Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Санкт-Петербургский государственный университет»

На правах рукописи

ПОЛЯКОВ ВЯЧЕСЛАВ ИГОРЕВИЧ

ОРГАНИЧЕСКОЕ ВЕЩЕСТВО КРИОГЕННЫХ ПОЧВ ДЕЛЬТЫ РЕКИ ЛЕНЫ: СОДЕРЖАНИЕ, СОСТАВ, СВОЙСТВА

Специальность 1.5.19 – Почвоведение

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата биологических наук

Санкт-Петербург
2025

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет».

Научный руководитель: **Абакумов Евгений Васильевич,**
Доктор биологических наук, профессор РАН, профессор кафедры прикладной экологии Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет»

Официальные оппоненты: **Дергачева Мария Ивановна**
Доктор биологических наук, профессор, главный научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт почвоведения и агрохимии СО РАН»

Каверин Дмитрий Александрович
Доктор географических наук, старший научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федеральный исследовательский центр «Коми научный центр УрО РАН»

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр «Пущинский научный центр биологических исследований РАН»

Защита состоится «____»_____2025 года в 10 ч. 00 мин. на заседании диссертационного совета 24.1.094.01 при ФГБУН Институт почвоведения и агрохимии СО РАН по адресу: 630090, г. Новосибирск, пр-т Ак. Лаврентьева, 8/2, ИПА СО РАН; тел./факс (383) 363-90-25; e-mail: soil@issa-siberia.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ИПА СО РАН https://www.issa-siberia.ru и на официальном сайте ВАК Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

Автореферат разослан «_____» _____2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.1.094.01,
кандидат биологических наук Гуркова Е.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В настоящее время к Арктическому биоклиматическому поясу приковано пристальное внимание ученых, это связано с высокими рисками трансформации ландшафтов в условиях прогнозируемого мировым научным сообществом климатического кризиса (Knoblauch et al., 2013; Ping et al., 2015; Gavrilov and Pizhankova, 2018; Schiedung et al., 2022). Интенсивная деградация многолетнемерзлых пород (ММП) и высвобождение биогенных элементов из почв, подверженных влиянию ММП, может привести к увеличению эмиссии парниковых газов в атмосферу, а также трансформации части ландшафтов (Schuur et al., 2015; Turetsky et al., 2020; Hugelius et al., 2020). Криолитозона включает до 27% территории материков, находящейся выше 50° с.ш., в ее почвах и ММП накоплено около 1600 Пг (10^{15} г) органического углерода в слое до 3 м (Kaiser et al., 2007; Köchy et al., 2015; Biskaborn et al., 2019; Schiedung et al., 2022). Почвенное органическое вещество (ПОВ) – это продукт, который аккумулируется в почве в виде неразложившихся, а также различной степени разложения органических остатков. ПОВ поддерживает ключевые экологические функции почвы и обеспечивает имплементацию таких экосистемных услуг, как регулирование климата, круговорот питательных веществ и производство первичной продукции, поскольку оно имеет решающее значение для стабилизации структуры почвы, регулирования режимов питания растений и водного режима почвы (Chen et al., 2016; Jackson et al., 2017; Polyakov et al., 2020b; Поляков, Абакумов, 2021). Местные геогенные особенности, климатические условия и тип землепользования определяют различные уровни стабилизации гумусовых веществ в почве (Chukov et al., 2015). Влияние сурового климата на арктические почвы приводит к аккумуляции и депонированию преимущественно слаборазложенных растительных остатков, а их роль в обеспечении стабильности гумосферы оценена лишь поверхностно (Поляков, Абакумов, 2021).

В связи с этим, особое внимание приковано к мониторингу арктических почв, в частности темпам гумификации и стабилизации ПОВ в условиях развития криогенных процессов. Угроза деградации ММП распространяется не только на природные экосистемы, но также и на участки земель, занятые человеком. Вопросам деградации ММП посвящено значительное количество работ (Zubrzycki et al., 2014; Schuur et al., 2015; Chen et al., 2016; Jackson et al., 2017; Turetsky et al., 2020), поскольку данный процесс имеет сильное влияние на биогеохимический круговорот в целом. При этом, из-за большой площади территорий, подверженных влиянию мерзлоты, и суровых климатических условий, мониторинг и изучение данных земель имеет локальный характер. Большое количество работ направлено на изучение пула органического углерода в почвах и эмиссии парниковых газов (Köchy et al., 2015; Chukov et al., 2015; Pengerud et al., 2017; Biskaborn et al., 2019; Schiedung et al., 2022). Между тем, вопросам стабилизации ПОВ посвящено относительно немного работ (Hugelius et al., 2020; Vasilevich et al., 2022).

Дельта реки Лены является крупнейшим ландшафтным комплексом, расположенным в Арктике (Большиянов и др., 2013). Формирование почв в дельте реки в значительной степени определяется рельефообразующими процессами (русловыми и аллювиальными), а также почвенным криогенезом. Влияние реки, которая оказывает отепляющий эффект, приводит к формированию высокопродуктивных фитоценозов на относительно молодых участках дельтового комплекса (Большиянов и др., 2013). Условия, в которых развиваются его почвы, довольно сильно отличаются от континентальных вариантов, формирующихся на той же широте, либо от почв, формирующихся на побережье арктических морей (Polyakov et al., 2018a). Это связано с относительно низкой степенью проявления криогенных процессов в дельте реки Лены. Тем не менее, из-за сложной геоморфологической организации дельты, здесь развиваются различные по генезису почвы и аккумулируется существенное количество ПОВ (Polyakov et al., 2022). Однако условия трансформации органического вещества в почвах, развивающихся в различных ландшафтах крупнейшей арктической дельты России к настоящему времени, нельзя считать раскрытыми. Это и определяет актуальность данной научной работы.

Цель и задачи исследования. Целью данного исследования является комплексное изучение основных параметров накопления и трансформации почвенного органического вещества, морфогенеза почв и условий почвообразования в дельте реки Лены для выявления их вклада в глобальный цикл углерода, определения позиции в современной почвенной номенклатуре и их экологических функций.

В соответствии с этим были поставлены следующие задачи исследования:

1. определить морфометрическую организацию и дать морфометрическую характеристику почв;

2. оценить влияние криогенеза на основные физико-химические параметры почв и его влияние на процессы трансформации органоминеральной части почв, формирующихся на различных террасах реки Лены;

3. определить показатели микробиологической активности почв, развивающихся под действием аллювиальных и криогенных процессов;

4. исследовать основные закономерности трансформации органических соединений почв и почвоподобных тел дельты реки Лены.

Объект исследования. Объектом настоящего исследования являются синлитогенные и постлитогенные почвы дельты реки Лены, формирующиеся под действием криогенеза.

Предмет исследования. Предметом настоящего исследования являются почвенные процессы, связанные с гумификацией, поступлением и трансформацией органических соединений в почвах дельты реки Лены.

Положения, выносимые на защиту.

1. В дельте реки Лены аллювиальные процессы, включающие высвобождение органического вещества из тающего ледового комплекса, играют ключевую роль в почвообразовании. Этот привнос органического

вещества, в сочетании с влиянием реки на водный и тепловой режимы, определяет формирование специфических мерзлотных пойменных почв.

2. В зависимости от длительности действия криогенных процессов, происходит трансформация органоминеральной части почв с формированием устойчивых биогенных пылевато-глинистых агрегатов.

3. Современные методы анализа почвенного органического вещества позволили выявить, что молекулярный состав гуминовых кислот, извлеченных из почв дельты реки Лены, характеризуется относительно высоким уровнем стабилизации почвенного органического вещества.

Научная новизна. Исследования в дельте реки Лены проводятся уже более 20 лет в рамках международного сотрудничества. При этом для криогенных почв данного региона существенная часть результатов получена нами впервые. Были получены сведения о химических и биологических свойствах криогенных почв крупнейшего дельтового комплекса арктической зоны, а также охарактеризовано его почвенное разнообразие. В ходе выполнения работы с использованием современных инструментальных методов анализа состава органического вещества получены уникальные данные о молекулярном и элементном составе гуминовых кислот, извлеченных из криогенных почв дельты. В почвах дельты впервые изучены особенности трансформации минеральной части почв в условиях криогенеза при помощи микроморфологического анализа почвенных микрошлифов. Были получены новейшие данные о накоплении и трансформации химических соединений в почвах дельты и их связи с деятельностью крупной реки. Опробован метод почвенно-геоморфологического картографирования территории дельты реки Лены на основе высокоточных снимков с БПЛА, позволивший выделить различные элементы ландшафта и связанные с ними почвы, в дальнейшем данный метод может быть использован для картографирования труднодоступных мест.

Теоретическая и практическая значимость работы. Полученные данные могут быть использованы при моделировании глобального цикла углерода в северных широтах и почвах, подверженных влиянию ММП. Использование полученных результатов делает возможным прогнозирование вклада ПОВ, находящегося в мерзлых породах, на изменение климата планеты. Метод почвенно-геоморфологического картирования на основе БПЛА, применяемый в данной работе, может быть использован для исследования труднодоступных участков арктической зоны. Результаты работы могут быть использованы при чтении лекционных курсов по таким дисциплинам как «Экология почв», «Химия почв» и др. Исследование ориентировано на реализацию: 1. перечня «Об Основах государственной политики Российской Федерации в Арктике на период до 2035 года» (Указ Президента РФ от 5 марта 2020 г. N 164) (Указ …, 2020). 2. «Целей устойчивого развития ООН и России. Борьба с изменением климата» (Цели…, 2016). 3. инициативы «4 на 1000 (4 промилле) новые осязаемые глобальные вызовы для почв» (Иванов и Столбовой, 2019). 4. проекта по созданию сети «Карбоновые полигоны России» (Приказ…, 2021). Важнейшего инновационного проекта государственного значения (ВИП ГЗ) «Национальная

система мониторинга динамики климатически активных веществ в наземных экосистемах РФ» (Распоряжение …, 2022).

Методология и методы исследования. Методология исследования заключалась в выявлении основных закономерностей трансформации органических соединений в почвах, подверженных влиянию криогенеза в крупнейшем дельтовом комплексе мира и их вклада в углеродный баланс Арктического биоклиматического пояса. Программа исследований включала проведение маршрутно-полевых экспедиций, заложение почвенных разрезов, статистическую обработку данных, анализ и интерпретацию полученных результатов. В ходе полевых исследований в дельте реки Лены в период с 2015 по 2022 гг. заложено и описано 140 полнопрофильных почвенных разрезов с различных островов дельты реки Лены, а также коренных берегов дельты. Определение физических, химических и биологических параметров почв было проведено согласно общепринятым руководствам. Картографический анализ проводился в программных комплексах ArcGIS и QGIS. Статистическая обработка результатов была выполнена в программах STATISTICA 12, PAST ver. 3.08 и GraphPad Prism 9. Определение классификационной принадлежности почв проводилось в соответствии с действующей отечественной классификацией (Шишов и др., 2004), а также международной классификацией почв (IUSS Working Group WRB, 2022).

Степень достоверности и апробация работы. Степень достоверности результатов исследований обусловлена достаточностью количества проведенных лабораторных и полевых исследований, применением современных инструментальных методов исследования, а также статистической обработкой полученных результатов.

Материалы диссертации опубликованы в 13 статьях в рецензируемых изданиях из списка ВАК, в том числе в 11 статьях в журналах международных баз Web of Science и Scopus, в 10 публикациях в сборниках материалов российских и международных конференций, а также получено свидетельство о регистрации базы данных. Материалы диссертации были представлены на конференциях: «Гуминовые вещества в биосфере» в Москве (2018а); «Устойчивое развитие территорий: теория и практика» в Сибае, Башкортостан (2018б); «Геология и минерально-сырьевые ресурсы Северо-Востока России» в Якутске (2018в); «Ломоносов-2018» (2018г); «Polar System Under Pressure», Росток, Германия (2018с); конференции EGU (2018d); на конференции Беломорской студенческой научной сессии СПбГУ в Санкт-Петербурге (2020); на конференции «Focus Siberian Permafrost», Гамбург, Германия (2021с); на конференции «Почвы и окружающая среда» в Новосибирске (2023а); «Мерзлотные почвы в Антропоцене» в Салехарде (2023b).

Личный вклад автора. Личный вклад автора состоит в постановке цели и задач исследования, планировании научной работы, выполнении полевых исследований и отбора образцов, обзоре литературы, соответствующей тематике работы, проведении лабораторных исследований, анализе и интерпретации данных совместно с научным руководителем и соавторами публикаций,

статистической обработке полученных данных, написании и оформлении текста работы и публикаций по выполненной работе.

Структура работы. Работа состоит из введения, обзора литературы, объектов и методов исследования, результатов исследования и их обсуждения, выводов, списка литературы, включающего 267 наименований, среди которых 148 источников на русском языке и 119 – на иностранном, а также приложений. Работа изложена на 201 странице машинного текста, включая 13 таблиц, 40 рисунков и приложения А–Г.

Благодарности. Автор выражает благодарность научному руководителю, и.о. заведующего кафедры Прикладной экологии Санкт-Петербургского государственного университета, профессору, д.б.н. Е.В. Абакумову за всестороннюю помощь на всех этапах исследования. Автор признателен директору федерального государственного бюджетного учреждения «Арктический и Антарктический научно-исследовательский институт» (ААНИИ), д.г.н. А.С. Макарову за помощь в организации экспедиционных работ в дельте реки Лены. Автор также выражает глубокую признательность начальнику экспедиции «Лена», ведущему научному сотруднику отдела Географии полярных стран ААНИИ д.г.н. Д.Ю. Большиянову за помощь в экспедиционных работах и консультации по вопросам формирования и развития дельты реки Лены. Автор благодарит заведующего кафедрой Почвоведения и агрохимии им. Л.Н. Александровой Санкт-Петербургского государственного аграрного университета д.с.-х.н. А.В. Лаврищева за консультации при подготовке работы. Автор признателен младшему научному сотруднику отдела Географии полярных стран ААНИИ С.А. Правкину за помощь в ходе полевых исследований в дельте реки Лены, младшему научному сотруднику кафедры прикладной экологии СПбГУ Т.И. Низамутдинову за помощь в проведении лабораторных исследований и статистического анализа полученных результатов, а также младшему научному сотруднику ФИЦ «Почвенный институт им. В.В. Докучаева» К.С. Орловой за моральную поддержку. Автор благодарит сотрудников кафедры Прикладной экологии Санкт-Петербургского государственного университета за помощь в проведении лабораторных исследований. Автор благодарит коллектив Ресурсных центров СПбГУ по направлениям: «Магнитно-резонансные методы исследования» и «Методы анализа состава вещества» за помощь в организации исследований.

ГЛАВА 1. ОБЗОР СОВРЕМЕННЫХ ДОСТИЖЕНИЙ НАУКИ В ОБЛАСТИ ИЗУЧЕНИЯ ПОЧВ, ФОРМИРУЮЩИХСЯ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ПОЧВЕННОГО КРИОГЕНЕЗА

В главе рассматриваются вопросы формирования арктических почв, история развития почвенного криогенеза в России. Представлен обзор работ, направленных на изучение основных почвообразовательных процессов, действующих в Арктической зоне. Рассмотрены особенности формирования почв в поймах рек, история изучения строения гумусовых веществ, основные

методы анализа состава органического вещества почв, а также механизмы стабилизации органического вещества почв.

ГЛАВА 2. ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Дельта реки Лены является крупнейшей дельтой, расположенной в арктической зоне (Большиянов и др., 2013; Поляков и Абакумов, 2021). Она характеризуется наличием трех геоморфологических уровней и активной поймы. Климат – арктический континентальный, со среднегодовой температурой воздуха в центральной части –11,6°С. Среднее количество осадков в летний период составляет 125 мм. В результате полевых работ были исследованы острова и почвы вдоль крупнейших проток дельты реки Лены (рис. 1).

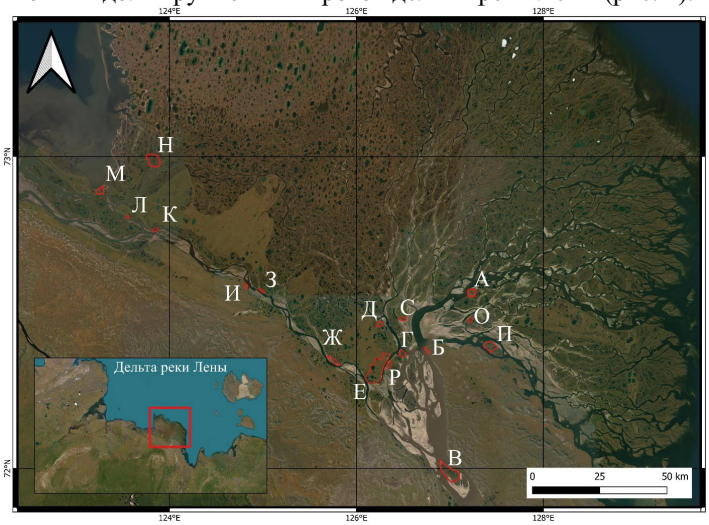


Рисунок 1 – Объекты исследования в дельте реки Лены.
Условные обозначения: А – о. Сардах, Б – Харулахский хребет, В – о. Тит-Ары, Г – о. Самойловский, Д, Е, Ж – о. Курунгнах, З – о. Джан-Гылах, И – кряж Чекановского, К, Л – о. Харданг, М – о. Эби-Басын Сисе, Н – о. Джипириес, О – о. Ботулу-Сисе, П – о. Чай-Ары, Р, С – острова без названия

Основные параметры почв были изучены общепринятыми методами: плотность твердой фазы – весовым методом (Рожков и др., 2002), гранулометрический состав – методом Качинского (Рожков и др., 2002). Для исследования микроморфологического состава были подготовлены почвенные шлифы, их анализировали с помощью поляризационного микроскопа в параллельных и скрещенных николях. Содержание углерода и азота в почвах и ГК определялось методом сухого сжигания. Для определения химического состава почв выполнен рентгенофлуоресцентный анализ. Молекулярный состав ГК определялся методом ^{13}С-ЯМР спектроскопии. Значения pH почвы измеряли согласно ГОСТ 26423-85. В образцах почв оценивали базальное дыхание по

скорости образования CO_2 в лабораторных условиях (Assessment methods…, 2001). Уровень потенциально минерализуемого углерода определялся по скорости образования CO_2 в течение 19 недель. В полевом инкубационном эксперименте эмиссия CO_2 и CH_4 определялась на газовом хроматографе Agilent 6890. Для создания почвенно-геоморфологической карты о. Самойловский были проанализированы данные ДЗЗ с применением БПЛА в программном комплексе ГИС. Химические и биологические показатели почв оценены в трех повторностях и выражены как среднее ± с.о. Для обобщения и визуализации пространственного варьирования данных выполнен анализ PCA, определен коэффициент корреляции Спирмена, кластерный анализ (метод Уорда). Для определения достоверности различий использовался факторный дисперсионный анализ, различия считались достоверными при $p \leq 0.1$.

ГЛАВА 3. ОБЩИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ КРИОГЕННОГО ПОЧВООБРАЗОВАНИЯ В ДЕЛЬТЕ РЕКИ ЛЕНЫ

3.1. Морфометрическая характеристика исследуемых почв дельты реки Лены и их положение в почвенной классификации

Почвообразование в дельте реки Лены осуществляется как по зональным, так и по интразональным вариантам, формирующиеся здесь почвы существенно отличаются от тех, что образуются на коренном берегу реки. Это связано с тем, что река оказывает отепляющий эффект на почвы, что отражается в относительно низкой степени развития криогенных процессов в почвах, формирующихся на первой террасе. Почвы второй и третьей террасы образуются под действием зональных факторов почвообразования, т.к. длительное время не подвергаются периодическому затапливанию.

На первой террасе происходит образование стратоземов на участках, которые подвержены периодическому затоплению и соответственно привносу свежего речного материала. Альфегумусовые почвы развиваются на участках, которые относительно недавно вышли из-под влияния реки и формируются под действием криогенеза. Развитие криогенных почв происходит на участках не подверженных активному влиянию реки. Глеевые почвы формируются в наиболее переувлажненных участках. Торфяно-эутрофные почвы формируются на участках водораздельных равнин. Почвы второй террасы подвержены более глубокому проявлению криогенных процессов и довольно сильно отличаются от аналогов первой террасы ввиду развития почвенного криогенеза. Здесь развиваются почвы отдела криоземов. Третья терраса характеризуется наличием ЛК. Здесь происходит формирование аласов, булгунняхов, нанополигональной тундры, и наблюдается активная трансформация береговой зоны в результате таяния ЛК. Почвенное разнообразие данной террасы представлены криогенными, глеевыми и торфяными отделами почв.

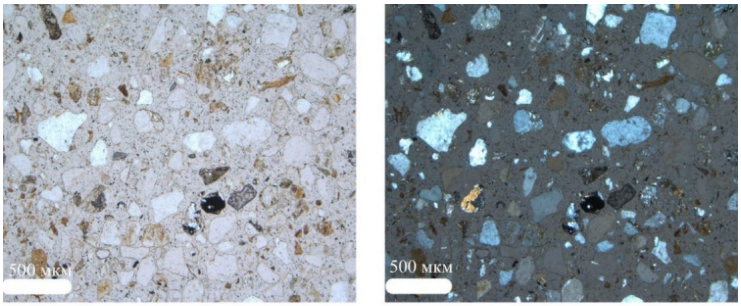
3.2. Физико-химическая характеристика почв дельты реки Лены

Величина pH в почвах дельты реки Лены варьирует от кислой до слабощелочной. В зависимости от положения в ландшафте и приуроченности

почв к геоморфологическим террасам прослеживается четкая смена реакции. В мелкоземе всех изученных почв отмечается преобладание песчаной фракции. В зависимости от положения в ландшафте и длительности процессов почвообразования были выделены песчаные, супесчаные, а также легко– и среднесуглинистые почвы. По данным химического состава почв было установлено, что наиболее распространёнными соединениями являются SiO_2, Fe_2O_3, Al_2O_3. В связи с увеличением почвенной кислотности происходит миграция оксидов железа и алюминия, что приводит к формированию железистых пленок на поверхности почвенных агрегатов.

3.3. Микроморфологические особенности разновозрастных криогенных почв дельты реки Лены

Микростроение почвенной массы почв первой террасы представлено плохо сортированным песком с кольцевым типом ориентации, что указывает на влияние реки, аморфным органическим веществом, слюдами (мусковит/биотит) и Fe/Mg конкрециями в виде железистых пленок на поверхности минералов (рис. 2). Криогенная активность в структуре слабая. Минералогический состав имеет низкую степень трансформации.

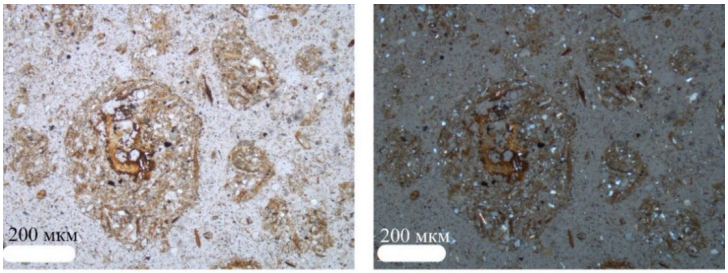


(а) (б)

Рисунок 2 – Микростроение почвы, находящейся в условиях активного затопления. а – проходящий поляризованный свет; б – скрещенный поляризованный свет

В изученных шлифах почв о. Сардах (рис. 3) наблюдается формирование пылевато-песчаных агрегатов с инкорпорированным в них органическим веществом, что обуславливает физическую стабилизацию ПОВ. Основные типы минералов – слюды (мусковит, биотит), гидрослюды (иллит, вермикулит, глауконит) и алюмосиликаты.

Почвенный криогенез играет важную роль в формировании почв в дельте реки Лены, при этом физическое выветривание является ведущим типом выветривания для данной территории.



(а) (б)

Рисунок 3 – Биогенные агрегаты. О. Сардах. а – проходящий поляризованный свет; б – скрещенный поляризованный свет

ГЛАВА 4. ОРГАНИЧЕСКОЕ ВЕЩЕСТВО ПОЧВ ДЕЛЬТЫ РЕКИ ЛЕНЫ: СОДЕРЖАНИЕ, ЗАПАСЫ И МОЛЕКУЛЯРНОЕ СТРОЕНИЕ

4.1. Микробиологическая активность и уровни потенциального минерализуемого углерода

Исходя из полученных данных, мы можем отметить, что наибольшая микробиологическая активность приходится на подбуры, развивающиеся на затапливаемой территории. Видимо, в условиях периодического затопления и привноса питательных веществ в почве формируются благоприятные условия для почвенной микробиоты. Наименьший показатель микробиологической активности отмечен в подбурах, на формирование которых влияет эоловый процесс накопления минерального материала. Данные почвы с поверхности перекрываются минеральными частицами, что угнетает почвенную биоту и приводит к снижению микробиологической активности (рис. 4).

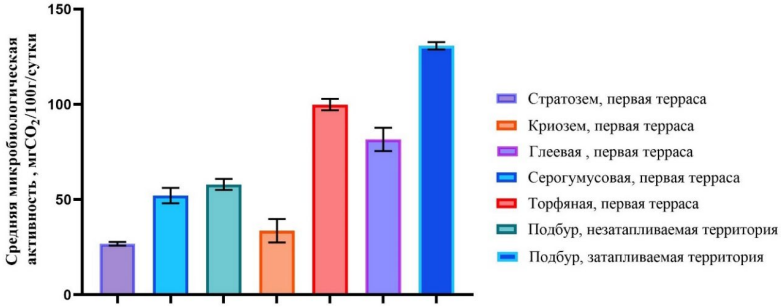


Рисунок 4 – Средние значения микробиологической активности среди различных отделов почв. Среднее±стандартное отклонение, различие средних значимо при $p \leq 0,1$

Был проведен анализ уровня потенциально минерализуемого углерода в почвах дельты реки Лены (рис. 5).

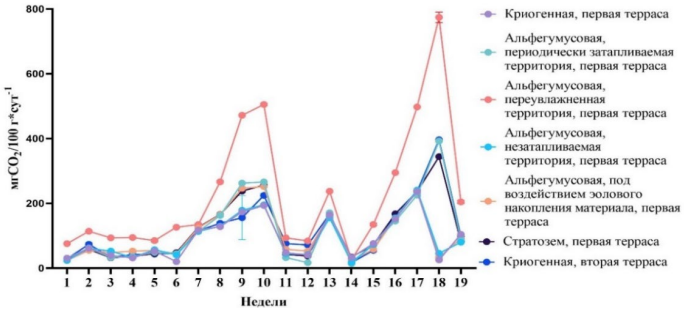


Рисунок 5 – Значения потенциального уровня минерализации углерода. Ось OY – микробиологическая активность (мгCO_2/100 г*сут$^{-1}$), ось OX – недели

Такое распределение в первую очередь связано с различным временем трансформации микробиотой различных фракций органического вещества исследуемых почв.

4.2. Содержание и запасы почвенного органического вещества в различных ландшафтных позициях дельты реки Лены

Для исследования закономерностей распределения ПОВ был проведен анализ содержания органического вещества в различных ландшафтных позициях о. Самойловский (рис. 6). Наибольшее содержание ПОВ отмечается на первой террасе, на участках, которые не подвержены процессу затопления. Участки с наибольшим содержанием ПОВ находились в зоне распространения криогенных и торфяных почв. В стратоземах на затапливаемой территории острова накапливается меньшее количество ПОВ в верхнем органо-аккумулятивном горизонте, что может быть связано со стратификацией почвенных горизонтов. Запасы ПОВ представлены на рисунке 7.

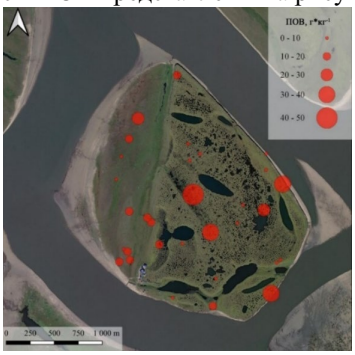


Рисунок 6 – Пространственное распределения ОВ в почвах на о. Самойловский в верхних 0–20 см

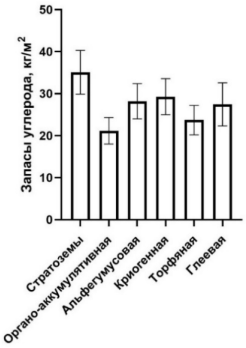
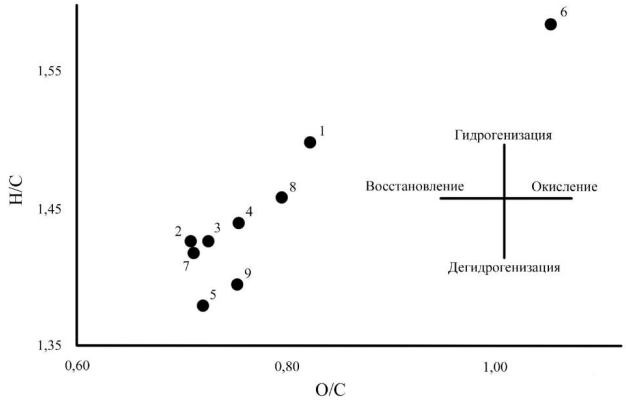


Рисунок 7 – Запасы углерода на глубине 0–100 см в различных отделах почв дельты реки Лены

Наибольшие запасы углерода при этом характерны для стратоземов, до 35,1 кг/м^2, это связано с процессами стратификации и периодическим отложением свежего речного аллювия на погребенных органоминеральных почвенных горизонтах. В условиях высокой аэрации и накопления большого количества химических соединений в почвах данного типа формируются благоприятные микробиологические условия, что приводит к образованию и трансформации гумуса. Почвы, принадлежащие к стволам постлитогенного и органогенного образования, отличаются меньшим запасом гумуса, это связано с накоплением ПОВ в верхних почвенных горизонтах, тогда как в нижележащих горизонтах почв, содержание органического углерода относительно низкое.

4.3. Молекулярное строение почвенного органического вещества

Элементный состав ГК почв в различных элементах ландшафта: алас (третья терраса), органоминеральный материал из ЛК и участки вне дельтового комплекса, Харулахский хребет и кряж Чекановского, показал, что содержание углерода в исследуемых образцах ГК довольно низкое и находится в узком диапазоне (43–46%), в то время как содержание углерода в образце из мерзлых грунтов ЛК заметно ниже (38%). Это может указывать на высокую степень окисления углерода в составе ГК. Содержание кислорода в исследованных образцах сопоставимо с содержанием углерода, в образце ГК из ЛК отмечено высокое содержание кислорода (53%). Одним из методов изображения элементного состава ГК из почв является графическое представление соотношения H/C к O/C (рис. 8).



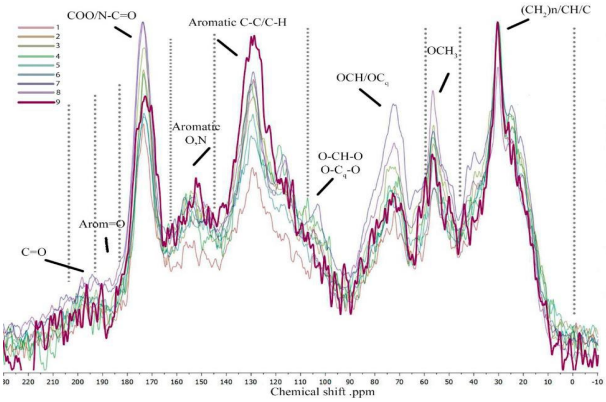
1–5 – алас,
6– отложения ЛК,
7-8– почвы с Харулахского хребта,
9 – почва ветрового убежища с хребта Чекановского

Рисунок 8 – Поля распределения показателей элементного состава в координатах H/C-O/C гуминовых кислот

Было установлено, что образец ГК, извлеченный из органоминеральных отложений ЛК, характеризуется относительно высокой степенью окисления и гидрогенизации, что может указывать на активные процессы внутримолекулярной трансформации ГК и разветвления алифатической

периферии за счет длительного нахождения органоминеральных отложений в мерзлом состоянии. Остальные исследованные образцы имеют схожие отношения H/C и O/C, что указывает на сходные условия формирования ГК.

Методом ^{13}C ЯМР-спектроскопии идентифицированы различные фрагменты молекул в составе ГК. В изученных почвах отмечено преобладание алифатических структурных фрагментов ГК (59–67%), их преобладание свидетельствует о высоком содержании алифатических структурных фрагментов в составе прекурсоров гумификации, а также о низкой степени трансформации растительных остатков в почве. В то же время, по сравнению с тундровыми почвами европейской территории России, молекулярный состав исследованных ГК обладает относительно высоким содержанием ароматических структурных фрагментов, что может указывать на их устойчивость к биодеградации (рис. 9).



1–5 – алас,
6 – отложения ЛК,
7–8 – почвы с Харулахского хребта,
9 – почва из ветрового убежища с кряжа Чекановского

Рисунок 9 – CP/MAS ^{13}C – ЯМР спектры ГК, извлеченных из почв дельты реки Лены

В зависимости от степени гидроморфизма и качества прекурсоров гумификации в почвах накапливается различное количество ароматических и алифатических структурных фрагментов в ГК. Это обусловлено формированием различных типов растительности, а также влиянием криогенеза на процесс гумификации в почве. Полученные данные о строении ГК извлеченных из почв аласа на о. Курунгнах указывают на то, что ГК в почвах аласа характеризуются достаточно однородным составом, что может свидетельствовать о схожих факторах, влияющих на трансформацию органического вещества. ГК почв с Харулахского хребта и кряжа Чекановского характеризуются относительно высоким уровнем содержания ароматических структурных фрагментов (до 33–35%). Это может быть связано с отсутствием ММП, так как почвенный покров формируется непосредственно на скальных породах.

Ежегодно из-за воздействия береговой эрозии и абразии происходит разрушение ЛК дельты реки Лены, и огромное количество органоминеральных веществ поступает в окружающую среду из мерзлого состояния. Было

установлено, что данный материал содержал наибольшее количество ароматических структурных фрагментов в составе ГК. Видимо, в результате накопления здесь различных органических остатков и их длительной трансформации происходит конденсация высокомолекулярных соединений, что приводит к увеличению содержания ароматических структурных фрагментов в ГК.

Характерной чертой криогенных почв является наличие погребенных органических горизонтов на границе с ММП, данное органическое вещество может быть вновь включено в биогеохимический цикл углерода, и внести существенный вклад в изменение климата на планете. Анализ внутрипрофильного распределения ГК из почв второй и третьей террас показал, что ГК, извлеченные из погребенных горизонтов почв, отличаются относительно высоким содержанием ароматических структурных фрагментов по сравнению с верхними горизонтами современных почв. Это может подтверждать тезис о том, что в результате термодинамического отбора, полимеризации происходит отбор наиболее устойчивых молекул в составе ГК.

В исследуемых препаратах ГК накапливается до 42% ароматических структурных фрагментов, что обусловливает стабилизацию органического вещества в почвах. Стабилизация ПОВ определена длительностью трансформации органического вещества под действием криогенеза и качеством прекурсоров гумификации.

ВЫВОДЫ

1. Почвы дельты формируются на трех разновозрастных геоморфологических террасах, их образование обусловлено проявлением русловых, аллювиальных и криогенных процессов. Анализ морфометрических характеристик почв показал, что под действием процессов криогенеза происходит изменение на макро– и микроуровнях организации почвенного профиля. В ходе процессов промерзания/оттаивания, происходит формирование диагностических криогенных горизонтов, с явными признаками криогенного массообмена, формированием геохимического барьера на границе с ММП, а также накопление слабо трансформированных органических остатков. Для почв, не подверженным русловым процессам, характерно проявление процессов миграции Al-Fe гумусовых комплексов в случае отдела альфегумусовых почв, торфонакопление, а также оглеение горизонтов вблизи границы ММП.

2. Развитие почв на различных геоморфологических террасах обуславливает их химический и минералогический состав. На участках, подверженных периодическому затоплению, кислотно-основные свойства почв способны меняться в диапазоне pH от слабощелочного до нейтрального, что обусловлено размыванием карбонатных пород в среднем и нижнем течении реки. На участках, вышедших из зоны периодического затопления, формируются слабокислые почвы. Влияние реки и криогенных процессов проявляется в накоплении химических элементов в почвах дельты. Было достоверно установлено что большая часть исследованных химических элементов (TiO_2, ZrO_2, CaO, Rb_2O,

SiO_2, SrO_2, K_2O) накапливается на затапливаемых участках, в то время как Fe_2O_3, и MnO, накапливается на участках, не подверженных влиянию реки, и связаны с процессами выветривания в почве. Анализ микрошлифов почв показал, что в результате взаимодействия процессов промерзания/оттаивания запускается процесс криоэлювиогенеза, который приводит к разрушению крупных минеральных частиц и формированию устойчивых биогенных пылевато-глинистых агрегатов. Увеличение содержания железа и марганца в почве приводит к ожелезнению органоминеральных агрегатов, что является характерным этапом физической стабилизации ПОВ.

3. Гетерогенность условий почвообразования и почвенный гидроморфизм довольно сильно влияют на микробиологическую активность изученных почв. Наибольшая микробиологическая активность отмечена в подбурах, которые подвергаются затоплению. Аккумуляция аллювиальных отложений, в том числе органического вещества, благоприятно сказывается на микробиологической активности данных почв. В почвах, которые формировались в голоцене (первая терраса), уровень микробиологической активности выше, чем в почвах, сформировавшихся в позднем плейстоцене (третья терраса). В результате широкого распространения оглеения, на почвах третьей террасы отмечается уменьшение микробиологической активности, как следствие формирования анаэробных условий. Высокое содержание потенциально-минерализуемого органического вещества обнаружено в гидроморфных почвах. Высокий потенциал для минерализации органического вещества связан с возможной трансформацией различных по химическому составу фрагментов ПОВ.

4. Наибольшее содержание ПОВ отмечается в криогенных и торфяных почвах дельты реки Лены, однако наибольшие запасы наблюдаются в стратоземах водно-аккумулятивного генезиса. Под действием процессов криогенного массообмена происходит перераспределение и депонирование органического вещества в состав ММП. В условиях деградации мерзлоты и береговой абразии, данный органический материал может быть вынесен на дневную поверхность и подвержен активным процессам трансформации. Элементный состав ГК изученных почв характеризуется относительно низким содержанием углерода, до 43%. На основе рассчитанных атомных отношений H/C и O/C, согласно диаграмме ван Кревелена, было выявлено, что ГК почв отличаются от таковых в отложениях ЛК, и в них сильнее развиты процессы дегидрирования. Анализ структурного состава ГК методом ^{13}C-ЯМР спектроскопии показал, что доля ароматических структурных фрагментов в молекулярном составе ГК почв дельты реки Лены достигает 42%. На участках дельты с более активным проявлением криогенных процессов формируются мохово-лишайниковые сообщества, характеризующиеся низким содержанием лигнина, что приводит к накоплению алифатических фрагментов в ГК. Для участков дельты с менее активным проявлением криогенных процессов характерно формирование растительных сообществ с преобладанием сосудистых растений с относительно высоким содержанием лигнин-содержащих фрагментов. Смена прекурсоров гумификации приводит к увеличению

содержания ароматических структурных фрагментов в составе ГК, что обуславливает стабилизацию ПОВ.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

По теме диссертации опубликовано 13 статей в журналах изданий, в том числе входящие в базы Scopus и/или WoS (11) и изданиях РИНЦ (2), а также получено свидетельство о регистрации базы данных:

– **Polyakov, V**. Evaluation of carbon stocks in the soils of Lena River Delta on the basis of application of “dry combustion” and Tyurin’s methods of carbon determination / V. Polyakov, K. Orlova, E. Abakumov // Biological Communications. – 2017. – № 62(2). – P. 67–72.

– **Polyakov, V**. Landscape-dynamic aspects of soil formation in the Lena River Delta / V. Polyakov, K. Orlova, E. Abakumov // Czech Polar Reports. – 2018. – № 8(2). – P. 260–274.

– **Polyakov, V**. Molecular and elemental composition of humic acids isolated from selected soils of the Russian Arctic / V. Polyakov, N. Chegodaeva, E. Abakumov // Vestnik Tomskogo Gosudarstvennogo Universiteta. Biologiya. – 2019. – № 47. – P. 6–21.

– **Polyakov, V**. Soils of the Lena River Delta, Yakutia, Russia: diversity, characteristics and humic acids molecular composition / V. Polyakov, K. Orlova, E. Abakumov // Polarforschung. – 2018. – № 88(2). – P. 135–150.

– **Polyakov, V**. Stabilization of organic material from soils and soil like bodies in the Lena River Delta (13C-NMR spectroscopy analysis) / V. Polyakov, E. Abakumov // Spanish Journal of Soil Science. – 2020. – № 10(2). – P. 170–190.

– **Polyakov, V**. Water holding capacity of Russian Arctic soils (Lena River Delta and Yamal Peninsula) / V. Polyakov, K. Orlova, E. Abakumov, I. Alekseev, J. Kostecki // Soil Science Annual. – 2020. – № 71(1). – P. 37–46.

– **Polyakov, V**. Micromorphological ccharacteristics of different aged Cryosols from the east part of Lena River Delta, Siberia, Russia / V. Polyakov, E. Abakumov // Geosciences. – 2021. – № 11(118). – P. 1–19.

– **Polyakov, V**. Assessments of organic carbon stabilization using the spectroscopic characteristics of humic acids separated from soils of the Lena River Delta / V. Polyakov, E. Abakumov // Separations. – 2021. – № 8. – ID 87.

– **Polyakov, V**. Soil-geomorphological mapping of Samoylov Island based on UAV imaging / V. Polyakov, A. Kartoziia, T. Nizamutdinov, W. Wang, E. Abakumov // Frontiers of Environmental Science. – 2022. – № 10. – ID 948367.

– **Polyakov, V**. molecular weight distribution of humic acids isolated from buried soils and Yedoma sediments / V. Polyakov, E. Abakumov, E. Lodygin, R. Vasilevich // Agronomy. – 2023. – № 13. – ID 1483.

– **Polyakov, V**. Physico-chemical and electrical properties of Cryosols in the Lena River Delta / V. Polyakov, E. Abakumov, A. Petrov // Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Biologiya. – 2023. – № 63. – P. 24–42.

– Абакумов, Е. Особенности почвообразования в Русской Арктике (на примере дельты реки Лена и полуострова Ямал) / Е. Абакумов, **В. Поляков**,

К. Орлова // Научный вестник Ямало-Ненецкого Автономного Округа. – 2018. – № 1(98). – С. 14–23.

– **Поляков, В**. Особенности гумусообразования в почвах дельты реки Лены / В. Поляков, Е. Абакумов // Почвы и окружающая среда. – 2021. – № 4 (4). – e163.

– Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2024623862 Российская Федерация. База данных молекулярного состава гуминовых кислот, выделенных из почв и почвоподобных тел крупнейшего дельтового комплекса Арктики (MCHAS ARCTICA) : № 2024623862, заявл. 21.08.2024 : опубл. 2.09.2024 / **В.И. Поляков**, Т.И. Низамутдинов, Е.В. Абакумов ; заявитель ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет».

Подписано в печать 21.03.2025. Формат А5.
Бумага офсетная
Тираж 100 экз. Заказ 73163000

Отпечатано на Картографической фабрике Института
Карпинского 199178, Санкт-Петербург, Средний пр., 72
Тел. 328-91-90, 321-81-53. E-mail: karta@karpinskyinstitute.ru