7 7,1	1,7/0,6 0,6/0,2	6,0/2,2 2,4/0,7	0,50/0,24 0,30/0,12	1,8 2,1	3,8 4,3	36,9 3,9
4	0–10 10–20	6,6 7,9	1,6/0,9 2,2/0,8	7,0/3,8 7,3/2,8	0,45/0,28 0,42/0,22	1,5 2,1	13,7 7,4	54,1 38,1
5	0–10 10–20	6,7 6,2	1,7/0,3 2,7/0,6	5,7/1,0 21,8/5,0	0,36/0,09 0,54/0,12	1,3 1,7	2,0 5,4	17,5 22,6
6	0–10 10–20	7,2 8,1	1,4/1,4 0,2/0,2	2,7/2,7 0,5/0,5	0,24/0,23 0,08/0,07	1,3 1,4	59,3 60,5	99,5 99,2
7	0–10 10–20	8,0 7,5	2,2/1,0 1,0/0,6	11,0/5,3 14,0/5,0	0,61/0,31 0,70/0,20	1,9 2,3	17,3 11,6	47,9 35,7
8	0–10 10–20	7,2 7,5	1,5/0,6 0,5/0,1	8,4/3,5 2,7/0,6	0,45/0,24 0,45/0,08	1,6 2,2	11,0 5,1	41,7 21,0

Примечание.
*1,1/0,1 – 1,1 - содержание в мелкоземе; 0,1 – содержание в почвах.

Основные физические и химические свойства почв участков, представлены в таблице 1 и подробно описаны в работе (Скотарева и др., 2024). Установлено, что основная особенность большинства исследуемых почв проявляется в их высокой каменистости. Это же свойство определяет низкое содержание в почвах общего азота и бихроматноокисляемого углерода. Высокое содержание физической глины и пород ее продуцирующих способствует развитию травянистых растительных группировок; на склоновых участках с высоким содержанием камней на начальных этапах формирования растительного покрова преимущество получает древесная растительность.

Полученные в ходе визуальной оценки участков и составления геоботанических описаний результаты несколько отличаются от данных, представленных при изучении данных участков в 2023 году (Скотарева и др., 2024). Это связано с различной тепло- и влагообеспеченностью последних лет, а также проявлением сукцессионных процессов, характерных для динамично развивающихся растительных сообществ отвалов (Глебова, 2005; Куприянов, Манаков, 2016).

Традиционно растительный покров отвалов угольных разрезов принято группировать, в соответствии с классификацией, предложенной А.Г. Вороновым (1973), на пионерные, простые, сложные и замкнутые фитоценозы (Кандрашин, 1989; Куприянов, Манаков, 2016), каждому из которых соответствует конкретный тип эмбриоземов (Курачев и др., 1994). На исследуемом отвале участков замкнутых фитоценозов не обнаружено, что наряду с относительной молодостью основной части поверхности отвала связано также с особенностями литогенной основы (Соколов и др., 2022), сказывающимися на скорости освоения субстрата биотой.

Присутствующие пионерные растительные группировки характеризуются сравнительно бедным видовым разнообразием и незначительной площадью проективного покрытия (до 10–15%). Приурочены они к инициальным эмбриоземам (ЭИпион_тр) на начальном этапе сукцессии. Подстилки на таких участках очень фрагментарны. Они представлены свежим опадом, зачастую не оторвавшимся от живых частей растений (ветошью) (Продуктивность травяных экосистем, 2020). Основными видами, формирующими мортмассу инициальных эмбриоземов выступают *Melilotus officinalis* L., реже

Melilotus suaveolens Ledeb., преобладающие на молодых и средневозрастных участках, и *Échium vulgáre* L., доминирующий на старых участках с экстремальными микроклиматическими условиями (южных склонах). В годы избыточного увлажнения на поверхности инициальных эмбриоземов обильно произрастает *Salsola collina* Pall., которая вместе с донниками обладают повышенной стрессо- и солеустойчивостью (Li et al., 2021; Wang et al., 2024) в условиях, характерных для отвалов. Помимо отмеченных видов вклад в формирование мортмассы поверхности инициальных эмбриоземов вносят также *Dracocephalum nutans* L., *Crepis sibirica* L., реже *Achillea millefolium* L. (табл. 2).

Таблица 2

Характеристика исследуемых участков

Номер участка	Тип эмбриозема (обозначение участка)	Описание участка (почвообразующие породы)	Возраст, лет	Число видов, шт.	Площадь проективного покрытия, %	Фитоценоз	Доминирующие виды (средняя высота, см)
1	инициальный (ЭИпион_тр)	южный склон (плотные)	35–40	8	10	пионерный	*Échium vulgáre* L. (50), *Salsola collina* Pall (10).
2	органо-аккумулятивный (ЭАОпр_др)	горизонтальный, бугристый (плотные)	35–40	12	70*	простой	*Betula pendula* Roth (8000).
3	органо-аккумулятивный (ЭОАпр_тр)	горизонтальный, спланированный (плотные)	25–30	16	75	простой	*Fragaria vesca* L. (10), *Melilotus officinalis* L (50).
4	дерновый (ЭДсл_тр)	горизонтальный, спланированный (плотные)	25–30	20	80	сложный	*Dactylis glomerata* L (90).
5	органо-аккумулятивный (ЭАОсл_др)	северный склон (плотные)	35–40	14	80	сложный	*Betula pendula* Roth (7500).
6	дерновый (ЭДсл_тр)	горизонтальный, бугристый (рыхлые)	20–25	25	85	сложный	*Dactylis glomerata* L. (70), *Bromus inermis* L (95).
7	инициальный (ЭИпион_тр)	горизонтальный, спланированный (плотные)	10–15	9	11	пионерный	*Melilotus officinalis* L. (60), *Échium vulgáre* L. (60),
8	органо-аккумулятивный (ЭОАпр_др)	пологий южный склон (плотные)	20–25	6	90	простой	*Betula pendula* Roth (8000).

Примечание.
*Для лесных сообществ приводится сомкнутость крон.

Простые сообщества формируются при доминировании древесных пород (ЭАОпр_др) на склоновых участках и участках с пересеченным рельефом, а также травянистых растений (ЭОАпр_тр) на спланированных горизонтальных поверхностях (Frouz et al., 2018; Sokolova et al., 2021) на промежуточном этапе сукцессии. На участках формирования лесных сообществ, благодаря высокой экологической пластичности (Oksanen, 2021), преимущество получает *Betula pendula* Roth.. На увлажненных участках она может уступать *Populus tremula* L., *Populus nigra* L. и *Salix caprea* L., а на более сухих в составе древостоя заметно увеличивается доля *Pinus sylvestris* L. В целом состав древостоев, наряду с адаптивными возможностями древесных пород (Алиев, Хамарова, 2019), значительно зависит от состава лесов окружающих ненарушенных экосистем (Шугалей, 1997). В травянистом ярусе разнообразие видов растений не отличается богатством: в зависимости от возраста участка оно составляет от 5 до 13 видов (табл. 2). Эта зависимость имеет нелинейный характер. Основным фактором, определяющим видовой состав яруса, является затененность. Наблюдения показали, что на более молодых участках, где кроны еще не сомкнулись или сомкнулись относительно недавно, в травянистом ярусе видовое разнообразие растений обеспечивается за счет рудеральных видов: *Melilotus officinalis* L., *Tussilago farfara* L., *Taraxacum officinale* F.H. Wigg. и других. На средневозрастных участках отвалов с сомкнутыми кронами число видов травянистого яруса

минимально. Здесь наряду с редкими рудеральными видами появляются отдельные представители лесных: *Orthilia secunda* L., *Pilosella officinarum* Vaill.,. *Elymus mutabilis* (Drobow) Tzvelev. На старых участках видовое разнообразие травянистого яруса увеличивается за счет лесных видов; дополнительно формируется и подлесок. Как правило, он представлен *Sorbus aucuparia* L. и/или *Prunus padus* L.. В составе подлеска участка №5 был зафиксирован также один инвазивный вид – *Acer negundo* L. Появление кустарникового яруса в техногенных лесных экосистемах, как указывает Е.Р. Кандрашин (1989), свидетельствует о наступлении стадии сукцессии сложного фитоценоза (ЭАОсл_др). Однако из-за высокой разреженности травяного и кустарникового ярусов их вклад в подстилку незначителен. В целом подстилочный горизонт органо-аккумулятивных горизонтов лесных участков формируется из листьев и мелких веток березы, в меньшей степени осины и сосны, которые относятся к категориям средне- и медленноразлагающихся растительных остатков (Пристова, 2020).

Простые травяные сообщества (ЭОАпр_тр) по сравнению с лесными характеризуются большим разнообразием видов, участвующих в формировании подстилки. На таких участках, в силу повышенной плотности и низкого плодородия почв, в видовом составе преобладают малотребовательные к эдафическим условиям *Melilotus officinalis* L. и *Pimpinella saxifraga* L. (табл. 2). Обильно представлена также *Fragaria vesca* L., распространению которой на отвалах способствует ее стрессоустойчивостью (Song et al., 2024) и вегетативное размножение с помощью ползучих побегов (усов). Отдельными куртинами встречаются злаки *Dactylis glomerata* L. и *Elymus mutabilis* L.

Участки, занятые сложными травяными сообществами (ЭОАсл_тр), отличаются наиболее благоприятными эдафическими условиями (табл. 1), поскольку формируются либо на потенциально плодородных породах со значительной долей физической глины в составе, либо на субстратах, где тонкодисперсные фракции накопились за счет процессов выветривания (Кусов, 2007). Не менее важным фактором, позволяющим сложным травяным сообществам формироваться на поверхности техногенных ландшафтов, является накопление в эмбриоземах азота, стимулирующего внедрение злаков (Глебова, 2005; Госсен, Соколов, 2014). В таких условиях в составе растительных ценозов заметно увеличивается доля *Bromus inermis* L., *Dactylis glomerata* L. и *Poa angustifolia* L., также как и их вклад в формирование подстилок. Обильно представлены *Vicia cracca* L., *Leucanthemum vulgare* Lam., *Chamaenerion angustifolium* L., *Scop.*, *Melilotus officinalis* L. и другие виды спланированных участков (ЭОАпр_тр).

Анализ морфологического строения подстилочных горизонтов и расчет запасов мортмассы позволили выявить отличительные особенности, характерные не только для одинаковых типов почв, но и сходных растительных сообществ (табл. 3). Мощность подстилки является одним из основных показателей, анализ которого позволяет оценивать скорость преобразования растительного опада (Волков, 2015). Минимальную мощность имеют фрагментарные подстилочные горизонты эмбриоземов инициальных (ЭИ), в составе которых отсутствует или плохо выражен ферментативно-перегнойный слой (OFH). Соответственно, инициальные эмбриоземы имеют наименьшие запасы мортмассы в подстилках, в составе которых преобладает свежий опад (ветошь).

Органо-аккумулятивные эмбриоземы (ЭОА) демонстрируют максимальные значения мощности подстилки, варьируя в зависимости от типа фитоценоза и положения участков в ландшафте. Небольшие значения мощности при повышенной плотности подстилки были зафиксированы в сложном лесном фитоценозе (ЭАОсл_др) на северном склоне, что, по всей видимости, указывает на активное ее преобразование в зимний период благодаря наибольшей мощности снегового покрова. Об этом также свидетельствует отсутствие подгоризонта OL. В целом для исследуемых техногенных лесных сообществ свойственно отсутствие или незначительная доля запасов мортмассы свежего опада в составе подстилок (табл. 3) практически до окончания вегетационного периода. Обратная тенденция в соотношении запасов мортмассы в различных подгоризонтах подстилки наблюдается в дерновых эмбриоземах под сложными травяными фитоценозами (ЭДсл_тр). Здесь доля запасов мортмассы в ветоши в 1,5 и более раз превышает таковую в ферментативно-перегнойном слое.

В целом можно отметить, что запасы мортмассы во фрагментарных подстилочных горизонтах инициальных эмбриоземов вдвое уступают или соответствуют запасам, приводимым А.А. Титляновой и С.В. Шибаревой (2012) для почв сухих степей. Примечательно, что близость значений коррелирует с суммой биологически активных температур, характерных для плакоров отвалов и сухих степей юга Сибири (Андроханов и др., 2023; Соколова, 2023). В органо-аккумулятивных эмбриоземах под простыми фитоценозами запасы подстилки аналогичны значениям, характерным для луговых степей (Титлянова, Шибарева, 2012), с той разницей, что на долю свежего опада в экосистемах отвалов приходится около 2/3 мортмассы (табл. 3). Запасы подстилки в дерновых эмбриоземах сложных

травяных сообществ, в целом, соответствуют запасам в луговых степях Западной и Средней Сибири (Биологическая продуктивность …, 1988). При этом сохраняется высокая доля ветоши и опада (около 2/3), обусловленная, очевидно, более низкой микробиологической активностью почв отвалов (Кандрашин, 1989). Запасы мортмассы в техногенных лесных экосистемах, напротив, в среднем вдвое ниже, чем в березовых лесах и колках естественных ландшафтов Сибири. Отмеченное явление связано, на наш взгляд, с неразвитостью в лесах отвалов кустарникового и травянистого ярусов.

Таблица 2

Характеристика подстилок исследуемых участков

Номер участка	Обозначение	Средняя мощность подстилки, см	Запасы мортмассы, т/га, сух. масса	
			подгоризонт OL	подгоризонт OFH
1	ЭИпион_тр	0,5*	0,70	0
2	ЭАОпр_др	3,8	0	8,55
3	ЭОАпр_тр	3,0	2,95	1,40
4	ЭДсл_тр	3,0	2,80	1,80
5	ЭАОсл_др	2,5	0	9,20
6	ЭДсл_тр	2,0	4,30	2,80
7	ЭИпион_тр	1,0*	1,30	0,29
8	ЭОАпр_др	2,7	1,10	7,80

Примечание.
* – фрагментарные горизонты в инициальных эмбриоземах.

Определение содержания основных биогенных элементов в компонентах исследуемых органогенных горизонтов почв проводилось с целью оценки их качественного состояния и последующего расчета запасов углерода. Результаты показывают, что ***содержание углерода*** в подстилках отличается как на различных участках, так и в анализируемых подгоризонтах. Наиболее высокие средние и медианные концентрации углерода отмечены в подгоризонтах OL (рис. 2), для них же характерен минимальный разброс значений (37,6–43,2%). Минимальные значения фиксируются в пределах участков занятых лесной растительностью, где опад деревьев до августа отсутствует и представлен остатками единичных экземпляров растений полога. Максимальные значения концентраций углерода в опаде свойственны участкам с доминированием в составе растительного покрова злаков (участок №6).

Более вариативно содержание углерода в ферментативно-перегнойном слое (OFH) (рис. 2). Разброс значений зависит от состава растительности, который обусловлен, в свою очередь, физическими, химическими и биологическими свойствами почв и этапом сукцессии. Так, за счет мелких ветвей максимальные концентрации углерода (48,4%) в подгоризонтах OFH фиксируются в подстилках органо-аккумулятивных эмбриоземов лесных участков (ЭОАпр_др). Минимальные значения (9,4%) отмечаются в эмбриоземах дерновых, сформированных на глинистых породах (ЭДсл_тр). По всей видимости, в глинистых почвах, в отличие от каменистых субстратов, по причине повышенной водоудерживающей способности почв складываются более благоприятные условия для разложения подстилок. В среднем содержание углерода в OFH в 1,2–1,3 раза ниже, чем в OL, что связано с более активными процессами разложения нижних слоев подстилок (Ведрова и др., 2018).

Процентное ***содержание азота*** в растительности, а, следовательно, и в подстилках зависит от множества абиотических и биотических факторов: от механического состава почв, строения почвообразующих пород, рельефа и режима увлажнения, интенсивности поступления растительных остатков и структуры опада, органа растения, входящих в подстилку, и климатических условий местности (Zhang et al., 2018). Кроме того, большое влияние оказывает скорость разложения органического вещества, так как при данном процессе происходит потеря азота в силу вовлечения его снова в биологический круговорот. Содержание азота в мортмассе варьирует в широких пределах: от 0,56 до 2,90% (рис. 2). Дифференциация этих значений обусловлена видовым составом растительных сообществ, поскольку минимальные концентрации азота фиксируются в сложных травяных сообществах (ЭДсл_тр), максимальные в простых лесных фитоценозах (ЭОАпр_др). На этом фоне содержание азота в подгоризонтах OFH в среднем в 1,5 раза ниже, чем в OL, т.к. в процессе разложения мортмассы определенная его часть, способная к миграции, вновь вовлекается в биологический круговорот. С другой стороны, отмечаемое в литературе обогащение азотом нижней части подстилок за счет пассивной диффузии, привноса почвенной фауной и накоплением грибами и бактериями

(Титлянова, Шибарева, 2012), в исследуемых почвах техногенных ландшафтов не наблюдается, что, вероятно, связано с их низкой освоенностью биотой.

Отношение C/N, отражающее качественное состояние органического вещества подстилок, демонстрирует широкий спектр значений. В массе опада, который представлен преимущественно остатками травянистых растений, C/N варьирует в интервале от 16,8 до 51,5 (рис. 2). При этом минимальные значения соответствуют тонким фрагментарным подгоризонтам OL инициальных эмбриоземов (ЭИпион_тр), максимальные – богатым опадом злаков подгоризонтам OL дерновых (ЭДсл_тр). Аналогичная картина наблюдается и в OFH подгоризонтах участков травяных сообществ; при том в тех же сообществах соотношение C/N в подгоризонте OL в 1,2–1,3 раза ниже, чем в OFH. Отношение C/N в ферментативно-перегнойном слое почв лесных участков, напротив, выше в среднем в 1,5 раза.

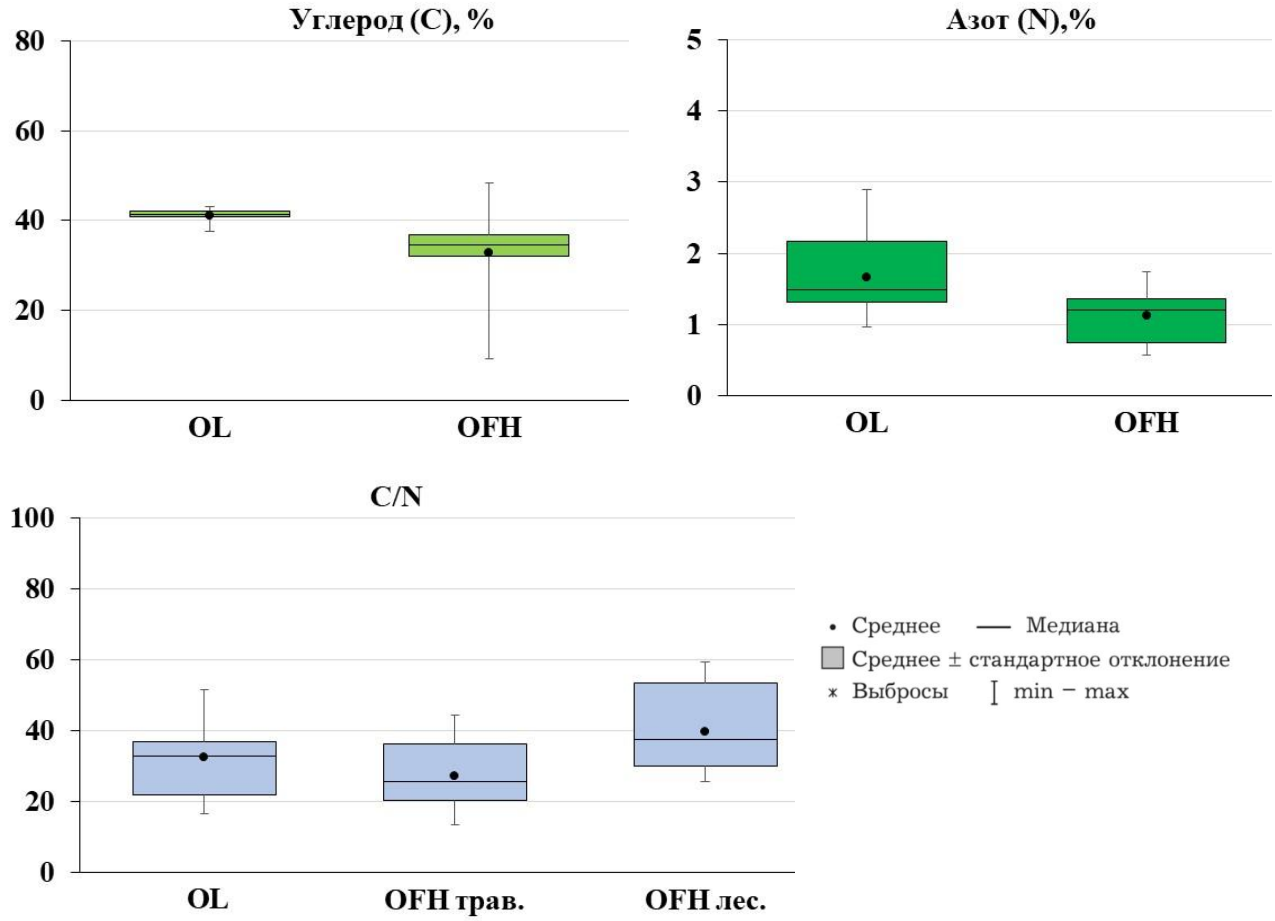


Рисунок 2. Содержание и соотношение углерода и азота в подгоризонтах OL (n=18) и OFH (n=22) подстилок эмбриоземов.

Расчет запасов углерода в подстилках изученных эмбриоземов показал, что их значения варьируют в диапазоне от 0,26 до 3,26 т C/га (рис. 3). Наибольшие запасы сосредоточены в эмбриоземах, сформированных под лесными, как простыми (3,04–3,11 т C/га), так и сложными (3,26 т C/га), сообществами (ЭОАпр_др и ЭДсл_др). Полученные значения соответствуют минимальному уровню запасов углерода, отмечаемому в лесах Звенигородской биостанции МГУ (Копцик и др., 2023), и попадают в диапазон оценок (1,3-70,8 т C/га) для лесных почв Европы и России (Baritz et al., 2010; Честных и др., 2007). Наименьшие запасы (0,26–0,63 т C/га) фиксируются в пионерных сообществах, приуроченных к инициальным эмбриоземам (ЭИпион_тр). Запасы углерода в подстилках простых и сложных травяных фитоценозов варьируют в интервале 1,57–2,08 т C/га, с максимумом в сообществах, сформированных на рыхлых породах (ЭДсл_тр). В структуре запасов углерода в травяных экосистемах 65–100% приходится на опад (подгоризонт OL), в лесных – 85–100% на ферментативно-перегнойный слой (OFH). Такая дифференциация связана с разницей в скорости круговорота травяных и лесных экосистем и преобразования опада. Более мягкий опад травянистых растений разлагается быстрее, нежели грубый древесный. В то же время, части травянистых растений могут отмирать в течение всего

вегетационного периода, тогда как массовый опад листьев деревьев происходит осенью, а летом на поверхности сохраняется преимущественно ферментативно-перегнойный подгоризонт.

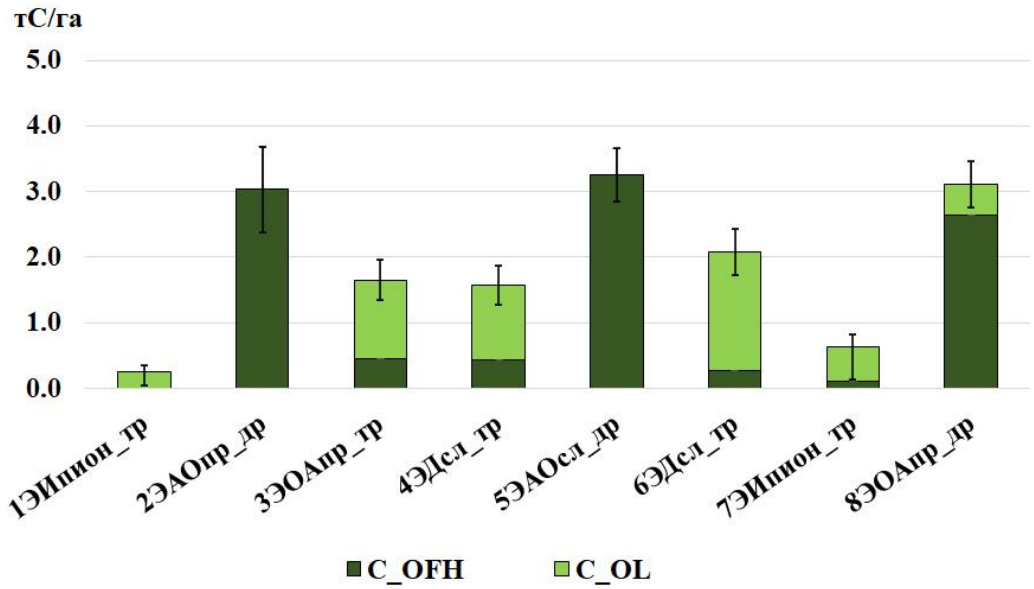


Рисунок 3. Запасы углерода в подстилках травяных и лесных техногенных экосистем. Обозначения см. табл. 1.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследования органогенных горизонтов почв отвалов, образованных из отходов добычи антрацита, показали, что в техногенных экосистемах в силу дифференцированности эдафических условий и возраста участков формируемые подстилки характеризуются неоднородностью по составу, строению и запасам органического вещества и углерода. Отмечаемые особенности подстилок имеют приуроченность к определенным типам эмбриоземов и произрастающим на них видам растений, которые группируются в пионерные, простые и сложные лесные и травянистые сообщества.

Минимальные мощность (до 1 см) и запасы органического вещества (до 1,59 т/га) фиксируются во фрагментарных подстилках пионерных растительных сообществ инициальных эмбриоземов. В их составе преобладает опад (подгоризонт OL) преимущественно из остатков *Melilotus officinalis* L., *Échium vulgáre* L., во влажные годы *Salsola collina* Pall. Под простыми травяными сообществами в органо-аккумулятивных эмбриоземах мощность подстилок достигает 3 см, а запасы органического вещества 4,35 т/га. На 2/3 они представлены подгоризонтами OL и состоят, по большей части, из остатков *Melilotus officinalis* L., *Pimpinella saxifraga* L. и *Fragaria vesca* L. Подстилки простых фитоценозов залесенных участков отличаются преобладанием (от 87 до 100% по запасам) частично переработанных растительных остатков ферментативно-перегнойного слоя (подгоризонт OFH), состоящего, в основном, из листьев и мелких веток *Betula pendula* Roth.; их мощность колеблется в интервале 2,7–3,8 см, а запасы органического вещества 8,55–8,90 т/га.

Небольшой мощностью, но повышенными запасами сухой массы характеризуются подстилки сложных фитоценозов. Так, в дерновых эмбриоземах травяных экосистем мощность подстилки колеблется в пределах 2,0–3,0 см, а запасы органического вещества 4,60–7,10 т/га. В их составе 2/3 мортмассы приходится на опад злаков *Bromus inermis* L., *Dactylis glomerata* L. и *Poa angustifolia* L., в меньшей степени на *Vicia cracca* L., *Leucanthemum vulgare* Lam., *Chamaenerion angustifolium* L., *Scop.*, *Melilotus officinalis* L. В органо-аккумулятивных эмбриоземах сложных лесных сообществ мощность подстилки около 2,5 см, а запасы сухой массы 9,20 т/га. Подгоризонт OL, как и в других техногенных лесных экосистемах, здесь фактически не выражен. Подгоризонт OFH, помимо доминирующих остатков *Betula pendula* Roth., представлен продуктами неполного разложения растений формирующегося кустарниково-травянистого яруса.

Содержание углерода в подстилках варьирует в широком диапазоне (от 9,4 до 48,4%, при среднем 36,7%) и отличается в зависимости от типа и состава растительных сообществ и эдафических условий. Содержание углерода в OFH в среднем в 1,2–1,3 раза ниже, чем в OL. Те же факторы формируют разброс содержания азота в подстилках (от 0,56 до 2,90%, при среднем 1,35%). В

подстилках почв исследуемых отвалов не происходит обогащение азотом нижней части, что, вероятно, связано с низкой биологической активностью.

В целом, запасы углерода в подстилках травяных и лесных техногенных экосистем находятся в интервале 0,26–3,26 т С/га и увеличиваются в ряду пионерные < простые травянистые ≤ сложные травянистые < простые лесные = сложные лесные сообщества.

Таким образом, полученные результаты позволяют заключить, что для формирования резервов углерода в техногенных ландшафтах при проведении рекультивации необходимо создавать условия для ускоренного развития сложных растительных сообществ. Учитывая специфику функционирования техногенных экосистем, более быстрыми темпами это можно достичь при выравнивании и отсыпке поверхности рыхлыми породами, способствуя, тем самым, ускоренному развитию травяных фитоценозов (Скотарева и др., 2024). Это позволит, наряду с формированием краткосрочного фонда углерода в виде подстилок, создать предпосылки для развития гумусово-аккумулятивных горизонтов как депо долгосрочной секвестрации. Для секвестрации соответствующих запасов углерода в подстилках лесных насаждений нужно больше времени ввиду специфики развития древесной растительности; при этом вместе с накоплением древесины формируется пул среднесрочного депо углерода (Уфимцев и др., 2025).

В любом случае, формирование на поверхности отвалов углеразрезов как лесных, так и травяных подстилок и других органогенных горизонтов является важным фактором, препятствующим образованию и миграции органических поллютантов (Соколов и др., 2021) и тяжелых металлов (Скотарева и др., 2025).

ФИНАНСОВАЯ ПОДДЕРЖКА

Работа выполнена по теме государственного задания Института почвоведения и агрохимии СО РАН (проект № 121031700316-9).

ЛИТЕРАТУРА

Абакумов Е.В., Поляков В.И., Чуков С.Н. Подходы и методы изучения органического вещества почв карбоновых полигонов (обзор) // Почвоведение. 2022. № 7. С. 773–786. https://doi.org/10.1134/s106422932207002x

Агроклиматические ресурсы Новосибирской области. Ленинград: Гидрометеоиздат, 1971. 155 с.

Алиев И.Н., Хамарова З.Х. Восстановление древесной растительности на отвалах месторождений полезных ископаемых на территории Кабардино-Балкарии // Растительные ресурсы. 2019. Том 55. № 1. С. 102–112. https://doi.org/10.1134/s0033994619010035

Андроханов В.А., Соколова Н.А. Почвенно-экологическое состояние поверхности отвалов антрацитовых месторождений (на примере Горловского антрацитового месторождения, Новосибирская область) // Достижения науки и техники АПК. 2022. Том 36. № 5. С. 31–36. https://doi.org/10.53859/02352451_2022-36-5-31

Андроханов В.А., Богуславский А.Е., Соколов Д.А., Филонова Ю.О., Ужогова А.А. Почвенно-экологическая оценка рекультивации отвалов угольных месторождений // Химия в интересах устойчивого развития. 2023. Том 31. № 1. С. 1–12. http://doi.org/10.15372/KhUR2023433

Базилевич Н.И., Титлянова А.А. Биотический круговорот на пяти континентах: азот и зольные элементы в природных наземных экосистемах / А.А. Тишков (отв. ред.); Новосибирск: Издательство Сибирского отделения РАН, 2008. 376 с.

Байтурина Р.Р., Султанова Р.Р., Асылбаев И.Г. Оценка запаса углерода в лесной подстилке и верхнем слое почв насаждений основных лесообразующих пород // Journal of Agriculture and Environment. 2023. № 12 (40). P. 16 https://doi.org/10.23649/JAE.2023.40.24

Биологическая продуктивность травяных экосистем. Географические закономерности и экологические особенности / Титлянова А.А., Базилевич Н.И., Снытко В.А. и др. Новосибирск: Наука. Сиб. отделение, 1988. 134 с.

Ведрова Э.Ф., Мухортова Л.В., Метелева М.К. Трансформация органического вещества подстилки в лесных культурах // Лесоведение. 2018. № 1. С. 24–36. https://doi.org/10.7868/S0024114818010023

Волков А.Г. Лесная подстилка в парцеллах ельников северной подзоны тайги // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2015. № 2 (344). С. 63–69.

Воронов А.Г. Геоботаника: Учеб. пособие для ун-тов и пед. ин-тов. 2-е изд. Высшая школа, 1973. 384 с.

Глебова О.И. Биогеографическая диагностика эмбриоземов Кузбасса. Автореферат диссертации … канд. биол. наук. Новосибирск. 2005. 18 с.

Госсен И.Н., Соколов Д.А. Оценка содержания гумуса в почвах рекультивированных отвалов угольных разрезов Кузбасса // Вестник НГАУ (Новосибирский государственный аграрный университет). 2014. № 4 (33). С. 33–40.

Кандрашин Е.Р. Сукцессии биоты в техногенных экосистемах (на примере Кузнецкого угольного бассейна): Автореферат диссертации ... канд. биол. наук. Днепропетровск, 1989. 17 с.

Копцик Г.Н., Копцик С.В., Куприянова Ю.В., Кадулин М.С., Смирнова И.Е. Оценка запасов углерода в почвах лесных экосистем как основа мониторинга климатически активных веществ // Почвоведение. 2023. № 12. С. 1686–1702. https://doi.org/10.31857/S0032180X23601329

Королева Т.С., Шунькина Е.А. Обзор мирового опыта консервации углерода в существующих лесных резервуарах // Труды Санкт-Петербургского научно-исследовательского института лесного хозяйства. 2014. № 4. С. 22–39.

Кудеяров В.Н. Секвестрация углерода в почве: факты и проблемы (аналитический обзор) // Успехи современной биологии. 2022. Том 142. № 6. С. 545–559. https://doi.org/10.31857/S0042132422060047

Куприянов А.Н., Манаков Ю.А. Закономерности восстановления растительного покрова на отвалах Кузбасса // Сибирский лесной журнал. 2016. № 2. С. 51–58. https://doi.org/10.15372/SJFS20160205

Курачев В.М., Андроханов В.А. Классификация почв техногенных ландшафтов // Сибирский экологический журнал. 2002. Том 9. № 3. С. 255–261.

Курачев В.М., Кандрашин Е.Р., Рагим-заде Ф.К. Сингенетичность растительности и почв техногенных ландшафтов: экологические аспекты, классификация // Сибирский экологический журнал. 1994. Том 1. № 3. С. 205–214.

Кусов А.В. Гранулометрическая диагностика внутрипочвенного выветривания обломочного материала в техногенных ландшафтах // Сибирский экологический журнал. 2007. Том 14. № 5. С. 837–843.

Почвенно-климатический атлас Новосибирской области / Отв. ред. А.П. Сляднев. Новосибирск: Наука. Сиб. отделение, 1978. 122 с.

Пристова Т.А. Скорость разложения растительного опада в лиственных насаждениях послерубочного происхождения в условиях средней тайги Республики Коми // Труды Санкт-Петербургского научно-исследовательского института лесного хозяйства. 2020. № 3. С. 62–72. http://doi.org/10.21178/2079-6080.2020.3.62

Продуктивность травяных экосистем: Справочник. Москва: Издательство МБА, 2020. 100 с.

Скотарева А.Е., Иванов Н.А., Соколов Д.А. Оценка факторов, определяющих скорость и направленность развития растительных сообществ на отвалах отходов добычи угля (на примере Горловского антрацитового месторождения) // Почвы и окружающая среда. 2024. Том 7. № 2. e259. http://doi.org10.31251/pos.v7i2.259

Скотарева А.Е. Гуркова Е.А., Соколов Д.А. Оценка содержания и подвижности тяжелых металлов в почвах техногенных ландшафтов (на примере Горловского месторождения антрацитов, Новосибирская область) // Экология и промышленность России. 2025. Том 29. № 3. С. 34–41. http://doi.org/0.18412/1816-0395-2025-3-34-41

Соколов Д.А., Морозов С.В., Абакумов Е.В., Андроханов В.А. Полициклические ароматические углеводороды в почвах отвалов антрацитовых месторождений Сибири // Почвоведение. 2021. № 6. С. 701–714. http://doi.org/10.31857/S0032180X21060125

Соколов Д.А., Гуркова Е.А., Соколова Н.А. Литогенный потенциал почвообразования в техногенных ландшафтах угледобывающих месторождений Сибири // Экология и промышленность России. 2022. Том 26. № 11. С. 48–54. http://doi.org/10.18412/1816-0395-2022-11-48-54

Соколова Н.А., Госсен И.Н., Соколов Д.А. Оценка пригодности вегетационных индексов для выявления почвенно-экологического состояния поверхности отвалов антрацитовых месторождений // Экология и промышленность России. 2020. Том 24. № 1. С. 62–68. https://doi.org/10.18412/1816-0395-2020-1-62-68

Соколова Н.А. Оценка почвенно-экологического состояния отвалов угольных разрезов дистанционными методами (на примере Горловского антрацитового месторождения). Диссертация … канд. биол. наук. Томск, 2023. 200 с.

Титлянова А.А., Шибарева С.В. Подстилки в лесных и травяных экосистемах. Новосибирск: Издательство Сибирского отделения РАН, 2012. 135 с.

Трефилова О.В., Беланов И.П., Уфимцев В.И., Ефимов Д.Ю. Эффекты фитогенного поля сосны в различных климатических условиях: почвенно-экологический эксперимент // Лесоведение. 2021. № 2. С. 156–172. http://doi.org/10.31857/S0024114821020091

Уфимцев В.И., Соколов Д.А., Легощина О.М. Депонирование углерода в надземной фитомассе древостоев на отвалах Горловского антрацитового месторождения // Уголь. 2025. № 4. С. 108–113. http://doi.org/10.18796/0041-5790-2025-4-108-113

Честных О.В., Лыжин В.А., Кокшарова А.В. Запасы углерода в подстилках лесов России // Лесоведение. 2007. № 6. С. 114–121.

Шугалей Л.С. Первичное почвообразование на отвалах вскрышных пород под культурой сосны // Почвоведение. 1997. № 2. С. 247–253.

Методика полевых работ для экспресс оценки характеристик лесной растительности и почв на тестовом полигоне интенсивного уровня в рамках реализации важного инновационного проекта государственного значения «Углерод в экосистемах: мониторинг». Консорциум № 4 / В.Л. Черных (руководитель группы). Москва: ФГБУН Центр по проблемам экологии продуктивности лесов РАН, 2023. [Электронный ресурс]. https://ritm-c.ru/wp-content/uploads/2023/07/metodika-pochvy_puly.pdf.p-content/uploads/2023/07/metodika-pochvy_puly.pdf. (дата обращения 23.03.2025).

Baritz R., Seufert G., Montanarella L., Van Ranst E. Carbon concentrations and stocks in forest soils of Europe // Forest Ecology and Management. 2010. Vol. 260. No. 3. P. 262–277. http://doi.org/10.1016/j.foreco.2010.03.025

Bar-On Y.M., Li X., O'Sullivan M., Wigneron J.-P., Sitch S., Ciais P., Frankenberg C. Fischer W.W. Recent gains in global terrestrial carbon stocks are mostly stored in nonliving pools // Science. 2025. Vol. 387. No. 6740. P. 1291–1295. http://doi.org/10.1126/science.adk1637

Frouz J., Mudrák O., Reitschmiedová E., Walmsley A., Vachová P., Šimáčková H., Albrechtová J., Moradi J., Kučera J. Rough wave-like heaped overburden promotes establishment of woody vegetation while leveling promotes grasses during unassisted post mining site development // Journal of Environmental Management. 2018. Vol. 205. P. 50–58. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.09.065

IUSS Working Group WRB. World Reference Base for Soil Resources. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps, 4th ed.; International Union of Soil Sciences (IUSS). Vienna, Austria, 2022. 234 p.

Li S., Chen Y., Duan Y., Zhao Y., Zhang D., Zang L., Ya H Widely targeted metabolomics analysis of different parts of Salsola collina pall // Molecules. 2021. Vol. 26. No. 4. P. 1126. https://doi.org/10.3390/molecules26041126

Oksanen E. Birch as a model species for the acclimation and adaptation of northern forest ecosystem to changing environment // Frontiers in Forests and Global Change. 2021. Vol. 4. P. 682512. http://doi.org/10.3389/ffgc.2021.682512

Oliver K., Innvar S., Lorenc T., Woodman J., Thomas J. A Systematic Review of Barriers to and Facilitators of the Use of Evidence by Policymakers // BMC Health Serv Res. 2014. Vol. 14. No. 2. http://doi.org/10.1186/1472-6963-14-2

Penman J., Gytarsky M., Hiraishi T., Krug T., Kruger D., Pipatti R., Buendia L., Miwa K., Ngara T., Tanabe K., Wagner F. Good practice guidance for land use, land-use change and forestry / J. Penman, M. Gytarsky, T. Hiraishi, T. Krug, D. Kruger, R. Pipatti, L. Buendia, K. Miwa, T. Ngara, K. Tanabe, F. Wagner (editors). Institute for Global Environmental Strategies, 2003. 593 p.

Sokolov D.A., Androkhanov V.A., Abakumov E.V. Soil formation in technogenic landscapes: trends, results, and representation in the current classifications (Review) // Вестник Томского государственного университета. Биология. 2021. № 56. С. 6–32. http://doi.org/10.17223/19988591/56/1

Sokolova N.A., Solovyev S.V., Sokolov D.A. Restoration of biodiversity of technogenic landscapes of anthracite deposits in Siberia. VI International Scientific Conference "Problems of Industrial Botany of Industrially Developed Regions". BIO Web Conferences. 2021. Vol. 31. Article Number 00026. https://doi.org/10.1051/bioconf/20213100026

Song P., Yang R., Jiao K., Guo B., Zhang L., Li Y., Zhang K., Zhou S., Wu X., Li X. FvMYB108, a MYB Gene from *Fragaria vesca*, Positively Regulates Cold and Salt Tolerance of Arabidopsis // International Journal of Molecular Sciences. 2024. Vol. 25. No. 6. P. 3405. http://doi.org/10.3390/ijms25063405

Wang Z., You J., Xu X., Yang Y., Wang J., Zhang D., Mu L., Zhuang X., Shen Z., Guo C. Physiological and Biochemical Responses of *Melilotus albus* to Saline and Alkaline Stresses // Horticulturae. 2024. Vol. 10. No. 3. P. 297. https://doi.org/10.3390/horticulturae10030297

Zhang, Y., Yang, J., Yang, W., Tan B., Fu C., Wu F. Climate, plant organs and species control dissolved nitrogen and phosphorus in fresh litter in a subalpine forest on the eastern Tibetan Plateau // Annals of Forest Science. 2018. Vol. 75. No. 51. https://doi.org/10.1007/s13595-018-0731-9

Поступила в редакцию 02.04.2025
Принята 14.05.2025
Опубликована 19.05.2025

Сведения об авторах:

Токарева Анастасия Вадимовна – студентка Новосибирского национального исследовательского государственного университета (г. Новосибирск, Россия); n4sty4t@yandex.ru

Уфимцев Владимир Иванович – доктор биологических наук, заведующий лабораторией рекультивации и биомониторинга Федерального исследовательского центра угля и углехимии СО РАН (г. Кемерово, Россия); uwy2079@gmail.com

Соколова Наталья Александровна – кандидат биологических наук, заведующая лабораторией географии и генезиса почв ФГБУН Институт почвоведения и агрохимии СО РАН (г. Новосибирск, Россия); sokolovanatalija@mail.ru

Соколов Денис Александрович – доктор биологических наук, заведующий лабораторией рекультивации почв ФГБУН Институт почвоведения и агрохимии СО РАН (г. Новосибирск, Россия); sokolovdenis@mail.ru

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Статья доступна по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License

Litter formation and its carbon deposition capacity in forest and grass man-made ecosystems of anthracite mining coal mining spoils

© 2025 A. V. Tokareva[1], V. I. Ufimtsev [2], N. A. Sokolova [3], D. A. Sokolov [3]

[1]Novosibirsk State University, st. Pirogova, 1, Novosibirsk, Russia. E-mail: n4sty4t@yandex.ru

[2]Federal Research Center of Coal and Coal Chemistry of the SB RAS, Sovetsky ave., 18, Kemerovo, Russia. E-mail: uwy2079@gmail.com

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

The aim of the study *was to identify litter formation features and assess litter carbon- sequestration ability in the forest and grass ecosystems of man-made landscapes of the Gorlovka anthracite deposit.*

Location and time of the study. *The outer anthracite mining spoil of the Gorlovka anthracite mine (54.568880, 83.588956), Novosibirsk region, Iskitimsky district, June-August 2024.*

Methods. *Litter sampling at the study sites was carried out using the envelope method as per the methodological recommendations for soil samples collection and analysis of the Unified National Monitoring System for Climatically Active Substances. A plastic cylinder with a diameter and height of 100 mm was used to collect the material. The litter samples were analyzed after drying to an air-dry state in the Laboratory of soil reclamation of the ISSA SB RAS. After cutting with scissors, more thorough dispersion with a vibrating ball mill and subsequent homogenization, litter carbon and nitrogen content was determined using a CHNS/O analyzer 2400 Series II Perkin Elmer. Statistical processing of the results was performed using Microsoft Excel and PAST v2.17 software packages.*

Results. *In the mining spoils ecosystems, due to the heterogeneity of edaphic conditions and longevity of spontaneous revegetation of the sites, the formed litter was characterized by heterogeneity in composition, structure and organic matter and carbon pools. The noted features of the litter were confined to certain types of embryozems and plants growing on them, which are grouped into pioneer, simple and complex forest and herbaceous communities. The minimum thickness (up to 1 cm) and pools of organic matter (up to 1,59 t/ha) were found in fragmentary litters of pioneer plant communities on initial embryozems. The litter of complex phytocenoses and grass ecosystems of turf embryozems was characterized by small thickness, but maximum pools of dry mass. The litter carbon content ranged widely (from 9,4 to 48,4%, with an average of 36,7%) and differed depending on the type and composition of plant communities and edaphic conditions. In general, carbon pools in the grass and forest litter of man-made mining spoils ecosystems ranged 0,26-3,26 t C/ha, increasing in a row of pioneer < simple herbaceous ≤ complex herbaceous < simple forest=complex forest communities. At the same time, nitrogen enrichment of the lower litter layers did not occur in the studied anthracite mining spoils most likely due to the poor development of biota.*

Keywords: *reclamation; embryozems; soils of man-made landscapes; carbon sequestration; Technosol.*

How to cite: *Tokareva A.V., Ufimtsev V.I., Sokolova N.A., Sokolov D.A. Litter formation and its carbon deposition capacity in forest and grass man-made ecosystems of anthracite mining coal mining spoils. The Journal of Soils and Environment. 2025. Vol. 8(1). e309. (in Russian with English abstract). DOI: 10.31251/pos.v8i1.309*

REFERENCES

Abakumov E.V., Polyakov V.I., Chukov S.N. Approaches and methods for studying the soil organic matter in the carbon polygons of Russia (Review). Eurasian Soil Science. 2022. No. 7. P. 849–860. http://doi.org/10.1134/s106422932207002x

Agroclimatic resources of the Novosibirsk region. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1971. 155 p. (in Russian).

Aliev I.N., Hamarova Z.H. Restoration of woody vegetation on mineral deposit dumps in Kabardino-Balkaria. Rastitelnye Resursy. 2019. Vol. 55. No. 1. P. 102–112. (in Russian). http://doi.org/10.1134/S0033994619010035

Androkhanov V.A., Sokolova N.A. Soil-ecological state of the surface of dumps of anthracite deposits (on the example of the Gorlovsky anthracite deposit, Novosibirsk region). Achievements of Science and Technology in Agro-Industrial Complex. 2022. Vol. 36. No. 5. P. 31–36. (in Russian). https://doi.org/10.53859/02352451_2022-36-5-31

Androkhanov V.A., Boguslavsky A.E., Sokolov D.A., Filonova Yu.O., Uzhogova A.A. Soil-Ecological Assessment of Recultivation at the Spoils of Coal Deposits. Chemistry for Sustainable Development. 2023. Vol. 31. No. 1. P. 1–12. http://doi.org/10.15372/CSD2023433

Bazilevich N.I., Titlyanova A.A. Biotic turnover of five continents: element exchange processes in terrestrial natural ecosystems / A.A. Tishkov (ed.). Novosibirsk: Publishing House SB RAS, 2008. 376 p. (in Russian).

Baiturina R.R., Sultanova R.R., Asylbaev I.G. An evaluation of carbon stock in forest floor and topsoil of plantations of main forest forming species. Journal of Agriculture and Environment. 2023. No. 12 (40). P. 16. (in Russian). https://doi.org/10.23649/JAE.2023.40.24

Biological productivity of grasslands. Geographical regularities and ecological features / Titlyanova A.A., Bazilevich N.I., Snytko V.A. et al. Novosibirsk: Publishing House SB RAS, 1988. 134 p. (in Russian).

Vedrova E.F., Mukhortova L.V., Meteleva M.K. Transformation of ofganic matter of litter in forest plantations. Lesovedenie. 2018. No. 1. P. 24–36. (in Russian). http://doi.org/10.7868/S0024114818010023

Volkov A.G. The Forest Litter in Spruce Formation in the Northern Subzone of Taiga. Russian Forestry Journal. 2015. No. 2 (344). C. 63–69. (in Russian).

Voronov A.G. Geobotany. 2nd ed. Vysshaya Shkola Publ., 1973. 384 p. (in Russian).

Glebova O.I. Biogeographical diagnostics of Kuzbassembryozems. Abstract of Dissertation … Cand. of Biol. Sci. Novosibirsk, 2005. 18 p. (in Russian).

Gossen I.N., Sokolov D.A. Assessment of humus content in soils of reclaimed coal dumps in Kuzbass. Bulletin of NSAU (Novosibirsk State Agrarian University). 2014. No. 4 (33). P. 33–40. (in Russian).

Kandrashin E.R. Biota succession in technogenic ecosystems (on the example of the Kuznetsk coal basin). Abstract of Dissertation … Cand. of Biol. Sci. Dnepropetrovsk, 1989. 17 p. (in Russian).

Koptsik G.N., Koptsik S.V., Kupriyanova I.V., Kadulin M.S., Smirnova I.E. Estimation of carbon stocks in soils of forest ecosystems as a basis for monitoring the climatically active substances. Eurasian Soil Science. 2023. No. 12. P. 2009-2023. http://doi.org/10.1134/s1064229323602196

Koroleva T.S., Shunkina E.A. The review of world experience preservation of carbon in the existing forest tanks. Proceedings of the Saint Petersburg Forestry Research Institute. 2014. No. 4. C. 22–39. (in Russian).

Kudeyarov V.N. Soil carbon sequestration: facts and challenges (analytical review). Uspekhi sovremennoi biologii. 2022. Vol. 142. No. 6. P. 545–559. (in Russian). https://doi.org/10.31857/S0042132422060047

Kupriyanov A.N., Manakov A.Y. Regularities of restoration of plant cover on the dumps of the Kuznetsk Basin. Siberian Journal Foresty Science. 2016. No. 2. P. 51–58. (in Russian). http://doi.org/10.15372/SJFS20160205

Kurachev V.M., Androkhanov V.A. Classification of soils in technogenic landscapes. Sibirskij ekologicheskij zhurnal. 2002. Vol. 9. No. 3. P. 255–261. (in Russian).

Kurachev V.M., Kondrashin E.R., Ragim-zadeh F.K. Syngenetics of vegetation and soils of man-made landscapes: ecological aspects, classification. Sibirskij Ekologicheskij Zhurnal. 1994. Vol. 1. No. 3. P. 205–214. (in Russian).

Kusov A.V. Granulometric diagnostics of intra-soil weathering of clastic material in man-made landscapes. Sibirskij Ekologicheskij Zhurnal. 2007. Vol. 14. No. 5. P. 837-843. (in Russian).

Soil and Climatic Atlas of the Novosibirsk Region / A.P. Slyadnev (ed.). Novosibirsk: Nauka. Siberian Branch, 1978. 122 p. (in Russian).

Pristova T.A. The rate of decomposition of plant litter in deciduous stands of post-harvest origin in the middle taiga of the Komi Republic. Proceedings of the Saint Petersburg Forestry Research Institute. 2020. No. 3. P. 62–72. (in Russian). http://doi.org/10.21178/2079-6080.2020.3.62

Productivity of grass ecosystems: A handbook. Moscow: IBA Publishing House, 2020. 100 p. (in Russian).

Skotareva A.E., Ivanov N.A., Sokolov D.A. Assessment of factors determining the rate and direction of plant communities development on coal mining spoils (the case study of the Gorlovskoye anthracite deposit). The Journal of Soils and Environment. 2024. Vol. 7. No. 2. e259. (in Russian). http://doi.org/10.31251/pos.v7i2.259

Skotareva A.E., Gurkova E.A., Sokolov D.A. Assessment of content and mobility of heavy metals in soils of technogenic landscapes (on the Example of Gorlovskoye anthracite deposit, Novosibirsk region). Ecology and Industry of Russia. 2025. Vol. 29. No. 3. P. 34–41. (in Russian). http://doi.org/10.18412/1816-0395-2025-3-34-41

Sokolov D.A., Androkhanov V.A., Morozov S.V., Abakumov E.V. Polycyclic aromatic hydrocarbons in soils of anthracite deposit dumps in Siberia. Eurasian Soil Science. 2021. No. 6. P. 875–887. http://doi.org/10.1134/S1064229321060120

Sokolov D.A., Gurkova E.A., Sokolova N.A. Lithogenic potential of soils formation in technogenic landscapes of Siberia. Ecology and Industry of Russia. 2022. Vol. 26. No. 11. P. 48–54. (in Russian). http://doi.org/10.18412/1816-0395-2022-11-48-54

Sokolova N.A, Gossen I.N., Sokolov D.A. Assessment of the Suitability of Vegetation Indices to Identify Soil and Ecological Condition of the Surface of Anthracite Deposits Dumps. Ecology and Industry of Russia. 2020. Vol. 24. No. 1. P. 62–68. (in Russian). https://doi.org/10.18412/1816-0395-2020-1-62-68

Sokolova N.A. Assessment of the soil-ecological state of coal mine dumps using remote methods (using the example of the Gorlovskoye anthracite deposit). Dissertation … Cand. of Biol. Sci. Tomsk, 2023. 200 p. (in Russian).

Titlyanova A.A., Shibareva S.V. Litter in forests and grasslands. Novosibirsk: Publishing House SB RAS, 2012. 135 p. (in Russian).

Trefilova O.V., Belanov I.P., Ufimtsev V.I., Efimov D.Yu. Pine's phytogenic field's effects in different climate conditions. Lesovedenie. 2021. No. 2. P. 156–172. (in Russian). http://doi.org/10.31857/S0024114821020091

Ufimtsev V.I., Sokolov D.A., Legoshchina O.M. Carbon seposition in the above ground phytomass of forest stands on damps of the Gorlovsky anthracite field. Ugol'. 2025. No. 4. P. 108–113. (in Russian). http://doi.org/10.18796/0041-5790-2025-4-108-113

Chestnykh O.V., Lyzhin V.A., Koksharova A.V. The Carbon Reserves in Litters of Forests in Russia. Lesovedenie. 2007. No. 6. P. 114–121. (in Russian).

Shugaley L.S. Primary soil formation on overburden dumps under pine culture. Pochvovedenie. 1997. No. 2. P. 247–253. (in Russian).

Field work methodology for express assessment of forest vegetation and soil characteristics at an intensive test site within the framework of the implementation of an important innovative project of national importance "Carbon in ecosystems: monitoring". Consortium No. 4 / V.L. Chernykh (group leader). Moscow: Center for Forest Productivity Ecology Problems of the Russian Academy of Sciences, 2023. [Electronic resource]. https://ritm-c.ru/wp-content/uploads/2023/07/metodika-pochvy_puly.pdf.p-content/uploads/2023/07/metodika-pochvy_puly.pdf. (accessed on 23.03.2025). (in Russian).

Baritz R., Seufert G., Montanarella L., Van Ranst E. Carbon concentrations and stocks in forest soils of Europe. Forest Ecology and Management. 2010. Vol. 260. No. 3. P. 262–277. http://doi.org/10.1016/j.foreco.2010.03.025

Bar-On Y.M., Li X., O'Sullivan M., Wigneron J.-P., Sitch S., Ciais P., Frankenberg C. Fischer W.W. Recent gains in global terrestrial carbon stocks are mostly stored in nonliving pools. Science. 2025. Vol. 387. No. 6740. P. 1291–1295. http://doi.org/10.1126/science.adk1637

Frouz J., Mudrák O., Reitschmiedová E., Walmsley A., Vachová P., Šimáčková H., Albrechtová J., Moradi J., Kučera J. Rough wave-like heaped overburden promotes establishment of woody vegetation while leveling promotes grasses during unassisted post mining site development. Journal of Environmental Management. 2018. Vol. 205. P. 50–58. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.09.065

IUSS Working Group WRB. World Reference Base for Soil Resources. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps, 4th ed.; International Union of Soil Sciences (IUSS). Vienna, Austria, 2022. 234 p.

Li S., Chen Y., Duan Y., Zhao Y., Zhang D., Zang L., Ya H Widely targeted metabolomics analysis of different parts of Salsola collina pall. Molecules. 2021. Vol. 26. No. 4. P. 1126. https://doi.org/10.3390/molecules26041126

Oksanen E. Birch as a model species for the acclimation and adaptation of northern forest ecosystem to changing environment. Frontiers in Forests and Global Change. 2021. Vol. 4. P. 682512. http://doi.org/10.3389/ffgc.2021.682512

Oliver K., Innvar S., Lorenc T., Woodman J., Thomas J. A Systematic Review of Barriers to and Facilitators of the Use of Evidence by Policymakers. BMC Health Serv Res. 2014. Vol. 14. No. 2. http://doi.org/10.1186/1472-6963-14-2

Penman J., Gytarsky M., Hiraishi T., Krug T., Kruger D., Pipatti R., Buendia L., Miwa K., Ngara T., Tanabe K., Wagner F. Good practice guidance for land use, land-use change and forestry / J. Penman, M. Gytarsky, T. Hiraishi, T. Krug, D. Kruger, R. Pipatti, L. Buendia, K. Miwa, T. Ngara, K. Tanabe, F. Wagner (editors). Institute for Global Environmental Strategies, 2003. 593 p.

Sokolov D.A., Androkhanov V.A., Abakumov E.V. Soil formation in technogenic landscapes: trends, results, and representation in the current classifications (Review). Tomsk State University Journal of Biology. 2021. № 56. P. 6–32. https://doi.org/10.17223/19988591/56/1

Sokolova N.A., Solovyev S.V., Sokolov D.A. Restoration of biodiversity of technogenic landscapes of anthracite deposits in Siberia. VI International Scientific Conference “Problems of Industrial Botany of Industrially Developed Regions”. BIO Web Conferences. 2021. Vol. 31. Article Number 00026. https://doi.org/10.1051/bioconf/20213100026

Song P., Yang R., Jiao K., Guo B., Zhang L., Li Y., Zhang K., Zhou S., Wu X., Li X. FvMYB108, a MYB Gene from *Fragaria vesca*, Positively Regulates Cold and Salt Tolerance of Arabidopsis. International Journal of Molecular Sciences. 2024. Vol. 25. No. 6. P. 3405. http://doi.org/10.3390/ijms25063405

Wang Z., You J., Xu X., Yang Y., Wang J., Zhang D., Mu L., Zhuang X., Shen Z., Guo C. Physiological and Biochemical Responses of *Melilotus albus* to Saline and Alkaline Stresses // Horticulturae. 2024. Vol. 10. No. 3. P. 297. https://doi.org/10.3390/horticulturae10030297

Zhang, Y., Yang, J., Yang, W., Tan B., Fu C., Wu F. Climate, plant organs and species control dissolved nitrogen and phosphorus in fresh litter in a subalpine forest on the eastern Tibetan Plateau // Annals of Forest Science. 2018. Vol. 75. No. 51. https://doi.org/10.1007/s13595-018-0731-9

Received 02 April 2025
Accepted 14 May 2025
Published 19 May 2025

About the authors:

Anastasia V. Tokareva – Student at Novosibirsk National Research State University (Novosibirsk, Russia); n4sty4t@yandex.ru

Vladimir I. Ufimtsev – Doctor of Biological Sciences, Head of the Laboratory of Remediation and Biomonitoring of the Federal Research Center for Coal and Coal Chemistry SB RAS (Kemerovo, Russia); uwy2079@gmail.com

Natalia A. Sokolova — Candidate of Biological Sciences, Senior Researcher at the Laboratory of Geography and Soil Genesis at the Institute of Soil Science and Agrochemistry SB RAS (Novosibirsk, Russia); sokolovanatalija@mail.ru

Denis A. Sokolov – Doctor of Biological Sciences, Leading Researcher in the Laboratory of Soil Remediation, Institute of Soil Science and Agrochemistry SB RAS (Novosibirsk, Russia); sokolovdenis@mail.ru

The authors read and approved the final manuscript

The article is available under Creative Commons Attribution 4.0 License

УДК 631.4+630;160.2+581.52
https://doi.org/10.31251/pos.v8i1.308

Check for updates

Изменение элементного состава и содержания низкомолекулярных органических соединений в ходе экспериментальной деструкции торфа в южно-таёжных болотах Западной Сибири

© 2025 Н. Г. Коронатова

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

Цель исследования. *Выявление особенностей динамики элементного состава и низкомолекулярных органических соединений при экспериментальной деструкции разных видов торфа на примере трёх сообществ Бакчарского болота (Западная Сибирь).*

Место и время проведения. *Полевой эксперимент проведён в трёх сообществах Бакчарского болота (56°51” с.ш., 82°50” в.д.): сосново-кустарничково-сфагновом ряме, кустарничково-пушицево-сфагновой окрайке топи и осоково-сфагновом сообществе в её центре. После подготовки образцы торфа были заложены на глубину 5–10 и 25–30 см, а через 4 и 16 месяцев отобраны для дальнейшего исследования.*

Методы. *Содержание углерода, водорода и азота определили на CNHS/O-анализаторе Perkin Elmer 2400 Series II (США); фосфора – колориметрически; обменных калия, натрия, кальция, магния и железа – методом атомно-абсорбционной спектрометрии. Анализ экстрактивных низкомолекулярных органических соединений провели методом газовой хромато-масс-спектрометрии на газовом хроматографе Clarus 500 MS фирмы Perkin Elmer (США) с квадрупольным детектором.*

Основные результаты. *В ходе экспериментальной деструкции в полевых условиях во всех образцах снизилось содержание углерода, а изменения содержания азота и отношения H/C и C/N были разнонаправлены по сообществам и глубине инкубации. Отношение C/N не оказалось определяющим для интенсивности разложения торфа в болоте. Содержание фосфора, калия и натрия снижалось в большинстве случаев. Содержание магния и железа при разложении торфа выросло в топяных сообществах, а кальция – при разложении в краевой части топи. Аэробный слой ряма отличался от остальных локаций тем, что здесь за время инкубации в образцах увеличилось содержание всех элементов. Содержание низкомолекулярных органических соединений после разложения возросло в аэробной зоне ряма и снизилось в топи. Содержание отдельных групп органических соединений менялось при этом по-разному – от небольшого изменения до четырёхкратного.*

Заключение. *Для каждого сообщества Бакчарского болота на основе динамики элементного состава и содержания низкомолекулярных органических соединений установлен специфический ход разложения торфа. В аэробной зоне ряма разложение торфа привело к увеличению содержания всех элементов и органических соединений на фоне наибольшей потери массы. В кустарничково-пушицево-сфагновой окрайке топи в ходе разложения торфа содержание элементов как снижалось, так и росло, а органических соединений – уменьшилось. В осоково-сфагновом центре топи из образца торфа произошло выщелачивание элементов. Наиболее вероятно такая динамика связана с развитием разных сообществ агентов разложения органического вещества: микромицетов в аэробной зоне торфяных почв ряма и бактерий в почве краевой части топи. В нижележащем слое почв ряма и обводнённой топи разложение замедлено в связи с анаэробными условиями.*

Ключевые слова: *торфяные почвы; углерод; водород; азот; зольные элементы; экстрактивные вещества.*

Цитирование: *Коронатова Н.Г. Изменение элементного состава и содержания низкомолекулярных органических соединений в ходе экспериментальной деструкции торфа в южно-таёжных болотах Западной Сибири // Почвы и окружающая среда. 2025. Том 8. № 1. e308. DOI: 10.31251/pos.v8i1.308*

ВВЕДЕНИЕ

Биосферная роль западносибирских болот в круговороте углерода и воды, поддержании постоянства регионального и глобального климата является общепризнанной. В рамках изучения круговорота углерода и других элементов на болотах активно изучаются процессы продуцирования и разрушения органического вещества, изменение содержания элементов и их бюджет. Показано, что скорость снижения массы при экспериментальной деструкции зависит от видовой принадлежности растений (Вишнякова и др., 2012; Миронычева-Токарева и др., 2013), абиотических условий (Никонова и др., 2019а, 2019б), степени нарушенности болотных экосистем (Никонова и др., 2024). В сравнении с исследованиями растений и их опада, деструкция торфа изучена слабее. Для Канады установлены ежегодные потери массы торфа при его минерализации в объёме 2,4–5,6% (Louis et al., 2003). Потери верхового торфа за два вегетационных сезона в болотах Западной Сибири составили от

10 до 45% от исходной массы в зависимости от его типа, сообщества и глубины инкубации (Коронатова, 2010; Коронатова, Шибарева, 2010).

Потери массы при разрушении растительных тканей сопровождаются изменением содержания химических элементов. Причины и механизмы варьирования этих компонентов во время деструкции остаются не до конца понятыми. В экспериментальных исследованиях для разных видов и местообитаний авторами публикаций фиксируется противоположная направленность и не всегда линейный характер динамики углерода, азота и зольных элементов (Козловская и др., 1978; Волкова и др., 2020; Головацкая и др., 2023; и др.). Относительная стабильность при деструкции растительного материала и торфа наблюдается в изменении величины отношения углерода к азоту (C/N), которая возрастает на первых этапах эксперимента в разнообразных наземных экосистемах (Козловская и др., 1978; Maisto et al., 2011; Вишнякова и др., 2017; Волкова и др., 2020; Головацкая и др., 2023; и др.). Тем не менее, в ходе эксперимента по разложению торфа в Австралии исследователи обнаружили снижение отношения C/N для разных его видов (Grover, Baldock, 2010). Такое отсутствие общей направленности преобразования элементного состава распадающихся растительных тканей указывает на вариативность и сложность биохимических процессов разложения в связи с многообразием субстратов, условий и деструкторов.

Состав и динамика органических соединений разлагающихся растительных остатков остаётся слабо изученной областью. Показано, что при разложении торфа меняется соотношение углеводородов к кислородсодержащим соединениям, а также содержание ароматических веществ в торфе (Grover, Baldock, 2010; 2012). При деструкции разных типов торфа наблюдается как снижение, так и рост суммарного содержания групп органических соединений и увеличение содержания некоторых индивидуальных соединений (Серебренникова и др., 2015; Коронатова, 2018).

Целью данной работы – выявление особенностей динамики элементного состава и низкомолекулярных органических веществ при экспериментальной деструкции разных видов торфа на примере трёх сообществ Бакчарского болота (Западная Сибирь).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве объектов исследования выбраны три вида верхового торфа из комплексного Бакчарского болота. Болото расположено в подзоне южной тайги Западной Сибири в пределах Томской области (56°51” с.ш., 82°50” в.д.). Образцы были отобраны с глубины 40–60 см в разных болотных экосистемах: фускум-торф в сосново-кустарничково-сфагновом сообществе (ряме), два сфагновых мочажинных – в краевой (КТ) и центральной (ЦТ) части топи (рис. 1). В течение эксперимента болотные воды не поднимались выше глубины 20 см в ряме, а в топяных сообществах стояли близко к поверхности на второй год эксперимента. Фускум-торф сложен остатками *Sphagnum fuscum* с незначительным содержанием мелких живых корней кустарничков (1%). Степень разложения торфа составила около 5%. По краю топи, по соседству с рямом, в кустарничково-пушицево-сфагновом фитоценозе торф сложен мочажинными мхами. Присутствующая сухая масса живых корней *Eriophorum vaginatum* не превысила 5%. Степень разложения данного торфа около 10%. В центральной части топи фитоценоз представлен осоково-сфагновым сообществом с *Carex rostrata* и *S. fallax*. В этом сообществе сфагновый мочажинный торф сформирован остатками мхов с массовой долей осок, не превышающей 16%, и близким (до 12%) присутствием мелких живых корней. Степень разложения данного торфа около 20%.

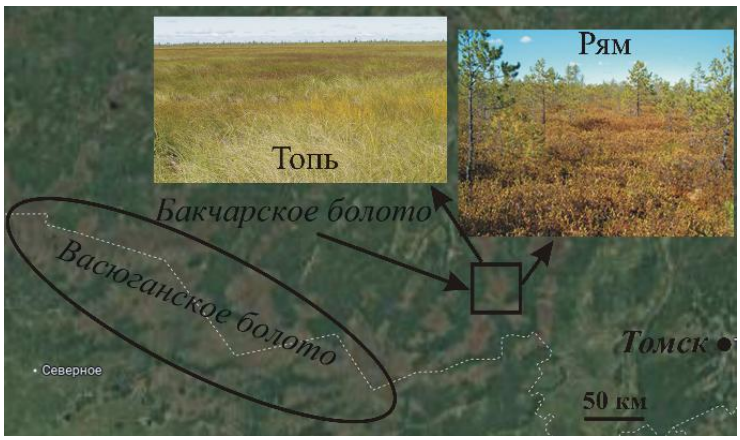


Рисунок 1. Схема расположения и общий вид болот.

В местах отбора образцов торфа для инкубации определили физико-химические показатели болотных вод. Актуальная кислотность (pH) составила 3,8 в ряме, 4,0 – в КТ и 4,7 – в ЦТ (pH-метр/иономер Мультитест ИПЛ-103, электрод ЭСК-10601/7). Проводимость оценили в 55, 47 и 28 мкСм/см в этих же сообществах, соответственно (Кондуктометр КЛ-С-1). Буферность определили титрованием проб объемом по 10 мл до конечной точки pH=7 раствором 0,01 М NaOH, которая составила 1,4 мл в ряме и 0,7 мл в КТ и ЦТ (pH-метр/иономер Мультитест ИПЛ-103).

При подготовке и закладке образцов торфа для эксперимента извлекали крупные объекты (корневища и узлы кущения трав, стволики и корни кустарничков), а живые мелкие корни оставляли. Торф был высушен при температуре 60°С и использован в эксперименте по разложению в полевых условиях. Для этого в 2006 году образцы поместили в торфяную залежь тех же экосистем, где они были отобраны. Нейлоновые мешочки (размер ячеи 0,3 мм) с торфом расположили выше и ниже уровня болотных вод: на глубину 5–10 см («верхний слой») и 25–30 см («нижний слой»). Образцы отбирали несколько раз в течение ряда лет в 5–6-кратной повторности для каждого сообщества и глубины. В этой работе представлены результаты, полученные через 4 и 16 месяцев инкубации – в конце первого и второго вегетационного сезона после начала инкубации. Описание эксперимента опубликовано (Коронатова, 2010). После высушивания провели определение потери массы образцов и их химического состава.

Перед проведением анализов на валовое содержание различных элементов, а также органических соединений, отобранные в повторности образцы торфа соединили в единый смешанный средний образец для каждого сообщества, глубины и времени инкубации. Содержание углерода, водорода и азота определили на CNHS/O-анализаторе Perkin Elmer 2400 Series II (США); фосфора – на колориметре по фосфорномолибденовой сини (Аринушкина, 1970); калия, натрия, кальция, магния и железа – на атомно-абсорбционном спектрометре Квант 2МТ (Россия). Анализ экстрактивных низкомолекулярных органических соединений провели методом газовой хромато-масс-спектрометрии на газовом хроматографе Clarus 500 MS фирмы Perkin Elmer (США) с квадрупольным детектором. Пробоподготовка и технические детали данного анализа опубликованы ранее (Коржов, Коронатова, 2013).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Проведённый эксперимент выявил различия между торфами в снижении массы и изменении содержания химических элементов и органических соединений. За 4 месяца деструкции потери массы торфа в верхнем (5–10 см) и нижнем (25–30 см) слоях залежи составили, соответственно, 34 и 5% в ряме, 13 и 9% в КТ, 17 и 18% в ЦТ. Через 16 месяцев инкубации соответствующие потери массы увеличились до 37 и 7% в ряме, а в топяных сообществах снизились до 6% на обеих глубинах в КТ и до 10 и 12% в ЦТ. Снижение массы в верхнем слое ряма сопровождалось морфологическими изменениями образца: появлением тёмных мажущих пятен на поверхности, в которых сложно было различить части растений. Детали потери массы торфа в эксперименте обсуждались ранее (Коронатова, 2010).

Исходное содержание углерода (С) в торфе было 48,9% в ряме, 49,1% в КТ и 49,5% в ЦТ. После инкубации в течение четырёх месяцев оно снизилось на 2% в ряме и КТ, и не более, чем на 0,6% – в ЦТ (рис. 2). В дальнейшем содержание С продолжило снижаться в сообществах топи, а в ряме увеличилось, но не достигло исходных значений.

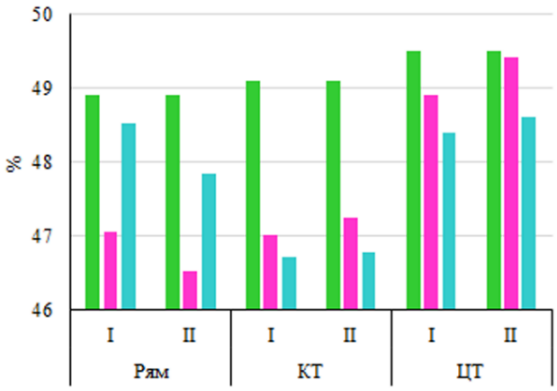


Рисунок 2. Содержание углерода в образцах торфа на глубине: I – 5–10 см, II – 25–30 см. Обозначения для торфа: – исходный, – после инкубации 4 месяца, – после инкубации 16 месяцев. КТ и ЦТ – край и центр топи (здесь и далее на рис. 3–4).

Содержание водорода (H) составило 6,6, 6,8 и 6,5% в ряме, КТ и ЦТ, соответственно. Изменение содержания H было сходным в первых двух сообществах; через 4 месяца инкубации произошло снижение его содержания, наиболее значительное в поверхностном слое, до 6,2–6,4% в ряме и до 6,2–6,6% в КТ. Через 16 месяцев содержание H повысилось до 6,4% в поверхностном слое ряма и до 6,7% в нижележащем, а также на обеих глубинах в КТ. В отличие от этих сообществ, содержание H в торфе ЦТ изменилось незначительно за всё время инкубации на обеих глубинах.

Молярное отношение H/C позволяет оценить степень ненасыщенности связей в органических соединениях. В исходных образцах торфа это отношение слабо варьировало от 1,58 до 1,66 и в ходе деструкции менялось мало (табл. 1). К концу эксперимента отношение H/C незначительно снизилось в верхнем слое ряма, что можно связать с уменьшением доли алкильных радикалов, которые в первую очередь подвержены деструкции. В нижнем слое ряма и на двух глубинах в КТ отношение H/C увеличилось, а в ЦТ изменения были незначительными.

Таблица 1

Молярное отношение H/C в образцах торфа

Объект	Глубина инкубации, см	Исходный торф	Торф после деструкции в течение времени	
			4 месяца	16 месяцев
Рям	5–10	1,62	1,59	1,59
	25–30		1,66	1,68
Край топи	5–10	1,66	1,58	1,73
	25–30		1,68	1,73
Центр топи	5–10	1,58	1,57	1,59
	25–30		1,58	1,61

Содержание азота (N) в торфе было максимально в ЦТ, двукратно превышая остальные сообщества (рис. 3). В ходе деструкции содержание N выросло в верхнем слое ряма, что можно объяснить поселением и развитием сообщества микроскопических грибов, и незначительно увеличилось в нижнем слое ЦТ. Напротив, на обеих глубинах КТ содержание N снизилось в связи с потреблением растениями высвобождающегося азота. В нижнем слое ряма и верхнем слое ЦТ изменения были незначительны.

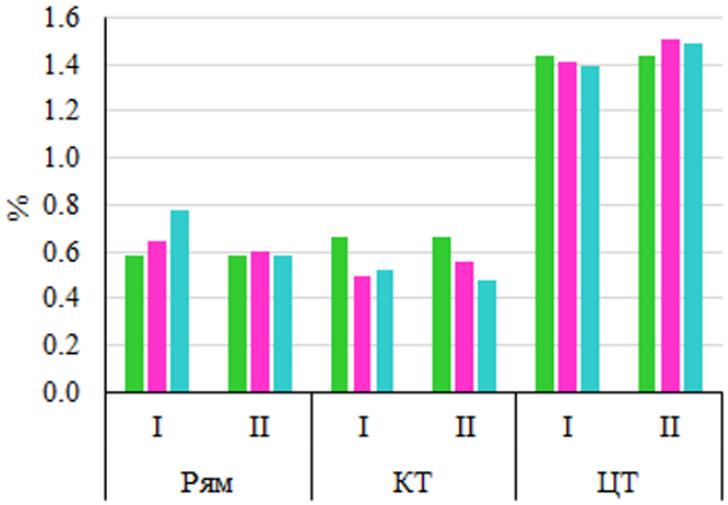


Рисунок 3. Содержание азота в образцах торфа на глубине: I – 5–10 см, II – 25–30 см. Обозначения для торфа: ■ – исходный, ■ – после инкубации 4 месяца, ■ – после инкубации 16 месяцев.

Отношение C/N обычно рассматривается как показатель доступности органического материала для деструкторов: чем оно выше, тем менее доступными для них являются растительные ткани. В исходных торфах C/N уменьшалось от ряма к центру топи, что обусловлено вкладом сосудистых растений в сложение торфа (табл. 2). В ходе деструкции C/N снизилось как в верхнем слое ряма, так и его нижнем слое, хотя и в меньшей степени. В КТ отмечена обратная тенденция – увеличение C/N в ходе деструкции. Изменения отношения C/N в ЦТ практически отсутствовали на обеих глубинах.

Таблица 2

Молярное отношение C/N в образцах торфа

Объект	Глубина инкубации, см	Исходный торф	Торф после деструкции в течение времени	
			4 месяца	16 месяцев
Рям	5–10	98	86	73
	25–30		91	95
Край топи	5–10	87	112	104
	25–30		99	113
Центр топи	5–10	40	40	41
	25–30		38	38

Исходное содержание золы и макроэлементов в торфе было максимальным в ЦТ, за исключением магния (Mg), которого больше всего было в фускум-торфе ряма (рис. 4). В ходе деструкции в верхнем слое ряма резко выросло содержание калия (K), а также постепенно увеличилось содержание золы, включая нерастворимый остаток. Содержание остальных элементов снизилось через 4 месяца эксперимента, а через 16 месяцев увеличилось до значений, превышающих исходные, что можно объяснить развитием сообщества деструкторов. Исключением стало железо (Fe), содержание которого не изменилось. В нижнем слое ряма содержание P, Na, Mg и Ca снизилось, Fe – возросло, а K – изменилось мало.

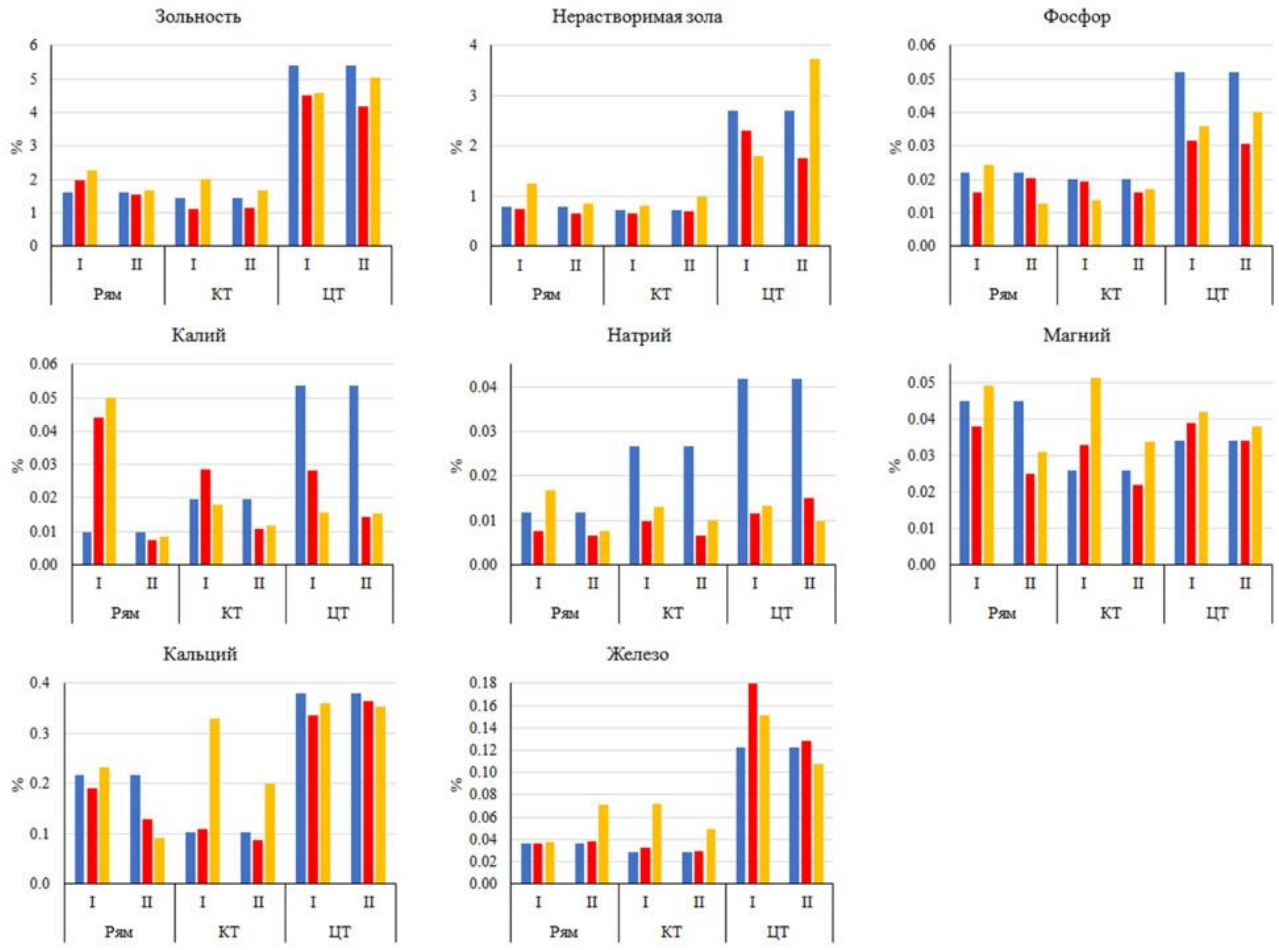


Рисунок 4. Содержание золы и макроэлементов в образцах торфов разных сообществ на глубине: I – 5–10 см, II – 25–30 см. Обозначения для торфа: ■ – исходный, ■ – после инкубации 4 месяца, ■ – после инкубации 16 месяцев.

В сообществе КТ изменения были сходными для двух глубин и выразились в снижении содержания P и Na и увеличении к концу периода наблюдений содержания Mg, Ca и Fe на фоне небольшого повышения зольности. В этом сообществе поведение K отличалось на двух глубинах:

наблюдалось его увеличение на первом этапе деструкции в верхнем слое и снижение – в нижнем слое торфяной почвы.

В ЦТ варьирование содержания элементов также было сходным на двух глубинах. Здесь произошли потери содержания P и большинства зольных элементов, а содержание Mg и Fe возросло. В нижележащем слое через 16 месяцев инкубации наблюдалось увеличение зольности и особенно нерастворимой золы (кремния), что можно связать с прорастанием живых корней осок в образцы. В отличие от нижележащего слоя, в поверхностном слое росли мхи, а корни трав отсутствовали.

Содержание низкомолекулярных органических веществ определялось в торфе ряма и краевой части топи, как в исходном, так и после деструкции в течение 16 месяцев. В составе торфов были обнаружены алканы нормального строения, алканы изопреноидного строения, жирные кислоты, кетоны, биарены, триарены, токоферолы, изопреноиды циклического строения, а также неидентифицированные вещества. Состав каждой группы был рассмотрен ранее (Коронатова, 2018). Общее их содержание составило в исходных торфах 280 и 310 мкг/г абсолютно сухого вещества в фускум-торфе и мочажинном, соответственно.

В торфе ряма после деструкции содержание органических веществ увеличилось в верхнем слое почти в два раза – до 525 мкг/г, а в нижнем снизилось до 246 мкг/г (рис. 5). Увеличение произошло в первую очередь благодаря росту содержания неидентифицированных веществ (в 3,4 раза), что говорит о качественной трансформации состава низкомолекулярных веществ; косвенно это указывает на появление новых источников органических соединений – сообщества деструкторов и требует дальнейшего изучения. Содержание карбоновых кислот выросло в 1,7 раза, кетонов и циклических терпеноидов – в 1,6 раза, алканов, включая изопреноидные – в 1,5 раза, менее всего увеличилось содержание токоферолов – в 1,2 раза. В нижнем слое в наибольшей степени (в 1,3–1,4 раза) снизилось содержание изопреноидных алканов, карбоновых кислот и неидентифицированных веществ. Остальные группы уменьшились в 1,1 раза.

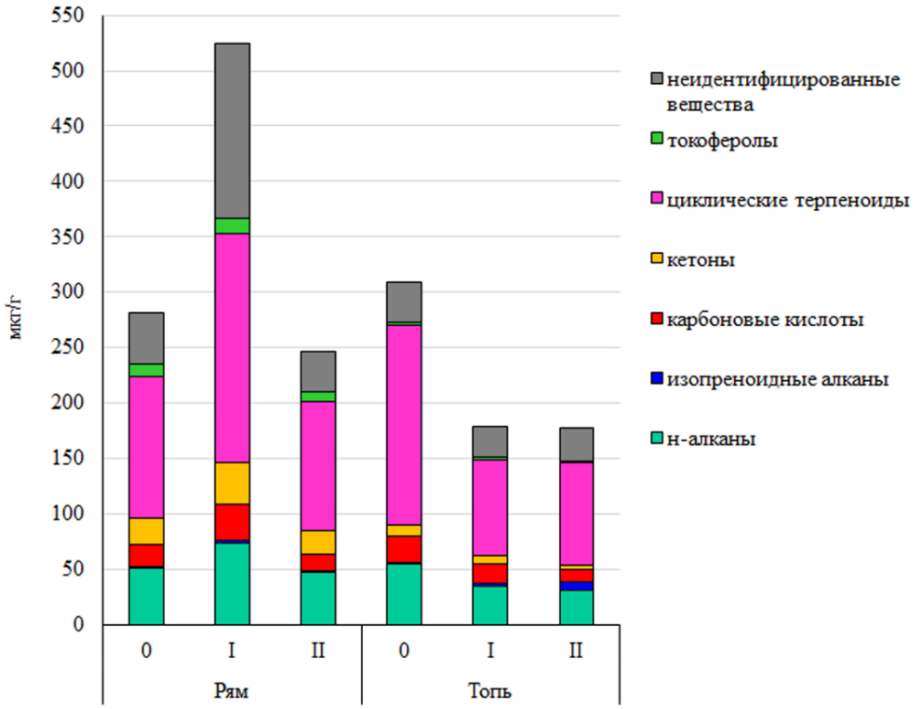


Рисунок 5. Содержание органических соединений в торфе ряма и края топи. Обозначения для торфа: 0 – исходный; I и II – после инкубации в течение 16 месяцев на глубине 5–10 и 25–30 см.

В топи после деструкции произошло снижение содержания органических веществ на обеих глубинах в 1,7 раза до одинаковой величины 177–178 мкг/г. При этом изменение содержания отдельных групп органических соединений различалось. В верхнем слое в наибольшей степени уменьшилось содержание циклических терпеноидов – в 2,1 раза. В нижнем слое их снижение было близким – в 2,0 раза, но ещё большее падение произошло в группе карбоновых кислот, кетонов и токоферолов – в 2,2–2,3 раза. Эти же группы в поверхностном слое снизились в 1,3–1,4 раза, а токоферолы – в 1,9 раз. Соответствующее снижение алканов в верхнем и нижнем слое было в 1,5 и

1,2 раза, неидентифицированных веществ – в 1,3 и 1,2 раза. В отличие от перечисленных групп, содержание изопреноидных алканов увеличилось после деструкции, причём в верхнем слое незначительно, а в нижнем – в 4,4 раза.

ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты, представленные в работе, позволяют получить представление об изменении содержания макроэлементов и групп низкомолекулярных органических веществ при экспериментальной деструкции разных видов торфа в почвах болот. Исходные торфа отличались ботаническим составом, содержанием азота и зольных элементов, а содержание углерода и низкомолекулярных органических веществ было сходным с небольшим превышением в торфе краевого сообщества топи. Произошедшие изменения разнились между сообществами и глубинами. В ряме верхний слой торфяной почвы всегда оставался в аэробных и тёплых условиях, а нижний – в анаэробных и наиболее холодных условиях (Коронатова, 2019). В двух топяных сообществах аэробные и анаэробные условия чередовались в верхнем слое в связи с колебанием уровня болотных вод, которые наиболее высоко стояли в центре топи. В нижнем слое этих сообществ условия могли быть частично аэробны в связи с прорастанием корней трав, включающих аэренхиму.

Поскольку исходные сфагновые торфа наследуют химический состав мхов-торфообразователей, сравнение полученных результатов приведено в сравнении с соответствующими видами мхов, информация о составе которых в литературе встречается чаще. Согласно публикациям, содержание C в ходе экспериментов по деструкции сфагновых мхов в болотах изменяется в сторону увеличения (Волкова и др., 2020; Головацкая и др., 2023), после чего следует его снижение (Козловская и др., 1978). Увеличение содержания C наблюдается при деструкции слабо- и среднеразложенного торфа, но снижение – у сильноразложенного торфа (Grover, Baldock, 2010). В нашем исследовании торфов слабой степени разложения C снизился во всех случаях, причём в наибольшей степени – в краевой части топи, а в ряме на обеих глубинах динамика была осложнена увеличением его содержания после первоначального падения.

По опубликованным данным, содержание N изменяется с ещё большей степенью несогласованности между разными видами растений и фракциями в одном эксперименте (Козловская и др., 1978; Волкова и др., 2020). Это наблюдалось и в нашем случае, когда произошло увеличение содержания N (верхний слой ряма и нижний слой ЦТ), снижение (обе глубины в КТ) и минимальные изменения (нижний слой ряма и верхний слой ЦТ). Такое отсутствие единства в динамике C и N связано, вероятно, с разнообразием химических соединений разлагаемого материала и составом сообщества деструкторов. Например, разнонаправленное изменение N при распаде корней трав и деревьев связано с разным типом микоризы, которая отличается химическим составом тканей (Бетехтина и др., 2020). В нашем случае несогласованность динамики C и N обусловлена скорее различиями в сообществе деструкторов, обитающих в ряме и топи, а также на разных глубинах торфяных почв. Так, для Васюганского болота было показано, что плотность бактериальных популяций высока, нарастает и меняется по составу с глубиной и различается между повышенными и пониженными экосистемами (Головченко и др., 2005), причем в экосистемах повышенных элементов рельефа преобладают микроскопические грибы (Добровольская и др., 2012). Наблюдаемое у нас увеличение содержания N в поверхностном слое ряма может быть связано с развитием сообщества микромицетов, у которых в состав клеточной стенки входит хитин, содержащий много трудноразлагаемого азота (Swift et al., 1979). Снижение содержания N при разложении в КТ указывает на развитие бактериального сообщества, наличие которого в топяных сообществах было показано Т.Г. Добровольской с соавторами (2012).

В исходных торфах отношение C/N снижалось в торфе от ряма к краевой части топи и далее к центральной её части, что должно означать лучшую доступность мочажинного торфа в центре топи для деструкторов. Однако в данном эксперименте мы получили наименьшие потери массы именно в ЦТ, а наибольшие – в ряме с самым высоким отношением C/N. Небольшие изменения массы в ЦТ сопровождались минимальными изменениями содержания C и N, а отношения C/N и C/H после эксперимента были неотличимы от исходных. Причина может заключаться в высокой обводненности сообщества и возникновении анаэробных условий уже с поверхности, что привело к замедлению биодеструкции и преобладанию выщелачивания. Это предположение подтверждается снижением содержания ряда элементов в ЦТ. В торфе ряма и краевой части топи установлены разнонаправленные изменения отношения C/N в ходе разложения, что показано также для других объектов (Вишнякова и др., 2017; Волкова и др., 2020) и может быть следствием разного набора деструкторов в этих экосистемах.

Соотношения показателей C/N и H/C между собой демонстрируют обособленность и наименьший разброс для ЦТ, в то время, как для ряма и КТ они перекрываются в правой части поля (рис. 6). В целом, в ходе деструкции наблюдалась тенденция увеличения H/C при росте C/N, особенно для нижнего слоя торфа, в ряду сообществ ЦТ – рям – КТ.

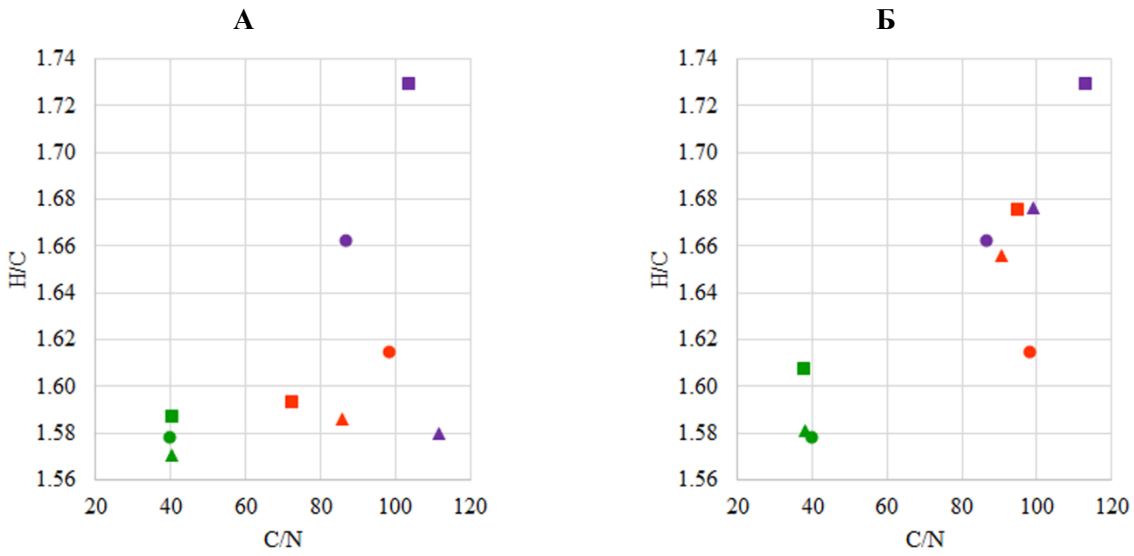


Рисунок 6. Соотношение показателей C/N и H/C в торфе разных сообществ на глубине: А – 5–10 см, Б – 25–30 см. Обозначения: ▬ – рям, ▬ – КТ, ▬ – ЦТ, ○ – исходный торф, △ – после инкубации 4 месяца, □ – после инкубации 16 месяцев.

Для удобства сравнения изменений в содержании зольных элементов в разных торфах была рассчитана доля их потери или накопления от исходного содержания (табл. 3). Содержание P и Na снижалось во всех сообществах и глубинах, кроме аэробной зоны ряма, где увеличилось спустя 16 месяцев деструкции. Схожая динамика получена для K с тем отличием, что увеличение его содержания в ряме началось уже спустя 4 месяца эксперимента и стало многократным, а также отмечено в поверхностном слое КТ на начальном этапе деструкции. Известно, что K содержится в живых организмах и быстро вымывается из отмерших. Поэтому стремительный подъем его содержания может указывать на активное развитие сообщества микроорганизмов.

Таблица 3

Изменение содержания азота и зольных элементов относительно исходного содержания в торфе, %

Элемент	Экосистема, глубина (см) и длительность инкубации (мес.)											
	Рям				Край топи				Центр топи			
	5–10		25–30		5–10		25–30		5–10		25–30	
	4	16	4	16	4	16	4	16	4	16	4	16
N	+10	+34	+3	+1	–25	–21	–16	–27	–2	–3	+5	+3
P	–27	+10	–8	–42	–4	–30	–20	–14	–39	–31	–41	–23
K	+360	+420	–23	–12	+46	–9	–46	–41	–47	–71	–73	–71
Na	–35	+42	–44	–35	–63	–51	–75	–62	–72	–68	–64	–77
Ca	–13	+6	–40	–57	+6	+221	–15	+95	–11	–5	–7	–7
Mg	–16	+10	–44	–31	+27	+97	–15	+30	+15	+24	0	+12
Fe	+1	+2	+6	+95	+13	+153	+3	+74	+46	+23	+5	–13
A*	+24	+43	–3	+5	–23	+38	–22	+15	–16	–15	–23	–7
IA**	–7	+56	–17	+7	–10	+11	–3	+36	–14	–34	–35	+39

Примечание.

Со знаком «+» показано увеличение содержания, со знаком «–» – снижение содержания. A* – зольность, IA** – нерастворимая зола.

Содержание Ca и Mg мало изменилось в поверхностном слое ряма и снизилось в нижележащем. В КТ их содержание выросло на обеих глубинах, причём в нижнем слое увеличению предшествовало снижение. В ЦТ содержание менялась незначительно с тенденцией к понижению для Ca и повышения – для Mg, особенно в поверхностном слое. Содержание Fe понизилось в

единственном случае – в глубоком слое ЦТ к концу эксперимента, а в остальных случаях росло (КТ, верхний слой ЦТ и нижний слой ряма) или почти не менялось (рям). В целом для этих элементов характерно разное поведение в экосистемах ряма и топи с преобладанием выщелачивания в ряме, накопления в КТ и слабого изменения в ЦТ (кроме Mg и Fe в верхнем слое). По-видимому, наблюдаемые изменения связаны именно с исходными свойствами торфа и процессом разложения, а не внешними факторами, в первую очередь, болотными водами. Так, в сходных с нашими сообществах шейхцериево-осоково-сфагновой топи и сосново-кустарничково-сфагнового ряма этого же Бакчарского болота установлен близкий состав ионов Ca, Mg, K, Na и Fe в болотных водах, в целом их слабая миграция и незначительная латеральная дифференциация, кроме Mg, который выносится (Иванова и др., 2017).

Содержание золы отражает суммарную динамику всех зольных элементов, оно выросло в аэробной зоне ряма, а также на обеих глубинах в КТ, где росту предшествовало падение. В анаэробной зоне ряма изменения почти отсутствовали, а в ЦТ содержание золы снизилось. В содержании нерастворимой золы, в состав которой входит в основном кремний, наблюдалась одинаковая динамика во всех сообществах и глубинах: снижение содержания через 4 месяца деструкции и повышение через 16. Исключением стал поверхностный слой в ЦТ, где наблюдалось только снижение. Вероятная причина заключается в вымывании кремния из разрушающихся тканей на первом этапе, а затем – накоплении при прорастании корней сосудистых растений в образцы, что обсуждалось ранее (Коронатова, Шибарева, 2010).

Судя по изменению отношения H/C, в ряме и КТ произошли некоторые изменения в соотношении групп органических соединений, в то время, как в ЦТ никаких изменений не было. В аэробной зоне ряма степень насыщенности связей снизилась, что можно связать с уменьшением доли алкильных радикалов, которые в первую очередь подвержены деструкции, и относительным накоплением ненасыщенных компонентов. Увеличение H/C в анаэробной зоне ряма и КТ может быть следствием замедления деструкции, потребления алкильных радикалов и увеличения гидрирования кратных связей. Величина H/C характеризует не только соотношение насыщенных и ненасыщенных связей в органических молекулах, но и является индикатором климатических условий гумусообразования, как было показано М.И. Дергачевой (2018). Дальнейшее изучение торфяных почв в этом отношении может оказаться интересной темой для исследования.

Суммарное содержание низкомолекулярных органических веществ было сходным в торфе ряма и краевой части топи. После деструкции содержание двукратно возросло в аэробной зоне ряма, вероятно, в связи с развитием сообщества микромицетов, которые внесли существенный вклад в суммарную массу и состав низкомолекулярных органических соединений. На это указывает увеличение содержания всех групп, а также трёхкратное повышение содержания соединений, которые не были идентифицированы. В топи двукратное снижение содержания органических веществ можно объяснить их потреблением бактериальным сообществом. Здесь сами деструкторы не внесли вклад в увеличение суммарного содержания органических соединений, но на их присутствие указывает трёхкратный рост содержания изопреноидных алканов (Пошибаева, 2015).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе показаны результаты изучения элементного состава и групп низкомолекулярных органических соединений в торфах Бакчарского болота в исходном состоянии и после деструкции. В целом, каждая болотная экосистема характеризовалось своей динамикой содержания углерода, азота и зольных элементов при деструкции. Поведение азота в ходе эксперимента было специфично: в ряме произошло увеличение его содержания, в краевой части топи – снижение, а в центральной – существенных изменений не было. Содержание фосфора, калия и натрия в основном снижалось в сообществах на разных глубинах. Содержание магния и железа выросло в топяных сообществах, а кальция – в краевой части топи. Аэробный слой ряма отличался от остальных локаций тем, что здесь произошло увеличение содержания всех элементов. Отношение C/N оказалось не определяющим для интенсивности разложения торфа в болотах. Вероятно, здесь более значимым фактором является степень анаэробности, которая влияет на состав сообщества микроорганизмов.

Анализ результатов позволяет сделать вывод о разных путях деструкции торфа в изученных сообществах. В поверхностном слое ряма значительное снижение массы торфа в ходе эксперимента сопровождалось увеличением содержания неорганических и органических веществ, что свидетельствует о развитии сообщества деструкторов. Вероятнее всего, оно было представлено микромицетами, что подтверждается ростом содержания азота, который входит в состав хитина их клеточных стенок, и согласуется с опубликованными данными (Добровольская и др., 2012). В

экосистеме края топи в нижнем слое торфа (25–30 см) разложение сопровождалась снижением содержания элементов питания растений, углерода, органических веществ и увеличением – двухвалентных металлов, железа и зольности. Наиболее вероятно, что здесь деструкторы представлены бактериальным сообществом, на что указывает увеличение содержания изопреноидных алканов. В этом же сообществе в поверхностном слое на уровне 5–10 см находились живые стебли мхов и сосудистых растений, опада мало, а торфа нет, и сообщество деструкторов развито слабо. В центре топи, судя по незначительному изменению содержания углерода, водорода, азота, отношения H/C и снижению содержания большинства элементов, микробиологического разложения практически нет; уменьшение содержания зольных элементов происходило за счёт выщелачивания. Такое же незначительное участие биодеструкции в нижнем слое ряма связано с анаэробными условиями и более низкой температурой.

Таким образом, выявленные особенности динамики элементного состава и низкомолекулярных органических веществ при экспериментальной деструкции разных видов торфа позволили установить специфический ход деструкции для каждого сообщества Бакчарского болота.

ФИНАНСОВАЯ ПОДДЕРЖКА

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках выполнения государственного задания ИПА СО РАН.

ЛИТЕРАТУРА

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

Бетехтина А.А., Некрасова О.А., Дергачева М.И., Радченко Т.А., Большаков В.Н. Разложение корней луговых и лесных растений в зольном субстрате отвалов электростанций: лабораторный эксперимент // Известия РАН. Серия Биологическая. 2020. № 3. С. 318–324. https://doi.org/10.31857/S0002332920010038

Вишнякова Е.К., Коронатова Н.Г., Михайлова Е.В. Трансформации соединений углерода и макроэлементов в торфяных залежах болот различной трофности // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2017. Том 4. № 2. С. 137–140.

Вишнякова Е.К., Миронычева-Токарева Н.П., Косых Н.П. Динамика разложения растений на болотах Васюганья // Вестник Томского государственного педагогического университета. 2012. № 7 (122). С. 87–93.

Волкова Е.М., Бойкова О.И., Хлытин Н.В. Изменение химического состава растений-торфообразователей в процессе разложения на карстово-суффозионных болотах Среднерусской возвышенности // Химия растительного сырья. 2020. № 1. С. 283–292. https://doi.org/10.14258/jcprm.2020015222

Головацкая Е.А., Никонова Л.Г., Калашникова Д.А., Симонова Г.В. Динамика содержания тяжёлых металлов (Zn, Cd, Pb, Cu) в процессе разложения сфагнума на осушенных и постпирогенных участках олиготрофных болот // Почвы и окружающая среда. 2023. Том 6. № 3. e237. https://doi.org/10.31251/pos.v6i3.237

Головченко А.В., Санникова Ю.В., Добровольская Т.Г., Звягинцев Д.Г. Сапротрофный бактериальный комплекс верховых торфяников Западной Сибири // Микробиология. 2005. Том 74. № 4. С. 545–551.

Дергачева М.И. Система гумусовых веществ как основа диагностики палеопочв и реконструкции палеоприродной среды. Новосибирск: Издательство СО РАН, 2018. 292 с.

Добровольская Т.Г., Головченко А.В., Кухаренко О.С., Якушев А.В., Семенова Т.А., Инишева Л.И. Структура микробных сообществ верховых и низинных торфяников Томской области // Почвоведение. 2012. № 3. С. 317–326. https://doi.org/10.1134/S1064229312030039

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.

Козловская Л.С., Егорова Р.А., Демьянова Ф.М. Минеральный состав растений-торфообразователей и их изменения в процессе разложения. В книге: Динамика органического вещества в процессе торфообразования / Л.С. Козловская, В.М. Медведева, Н.И. Пьявченко. Ленинград: Наука, 1978. С. 50–58.

Коржов Ю.В., Коронатова Н.Г. Состав гексан-хлороформного экстракта верховых торфов южной тайги Западной Сибири // Химия растительного сырья. 2013. № 3. С.213–220. https://doi.org/10.14258/jcprm.1303213

Коронатова Н.Г. Исследование разложения торфа в болотах методом инкубации сухих и влажных образцов // Динамика окружающей среды и глобальные изменения климата. 2010. Том 1. № 1. С. 77–84. https://doi.org/10.17816/edgcc1177-84

Коронатова Н.Г. Изменение содержания групп органических соединений в результате деструкции верховых торфов // Почва и окружающая среда. 2018. Том 1. № 1. С. 6–16. https://doi.org/10.31251/pos.v1i1.3

Коронатова Н.Г. Температурный режим торфяных олиготрофных почв Бакчарского болота (Западная Сибирь) // Почва и окружающая среда. 2019. Том 2. № 3. e79. https://doi.org/10.31251/pos.v2i3.79

Коронатова Н.Г., Шибарева С.В. Изменение массы торфа в процессе его разложения на болотах Польши и Западной Сибири // Сибирский экологический журнал. 2010. Том 3. С. 445–451.

Миронычева-Токарева Н.П., Косых Н.П., Вишнякова Е.К. Продукционно-деструкционные процессы в болотных экосистемах Васюганья // Динамика окружающей среды и глобальные изменения климата. 2013. Том 4. № 1 (7). https://doi.org/10.17816/edgcc411-9

Никонова Л.Г., Головацкая Е.А., Курьина И.В., Курганова И.Н. Скорость разложения растений-торфообразователей в олиготрофных болотах южно-таежной подзоны Западной Сибири: оценка влияния уровня болотных вод и температуры торфяной залежи // Почвоведение. 2019а. № 9. С. 1092–1103. https://doi.org/10.1134/S0032180X19090065

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

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

Пошибаева А.Р. Биомасса бактерий как источник углеводородов нефти. Диссертация … канд. хим. наук. Москва, 2015. 124 с.

Серебренникова О.В., Сваровская Л.И., Стрельникова Е.Б., Русских И.В., Кадычагов П.Б., Дучко М.А. Влияние биодеструкции на состав органических соединений торфа // Проблемы изучения и использования торфяных ресурсов Сибири: сборник материалов III Международной научно-практической конференции (27 сентября – 3 октября 2015 г.). Ставрополь: ООО «Альфа-Принт», 2015. С. 163–166.

Grover S.P.P., Baldock J.A. Carbon decomposition processes in a peat from the Australian Alps // European Journal of Soil Science. 2010. Vol. 61. P. 217–230. https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2009.01220.x

Grover S.P.P., Baldock J.A. Carbon chemistry and mineralization of peat soils from the Australian Alps // European Journal of Soil Science. 2012. Vol. 63. P. 129–140. https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2011.01424.x

Louis V.L.St., Partridge A.D., Kelly C.A., Rudd J.W.V. Mineralization rates of peat from eroding peat islands in reservoirs // Biogeochemistry. 2003. Vol. 64. P. 97–110. https://doi.org/10.1023/A:1024982915493

Maisto G., De Marco A., Meola A., Sessa L., De Santo A.V. Nutrient dynamics in litter mixtures of four Mediterranean maquis species decomposing in situ // Soil Biology and Biochemistry. 2011. Vol. 43. P. 520–530. https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2010.11.017

Swift M.J., Heal O.W., Anderson J.M. Decomposition in Terrestrial Ecosystems. Berkeley, Los Angeles: Univ. California Press, 1979. 372 p.

Поступила в редакцию 31.03.2025
Принята 18.04.2025
Опубликована 30.04.2025

Сведения об авторе:

Коронатова Наталья Геннадьевна – кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник лаборатория биогеоценологии ФГБУН Институт почвоведения и агрохимии СО РАН (г. Новосибирск, Россия); koronatova@issa-siberia.ru; https://orcid.org/0000-0002-0557-0083

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

Статья доступна по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License

Changes in the elemental composition and content of low molecular organic compounds during experimental peat destruction in the southern taiga bogs (West Siberia)

© 2025 N. G. Koronatova

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

The aim of the study *was to investigate the dynamics of elemental composition and the content of low-molecular organic compounds during experimental destruction of different peat types in three communities of the Bakchar Bog (West Siberia, Russia).*

Location and time of the study. *The field experiment was carried out in three communities of the Bakchar Bog (56°51" N, 82°50" E): the pine-dwarf shrub-Sphagnum community (ryam), dwarf shrub-cotton grass-Sphagnum community at the edge of a poor fen and the sedge-Sphagnum community in the center of the poor fen. After preparation peat samples were placed at the depths of 5-10 and 25-30 cm, and after 4 and 16 months the samples were collected for analyses.*

Methods*. Total soil carbon, hydrogen and nitrogen content was determined on a Perkin Elmer 2400 Series II CNHS/O analyzer (USA). Phosphorus was determined colourimetrically, whereas soil exchangeable potassium, sodium, calcium, magnesium and iron were determined by atomic absorption. Extractive low-molecular organic compounds were analyzed by gas chromatography-mass spectrometry (Clarus 500 MS gas chromatograph, Perkin Elmer, USA) with a quadrupole detector.*

Results. *During the experiment, the carbon content decreased in all samples, while the nitrogen content and the H/C and C/N ratios changed differently among communities and depths. The C/N ratio was not the important driver of the peat decomposition intensity at the studied sites. The phosphorus, potassium and sodium content decreased in most cases. The concentration of magnesium and iron increased in the fen communities, whereas calcium decreased in the dwarf shrub-cotton grass-Sphagnum community of the fen edge. The aerobic layer of the ryam differed from other locations by the increased concentration of all the elements. After destruction the content of low-molecular organic compounds increased in the aerobic zone of the ryam and decreased in the fen. The content of individual groups of organic compounds changed differently, i.e. from a small change to a fourfold one.*

Conclusions. *Specific patterns of peat decomposition in the Bakchar Bog were found for each of the studied communities, based on the dynamics of the elemental composition and low-molecular organic compounds. In the aerobic zone of the ryam, the concentration of all elements and organic compounds increased, accompanied by the greatest mass loss. In the dwarf shrub-cotton grass-Sphagnum community, the concentration of elements both decreased and increased, and the content of organic compounds decreased. In the sedge-Sphagnum community, the leaching of the elements occurred. Most likely, such dynamics was due to the development of different communities of destructors: micromycetes in the aerobic zone of the ryam soils and bacteria at the edge of the poor fen. In the deep peat layer of the ryams and in the center of the poor fen, decomposition was negligible due to anaerobic conditions.*

Keywords: *peat soils; carbon; hydrogen; nitrogen; ash elements; extractable organic compounds.*

How to cite: *Koronatova N.G. Changes in the elemental composition and content of low molecular organic compounds during experimental peat destruction in the southern taiga bogs (West Siberia). The Journal of Soils and Environment. 2025. 8(1). e308. DOI: 10.31251/pos.v8i1.308 (in Russian with English abstract).*

FUNDING

The study was financially supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation as part of the implementation of the state assignment of the ISSA SB RAS.

REFERENCES

Arinushkina E.V. Guidelines for chemical analysis of soils. Moscow: Publishing House of Moscow State University, 1970. 488 p. (in Russian).

Betekhtina A.A., Nekrasova O.A., Dergacheva M.I., Radchenko T.A. Decomposition of meadow and forest plant roots in the ash substrate of power plant dumps: a laboratory experiment. Biology Bulletin. 2020. Vol. 47. No. 3. P. 299–305. https://doi.org/10.1134/S1062359020010033

Vishnyakova E.K., Koronatova N.G., Mikhailova E.V. Transformation of carbon and macroelements compounds in mire peat deposits of different nutritional status. Interexpo Geo-Siberia. 2017. Vol. 4. No. 2. P. 137–140. (in Russian).

Vishnyakova E.K., Mironycheva-Tokareva N.P., Kosykh N.P. Decomposition dynamics of plants of bogs (data: Vasyugan bog). Tomsk State Pedagogical University Bulletin. 2012. No. 7 (122). P. 87–93. (in Russian).

Volkova E.M., Boykova O.I., Khlytin N.V. The changes of chemical parameters of peat-forming plants during decomposition processes on karst-suffusion mires of the Middle-Russian upland. Khimija Rastitel'nogo Syr'ya. 2020. No. 1. P. 283–292. (in Russian). https://doi.org/10.14258/jcprm.2020015222

Golovatskaya E.A., Nikonova L.G., Kalashnikova D.A., Simonova G.V. Dynamics of the heavy metals content (Zn, Cd, Pb, Cu) during the decomposition of Sphagnum moss at the drained and post-pyrogenic sites of oligotrophic bogs. The Journal of Soils and Environment. 2023. Vol. 6. No. 3. e237. (in Russian). https://doi.org/10.31251/pos.v6i3.237

Golovchenko A.V., Sannikova Yu.V., Dobrovol'skaya T.G., Zvyagintsev D.G. The saprotrophic bacterial complex in the raised peat bogs of Western Siberia. Microbiology. 2005. Vol. 74. No. 4. P. 471–476. https://doi.org/10.1007/s11021-005-0091-y

Dergacheva M.I. The system of humic substances as a basis for the diagnosis of paleosoils and reconstruction of the paleogenic environment. Novosibirsk: Publishing House of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 2018. 292 p. (in Russian).

Dobroval'skaya T.G., Golovchenko A.V., Kukharenko O.S., Yakushev A.V., Semenova T.A., and Inisheva L.A. The structure of the microbial communities in low-moor and high-moor peat bogs of Tomsk Oblast. Eurasian Soil Science. 2012. Vol. 45. No. 3. P. 273–281. https://doi.org/10.1134/S1064229312030039

Ivanova E.S., Kharanzhevskaya Yu.A., Mironov A.A. Lateral distribution and migration of chemical elements in swamp waters within the Bakchar and Iksa river basins (Western Siberia). Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5. Geografiya. 2017. No. 4. C. 55–64. (in Russian).

Kozlovskaya L.S., Egorova R.A., Dem'yanova F.M. The mineral composition of peat-forming plants and their changes during decomposition. In book: Dinamika organicheskogo veshchestva v protsesse torfoobrazovaniya. Leningrad: Nauka Publ., 1978. P. 50–58. (in Russian).

Korzhov Yu.V., Koronatova N.G. The composition of hexane-chloroform extract of peat tops of the southern taiga of Western Siberia. Khimija Rastitel'nogo Syr'ya. 2013. No. 3. P. 213–220. (in Russian). https://doi.org/10.14258/jcprm.1303213

Koronatova N.G. Investigation of peat decomposition in bogs by method of dry and wet samples incubation. Environmental Dynamics and Global Climate Change. 2010. Vol. 1. No. 1. P. 77–84. (in Russian). https://doi.org/10.17816/edgcc1177-84

Koronatova N.G. Change of the content of organic compounds groups as a result of the sphagnum peat decomposition. The Journal of Soils and Environment. 2018. Vol. 1. No. 1. P. 6–16. (in Russian). https://doi.org/10.31251/pos.v1i1.3

Koronatova N.G. Temperature regime of fibrist histosols of the Bakchar Mire (Western Siberia). The Journal of Soils and Environment. 2019. Vol. 2. No. 3. e79. (in Russian). https://doi.org/10.31251/pos.v2i3.79

Koronatova N.G., Shibareva S.V. Change of peat mass during decomposition in mires of Poland and West Siberia. Contemporary Problems of Ecology. 2010. Vol. 3. No. 5. P. 445–451. https://doi.org/10.1134/S1995425510030094

Mironycheva-Tokareva N.P., Kosykh N.P., Vishnyakova E.K. Production and destruction processes in peatland ecosystems of Vasyugan region. Environmental Dynamics and Global Climate Change. 2013. Vol. 4. No. 1 (7). (in Russian). https://doi.org/10.17816/edgcc411-9

Nikonova L.G., Golovatskaya E.A., Kur'ina I.V., Kurganova I.N. Decomposition rate of peat-forming plants in oligotrophic bogs of the southern taiga subzone of Western Siberia: assessment of the effect of water table level and peat deposit temperature. Eurasian Soil Science. 2019a. Vol. 52. No. 9. P. 1101–1111. https://doi.org/10.1134/S1064229319090060

Nikonova LG, Kurganova IN, Lopes de Gerenyu VO, Zhmurin VA, Golovatskaya EA. Impact of abiotic factors on the decomposition of litter of peat-forming plants in the incubation experiment. Tomsk State University Journal of Biology. 2019б. Vol. 46. P. 148–170. (in Russian). https://doi.org/10.17223/19988591/46/8

Nikonova L.G., Kalashnikova D.A., Golovatskaya E.A., Simonova G.V. Phytomass reserves and degradation of peat-forming plants at the first stages of decomposition in natural and post-pyrogenic peatlands of West Siberia. The Journal of Soils and Environment. 2024. Vol. 6. No. 2. e258 (in Russian). https://doi.org/10.31251/pos.v7i2.258

Poshibaeva A.R. Bacterial biomass as a source of petroleum hydrocarbons. Dissertation ... Cand. of Chemical Sci. Moscow, 2015. 124 p. (in Russian).

Serebrennikova O.V.1, Svarovskaya L.I.1, Strelnikova E.B.1, Russkikh I.V.1, Kadychagov P.B. Duchko M.A. Biodegradation influence on peat organic compounds composition. Problemy isucheniya i ispol'zovaniya torfyanykh resursov Sibiri: Procedings of the III International scientific and practical conference (September 27 – October 3, 2015). Stavropol: Alfa-Print LLC, 2015. P. 163–166. (in Russian).

Grover S.P.P., Baldock J.A. Carbon decomposition processes in a peat from the Australian Alps. European Journal of Soil Science. 2010. Vol. 61. P. 217–230. https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2009.01220.x

Grover S.P.P., Baldock J.A. Carbon chemistry and mineralization of peat soils from the Australian Alps. European Journal of Soil Science. 2012. Vol. 63. P. 129–140. https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2011.01424.x

Louis V.L.St., Partridge A.D., Kelly C.A., Rudd J.W.V. Mineralization rates of peat from eroding peat islands in reservoirs. Biogeochemistry. 2003. Vol. 64. P. 97–110. https://doi.org/10.1023/A:1024982915493

Maisto G., De Marco A., Meola A., Sessa L., De Santo A.V. Nutrient dynamics in litter mixtures of four Mediterranean maquis species decomposing in situ. Soil Biology and Biochemistry. 2011. Vol. 43. P. 520–530. https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2010.11.017

Swift M.J., Heal O.W., Anderson J.M. Decomposition in Terrestrial Ecosystems. Berkeley, Los Angeles: Univ. California Press, 1979. 372 p.

Received 31 March 2025
Accepted 18 April 2025
Published 30 April 2025

About the author:

Natalia G. Koronatova – Candidate of Biological Sciences, Leading Researcher in Laboratory of Biogeocenology in the Institute of Soil Science and Agrochemistry, the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Novosibirsk, Russia); koronatova@issa-siberia.ru; https://orcid.org/0000-0002-0557-0083

The author read and approved the final manuscript

The article is available under Creative Commons Attribution 4.0 License

УДК 631.4 630.114.444:577.152.1:631.417 (571.1)
https://doi.org/10.31251/pos.v8i1.297

Check for updates

Регрессионные модели связи каталазной активности и водного режима – критерии качества осушенных почв болотных сосняков Западной Сибири

© 2025 Т. Т. Ефремова, С. П. Ефремов, А. Ф. Аврова

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

Цель исследования. *Построить регрессионные модели связи каталазной активности осушенных почв и водного режима и показать возможность использования моделей для оценки влияния глубины гидромелиорации на лесорастительные свойства торфяных почв.*
Место и время проведения. *Подзона южной тайги Западной Сибири; за период май – октябрь 2000–2002 гг.*
Объекты и методы исследования. *Объектом исследования послужило осушенное 25–30 лет тому назад открытое сфагново-осоково-вахтово-кустарничковое болото, занятое сосняками естественного происхождения (географические координаты 56°23′ с.ш., 84°34′ в.д.). Уровень почвенно-грунтовых вод, влажность, каталазную активность торфяных почв изучали в сезонной динамике в течение 2000-2002 гг. с мая по октябрь с шагом 5–8 дней. В превалирующих ассоциациях напочвенного растительного покрова каждого типа леса (осоково-сфагновом, вейниковом и разнотравно-крапивном) закладывали почвенные шурфы глубиной около 50 см, извлекали торфяные монолиты, дифференцировали профиль на горизонты 0–5, 5–10, 10–20 и 20–30 см (по концентрации живых корней, цвету, плотности сложения) и формировали средние образцы согласно выделенным глубинам. Каталазную активность определяли в свежеотобранных (сырых) образцах перманганатометрическим методом.*
Основные результаты. *Чрезмерное иссушение, как и избыточная влажность, снижают ферментативную активность и лесорастительные свойства почв. В режиме умеренного осушения отмечается самый высокий уровень каталазной активности – фактора, способствующего гумификации органического вещества, формированию устойчивого гумуса (гуматного типа), сохранению необходимых запасов биогенных элементов и формированию достаточно высоких среднегодовых приростов качественной древесины.*
Заключение. *Построены высоко значимые парные регрессионные модели на базе полиномов второго порядка, которые могут стать основой для разработки приемов управления гумусным состоянием, повышения и поддержания плодородия торфяных почв при планировании гидротехнических мероприятий по рациональному лесохозяйственному освоению болот.*

Ключевые слова: *мезотрофные болота; торфяные почвы; регрессионный анализ; оценка статистических моделей; гумусное состояние; биогенные элементы; запасы и качество древесины.*

Цитирование: *Ефремова Т.Т., Ефремов С.П., Аврова А.Ф. Регрессионные модели связи каталазной активности и водного режима – критерии качества осушенных почв болотных сосняков Западной Сибири // Почвы и окружающая среда. 2025. Том 8. № 1. e297. DOI: 10.31251/pos.v8i1.297*

ВВЕДЕНИЕ

Масштабы заболоченности лесного фонда Западной Сибири достигают 75–76 млн га; около половины – безлесные и слабооблесенные болота, которые нуждаются в содействии естественному и искусственному возобновлению леса (Ефремов, 1967, 1987; Глебов, 1971). Одним из основных приемов стимулирования лесообразовательного процесса является осушительная мелиорация. Сброс избыточной влаги сопровождается не только повышением производительности лесных насаждений, но и глубокой биохимической трансформацией торфяных почв. Неудачно выбранный тип и интенсивность гидромелиорации может спровоцировать крайне нежелательные последствия. Показано, что глубокое осушение влечет за собой непроизводительное сгорание органического вещества и деградацию торфяной залежи, так как сопровождается повышенной эмиссией CO_2, активным образованием подвижных минеральных и органических соединений, которые активно выносятся за пределы торфяной залежи дренажными водами (Вомперский, 1968; Ефремова, 1975; Зименко, 1977; Мелентьева, 1980; Ефремова, Мелентьева, 1981; Переверзев, 1987; Бамбалов и др., 2000; Инишева, Дементьева, 2000; Gianfreda, Bollag, 1996; Leifeld et al., 2020; Lasota, Błońska, 2021).

Однако одни и те же приемы производственной лесохозяйственной деятельности оказывают дифференцированное воздействие в различных почвенно-экологических сочетаниях и климатических

зонах. Поэтому крайне важно уметь заранее оценить интенсивность воздействия, приводящего не только к повышению продуктивности древесного яруса, но и к совершенствованию лесорастительных условий. Такая возможность создается в процессе количественной оценки взаимосвязи различных факторов среды. В первую очередь это относится к почвенному покрову как основному средству производства в сельском и лесном хозяйстве. Постоянное совершенствование и рационализация приемов повышения растительного потенциала почв необходимо признать в качестве главного принципа природопользования (Мигунова, 2001). Антропогенные факторы существенно влияют на все свойства почвы и выступают в качестве важного регулятора ее ферментативной активности (Хазиев, 1982). Осуществляя сложную цепь синтетико-деструктивных преобразований органического вещества, ферментативная активность микроорганизмов служит одним из чувствительных показателей трансформации почв, как в процессе естественной эволюции, так и под воздействием антропогенных факторов. Поэтому показатели ферментативной активности рекомендуется использовать в почвенно-мониторинговых исследованиях (Хазиев, 1982, 2018; Ефремова, Овчинникова, 2007; Dick et al., 1996; Karaca et al., 2010; Kujur, Patel, 2014).

Степень преобразования органических остатков связана с участием различных классов ферментов. Выбор того или иного фермента определяется характером антропогенного фактора и задачами исследований. Гидромелиорация сопровождается, в первую очередь, улучшением условий аэрации и развитием окислительных процессов. Поэтому для решения перечисленных задач выбраны ферменты класса оксидоредуктаз, среди которых к числу наиболее широко распространенных и достаточно изученных относится каталаза. Многочисленные библиографические сводки указывают: каталазная активность почв связана с ботаническим составом торфов, общей численностью основных групп микроорганизмов, состоянием органического вещества, характеризует интенсивность выделения CO_2, биохимических и ферментативных процессов, отражает уровень потенциального плодородия и служит показателем качества почв (Купревич, Щербакова, 1966; Ефремова и др.,1978; Щербакова, 1983; Дырин, 2009; Ефремова и др. 2006; Инишева и др., 2007; Киреева и др., 2008; Мелехина и др., 2015; Наумова и др., 2018; Леонова и др., 2020; Арзамазова и др., 2023; Инишева и др., 2024; Wallenstein et al., 2009; Błońska, 2010; Baldrian, Stursova, 2011; Brockett et al., 2012; Burns et al., 2013; Bobuľská et al., 2015; Alves et al., 2021). Перечисленные функции создают все предпосылки использования каталазной активности почв в мониторинговых исследованиях.

В настоящее время темпы лесохозяйственного освоения болот посредством осушительной мелиорации в Западной Сибири значительно сократились. Однако ускоренное экономическое развитие этой территории требует оперативных решений по повышению продуктивности малоценных земель, болотных и заболоченных лесов. Обоснована идея поэтапно-дифференцированной, ограниченно-целевой (выборочной) осушительной мелиорации территории Западной Сибири с целью производственной лесохозяйственной деятельности (Ефремов, 1987). С позиций рационального природопользования требуются научно аргументированные предсказания предстоящих изменений в осушаемых экосистемах болот. Ранее, используя метод главных компонент, дискриминантный анализ и каноническую корреляцию на основании совокупности показателей: физико-химических (уровень болотных вод, объемная влажность, температура почв, pH, окислительно-восстановительный потенциал), химических (воднорастворимые Fe^{2+}, Fe^{3+}, Fe, связанное с органическим веществом, C, NH_4^+) и активности оксидоредуктаз (каталаза, пероксидаза и анаэробная дегидрогеназа) установлено, что наиболее точная диагностика торфяных почв по степени осушения (почти 90%) осуществляется совокупностью физико-химических показателей (Ефремова и др., 2006). Наибольший вклад в предсказание вносят уровни стояния вод (F-критерий = 437,6) и объемная влажность (F-критерий = 43,3), то есть водный режим.

В данном контексте цель настоящей работы – построить регрессионные модели связи каталазной активности осушенных почв и водного режима и показать возможность использования моделей для оценки влияния глубины гидромелиорации на лесорастительные свойства торфяных почв.

Постановка задач в свете поставленной цели:

- оценить параметры модели,
- построить доверительные интервалы параметров,
- проверить гипотезу о значимости регрессии,
- оценить степень адекватности модели,
- выполнить анализ остатков,
- описать ошибку аппроксимации.

Полученные результаты могут быть основой, базой при разработке и оперативном прогнозе последствий гидромелиоративных мероприятий, направленных на повышение лесорастительного потенциала болот и плодородия осушенных торфяных почв.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом исследования послужило осушенное 25–30 лет тому назад открытое сфагново-осоково-вахтово-кустарничковое болото в пределах южнотаежной подзоны Западной Сибири, занятое сосняками естественного происхождения (географические координаты 56°23′ с.ш., 84°34′ в.д.). Осушенный массив слагается сетью мелких открытых каналов (ширина 40–45 см, глубина около 40 см) с различным междренным расстоянием. Растительность, как известно, своим составом и продуктивностью служит индикатором условий среды. Метод фитоиндикации являет собой экосистемный принцип оценки качества типов местообитаний на основе сопряженного изучения почв и растительности (Мигунова, 2001). Руководствуясь этими представлениями, выдели три типа сосняков – осоково-сфагновый, вейниковый и разнотравно-крапивный. В пространстве мелиоративной сети осоково-сфагновый сосняк сформировался на 96-метровой межканальной полосе. В напочвенном растительном покрове доминируют: сфагнум узколистный (*Spagnum angustifolium* C. Jens.), аулакомниум болотный (*Aulacomnium palustre* (Hedw.) Schwaegr.), осока двутычинковая (*Carex diandra* Schrank), вздутая (*C. rostrata* Stokes), магелланская (*C. magellanica* Zam). Сосняк вейниковый занимает участок 47-метровой межканальной полосы. Господствующие виды напочвенного покрова: вейник пурпурный (*Calamagrostis purpurea* (Trin.) Trin.), незамеченный (*C. neglegta* (Erhr.) Laertn.), мятлик болотный (*Poa palustris* Z.). Сосняк разнотравно-крапивный расположен на стыке магистрального и ловчего каналов с расстоянием между ними 20–25 м. В напочвенном покрове преобладают: крапива двудомная (*Urtica dioica* Z.), лабазник вязолистный (*Filipendula ulmaria* (Z.) Maxim.), василисник простой (*Thalictrum simplex* Z.), вероника длиннолистная (*Veronica longifolia* Z.).

Лесная растительность дифференцирует типы местообитаний на классы бонитета по трофности лесорастительных условий. Одновозрастные 26-летние сосновые насаждения, исходя из линейной высоты древостоев, разграничиваются следующим образом. Сосняки разнотравно-крапивные I–Ia, вейниковые – II–I, осоково-сфагновые – III–II класс бонитета (табл. 1). В соответствующих почвах глубокой и умеренной гидромелиорации относительно слабой валовые запасы биогенных элементов в зоне ризосферы выше: P_2O_5 – в 2,7 и 2,5, K – 1,8 и 1,6, N – в 3,7 и 3,4 раза. Систематизированные сведения о почвенно-гидрологическом, фитоценотическом и таксационном разнообразии болотных сосняков северной части междуречья Оби и Томи содержатся в наших текущих публикациях (Ефремов и др., 2024а, б).

Таблица 1

Таксационные показатели осушенных болотных сосняков мезотрофного ряда развития

Состав древостоя	Число стволов/га	Пол-нота	Средние			Запас древесины, $м^3$/га	Среднегодовой прирост, $м^3$/га	Класс бонитета
			высота, м	диаметр, см	возраст, лет			
Слабо осушенный сосняк осоково-сфагновый								
8С2Б	2270	0,91	9,4	11,5	26	113,5	3,4	III–II
Умеренно осушенный сосняк вейниковый								
9С1Б	1818	0,96	10,3	13,6	26	154,5	4,3	II–I
Интенсивно осушенный сосняк разнотравно-крапивный								
8С2Б	1174	0,79	12,1	15,7	26	150,3	5,1	I–Ia

Современные почвы 0–30 см (верхний биологически активный слой выше средневегетационного уровня болотных вод) формируются на мощной (3–5 м) торфяной залежи, сложенной осоково-сфагновыми торфами в верхнем метровом слое. Объемная масса торфяных почв (Histosols) в режиме слабого осушения составила 0,092–0,099, умеренного – 0,113–0,132, интенсивного – 0,102–0,145 г/$см^3$, зольность – 4,10–14,19, 4,73–15,99 и 4,85–15,72%. Запасы биогенных элементов в зоне ризосферы (0–20 см) соответственно: N – 1500, 5140 и 5590 кг/га, P_2O_5 – 370, 940 и 1000, K_2O – 110, 180 и 200 кг/га.

Уровень почвенно-грунтовых вод (УПГВ), влажность, каталазную активность торфяных почв изучали в сезонной динамике в течение 2000-2002 гг. с мая по октябрь с шагом 5–8 дней. За этот период в каждой почве – слабого, умеренного и глубокого осушения – обработано от 14 до 19 сроков наблюдений. В превалирующих ассоциациях напочвенного растительного покрова каждого типа леса

(осоково-сфагновом, вейниковом и разнотравно-крапивном) закладывали почвенные шурфы глубиной около 50 см, обычно не менее пяти. Извлекали торфяные монолиты размером около 40×40×40 см, дифференцировали профиль на горизонты 0–5, 5–10, 10–20 и 20–30 см (по концентрации живых корней, цвету, плотности сложения) и формировали средние образцы согласно выделенным глубинам. Почвы помещали в холодильник. На другой день в свежеотобранных (сырых) образцах в двух весовых повторностях определяли активность каталазы методом Джонсона и Темпле (Хазиев, 2005). К навеске 0,5–2 г (минимум в горизонтах слоя 0–10 см) приливали 40 мл дистиллированной воды, вносили 5 мл 0,3% H_2O_2. Колбу встряхивали на ротаторе в течение 20 мин. Нерасщепленную часть перекиси стабилизировали добавлением 5 мл 3 н. H_2SO_4 и фильтровали через плотный фильтр. Аликвоту 10 мл титровали 0,1 н. раствором $KMnO_4$ до слабо-розовой окраски, устойчивой в течение 1 минуты по секундомеру. Корректировку результатов выполняли контролем на чистоту реактивов. Анализ выполняли в 2-х весовых повторностях и выражали в мл 0,1 н. $KMnO_4$ на 1 г абсолютно сухой почвы за 20 минут. Плотность сложения торфяного субстрата определяли методом режущего кольца, влажность – термостатно-весовым методом. Валовой химический анализ и состав органического вещества выполнен однократно в образцах осеннего срока отбора по общепринятым в почвоведении методам: азот – по Кьельдалю, фосфор – по Дениже, калий – на пламенном фотометре, состав органического вещества по методике Пономаревой, Николаевой (Агрохимические методы…, 1975; Пономарева, Николаева, 1961). Построение и оценка пригодности регрессионных моделей выполнена в соответствии с руководством (Дрейпер, Смит, 1986).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Почвенно-грунтовые воды в течение периода наблюдений ближе всего к поверхности поднимались в мае и раннелетнем сроке наблюдений (рис. 1 А). В течение лета последовательно опускались до максимального глубокого уровня стояния в августе-сентябре, в октябре наблюдался некоторый подъем. Сообразно уровню почвенно-грунтовых вод варьировала объемная влажность торфяных почв, чем ближе к поверхности уровень стояния, тем выше обводненность (рис. 1 Б). Показатели достоверно со средней теснотой взаимосвязаны (r = – 0,54).

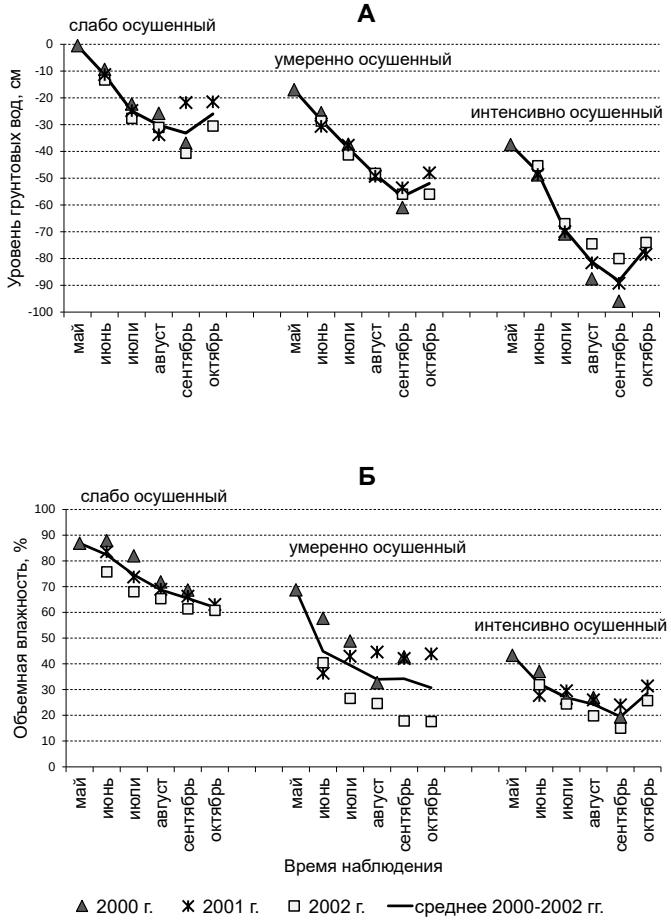


Рисунок 1. Водный режим осушенных торфяных почв за три года наблюдений в течение мая–октября: А – уровни стояния почвенно-грунтовых вод, см; Б – объемная влажность почв, %.

За три года наблюдений в сосняках осоково-сфагновых, вейниковых и разнотравно-крапивных среднемноголетний уровень стояния почвенно-грунтовых вод за теплый период составил 23, 42 и 70 см, объемная влажность – 77,4, 41,7, 28,7% соответственно (табл. 2). На основании показателей водного режима почвы осоково-сфагнового сосняка классифицировали как слабо осушенные, вейникового – умеренно и разнотравно-крапивного сосняка – интенсивно осушенные. Наибольшей каталазной активностью в слое 0–30 см за период наблюдений отличались торфяные почвы в режиме умеренной гидромелиорации – в среднем 17,3 мл 0,1 н. $KMnO_4$ на 1 г абсолютно сухой почвы за 20 минут. Чрезмерное иссушение почв снижает активность каталазы несколько более, чем избыточная влажность, составляя75 и 80 % относительно умеренно осушенных почв. С глубиной активность каталазы заметно снижалась, в горизонтах 20–30 см по сравнению с поверхностными она была в 2 раза ниже.

Таблица 2

Уровни почвенно-грунтовых вод, объемная влажность и каталазная активность лесных торфяных почв (0–30 см), средние за три года наблюдений

Параметры водного режима	Степень осушения		
	слабая	умеренная	интенсивная
Уровень почвенно-грунтовых вод, см	6–43 23	20–60 42	40–100 70
Объемная влажность, %	49,2–90,7 77,4	24,3–54,8 41,7	21,2–34,7 28,7
Активность каталазы, единиц	10,6–19,1 13,9	12,2–33,6 17,3	9,2–16,7 13,0

Примечание.
Единиц – мл 0,1 н. $KMnO_4$ / 1 г × 20 минут; над чертой – варьирование, под чертой – среднее.

В соответствии с целью настоящего сообщения рассмотрим регрессионную связь каталазной активности осушенных почв и глубины почвенно-грунтовых вод, объединив в один массив данные по всем уровням осушения за три года наблюдений. Зависимость аппроксимируется уравнением параболы второго порядка (рис. 2 А).

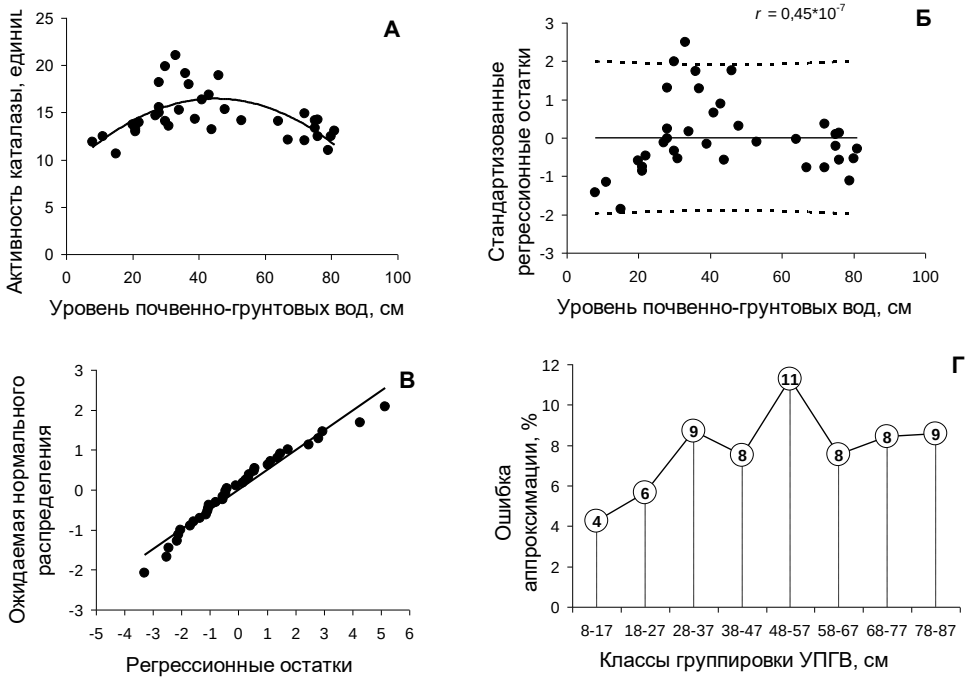


Рисунок 2. Диаграммы оценки пригодности регрессионной модели каталазной активности осушенных торфяных почв и уровней почвенно-грунтовых вод: А – теоретическая линия регрессии и рассеивания данных, Б – гомоскедастичность остатков, В – вероятность нормального распределения, Г – ошибки аппроксимации по классам группировки предиктора.

Высокой значимости модели (*F*-критерий – 670, $p < 0{,}001$) соответствует коэффициент детерминации (R^2) – 0,42, который измеряет качество построенной регрессии и долю разброса относительно среднего значения (табл. 3). Регрессионные коэффициенты являются высоко значимыми на уровне $p < 0{,}001$. Доверительные интервалы, которые задают область вокруг средних значений коэффициентов уравнения, показывают диапазоны, внутри которых содержится истинное среднее с вероятностью 95%. Адекватность (точность) регрессионных моделей оценили с помощью анализа остатков (разностей между экспериментальными данными и значениями, рассчитанными по регрессионному уравнению). В случае правильно подобранной модели вычисленные остатки характеризуются однородностью дисперсий (гомоскедастичностью), являются нормально-распределенными случайными величинами, не зависят от предиктора и у них отсутствует автокорреляция. Проверку допущения о постоянной дисперсии остатков выполнили с помощью диаграммы разброса стандартизованных остатков относительно предиктора (рис. 2 Б). Остатки примерно одинаково принимают как положительные, так и отрицательные значения, не проявляют тенденции к росту с увеличением уровня почвенно-грунтовых вод и не обнаруживают с ними выраженной зависимости ($r = 0{,}45\times10^{-7}$). Основная масса стандартизованных остатков находится в диапазоне –2…+2, т.е. 95% от числа всех вариант совокупности, что отвечает параметрам нормального распределения. Построены также диаграммы вероятностей нормального распределения (рис. 2 В).

Таблица 3

Оценка регрессионных моделей связи каталазной активности и гидрологического режима осушенных торфяных почв по типу квадратичной параболы ($y = a + bx + cx^2$)

Аргументы и регрессионные коэффициенты	Статистические параметры			
	значение	*p*-уровень	границы 95% доверительного интервала	
			нижняя	верхняя
Уровень почвенно-грунтовых вод:				
a	8,85	0,000005	5,53	12,17
b	0,338	0,000159	0,177	0,500
c	-0,0038	0,000055	-0,0054	-0,0021
Оценка регрессионной модели: $R^2 = 0{,}42$, *F*-критерий = 670, *p*-уровень <0,001				
Объемная влажность:				
a	3,21	0,075	-0,34	6,77
b	0,53	<0,001	0,36	0,70
c	-0,005	<0,001	-0,0069	-0,0034
Оценка регрессионной модели: $R^2 = 0{,}56$, *F*-критерий = 723, *p*-уровень <0,001				

Остатки лежат или на линии нормального распределения, или вплотную приближаются к ней. Можно утверждать, что условие нормального распределения ошибок нарушается незначительно, то есть остатки гомоскедастичны. Таким образом, оценка ошибок аппроксимации остатков дает основание констатировать: условие применения регрессионного анализа (метода наименьших квадратов) выполняется и модель вполне адекватно описывает данные. Следовательно, с ее помощью возможно строить достаточно надежные выводы о зависимости активности каталазы и уровней почвенно-грунтовых вод. Регрессионная модель построена в диапазоне уровней почвенно-грунтовых вод 11–81 см и может быть применима только к этим интервалам значений.

О качестве уравнения регрессии можно судить и по средней относительной ошибке аппроксимации, которая вычисляется по формуле:

$$\bar{A} = \frac{1}{n} \times \sum \left| \frac{y - yp}{y} \right| \times 100\%$$

где $\bar{A}$ – средняя относительная ошибка аппроксимации, %; y – аналитические данные; yp– их расчетные значения; $|y–yp|$ – величины, соответствующие модулю; n – число наблюдений. Значения средней относительной ошибки аппроксимации в пределах 10% свидетельствует о хорошем соответствии линии регрессии исходным аналитическим данным (Елисеева и др., 2003).

Для более четкой интерпретации ошибок прогноза каталазной активности показатели гидрологического режима с помощью «Сводной таблицы» в Excel сгруппировали в классы и рассчитали в них среднюю ошибку аппроксимации. Чем выше к поверхности залегают почвенно-грунтовые воды, тем выше точность предсказанных значений (рис. 2 Г). В среднем ошибка аппроксимации составляет 7,9%, что соответствует хорошей точности прогноза.

Регрессионная модель связи каталазной активности почв и объемной влажности построена по средним данным слоя 0–30 см за три года наблюдений в течение мая–октября. Регрессионная связь каталазной активности почв и объемной влажности аппроксимируется уравнением параболы второго порядка (рис. 3 А, табл. 3). Высокой значимости модели (F-критерий – 723, $p < 0{,}001$) соответствует коэффициент детерминации (R^2) – 0,56. Регрессионные коэффициенты являются высоко значимыми, свободный член (константа) – на уровне 0,075.

Вычисленные остатки характеризуются однородностью дисперсий (гомоскедастичностью), являются нормально-распределенными случайными величинами, не зависят от предиктора и у них отсутствует автокорреляция (рис. 3 Б, В). Ошибка аппроксимации каталазной активности осушенных торфяных почв по объемной влажности, изменяясь в пределах 4–13%, составляет в среднем 8,2% и соответствует хорошей точности прогноза (рис. 3 Г). Регрессионная модель построена в диапазоне объемной влажности 13–82% и может быть применима только к этим интервалам значений.

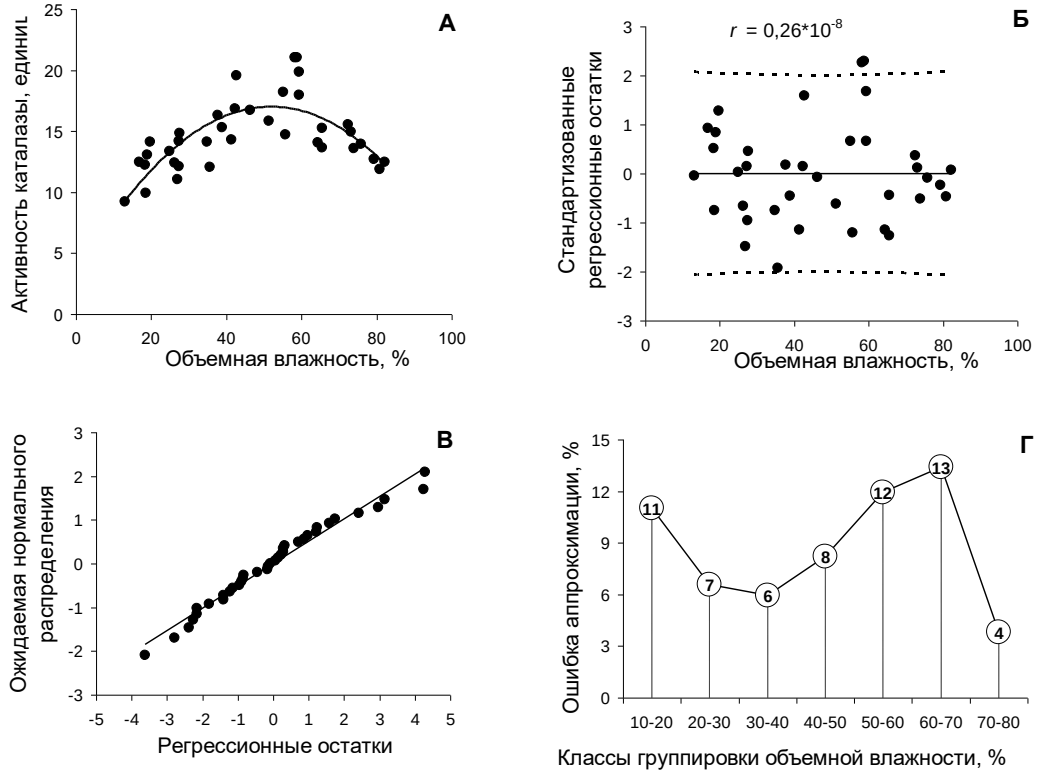


Рисунок 3. Диаграммы оценки пригодности регрессионной модели каталазной активности и объемной влажности осушенных торфяных почв. Условные обозначения А–Г см. рис. 2.

Рассчитанная максимальная точка экстремума УПГВ – 44 см, соответствующая ей каталазная активность почв 16,7 единиц, предсказанная на основании коэффициентов регрессии, вполне сопоставимы со средними за период наблюдений экспериментальными данными почв умеренного осушения: УПГВ – 42 см, каталазная активность – 17,3 единицы (табл. 2). Максимальная точка экстремума объемной влажности – 52% и сопутствующая ферментативная активность почв – 33 единицы также приурочены к режиму умеренного осушения и вплотную приближаются к наибольшим значениям обсуждаемых признаков за сезон – 54,8% и 33,6 единиц.

Неплохое совпадение предсказанных и эмпирических данных объективно подтверждает, что наиболее благоприятный водный режим для развития каталазной активности осушенных торфяных почв создается в случае умеренной гидромелиорации. Каталазная активность почв возрастает по мере снижения УГВ до уровня 44 см и 52% объемной влажности. Дальнейшее опускание почвенно-грунтовых вод и увеличение влажности почв сопровождается падением ферментативной активности,

т.е. чрезмерное иссушение, как и повышенная влажность торфяного субстрата, снижают активность каталазы.

Установлено, что каталазная активность, наряду с гидрологическими условиями, связана с отношением C/ N (рис. 4 А). Высокой значимости модели ($p < 0,001$) по типу квадратичной параболы соответствует R^2 – 0,64, характеризующий среднюю тесноту связи. Согласно рисунку, по мере расширения отношения C/N в пределах 17,7–43,6 визуально наблюдается ускоренное падение активности каталазы, что объективно подтверждается знаками регрессионных коэффициентов b и c.

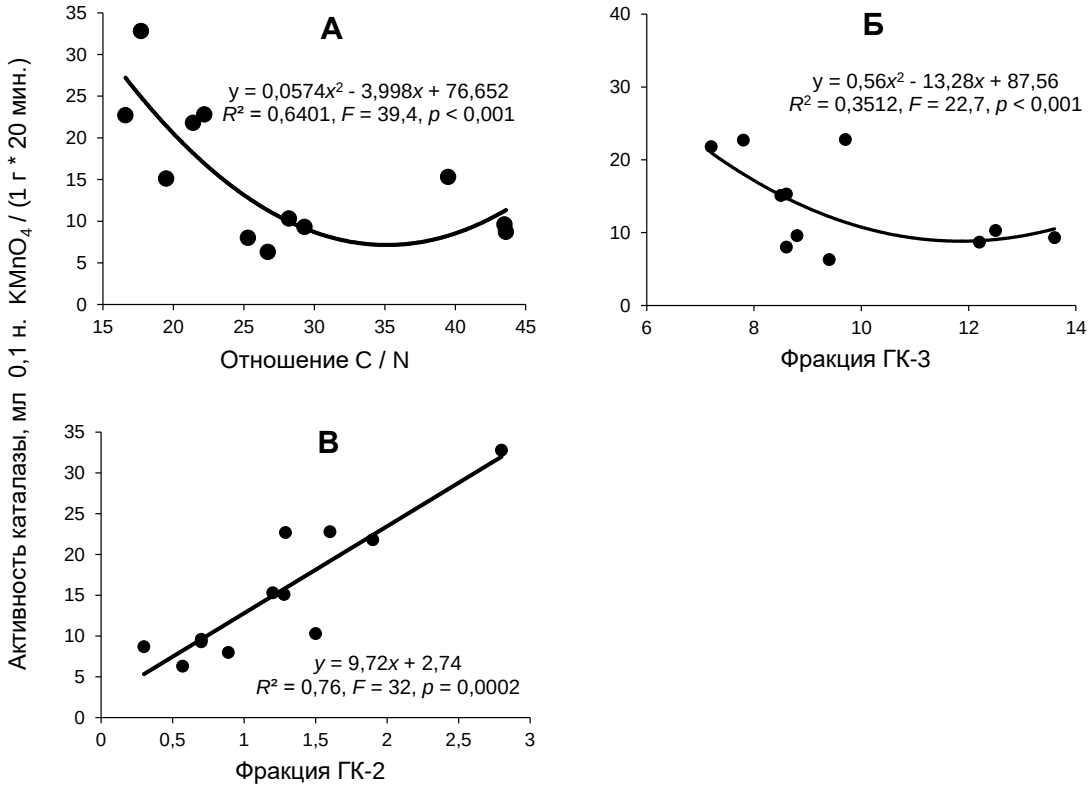


Рисунок 4. Регрессионная связь каталазной активности осушенных торфяных почв и биохимических показателей: А – отношение C/N; Б – содержание гуминовых кислот 3-й фракции, % к $C_{общ.}$; В – содержание гуминовых кислот 2-й фракции, % к $C_{общ}$.

Каталазная активность почв и отношение C/N рассматриваются в качестве интегрирующих показателей функциональной активности микрофлоры в различных экологических условиях (Аристовская, 1965; Козловская, 1976; Щербакова, 1983; Мелехина и др., 2015; Наумова и др., 2018; Skujins, 1976; Dick et al., 1996; Bobuľská et al., 2015). Кинетика каталазы в профиле осушенных торфяных почв четко разграничивается на две области: 0–10 см – высокоинтенсивную, сосредоточение живого населения почвы и 10–30 см – биологически менее активную. В обсуждаемых сосняках мезотрофного ряда развития верхние 10 см почв вмещают основную массу микроорганизмов – преимущественно неспоровых флюоресцирующих бактерий и плесневых грибов, почвенных животных – панцирных клещей, олигохет, личинок Diptera, а также физиологически активных корней растений (Загуральская, 1967; Ефремов и др., 1972; Ефремов, Ефремова, 1973; Козловская, 1976). Показано, что микробы начинают беспрепятственно заселять органические остатки в диапазоне C/N 30–20 и чем уже отношение, тем интенсивнее микробиологическая деятельность (Козловская, 1976). В профиле торфяных почв (0–30 см) слабого, умеренного и глубокого осушения средняя величина C/N составляет 37, 26 и 21, соответственно. На основании оценок скорости освоения растительных остатков, микробиологическую активность торфяных почв косвенно можно охарактеризовать как сравнительно низкую, среднюю и высокую. То есть, наибольшая каталазная активность умеренно осушенных почв сочетается со средним уровнем их микробиологической активности. С определенной долей вероятности допускаем, что в осушенных почвах сосняков, густо заселенных вейниками и мятликом, преобладающее значение в происхождении каталазной активности имеет корневая система этих растений. Установлено, что каталитическая активность торфяных почв обусловлена не только ферментами микробного метаболизма, но и каталазой растительного происхождения – корневыми

системами при их жизни, а также отмершими клетками высших растений и растений-торфообразователей (Купревич, Щербакова, 1966).

Уровень ферментативной активности почв, который фиксируется в текущий момент времени, создается не за один год, а является результатом всего предшествующего периода развития почвы, истории освоения и характеризует запас ее биологических возможностей (Щербакова, 1983). Каталаза может участвовать в реакциях, в ходе которых окислению подвергаются различные восстановленные соединения (Купревич, Щербакова, 1966). Донором водорода, в частности, могут служить гуминовые кислоты, пептизируемые 0,02 н. раствором NaOH на водяной бане (фракция ГК-3) как наиболее восстановленные соединения в системе гумусовых кислот торфяных почв (Ефремова, 1992). Согласно рисунку 4 Б, каталазная активность осушенных почв и гуминовые кислоты третьей фракции с высокой значимостью взаимосвязаны по типу квадратичной параболы. Благодаря высокоактивному кислороду в процессе разложения перекиси (при участии фермента) содержание ГК-3 снижается с ускорением (см. знаки коэффициентов b и c в регрессионном уравнении). В качестве окисленной формы можно назвать гуминовые кислоты, выделяемые 0,1 н. щелочью после декальцинации (фракция ГК-2), которые с высокими уровнем значимости и теснотой положительно линейно связаны с каталазной активностью почв (рис. 4 В).

Многочисленные сведения указывают, что в почве большая часть ферментов находится в виде комплексов с гумусовыми соединениями. По мнению Д.С. Орлова (1990), с биологической активностью почвы непосредственно связан групповой состав гумуса. Самое высокое содержание гуминовых кислот – 30,53% и фульвокислот (ФК) – 22,72% содержится в профиле интенсивно осушенных почв (табл. 4). Относительно этих показателей в умеренно осушенных почвах содержание ФК падает на 22, а ГК – 7%; в условиях слабого – на 30 и 42 %, соответственно. Исходя из отношения Сгк/Сфк – 1,7, наиболее устойчивый гуматный тип гумуса образуется в режиме умеренной гидромелиорации. В условиях интенсивного осушения фульватно-гуматный тип – Сгк/Сфк – 1,4, слабого гуматно-фульватный – Сгк/Сфк – 1,1. Преимущественному образованию гуминовых кислот сопутствует наиболее высокая каталазная активность умеренно осушенных торфяных почв. Гуминовые кислоты как аккумулятивные компоненты гумуса служат показателем протекающих процессов почвообрзования (Дергачева, 2018).

Таблица 4

Групповой состав органического вещества и запасы гумуса осушенных торфяных почв болотных сосняков, % к $C_{общ.}$

Глубина горизонтов, см	Гумусовые кислоты				Полисахариды			Гумин	Запасы гумуса, т/га
	ГК	ФК	ГК+ФК	Сгк/Сфк	гемицел-люлозы	целлю-лоза	Сумма		
Слабо осушенные									
0–5	17,65	19,58	35,63	0,90	13,43	19,42	32,85	22,6	51,6
5–10	17,4	16,43	32,62	1,06	12,29	19,3	31,6	27,49	45,28
10–20	19,32	14,09	32,43	1,37	11,23	16,98	28,22	30,56	49,36
20–30	16,02	13,28	28,4	1,21	10,88	16	26,88	34,41	45,1
0–30	**17,60**	**15,85**	**32,27**	**1,13**	**11,96**	**17,93**	**29,89**	**28,77**	**47,84**
Умеренно осушенные									
0–5	27,87	23,87	49,23	1,17	7,59	10,2	17,79	23,91	95,12
5–10	28,44	17,79	44,51	1,60	10,53	9,96	20,49	25,84	97,6
10–20	29,08	15,25	42,9	1,91	9,74	10,55	20,29	27,1	89,16
20–30	28,1	14,3	41	1,97	10,38	14,12	24,5	23,81	81,1
0–30	**28,37**	**17,80**	**44,41**	**1,66**	**9,56**	**11,21**	**20,77**	**25,17**	**90,75**
Интенсивно осушенные									
0–5	29,29	26,06	52,61	1,12	7,81	12,74	20,55	17,77	104,52
5–10	31,86	23,19	52,94	1,37	8,51	12,32	20,84	18,78	103,16
10–20	29,86	21	49,07	1,42	9,59	13,8	22,39	21,61	89,66
20–30	31,09	20,64	50,04	1,51	8,46	13,43	21,89	21,67	93,14
0–30	**30,53**	**22,72**	**51,17**	**1,36**	**8,59**	**13,07**	**21,42**	**19,96**	**97,62**

Примечание.

ГК – гуминовые кислоты, ФК – фульвокислоты, Сгк/Сфк – отношение углерода гуминовых кислот к углероду фульвокислот, гумин – нерастворимый и негидролизуемый остаток, запасы гумуса – слой 0–20 см.

Активному формированию фульвокислот способствуют энергичные микробиологические процессы в интенсивно осушенных почвах, судя по самому узкому отношению C/N. В условиях

слабого осушения, за пределами благоприятных условий жизнедеятельности микроорганизмов, наиболее низкий уровень гумификации сопровождаются примерно равным образованием гуминовых и фульвокислот. Другие показатели группового состава органического вещества изменяются пропорционально глубине гидромелиорации торфяных почв. Относительно слабо осушенных почв в режиме интенсивного повышается степень гумификации в 1,6, запасы гумуса в 2 раза и снижается в 1,4 раза количество полисахаридов – показателей интенсивности минерализации. Наиболее важной является информация о запасах гумуса – важного критерия плодородия почв. В умеренно осушенных почвах они мало уступают максимальному содержанию гумуса в условиях интенсивной гидромелиорации (97,62 т/га), составляя к их уровню 93%.

Интенсивное осушение торфяных почв сопровождалось, как показано выше, активным формированием фульвокислот, которые благодаря высокой растворимости легко мигрируют с дренажными водами за пределы торфяной залежи, снижая потенциальное плодородие почв. Существенные изменения происходят и в минеральной компоненте, но это отдельная тема последующих обсуждений. В настоящем сообщении ограничимся некоторыми итогами. Сильное иссушение способствовало прочному закреплению фосфат-иона окисными соединениями железа и активно формирующимися гумусовыми кислотами, сокращая количество легкоусвояемых форм фосфора. Напротив, происходило значительное образование легкодоступных минеральных форм азота. Запасы аммонийных и нитратных форм достигали в режиме глубокого осушения 130, слабого – 32 кг/га, то есть снижались более чем в 4 раза. В почвенный раствор поступало большое количество конечных продуктов минерализации органического вещества – ионов NO_3^-, HCO_3^-. Гидрокарбонаты, наряду с нитратами, образуя с кальцием легкорастворимые соединения, активно способствовали выносу элемента дренажными водами за пределы торфяной залежи. В результате произошло снижение валового кальция по всему профилю почв, что вызвало смещение величины pH в более кислый интервал. Приведенные оценки условий почвенной среды дают основание оценивать долгосрочный прогноз лесорастительного потенциала интенсивно осушенных почв как неблагоприятный, а высокую продуктивность разнотравно-крапивных сосняков отнести к эфемерной (скоропроходящей).

Другим главным индикатором условий местообитания в лесных экосистемах служит продуктивность древесного яруса. Сосняки вейниковые и разнотравно-крапивные характеризуются близкими запасами 154,5 и 150,3 т/га с некоторым преобладанием в первых. Такое преимущество обусловлено большим числом стволов на гектаре и составом древостоя с меньшим участием березы. Более рельефно производительность сосняков характеризует среднегодовой прирост древесины, который повышается по мере нарастания глубины гидромелиорации. Относительно режима слабого осушения – 3,4 $м^3$/га прирост возрастал в 1,3 и 1,5 раза в условиях умеренной и интенсивной гидромелиорации, соответственно. Однако более высокому темпу прироста древесины в режиме глубокого осушения, как показано выше, сопутствует целый комплекс нежелательных экологических последствий. Кроме того, на сходных объектах ранее выполнены физико-механические испытания древесины сосновых молодняков с целью прогноза формирования древесины с высокими деловыми качествами и выбора оптимального режима мелиорации ее ускоренного созревания (Ефремов, 1987). Древесина на 110-метровой межканальной полосе (режим слабого осушения) оказалась менее пористой и более плотной. Она обладает повышенным пределом устойчивости к механическим нагрузкам в таких видах испытаний как сжатие вдоль волокон и статистический изгиб. У сосновых кряжей на осушенных площадях 60-метровой полосы механические свойства и коэффициенты качества древесины выше, чем у суходолов (за исключением предела прочности при сжатии вдоль волокон). В сосняках на 25-метровой межканальной полосе (интенсивное осушение) предельные нагрузки, вызывающие разрушение древесины, наименьшие. Следовательно, возможность её применения в конструкциях, выполняющих опорные функции, более ограничена, чем древесина, формирующаяся на осушенных болотах слабой и умеренной гидромелиорации.

На основании вышеизложенного, режим умеренной гидромелиорации, который создается 47-метровыми межканальными полосами, следует признать оптимальным с позиции рационального лесоосушения мезотрофных болот южнотаежной подзоны Западной Сибири. В такой структуре гидромелиоративной сети болотные воды не опускается ниже 42±11 см в среднем за период вегетации. Обеспечивается наибольшая каталазная активность почв, которой сопутствует благоприятный для формирования устойчивого типа гумуса уровень микробиологической активности, сохраняются в должном количестве запасы биогенных элементов, способствующие формированию достаточно высокого среднегодового прироста качественной древесины. В данном контексте, высокая каталазная активность осушенных почв может служить индикатором процессов трансформации условий среды и

показателем лесорастительного потенциала осушенных болот. Построенные регрессионные модели связи каталазной активности и водного режима могут быть использованы для разработки приемов повышения и поддержания плодородия торфяных почв при планировании гидротехнических мероприятий по лесохозяйственному освоению болот. Парные регрессионные модели достаточно просты в применении и базируются на показателях, расчеты и измерение которых не требуют больших трудозатрат и длительной аналитической подготовки.

ВЫВОДЫ

1. Построены высокозначимые парные регрессионные модели на базе полиномов второго порядка, описывающие связь каталазной активности осушенных лесных почв с объемной влажностью (13–82%), а также уровнем почвенно-грунтовых вод (11–81 см). Средняя относительная ошибка аппроксимации 8,3% свидетельствует о хорошем соответствии линии регрессии исходным аналитическим данным. Предсказанные максимальные точки экстремумов глубины стояния почвенно-грунтовых – 44 см – и каталазной активности почв – 16,7 единиц – вплотную приближаются к наибольшим показателям эмпирических наблюдений в режиме умеренного осушения (42 см и 17,3 единицы) в среднем за май–октябрь. Максимальные точки экстремумов объемной влажности – 52% и ферментативной активности почв – 33 единицы – соответствуют наибольшим эмпирическим данным за сезон (54,8% и 33,6 единиц).

2. Близкие значения предсказанных и эмпирических данных обосновывают следующее заключение. Наиболее благоприятный режим лесоосушения мезотрофных болот южнотаежной подзоны Западной Сибири создается уровнем стояния почвенно-грунтовых вод в среднем на глубине 42±11 см за теплый период, который в пространстве мелиоративной сети обеспечивается 47-метровыми межканальными полосами. В таком режиме гидромелиорации проявляется самый высокий уровень каталазной активности почв, который сочетается с достаточно высоким среднегодовым приростом качественной древесины (4,3 $м^3$/га) и образованием устойчивого (гуматного) типа гумуса, обеспечивающего повышение и сохранение лесорастительного потенциала осушенных почв на длительный период. Режим интенсивной гидромелиорации (УПГВ 70±16 см) торфяных почв, несмотря на сравнительно высокий ежегодный прирост древесины (5,1 $м^3$/га), является в большей мере критическим. Он сопровождается интенсивной минерализацией органического вещества и формированием фульвокислот, которые легко мигрируют с дренажными водами за пределы торфяной залежи, что приводит к непроизводительным потерям торфяной толщи и снижению потенциального плодородия почв. Поэтому высокую продуктивность интенсивно осушенных молодняков сосновых насаждений можно оценить как эфемерную (скоропроходящую).

3. В данном контексте каталазная активность осушенных почв может служить индикатором происходящих при осушении болот процессов, а ее высокая кинетика – показателем предпочтительных для лесовыращивания условий почвенной среды. Высоко значимые парные регрессионные модели на базе полиномов второго порядка могут стать основой для разработки приемов управления гумусным состоянием, повышения и поддержания плодородия торфяных почв при планировании гидротехнических мероприятий по рациональному лесохозяйственному освоению болот.

ФИНАНСОВАЯ ПОДДЕРЖКА

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

ЛИТЕРАТУРА

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

Арзамазова А.В., Гальцова А.Д., Кинжаев Р.Р., Григорьева И.И. Эффективность применения различных форм азотных удобрений при выращивании злаковых трав на нефтезагрязненной олиготрофной торфяной почве // Проблемы агрохимии и экологии. 2023. № 2. С. 41–47. https://doi.org/10.26178/AE.2023.51.52.007

Аристовская Т.В. Микробиология подзолистых почв. Ленинград, 1965. 187 с.

Бамбалов Н.Н., Смирнова В.В., Тановицкий И.Г. Беленький С.Г. Ракович В.А. Современное состояние и перспективы использования торфяного фонда Белоруссии // Природные ресурсы. 2000. № 3. С. 5–15.

Вомперский С.Э. Биологические основы эффективности лесоосушения. Москва: Наука, 1968. 312 с.

Глебов Ф.З. Об улучшении учета гидролесомелиоративного фонда при лесоустройстве в Западной Сибири // Лесное хозяйство. 1971. № 1. С. 54–60.

Дергачева М.И. Система гумусовых веществ как основа диагностики палеопочв и реконструкции палеоприродной среды. Новосибирск: Издательство СО РАН, 2018. 292 с.

Дрейпер Н., Смит Г. Прикладной регрессионный анализ. Книга 1. Пер. с англ., 2-е изд., перераб. и доп. Москва: Финансы и статистика, 1986. 366 с.

Дырин В.А. Активность каталазы в торфе целинного и рекультивируемого участков болотной экосистемы низинного типа // Вестник Томского государственного педагогического университета. 2009. № 6 (84). С. 121–125.

Елисеева И.И., Курышева С.В., Костеева Т.В., Бабаева И.В., Михайлов Б.А. Эконометрика. Москва: Финансы и статистика, 2003. 344 с.

Ефремов С.П. О залесении осушенных болот Томской области // Взаимоотношение леса и болота. Москва: Наука, 1967. С.141–174.

Ефремов С.П. Пионерные древостои осушенных болот. Новосибирск: Наука, 1987. 248 с.

Ефремов С.П., Ефремова Т.Т., Козловская Л.С., Крапивина Л.А., Мелентьева Н.В. Биологический профиль осушенных торфяных почв Западной Сибири. Москва: Наука, Проспект ВДНХ СССР, 1972. 4 с.

Ефремов С.П., Ефремова Т.Т. Влияние осушения на загруженность торфяной почвы корнями древесных и травянистых растений // Комплексная оценка болот и заболоченных лесов в связи с их мелиорацией. Новосибирск: Наука, 1973. С. 113–127.

Ефремов С.П., Ефремова Т.Т., Пименов А.В., Седельников М.В. Эффекты радиального прироста болотных сосняков в ракурсе фитосоциальной парадигмы // Сибирский экологический журнал. 2024а. № 5. С. 769–782. https://doi.org/10.15372/SEJ20240509

Ефремов С.П., Ефремова Т.Т., Пименов А.В., Седельникова Т.С. Структура пула годичных колец в социумах болотных и суходольных сосняков междуречья Оби и Томи. Сообщение I: методологическое обоснование и лесорастительные условия // Сибирский лесной журнал. 2024б. № 5. С. 3–12. https://doi.org/10.15372/SJFS20240501

Ефремова Т.Т. Формирование почв при естественном облесении осушенных болот. Новосибирск: Наука, 1975. 125 с.

Ефремова Т.Т. Почвообразование и диагностика торфяных почв болотных экосистем // Почвоведение. 1992. № 12. С. 25–35.

Ефремова Т.Т., Ефремов С.П., Воронков П.Т. Регрессионный анализ ферментативной активности осушенных торфяных почв // Особенности лесо-болотных экосистем Западной Сибири. Красноярск, 1978. С. 111–131.

Ефремова Т.Т, Мелентьева Н.В. Биологические свойства торфяных почв в связи с гидролесомелиорацией // Почвоведение. 1981. № 2. С. 117–127.

Ефремова Т.Т., Овчинникова Т.М., Суховольский В.Г. Многопараметрический анализ почвенных свойств лесных осушенных болот Западной Сибири // Почвоведение. 2006. № 6. С. 657–667.

Ефремова Т.Т., Овчинникова Т.М. Оксидоредуктазная активность торфяных почв как показатель глубины биохимической трансформации лесных осушенных болот Западной Сибири // Известия РАН. Серия биологическая. 2007. № 3. С. 360–366.

Загуральская Л.М. Микронаселение торфяно-болотных почв Томской области // Взаимоотношение леса и болота. Москва: Наука, 1967. С. 56–81.

Зименко Т.Г. Микробиологические процессы в мелиорированных торфяниках Белоруссии и их направленное регулирование. Минск: Наука и техника, 1977. 208 с.

Инишева Л.И., Дементьева Т.В. Скорость минерализации органического вещества торфа // Почвоведение. 2000. № 2. С. 196–203.

Инишева Л.И., Порохина Е.В., Аристархова В.Е, Боровкова А.Ф. Выработанные торфяные месторождения, их характеристика и функционирование. Томск: Изд-во ТГПУ, 2007. 177 с.

Инишева Л.И., Порохина Е.В., Головченко А.В. Биохимическая активность торфов различного генезиса // Сибирский вестник сельскохозяйственной науки. 2024. Том 54. № 5. С. 5–16. https://doi.org/10.26898/0370-8799-2024-5-1

Киреева Н.А., Рафикова Г.Ф., Щемелинина Т.Н., Маркарова М.Ю. Биологическая активность загрязненных нефтью и рекультивируемых торфяно-глеевых почв республики Коми // Агрохимия. 2008. № 8. С. 68–75.

Козловская Л.С. Роль беспозвоночных в трансформации органического вещества болотных почв. Ленинград: Наука, 1976. 211 с.

Купревич В.Ф., Щербакова Т.А. Почвенная энзимология. Минск: Наука и техника, 1966. 273 с.

Леонова О.А., Кочаровская Ю.Н., Волкова Е.М. Каталазная активность в торфах различного происхождения // Известия Тульского государственного университета. Естественные науки. 2020. № 2. С. 65–72.

Мелентьева Н.В. Почвы осушенных лесных болот. Новосибирск: Наука, 1980. 128 с.

Мелехина Е.Н., Макарова М.Ю., Щемелинина Т.Н., Анчугова Е.М., Канев В.В. Восстановительные сукцессии биоты в торфяной почве с нефтяным загрязнением при различных методах биологической рекультивации // Почвоведение. 2015. № 6. С. 740–750. https://doi.org/10.7868/S0032180X15060076

Мигунова Е.С. Лесоводство и естественные науки (ботаника, география, почвоведение). Харьков: Издательство «Майдан», 2001. 612 с.

Орлов Д.С. Гумусовые кислоты почв и общая теория гумификации. Москва: Издательство МГУ, 1990. 325 с.

Наумова Г.В., Жмакова Н.А., Макарова Н.Л., Рассоха Н.Ф., Овчинникова Т.Ф. Энзиматическая активность торфа естественной и разрабатываемой торфяной залежи // Природопользование. 2018. № 1. С. 208–216.

Переверзев В.Н. Биохимия гумуса и азота почв Кольского полуострова. Ленинград: Наука, 1987. 303 с.

Пономарева Т.А., Николаева В.В. Методы изучения органического вещества в торфяно-болотных почвах // Почвоведение. 1961. № 5. С. 88–95.

Хазиев Ф.Х. Системно-экологический анализ ферментативной активности почв. Москва: Наука, 1982. 203 с.

Хазиев Ф.Х. Методы почвенной энзимологии. Москва: Наука, 2005. 252 с.

Хазиев Ф.Х. Экологические связи ферментативной активности почв. Экобиотех. 2018. Том 1. № 2. С. 80–92. https://doi.org/10.31163/2618-964X-2018-1-2-80-92

Щербакова Т.А. Ферментативная активность почв и трансформация органического вещества (в естественных искусственных фитоценозах). Минск: Наука и техника, 1983. 222 с.

Alves R.J., Callejas I.A., Marschmann G., Mooshammer M., Singh H.W., Whitney B., Torn M.S., Brodie E.L. Kinetic Properties of Microbial Exoenzymes Vary with Soil Depth but Have Similar Temperature Sensitivities Through the Soil Profile // Frontiers in Microbiology. 2021. Vol. 12. Article 735282. https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.735282

Baldrian P., Stursova M. Enzymes in Forest Soils. In book: Soil Enzymology. Berlin: Springer-Verlag, 2011. P. 61–73.

Błońska E. Enzyme activity in forest peat soils // Folia Forestalia Polonica. 2010. Vol. 52. № 1. P. 20–25.

Bobuľská L., Fazekašová D., Angelovičová L. Vertical Profiles of Soil Properties and Microbial Activities in Peatbog Soils in Slovakia // Environmental Processes. 2015. Vol. 2. P. 411–418. https://doi.org/10.1007/s40710-015-0073-7

Brockett B., Prescott C., Grayston S. Soil Moisture is the Major Factor Influencing Microbial Community Structure and Enzyme Activities Across Seven Biogeoclimatic Zones in Western Canada // Soil Biology and Biochemistry. 2012. Vol. 44. No. 1. P. 9–20. https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2011.09.003

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

Dick R.P., Breakwell D.P., Turco R.F. Soil enzyme activities and biodiversity measurements as integrative microbiological indicators. In book: Methods for assessing soil quality. John W. Doran, Alice J. Jones (ed.). Soil Science Society of America Inc., 1996. P. 9–17.

Kujur M., Patel A.K. Kinetics of soil enzyme activities under different ecosystems: An index of soil quality // Chilean Journal of Agricultural Research. 2014. Vol. 74. P. 96–104. https://doi.org/10.4067/S0718-58392014000100015

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

Lasota J., Błońska E. C:N:P stoichiometry as an indicator of Histosol drainage in lowland and mountain forest ecosystems // Forest Ecosystems. 2021. Vol. 8 (1). P. 39. https://doi.org/10.1186/s40663-021-00319-7

Leifeld J., KleinK., Wüst-Galley Ch. Soil organic matter stoichiometry as indicator for peatland degradation // Scientific Reports. 2020. Vol. 10. Article number: 7634. https://doi.org/10.1038/s41598-020-64275-y

Gianfreda L., Bollag J.M. Influence of natural and anthropogenic factors on enzyme activity in soil. Book chapter: Soil Biochemistry. Vol. 9. G. Stotzky, J.M. Bollag (ed.). New York: Marcel Dekker Inc., 1996. P. 123–193.

Skujins J.J. Extracellular enzymes in soil // CRC critical reviews in microbiology. 1976. Vol. 4. No. 4. P. 383–421. https://doi.org/10.3109/10408417609102304

Wallenstein M.D., McMahon S.K., Schimel J.P. Seasonal variation in enzyme activities and temperature sensitivities in Arctic tundra soils // Global Change Biology. 2009. Vol. 15 (7). P. 1631–1639. https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2008.01819.x

Поступила в редакцию 31.01.2025
Принята 16.04.2025
Опубликована 25.04.2025

Сведения об авторах:

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

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

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

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Статья доступна по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License

Regression models of catalase activity and water regime as criteria for quality assessing of the drained soils of mire pine forests in West Siberia

© 2025 T. T. Efremova, S. P. Efremov, A. F. Avrova

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

The aim of the study *was to evaluate the influence of the depth of wetland hydrological reclamation on the quality of forest conditions by assessing statistically the relationship between the catalase activity of drained soils and environmental factors such as mire water levels, volume humidity, biological activity and soil humus status.*
Location and time of the study. *The southern taiga subzone of West Siberia for three years during May–October.*
Methods*. As an object for the study, we chose an open mire occupied by a natural pine forest with sphagnum, sedges and shrubs (56°23′ N, 84°34′ E) as the ground cover. The mire was drained 25–30 years ago. The level of ground water, moisture content and catalase activity of the peat soils were studied in seasonal dynamics from May till October with an increment of 5-8 days for three years. At the sites of prevailing surface plant cover of each forest type (sedge+sphagnum, reed grass and herbs+grasses+nettle), pits 0–50 cm were cm, peat monoliths taken, and soil profiles differentiated into 0–5, 5–10, 10–20 and 20–30 cm layers, according to soil colour, density and living roots content. Then the soil from the same depth was bulked to comprise a composite sample. Catalase activity was estimated in fresh soil sample by the permanganate technique.*
Results. *Excessive desiccation, as well as excessive moisture, reduced the enzymatic activity and soil fertility. Under dehumidification, the highest level of catalase activity was measured, which is a factor contributing to organic matter humification, stable humus formation (humate type), the preservation of biogenic elements reserves and high average annual increases of the high–quality wood.*

Conclusions. *Highly significant paired regression models based on second-order polynomials were obtained. The models can become the basis for developing techniques for managing the humus state, increasing and maintaining the fertility of peat soils when planning hydrotechnical engineering measures for the rational forestry development of mires.*

Keywords: *mesotrophic mires; peat soils; regression analysis; evaluation of statistical models; humus state; biogenic elements; stocks and quality of wood.*

How to cite: *Efremova T.T., Efremov S.P., Avrova A.F. Regression models of catalase activity and water regime as criteria for quality assessing of the drained soils of mire pine forests in West Siberia. The Journal of Soils and Environment. 2025. 8(1). e297. DOI: 10.31251/pos.v8i1.297 (in Russian with English abstract).*

FUNDING

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

REFERENCES

Agrochemical methods of soil research. Moscow: Nauka Publ., 1975. 656 p. (in Russian).

Arzamazova A.V., Galtsova A.D., Kinzhaev R.R., Grigoreva I.I. Effectiveness of various forms of nitrogen fertilizers in growing cereal grasses on oil-contaminated oligotrophic peat soil. Agrochemistry and Ecology Problems. 2023. No. 2. P. 41–47. (in Russian). https://doi.org/10.26178/AE.2023.51.52.007

Aristovskaya T.V. Microbiology of podzolic soils. Leningrad, 1965. 187 p. (in Russian).

Bambalov N.N., Smirnova V.V., Tanovitsky I.G. Belenky S.G. Rakovich V.A. The current state and prospects of using the peat fund of Belarus. Natural Resources. 2000. No. 3. P. 5–15. (in Russian).

Vompersky S.E. Biological foundations of the effectiveness of forest reclamation. Moscow: Nauka Publ., 1968. 312 p. (in Russian).

Glebov F.Z. On improving the accounting of the forestry reclamation fund in forest management in Western Siberia. Forestry. 1971. No. 1. P. 54–60. (in Russian).

Dergacheva M.I. The system of humic substances as a basis for diagnostics of paleosols and reconstruction of the paleogenic environment. Novosibirsk: Publishing House of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 2018. 292 p. (in Russian).

Draper N.R., Smith H. Applied regression analysis. In Book 1. Trans. see, 2nd ed., reprint. and additional. Moscow: Publishing House Finance and Statistics, 1986. 366 p. (in Russian).

Dirin V.A. Activity of catalase in peat of virgin and reclamated sites of lowland bog ecosystem. Tomsk State Pedagogical University Bulletin. 2009. No. 6 (84). P. 121–125. (in Russian).

Eliseeva I.I., Kurysheva S.V., Kosteeva T.V., Babaeva I.V., Mikhailov B.A. Econometrica. Moscow: Publishing House Finance and Statistics, 2003. 344 p. (in Russian).

Efremov S.P. On the introduction of drained swamps of the Tomsk region. In book: The relationship between forests and swamps. Moscow: Nauka Publ., 1967. P.141–174. (in Russian).

Efremov S.P. Pioneer stands of drained marshes. Novosibirsk: Nauka Publ., 1987. 248 p. (in Russian).

Efremov S.P., Efremova T.T., Kozlovskaya L.S., Krapivina L.A., Melentyeva N.V. Biological profile of drained peat soils of Western Siberia. Moscow: Nauka Publ., Prospekt VDNKH USSR, 1972. 4 p. (in Russian).

Efremov S.P., Efremova T.T. The effect of drainage on the loading of peat soil with roots of woody and herbaceous plants. In book: Comprehensive assessment of swamps and wetland forests in connection with their melioration. Novosibirsk: Nauka Publ., 1973. P. 113–127. (in Russian).

Efremov S.P., Efremova T.T., Pimenov A.V., Sedel'nikov M.V. Effects of radial growth in mire pine stands from the perspective of a phytosocial paradigm. Contemporary Problems of Ecology. 2024a. Vol. 17. No. 5. P. 670–681. https://doi.org/10.1134/S1995425524700458

Efremov S. P., Efremova T. T., Pimenov A. V., Sedel'nikova T. S. Structure of the Annual Ring Pool in Communities of Swamp and Dry Pine Forests Between Ob' and Tom' Rivers. Communication I: Methodological Substantiation and Forest Growing Conditions. Siberian Journal Forestry Science. 2024б. No. 5. P. 3–12. (in Russian). https://doi.org/10.15372/SJFS20240501

Efremova T.T. Soil formation during natural afforestation of drained swamps. Novosibirsk: Nauka Publ., 1975. 125 p. (in Russian).

Efremova T.T. Soil formation and diagnostics of peat soils of swamp ecosystems. Pochvovedenie. 1992. No. 12. P. 25–35. (in Russian).

Efremova T.T., Efremov S.P., Voronkov P.T. Regression analysis of enzymatic activity of drained peat soils. In book: Features of forest-marsh ecosystems of Western Siberia. Krasnoyarsk, 1978. P. 111–131. (in Russian).

Efremova T.T., Melentyeva N.V. Biological properties of peat soils in connection with forestry reclamation. Pochvovedenie. 1981. No. 2. P. 117–127. (in Russian).

Efremova T.T., Ovchinnikova T.M., Sukhovol'skii V.G. Multiparametric analysis of soil properties in the drained forest bogs of Western Siberia. Eurasian Soil Science. 2006. Vol. 39. No. 6. P. 588–596. https://doi.org/10.1134/S1064229306060020

Efremova T.T., Ovchinnikova T.M. Oxidoreductase activity of peat soils as an indicator of the degree of biochemical transformation of drained and forested bogs in West Siberia. Biology Bulletin. 2007. Vol. 34. No. 3. P. 297–302. https://doi.org/10.1134/S1062359007030132

Zaguralskaya L.M. Micro-population of peat-marsh soils of the Tomsk region. In book: The relationship between forests and swamps. Moscow: Nauka Publ., 1967. P. 56–81. (in Russian).

Zimenko T.G. Microbiological processes in reclaimed peat bogs of Belarus and their directional regulation. Minsk: Publishing House Science and Technology, 1977. 208 p. (in Russian).

Inisheva L.I., Dement'eva T.V. Mineralization rate of organic matter in peats. Eurasian Soil Science. 2000. Vol. 33. No. 2. P. 170–176.

Inisheva L.I., Porokhina E.V., Aristarkhova V.E., Borovkova A.F. Cutaway peat deposits, their characteristics and functioning. Tomsk: TSPU Publishing House, 2007. 177 p. (in Russian).

Inisheva L.I., Porokhina E.V., Golovchenko A.V. Biochemical activity of peats of different genesis. Siberian Herald of Agricultural Science. 2024. Vol. 54. No. 5. P. 5–16. (in Russian). https://doi.org/10.26898/0370-8799-2024-5-1

Kireeva N.A., Rafikova G.F., Shchemelinina T.N., Makarova M.Y. Biological activity of oil-contaminated and recultivated peat-gley soils of the Komi Republic. Agrokhimia. 2008. No. 8. P. 68–75. (in Russian).

Kozlovskaya L.S. The role of invertebrates in the transformation of organic matter in swamp soils. Leningrad: Nauka Publ., 1976. 211 p. (in Russian).

Kuprevich V.F., Shcherbakova T.A. Soil enzymology. Minsk: Science and Technology, 1966. 273 p. (in Russian).

Leonova O.A., Kocharovskaya YU.N., Volkova E.M. The catalase activity in peats of different origin. Izvestiya Tula State University. Natural Science. 2020. No. 2. P. 65–72. (in Russian).

Melentyeva N.V. Soils of drained forest swamps. Novosibirsk: Nauka Publ., 1980. 128 p. (in Russian).

Melekhina E.N., Markarova M.Y., Shchemelinina T.N., Anchugova E.M., Kanev V.A. Secondary successions of biota in oil-polluted peat soil upon different biological remediation methods. Eurasian Soil Science. 2015. Vol. 48. No. 6. P. 643–653. https://doi.org/10.1134/S1064229315060071

Migunova E.S. Forestry and natural sciences (botany, geography, soil science). Kharkiv: Publishing house "Maidan", 2001. 612 p. (in Russian).

Orlov D.S. Humic acids of soils and the general theory of humification. Moscow: Publishing House of Moscow State University, 1990. 325 p. (in Russian).

Naumova G.V., Zhmakova N.A., Makarova N.L., Rassokha N.F., Ovchinnikova T.F. Enzymatic activity of the peat of natural and developed peat deposit. Nature Management. 2018. No. 1. P. 208–216. (in Russian).

Pereverzev V.N. Biochemistry of humus and nitrogen of soils of the Kola Peninsula. Leningrad: Nauka Publ., 1987. 303 p. (in Russian).

Ponomareva T.A., Nikolaeva V.V. Methods of studying organic matter in peat-bog soils. Pochvovedenie. 1961. No. 5. P. 88–95. (in Russian).

Khaziev F.Kh. System-ecological analysis of the enzymatic activity of soils. Moscow: Nauka Publ., 1982. 203 p. (in Russian).

Khaziev F.Kh. Methods of soil enzymology. Moscow: Nauka Publ., 2005. 252 p. (in Russian).

Khaziev F.Kh. Ecological relations of the enzymatic activity of soil. Ecobiotech. 2018. Vol. 1. No. 2. P. 80–92. (in Russian). https://doi.org/10.31163/2618-964X-2018-1-2-80-92

Shcherbakova T.A. Enzymatic activity of soils and transformation of organic matter (in natural artificial phytocenoses). Minsk: Science and Technology, 1983. 222 p. (in Russian).

Alves R.J., Callejas I.A., Marschmann G., Mooshammer M., Singh H.W., Whitney B., Torn M.S., Brodie E.L. Kinetic Properties of Microbial Exoenzymes Vary with Soil Depth but Have Similar Temperature Sensitivities Through the Soil Profile. Frontiers in Microbiology. 2021. Vol. 12. Article 735282. https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.735282

Baldrian P., Stursova M. Enzymes in Forest Soils. In book: Soil Enzymology. Berlin: Springer-Verlag, 2011. P. 61–73.

Błońska E. Enzyme activity in forest peat soils. Folia Forestalia Polonica. 2010. Vol. 52. № 1. P. 20–25.

Bobuľská L., Fazekašová D., Angelovičová L. Vertical Profiles of Soil Properties and Microbial Activities in Peatbog Soils in Slovakia. Environmental Processes. 2015. Vol. 2. P. 411–418. https://doi.org/10.1007/s40710-015-0073-7

Brockett B., Prescott C., Grayston S. Soil Moisture is the Major Factor Influencing Microbial Community Structure and Enzyme Activities Across Seven Biogeoclimatic Zones in Western Canada. Soil Biology and Biochemistry. 2012. Vol. 44. No. 1. P. 9–20. https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2011.09.003

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

Dick R.P., Breakwell D.P., Turco R.F. Soil enzyme activities and biodiversity measurements as integrative microbiological indicators. In book: Methods for assessing soil quality. John W. Doran, Alice J. Jones (ed.). Soil Science Society of America Inc., 1996. P. 9–17.

Kujur M., Patel A.K. Kinetics of soil enzyme activities under different ecosystems: An index of soil quality. Chilean Journal of Agricultural Research. 2014. Vol. 74. P. 96–104. https://doi.org/10.4067/S0718-58392014000100015

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

Lasota J., Błońska E. C:N:P stoichiometry as an indicator of Histosol drainage in lowland and mountain forest ecosystems. Forest Ecosystems. 2021. Vol. 8 (1). P. 39. https://doi.org/10.1186/s40663-021-00319-7

Leifeld J., KleinK., Wüst-Galley Ch. Soil organic matter stoichiometry as indicator for peatland degradation. Scientific Reports. 2020. Vol. 10. Article number: 7634. https://doi.org/10.1038/s41598-020-64275-y

Gianfreda L., Bollag J.M. Influence of natural and anthropogenic factors on enzyme activity in soil. Book chapter: Soil Biochemistry. Vol. 9. G. Stotzky, J.M. Bollag (ed.). New York: Marcel Dekker Inc., 1996. P. 123–193.

Skujins J.J. Extracellular enzymes in soil. CRC critical reviews in microbiology. 1976. Vol. 4. No. 4. P. 383–421. https://doi.org/10.3109/10408417609102304

Wallenstein M.D., McMahon S.K., Schimel J.P. Seasonal variation in enzyme activities and temperature sensitivities in Arctic tundra soils // Global Change Biology. 2009. Vol. 15 (7). P. 1631–1639. https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2008.01819.x

Received 31 January 2025
Accepted 16 April 2025
Published 25 April 2025

About the authors:

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

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

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

The authors read and approved the final manuscript

The article is available under Creative Commons Attribution 4.0 License