

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**

1.5.19. Почвоведение

Диссертация

на соискание ученой степени
кандидата биологических наук

Научный руководитель:
д.б.н., профессор
Абакумов Е.В.

Санкт-Петербург
2024

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
ГЛАВА 1. ОБЗОР СОВРЕМЕННЫХ ДОСТИЖЕНИЙ НАУКИ В ОБЛАСТИ ИЗУЧЕНИЯ ПОЧВ, ФОРМИРУЮЩИХСЯ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ПОЧВЕННОГО КРИОГЕНЕЗА	14
1.1. Особенности формирования почв Арктического региона России	14
1.2. История развития мерзлотного почвоведения в России	17
1.3. Влияние отрицательных температур на процессы, происходящие в почве	19
1.3.1. Почвообразующие процессы в арктической зоне	21
1.3.2. Особенности почвообразования в поймах рек	26
1.4. Представления о строении гумусовых веществ	28
1.5. Экологическое значение гумусовых веществ в биосфере	31
1.6. Депонирование углерода органических соединений в почвах Арктики	35
1.7. Молекулярные методы анализа органического вещества почв	35
1.8 Стабилизация органического вещества почв	38
ГЛАВА 2. ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ	42
2.1. Особенности факторов почвообразования в дельте реки Лены	42
2.2. Ключевые районы исследования	46
2.3. Методы исследования	49
ГЛАВА 3. ОБЩИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ КРИОГЕННОГО ПОЧВООБРАЗОВАНИЯ В ДЕЛЬТЕ РЕКИ ЛЕНЫ	53
3.1. Морфометрическая характеристика исследуемых почв дельты реки Лены и их положение в почвенной классификации	53
3.1.1. Почвы первой террасы, формирующиеся в условиях влияния реки, и на аллювиальных отложениях раннего голоцена	54

3.1.2. Почвы второй террасы (сформированные на отложениях позднего плейстоцена)	65
3.1.3. Почвы третьей террасы (сформировавшейся в период от раннего голоцена до позднего плейстоцена)	67
3.1.4. Почвы, формирующиеся на коренном берегу дельты р. Лены (кряж Чекановского, Харулахский хребет)	74
3.1.5. Почвенно-геоморфологическое картирование о. Самойловский на основе снимков беспилотных летательных аппаратов	74
3.2. Физико-химическая характеристика почв дельты реки Лены	79
3.2.1. Кислотно-основные параметры	79
3.2.2. Физические свойства почв	80
3.2.3. Химический состав почв	82
3.3. Микроморфологические особенности разновозрастных криогенных почв	86
3.3.1. Микроморфологическая характеристика исследуемых почв первой террасы в условиях периодического затопления	87
3.3.2. Микроморфологическая характеристика исследуемых голоценовых почв первой террасы (о. Самойловский)	88
3.3.3. Микроморфологическая характеристика исследуемых почв третьей террасы (о. Сардах)	90
ГЛАВА 4. ОРГАНИЧЕСКОЕ ВЕЩЕСТВО ПОЧВ ДЕЛЬТЫ РЕКИ ЛЕНЫ: СОДЕРЖАНИЕ, ЗАПАСЫ И МОЛЕКУЛЯРНОЕ СТРОЕНИЕ	94
4.1. Микробиологическая активность почв и уровни потенциального минерализуемого углерода	94
4.2. Содержание и запасы почвенного органического вещества в различных ландшафтных позициях дельты реки Лены	98
4.3. Молекулярное строение почвенного органического вещества	102

4.3.1. Характеристика гуминовых кислот, извлеченных из почв и осадков ледового комплекса	102
4.3.2. Внутрпрофильное распределение гуминовых кислот из почв второй и третьей террасы	114
4.3.3 Трансформация погребенного почвенного органического вещества	126
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	136
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	141
ПРИЛОЖЕНИЕ А	169
ПРИЛОЖЕНИЕ Б	188
ПРИЛОЖЕНИЕ В	194
ПРИЛОЖЕНИЕ Г	201

ВВЕДЕНИЕ

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 1700 Пг (10^{15} г) органического углерода (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. Оно является ключевым компонентом глобального цикла углерода в атмосфере, педосфере и гидросфере (Заварзина и др., 2021). 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. В полярных почвах ПОВ представлено в основном в виде грубодисперсных растительных остатков, а также ретинизированного гумуса, и из-за низких температур отличается низкой степенью трансформации (Chukov et al., 2015; Pengerud et al., 2017; Vasilevich et al., 2022). Влияние сурового климата на арктические почвы приводит к аккумуляции и депонированию

преимущественно слаботоразложившихся растительных остатков, а их роль в обеспечении стабильности гумусферы оценена лишь поверхностно (Поляков, Абакумов, 2021).

Почвы, подверженные влиянию ММП, играют ключевую роль в формировании углеродного баланса планеты, поскольку они содержат максимальные запасы ПОВ в пределах всей педосферы (Kaiser et al., 2007; Zubrzycki et al., 2014). Накопление ПОВ в составе арктических почв связано с процессами ретинизации гумуса, криогенеза, с образованием *in situ* из остатков тканей растений (Szymański, 2017). Почвы полярных регионов играют важную роль в процессах изменения климата на нашей планете, т.к. участвуют в регулировании углеродного баланса в пределах педосферы и депонировании высоко- и низкомолекулярных органических соединений в составе почв и ММП, которые являются наиболее устойчивыми к биодegradации (Семенов и др., 2013). Трансформация ландшафтов в результате повышения температуры и действия береговой абразии приводит к деградации ММП и высвобождению законсервированного ПОВ, что может негативно влиять на изменение климата на планете.

В условиях криогенеза в почвах действуют следующие процессы: криогенный массообмен, морозное пучение, криотурбирование, а также криоэлювиогенез (Jones et al., 2010; Губин, 2013). 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 (Большаинов 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 (Большаинов 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.

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

Предмет исследования – 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 почв, испытывающих влияние криогенеза, в данном регионе 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 органоминеральной 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 новый метод почвенно-геоморфологического картографирования территории дельты реки Лены на основе высокоточных снимков с беспилотного летательного аппарата (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:

– 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);

– «Целей устойчивого развития ООН и России. Борьба с изменением климата» (Цели..., 2016);

– инициативы «4 на 1000 (4 промилле) новые осязаемые глобальные вызовы для почв» (Иванов и Столбовой, 2019);

– 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 Сибее, 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 (2023б).

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 204 страницах 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

1.1. Особенности формирования почв Арктического региона России

В границах Арктического региона, характеризующегося постоянными отрицательными температурами воздуха и небольшим количеством осадков, на территории России представлены две почвенно-географические зоны: арктическая и субарктическая (Макеев и др., 1977; Глазовская, 1972).

Арктическая зона включает в себя острова Северного Ледовитого океана, а также северную часть полуострова Таймыр. Почвенный покров этой зоны отличается своей прерывистостью и разрозненностью (Глинка, 1910). Здесь практически отсутствуют сплошные участки почвенного покрова (Горячкин и др., 1998; Десяткин и др., 2012), сомкнутый почвенный покров формируется в узких перигляциальных зонах между краями постоянных ледяных покровов и береговой линией, на гляциальных или морских террасах, а также в различных отрицательных формах рельефа, таких как долины, впадины или овраги (Васильевская, 1988). В этих условиях растения, способствующие развитию почвообразования, занимают всего 5–10% площади северных районов и не более 50–60% южных районов арктической зоны (Величко и Нечаев, 1992). Здесь образуются арктические почвы различного состава и структуры, зависящие от типа почвообразующих пород. Это могут быть примитивные почвы с высоким содержанием железа, карбонатов, легкорастворимых солей, а также кремнезема (Васильевская, 1979; Еловская и др., 1979; Губин, 2001; Губин, 2013; Valerio et al., 2016). Здесь часто встречаются грубощебнистые мелкоземистые почвы без значительного скопления глинистых материалов (Каплина, 2009), а также типичные глеевые переувлажнённые арктические почвы (Караваева, 1969; Губин и Лупачев, 2008). В этой области также можно найти маршевые солончаки, которые располагаются в низменных прибрежных зонах островов (Губин и

Лупачёв, 2017а; Гормогенова и Десяткин, 2007). В северной части зоны, основными типами почв являются пустынные криогенные и болотные, а в южной – типичные арктические гумусовые и глеевые (Mann et al., 1986; Дымов и др., 2013; Höfle et al., 2013; Zubrzycki et al., 2014). Под тундровой растительностью в Европейской части России можно обнаружить криометаморфические почвы (Тонконогов, 2008). Для этого региона характерны выходы коренных пород, которые не затронуты почвообразованием (Макеев, 1995). Согласно Горячкину С.В. и др. (2008), помимо биоклиматических характеристик арктической и субарктической зон, необходимо учитывать неоднородный литологический фон, который коренным образом меняет условия почвообразования. Лишь на легких кислых породах можно корректно наблюдать смену почв в результате изменений биоклиматических условий. Для почв, формирующихся на легких карбонатных и базальтовых субстратах, а также на различных моренных отложениях, необходимо проводить корректировку для уточнения представлений о зональной смене почв.

Субарктическая зона занимает территорию вдоль северного побережья Евразии и делится на три подзоны: арктическую, типичную тундру и южную тундру (Томирдиаро, Черненький, 1987). Арктическая подзона характеризуется наличием полигональной тундры, которая занимает до 80% ландшафтов (Губин и Лупачев, 2017б; Voike et al., 2013). В этой подзоне доминируют тундровые оглеенные почвы. На локальных выходах карбонатов сформированы окарбоначенные почвы, засоленные почвы распространены вблизи морских побережий (Федоров-Давыдов и др., 2003; Десяткин и др., 2009). В типичной тундре большую часть территории занимают тундровые глеевые почвы (Макеев, 1981; Герасимов, 1973), надмерзлотные глеевые и оподзоленные тундровые почвы (Докучаев, 1949; Ping et al., 2015). Характерной особенностью тундровой зоны является широко распространение болот, с развивающимися здесь торфяными почвами (Соколов, Соколова, 1962). На дренируемых территориях широко распространены почвы альфегумусового отдела (Ковда, 1973). В южной тундре, на горных склонах и на дренированных территориях встречаются

подзолы иллювиально-гумусовые (Davis, 2001; Романовский, 1993). Таким образом, структура почвы в субарктической зоне во всех подзонах чрезвычайно сложна и многообразна, зависит от геоморфологических особенностей местности и гидрологического режима почв (Сумгин, 1931; Таргульян, 1971; Худяков, 1984; Walker et al., 2008; Michaelson et al., 2008; Лупачев и Губин, 2012). Так, для низменных приморских равнин, характерна высокая степень заболоченности территории, здесь формируются торфяные, глеевые, а также криогенные почвы в сочетании с аллювиальными и маршевыми почвами (Данилова и др., 2012; Десяткин и др., 2011). Низинные моренные равнины характеризуются меньшей заболоченностью и преобладанием глеевых почв (Катасонов, 1982; Десяткин, 1984). В горной местности тундровой зоны развиваются примитивные почвы, генезис которых связан с особенностями минералогического состава горных пород, а также подбуры и подзолы (Дымов и др., 2013; Tarnocai, 2009; Szymański et al., 2016).

Макеевым О.В. была предложена концепция криопедосферы, которая подразумевает область распространения таломерзлых пород, на которых происходит формирование почв под действием криогенеза (Макеев и др., 1977). Почвенный криогенез в качестве фактора почвообразования можно расценивать, как субфактор, который включает в себя климатические особенности (низкая годовая сумма температур и длительное нахождение почвы при температуре ниже нуля), а также наличие мерзлых пород. Макеевым О.В. выделены три стадии почвенного криогенеза, а именно: (1) стадия охлаждения-промерзания – процесс, когда почва охлаждается ниже нуля и промерзает; (2) мерзлая стадия – начинается от промерзания до возникновения в почве положительной температуры и (3) стадия нагревания – подразумевает полное протаивание почвенного профиля (Макеев, 2019). Почвенный криогенез тесно связан с трансформацией ландшафта, термокарстовыми процессами, формированием полигонального нанорельефа, а также трансформацией перигляциальных зон из-за движения ледников (Зазовская и др., 2022).

Важными факторами необходимыми для трансформации ландшафта под действием почвенного криогенеза является время и длительность промерзания почв, поэтому изучение разновозрастных участков для выявления темпов трансформации ландшафта является важной задачей криологии почв. Длительное влияние криогенных процессов на почву приводит к формированию термокарста в мерзлотных почвах. Формирование подобного рельефа приводит к деградации почвенного покрова и ландшафта в целом, это хорошо заметно на участках, которые прилегают к крупным рекам или акваториям. Теплые речные или морские воды размывают многолетнемерзлые породы, что приводит к деградации существенной части ландшафта (Gavrilov, Pizhankova, 2018). Однако проявление термокарста также характерно и для континентальных участков распространения многолетнемерзлых пород. Деградация почв в таком случае сопровождается также и трансформацией растительного покрова, который является буфером между атмосферой и почвой, таким образом предохраняя почву от прямого воздействия изменения температуры воздуха. Изучение территорий, подверженных влиянию почвенного криогенеза, в условиях изменения климата является приоритетной задачей государства в рамках указа Президента РФ N 164 "О Об основах государственной политики Российской Федерации в Арктике на период до 2035 года (Указ..., 2020).

1.2. История развития мерзлотного почвоведения в России

Центральная роль в изучении криопедологии и криопедосферы принадлежит профессору Олегу Владимировичу Макееву. Он фундаментально и многократно рассматривал проблемы почвоведения, связанные с почвенным криогенезом (Макеев, 1975; Макеев, 1981; Макеев, 2019).

В развитии мерзлотного почвоведения принято выделять три этапа. Первый этап (1910-1930 гг.) был открыт работами Филатова М.М. (1910) и Глинки К.Д. (1910) по Азиатской части России, Польшова Б.Б. (1910) и Прасолова Л.И. (1911) по Дальнему Востоку, и ряда других ученых.

Второй этап начался после Великой Отечественной войны и приурочен к крупным региональным исследованиям сезонной и многолетней мерзлоты. Здесь отмечаются работы Зольникова В. Г. (1954) в Центральной Якутии, Орловского Н. В. (1979) в Юго-Западной Сибири, Мартынова В. П. (1965) в горах Прибайкалья. Активно исследовался район Забайкалья (Ногина, 1957; Соколова, Соколов, 1963). Данный этап, видимо, является самым важным, т.к. начались фундаментальные исследования почвенного криогенеза как почвообразовательного процесса и его роли в формировании почв, подверженных воздействию многолетнемерзлых пород. Макеев О. В. рассматривал многолетнюю и сезонную мерзлоту в качестве субфактора, который действует в совокупности с основными пятью факторами почвообразования (по Докучаеву В. В.) (Макеев, 1978). При этом мерзлота является результатом действия сразу нескольких основных факторов почвообразования (климат, порода и рельеф), тем самым оказывая широкое воздействие на почвенный покров (Макеев, 2019).

Третий этап ознаменован систематическим и целенаправленным изучением криогенеза и почв криолитозоны, в это время происходит зарождение криологии почв в качестве новой отрасли знания. Сам термин «почвенный криогенез» появился в 1973 году, он подразумевает совокупность процессов физического, химического и биологического преобразования почвенной массы, проходящих в условиях сезонных процессов промерзания/оттаивания (Макеев, 1973). Таким образом, криогенными почвами считаются почвы, имеющие мерзлотные признаки, которые отражаются в макро- мезо- и микроморфологических характеристиках, тепловых и водных режимах, а также вещественных признаках (надмерзлотная аккумуляция материала).

Таким образом, исследования севера Азиатской части России послужили началу формирования целого направления отрасли науки. С 1910 г., к которому приурочены первые исследования криогенных почв, прошло более 100 лет, тем не менее, вопросы, связанные с формированием и трансформацией криогенных почв в условиях изменения климата, остаются открытыми.

1.3. Влияние отрицательных температур на процессы, происходящие в почве

Почвы криолитозоны, расположенные выше 50° с.ш., охватывают площадь свыше 8,6 млн. км², являются хранилищем существенного количества органического углерода и считаются одними из важнейших элементов криосферы (Jones et al., 2010). Наличие ММП и процессы долгосрочного мерзлотного цикла – оттаивание и промерзание почвы – значительно влияют на гидрологические и теплофизические процессы, растворимость питательных элементов, их доступность для растений и на биопродуктивность экосистем (Игнатенко, 1979; Dutta et al., 2006; Jones et al., 2010; Schimel, 1995; Zubrzycki et al., 2013, 2014; Polyakov et al., 2023b).

В почвах Арктики и Субарктики, в результате действия низких температур и микробиологической активности происходит накопление растительных остатков различной степени разложения в верхнем горизонте почв (горизонт O) (Васильевская, 1980; Ливеровский, 1983). В минеральных почвах мощность данного горизонта составляет обычно менее 40 см, в то время как в органогенных почвах его мощность может достигать нескольких метров. Характерной особенностью почв криолитозоны является наличие слоя ММП (Шур, 1988; Поляков, Абакумов, 2021), который действует как геохимический барьер, приводящий к накоплению талых вод на верхней границе ММП и способствующий развитию анаэробных процессов в надмерзлотном слое почв (Соколов, 1980; Поляков, Абакумов, 2021). Другой морфологической особенностью почв криолитозоны является отсутствие горизонтальной стратификации почвенных горизонтов (Водяницкий, 2008), данная особенность обусловлена развитием процесса криотурбации и сопровождается криогенным массообменом, деградацией почвенных горизонтов, формированием гумусовых потеков, трещин и узорчатого грунта (кочки, холмики и полигональные структуры) (Конищев, 1965; Пукемо, 1987; Jones et al., 2010; Polyakov and Abakumov, 2021a).

Еще одна особенность арктических почв – их температурный режим, в частности большие перепады температур в зависимости от сезонных флуктуаций (Рогов, 2009; Десяткин и др., 2012). Во многих арктических регионах температура верхнего слоя почвы может снижаться до -50°C зимой и не превышать $+10^{\circ}\text{C}$ в летние месяцы. Такие суровые термические условия снижают биологическую активность, скорость химических процессов и интенсивность химического выветривания (Губин, 2001).

При замерзании воды в почве образуются кристаллы льда. Однако не вся вода сразу превращается в лед. Температура на границе между льдом и еще незамерзшей водой остается на уровне около 0°C , несмотря на постепенное охлаждение поверхности почвы (Губин, 2003; Днепровская и др., 2009). Из-за наличия этого слоя «более теплой» воды кристаллизация льда приводит к переохлаждению почвенной воды, температура переохлажденной незамерзшей воды достигает -5°C . Интенсивность криогенных процессов зависит от температурных факторов (степени, продолжительности и глубины охлаждения почвы), влажности почвы, ее гранулометрического и минералогического состава (Оконешникова, 2013; Переверзев, Литвинова, 2012; Пестерев, 2013). В глинистой почве вода в основном связана с поверхностью частиц глины в виде тонких пленок воды. Эти пленки застывают при температурах намного ниже 0°C . Наиболее активное замерзание пленочной воды наблюдается при температурах около -7°C . Некоторая пленочная вода остается незамерзшей даже при гораздо более низких температурах (Роде, 1969). Такая вода в почве затем мигрирует по температурному градиенту от теплой к холодной, увеличивая размер ледяных кристаллов. Эти увеличивающиеся кристаллы обеспечивают механизм криогенных процессов, таких как морозное пучение, криотурбация, криогенная сортировка и сегрегация льда. Если температура почвы быстро падает до -40°C или ниже, масса мерзлого грунта сжимается и трескается (Конищев, 1965, 1973; Конищев, Рогов, 1977).

В ходе химического выветривания минеральных частиц происходит накопление элементов питания растений. Эта доступность во многом определяет

плодородие почвы, которая обеспечивает продуктивность экосистем. Из-за низких температур химическое и биологическое выветривание (разрушение горных пород) в северных широтах обычно развито слабо (Мишустин, Петрова, 1963; Савич и др., 2015). Однако физическое выветривание (дезинтеграция твердой породы на более мелкие фрагменты) часто бывает интенсивным, оно вызвано колебаниями температуры и образованием льда в трещинах горных пород (Конищев, 1965; Polyakov, Abakumov, 2021a). В криолитозоне широко распространен такой механизм физического выветривания, известный как криоэлювиогенез (Конищев, Рогов, 1977; Polyakov, Abakumov, 2021a). Процесс обусловлен уменьшением размеров отдельных минеральных частиц в почве, вызванный замерзанием тонких пленок воды, находящихся на поверхности и в трещинах почвенных частиц (Polyakov, Abakumov, 2021a). В результате этого процесса в почве накапливаются мелкозернистые (иловые) частицы, которые могут выступать в качестве субстрата и источника питательных элементов для растений. В ходе аккумуляции мелкозернистых частиц (криопелитов) могут создаваться плащеобразные элювиальные покровы с мощностью до 5 метров на различного рода поверхностях, склонах, террасах рек (Таргульян, Куликов, 1983; Добровольский, 1994). Таким образом, в условиях Арктики под действием криогенных процессов способны формироваться мощные элювиальные отложения, которые в дальнейшем вовлекаются в процесс почвообразования.

1.3.1. Почвообразующие процессы в арктической зоне

Почва, по сравнению с воздушной и водной средой, является наиболее активной биологической средой на планете. Докучаев В.В. выделил пять факторов, которые обуславливают формирование почв: почвообразующие (горные) породы, живые организмы (растительность, животные, почвенная микробиота), климатические параметры, рельеф территории, а также возраст развития почв (Глинка, 1933). В настоящее время также принято выделять антропогенный фактор почвообразования, в связи с тем, что антропогенная

активность способна коренным образом влиять на почвы. Таким образом, определим ведущие почвообразовательные процессы в Арктике.

Криогенез реализуется под действием влияния холодного сухого и/или влажного климата. Присутствие и подвижность незамерзшей воды в почве стимулируют этот процесс, поскольку она мигрирует по температурному градиенту к фронту промерзания в почве. Специфическими криогенными процессами, влияющими на генезис почв, являются морозное пучение, криотурбация (криогенный массообмен), термическое растрескивание и нарастание льда. Все эти процессы также способствуют развитию узорчатого грунта (криогенная сортировка) (Макеев, 1981; Jones et al., 2010; Schimel, 1995; Zubrzycki et al., 2013, 2014). При промерзании почвенный материал также может перемещаться в результате процесса, известного как «морозное пучение». Этот процесс зависит от температуры, наличия воды и гранулометрического состава почвы. Если почва подстилается слоем мерзлоты (или каким-либо другим геохимическим барьером, таким как твердые почвообразующие породы) и в то же время ограничена боковой преградой, такой как ледяные клинья, при замерзании почвы может возникнуть огромное криостатическое давление. Оно приводит к кардинальным структурным изменениям почвы и обуславливает движение вверх или вниз обломков горной породы в пределах профиля (Соколов, 1997). Это движение может вызвать вздутие (перепад) поверхности или даже выталкивание материала из почвы (Bockheim, Hinkel, 2005).

Важным следствием процессов морозного пучения являются криотурбированные почвы, для которых характерно перемещение и смешивание органоминеральных компонентов, сортировку (которая отделяет мелкие материалы от крупных) и своеобразную ориентировку камней. Криотурбация в различной степени происходит в большинстве почв, подверженных воздействию мерзлотных процессов, и характеризуется деформированием горизонтов и перемешиванием органоминеральных компонентов в почве, что приводит к формированию специфических криогенных почв. Признаки криотурбации часто

сохраняются в почве, что позволяет распознавать прошлые климатические особенности (Hinkel, Nelson, 2003; Kokelj, Burn, 2005).

Криогенное растрескивание реализуется в результате охлаждения поверхности почвы, так, верхний слой почвы сжимается, вызывая образование системы параллельных вертикальных трещин. Таким образом, поверхность почвы расчленяется четырехугольным (полигональным) рисунком, при этом формируется характерный рельеф тундровой местности (полигональный рельеф) (Таргульян, 1971; Савич и др., 2015; Пестерев, 2013; Губин, 2013). Конкретная форма и размер морозных трещин зависят от многих факторов, таких как градиенты температуры почвы, минеральный состав, влажность и колебания температуры воздуха (Попов, 1962). Термокарстовые процессы реализуются в результате деградации ледяных ядер в почве, что приводит к формированию характерного холмистого рельефа, состоящего из озерно-аласных котловин и отложений ледового комплекса (Губин, Лупачев, 2020). В результате действия термокарстовых процессов в почвах отмечается присутствие слаботрансформированных органических соединений, а также небольшая доля гумусовых соединений (Губин, Лупачев, 2020).

В условиях почвенного криогенеза также могут развиваться криометаморфические почвы, диагностируются они по наличию горизонта CRM со специфической рассыпчатой, угловато-крупитчатой, ооидной, творожистой или гранулированной криогенной структуры (Пастухов и др., 2005; Тонконогов, 2008). Данные почвы развиваются на суглинистых отложениях, возможно проявление тиксотропии в условиях повышенного увлажнения (Русанова и др., 2014). Размер структурных отдельностей в криометаморфическом горизонте может колебаться в пределах 3–7 мм. Над горизонтом CRM может развиваться подзолистый и иллювиально-железистый горизонт. Распространены данные почвы в пределах тундры, северной и средней тайги.

Накопление органических веществ в почве реализуется в условиях сурового климата Арктики, способствует накоплению грубо разложившихся остатков растительного и животного происхождения. Низкие температуры и

переувлажнение приводят к формированию подстилки с различной степенью разложения растительных и животных органических остатков и формированию торфяников (Оконешникова, 2015; Dai et al., 2002; Szymański et al., 2016). В зависимости от климатических параметров и микробиологической активности верхний горизонт может быть представлен слаборазложившимися растительными остатками, в которых можно различить отдельные структурные фрагменты (Kutzbach et al., 2004; Jones et al., 2010). С увеличением микробиологической активности степень разложения может усиливаться с накоплением средне- или даже полностью разложившихся растительных остатков. Следствием этого процесса является существенное накопление гумуса, который в условиях Арктики депонируется в составе ММП (Zubrzycki et al., 2013, 2014).

Выветривание почвообразующих пород реализуется в результате действия влаги на горные породы, процессов промерзания/оттаивания, а также в результате инсоляции (суточные процессы нагревания и охлаждения). При химическом выветривании исходные первичные минералы (полевой шпат, кварц и т.д.), будут медленно разрушаться с образованием вторичных силикатов, оксидов железа и алюминия, карбонатов и легкодоступных питательных веществ (Конищев, 1965, 1973; Конищев, Рогов, 1977; Mergelov et al., 2018). Биологическое выветривание в северных широтах обычно ограничено из-за низких температур. Интенсивность выветривания наиболее высока на поверхности почв и уменьшается с глубиной (Pengerud et al., 2017; Davidson, Janssens, 2006). Таким образом, в почвенном профиле мы можем отметить высокое содержание первичных минералов в верхних слоях почвы, накопление алюмосиликатов в срединной части профиля, и формирование специфического надмерзлотного горизонта CRO, где происходит накопление продуктов выветривания и гумусовых веществ (Лупачев, Губин, 2008; Губин, Лупачев, 2020).

Выщелачивание реализуется в результате прохождения воды через почву, которая растворяет легкорастворимые соли, такие как хлориды, нитраты,

сульфаты и, медленнее, карбонаты. Карбонат кальция выщелачивается в виде ионов кальция и гидрокарбоната. В более сухих частях они могут повторно осаждаться ниже по профилю почвы в виде вторичных карбонатных новообразований (Mokma et al., 2004; Jauhiainen, 1973; Melkerud et al., 2000).

В переходной зоне между лесотундрой и тундрой происходит формирование почв с признаками подзолообразования, миграции железистых частиц внутри профиля, а также криометаморфизма. В ходе голоцена происходила неоднократная смена границы леса, в таких условиях несколько типов почвообразования накладывалось друг на друга. Такие смены диагностируются по наличию внутри профиля почв гумусовых педореликтов, а также глинистых кутан, в то время как верхняя часть почвенного профиля затронута современными альфегумусовыми процессами (Десяткин и др., 2012; Дюкарев, 2005).

Оглеение реализуется в условиях формирования механического барьера в почвах, который не позволяет воде попадать в грунтовые воды, в результате чего поры и полости заполняются водой. При этом грунтовые воды могут быть найдены на относительно небольшой глубине (<2 м). Наличие близко залегающих грунтовых вод сильно снижает перемещение газов в почве, потому что диффузия кислорода и углекислого газа в заболоченных участках происходит очень медленно по сравнению с порами, заполненными воздухом. В таких условиях трехвалентное железо превращается в более растворимое и, следовательно, подвижное двухвалентное железо (Десяткин, 1984; Добровольский, 1994). В почвенном профиле оглеение проявляется в виде формирования в анаэробных условиях глеевых и оглеенных горизонтов, имеющих характерный сизый цвет за счет восстановления трехвалентного железа до двухвалентного.

Засоление реализуется за счет наличия в почвообразующих породах существенного количества ионов натрия и магния или в отрицательных формах рельефа полувзасушливых почв, где близко подходят засоленные грунтовые воды. Это приводит к накоплению солей на поверхности, а также к образованию

солевых корок. Соли натрия (Na) приводят к увеличению подвижности органического материала, и оно вымывается из верхнего слоя почвы, что приводит к образованию частично обесцвеченного горизонта. В условиях Арктики данные почвы могут встречаться в прибрежной морской зоне, куда соли попадают во время приливов, а также переносятся вместе с ветром (Цытович, 1973; Григорьев, 1987; Дубиков, 2002). В связи с тем, что криогенные почвы занимают огромные территории не только в Северном полушарии, но также и Южном (Антарктические оазисы), их исследование является важной задачей (Фотиев, 1999; Мергелов, Горячкин, 2010).

1.3.2. Особенности почвообразования в поймах рек

Поймы рек являются одними из самых молодых и быстро меняющихся областей на поверхности Земли (Добровольский, 2005). Пойменные почвы встречаются в самых новых и недавно сформировавшихся регионах (прибрежные отмели и заросшие пруды) и имеют относительно большой возрастной диапазон (Добровольский и др., 2011; Добровольский, 2007; Федоров, 1993). Формирование почв в дельтах северных рек обусловлено влиянием таких процессов как криогенез, связанный с особенностями климата и наличием ММП, и пойменный перенос материала (ежегодное затопление) (Добровольский, 1994; Абакумов и др., 2018). Ежегодно затапливаемые территории представляют собой ландшафты с высокой геохимической активностью и относительно высоким уровнем почвенного плодородия (Добровольский и др., 2011; Абакумов и др., 2018).

Крупные реки России (Обь, Енисей, Хатанга, Анабар, Лена, Яна, Колыма, Оленек) оказывают существенное влияние на Арктический бассейн, т.к. они определяют накопление и перераспределение углерода в северных морях. Поэтому особое внимание уделяется влиянию речного стока на формирование планетарного максимума климатически активных газов в высоких широтах (Добровольский, 2007; Добровольский и др., 2011; Polyakov et al., 2018a). Таким

образом, в Арктический бассейн попадает огромное количество насыщенного органического материала, который затем трансформируется морскими организмами и участвует в глобальном цикле углерода.

Формирование дельт происходит в результате взаимодействия реки и моря, что приводит к образованию устьевому конуса выноса. Так, дельты в своем строении имеют поемные части, а также различные геоморфологические террасы. Важную роль в пространственной организации и генезисе почв играют процессы накопления свежего речного аллювия и формирования различных форм дельтового рельефа (Гынинова и др., 2012). Приморские дельты, подвержены активному влиянию речного потока, что приводит к формированию сложной и динамической гидрографической сети, а также специфичного ландшафта. В зависимости от климатических характеристик и сменой гидрологического режима происходит качественное изменение почвенного покрова, и наблюдается эволюция почв.

Интенсивное накопление песчаных фракций аллювия и погребение сформированных органо-аккумулятивных горизонтов свежим аллювием ведет к развитию прерывистого органо-аккумулятивного процесса, а также формированию стратифицированных и аллювиальных почв. Накопление химических элементов на геохимических барьерах в почвах приводит к окарбоначиванию, засолению, оруденению и обогащению почв соединениями марганца, фосфора, в зависимости от того, в какой природной зоне расположена дельта и какие природные зоны пересекают на своем пути водотоки бассейна реки (Гынинова и др., 2012). Миграция русел и переотложение аллювия, происходящие в результате разрушения прирусловых повышений во время ледохода, приводят к затоплению низкой части речной террасы и перекрытию почв свежим речным аллювием, что приводит почвообразовательный процесс в синлитогенную стадию развития. Таким образом, происходит периодическое погребение речным материалом зрелых почв, которые и в погребенном состоянии могут влиять на почвообразование только что сформированных почв (Гынинова и др., 2012). В связи с высоким разнообразием форм рельефа и

факторов, влияющих на формирование почвы в дельтовых комплексах, вопрос о депонировании ПОВ в наиболее динамичных ландшафтах до сих пор остается открытым.

1.4. Представления о строении гумусовых веществ

История изучения гумусовых веществ насчитывает около 300 лет, что на сегодняшний день вылилось в развитие нескольких гипотез о формировании специфичной структуры гумусовых веществ и их молекулярном строении. К началу изучения ПОВ, на то время еще именуемого перегноем, следует отнести работы J.G. Wallerius (1761), который впервые указал на образование гумуса из растительных остатков и описал некоторые его свойства. О гумусовых (гуминовых) кислотах впервые заговорили в первой половине девятнадцатого века (Sprengel, 1826). Была установлена кислотная природа гумуса и описаны свойства гумусовых веществ. С 1839 года G.J. Mulder (1839) была проведена систематизация гумусовых веществ по цвету и растворимости в воде, также он говорил о том, что в органическом веществе почв могут содержаться не только гумусовые соединения, но и продукты распада органических остатков. В это же время под вопрос была поставлена природа гумусовых веществ, как химически индивидуальных соединений, так и была заложена гипотеза о многообразии видов гумусовых веществ, которая актуальна и сегодня. В это время, с развитием микробиологии, начала формироваться концепция о биологической природе гумуса, а не химической или физико-химической.

В трудах Докучаева В.В. «Русский чернозем» (1936) и Костычева П.А. «Почвы черноземной области России» (1937) были отмечены географические закономерности организации гумусообразования, роль микроорганизмов в гумификации растительных остатков и высказаны первые представления о синтетической природе гумусовых веществ, которые формируются в результате двух взаимно противоположных процессов – разложения и синтеза.

В дальнейшем, в работах Трусова А.Г. (1917) были систематизированы результаты исследования особенностей гумификации и доказана возможность участия в образовании гумуса разнообразных растительных остатков, претерпевающих в процессе гумификации сложные превращения биохимического характера. Идеи Трусова А.Г. затем развивал его ученик Шмук А.А., который установил ароматическую природу гуминовых кислот. Таким образом, можно сказать, что его работы являются предвестниками современной конденсационной теории формирования гуминовых кислот (Шмук, 1924).

В дальнейшем активное развитие получили идеи лигнинового происхождения гумусовых веществ, с ней связан такой исследователь как Waksman S.A. (Waksman, 1938). Однако, многие исследователи отмечали возможность нелигнинового происхождения гумусовых веществ (Кононова, 1963). Так в 40–50-х годах двадцатого века факт существования гумусовых веществ не вызывал сомнения у ученых, при этом вопросом оставалось строение и состав данных веществ. Различными учеными удалось выявить основные функциональные группы в составе гумусовых веществ. Тищенко В.В. и Рыдалевская М.Д. определили наличие спиртовой и метоксильной группы (1936), Драгунов С.С. – хиноны (1949). Тюрин И.В. (1937) предположил наличие карбонильной группы. Большой вклад в изучение гумусовых веществ внесла Александрова Л.Н. (1949), которая выделила из групп гуминовых и фульвокислот ряд фракций, различающихся по элементному составу, дисперсности и характеризующихся различной устойчивостью к коагулирующему действию электролитов. В 1951 году вышла монография Кононовой М.М. «Проблема почвенного гумуса и современные задачи его изучения», в ней были представлены данные, обобщающие исследования предыдущих лет и собственные данные автора по изучению роли гумусовых веществ в земледелии (Кононова, 1951). В 1974 году вышла в свет монография Орлова Д.С., в которой автор высказывал идеи о роли гумусовых веществ в экосистемах, составе, строении и их определении (Орлов, 1974). Многие идеи о строении и функциях гуминовых кислот подтверждались современными

исследованиями. Под гуминовыми кислотами Орлов Д.С. понимал растворимую в щелочах группу гуминовых веществ, которые являются наиболее характерными компонентами органического вещества почв (Орлов, 1990). Большой вклад в способы выделения и определения гуминовых веществ внесли Пономарева В.В. и Плотникова Т.А., труд по фракционированию по схеме Тюрина И.В. в их модификации является одним из простых и информативных анализов по исследованию ПОВ (Пономарева, Плотникова, 1975).

Anderson H.A. и Russell J.D. (1976) установили алифатическую природу гуминовых кислот. В это же время за рубежом одним из ведущих исследователей гуминовых веществ являлся Schnitzer M., который придерживался гипотезы об ароматическом ядре в составе гуминовых кислот, выявленном на основе применения ЯМР спектроскопии (Schnitzer, 1985) В 1982 году выходит книга Stevenson F.J. «Humus Chemistry», в которой также указывалась лигнинная природа гуминовых веществ.

В связи с большой сложностью строения и анализа гумусовых веществ ученые не могли прийти к единому мнению касательно природы гумуса. В 1983 году была сформирована международная группа по изучению гумусовых веществ (IHSS), которая была призвана дать ответы о строении и свойствах гуминовых кислот в почвах. Были приняты шаги по унификации методов выделения гуминовых кислот из почв.

На сегодняшний день, с развитием инструментальной базы, привлечением ученых из смежных областей удалось продвинуться далеко вперед, тем не менее вопросы о формировании и строении гумусовых веществ до сих пор остаются открытыми (Поляков, Абакумов, 2021). Сейчас существует две основные гипотезы гумификации. Исходя из первой гипотезы (Орлов, 1990), за счет термодинамического отбора происходит образование наиболее устойчивых структурных фрагментов в составе гуминовых кислот. При этом в молекулярном составе гуминовых кислот происходит формирование ароматических структурных фрагментов и сокращение алифатических, этот процесс сопровождается увеличением молекулярной массы кислот и уменьшением

низкомолекулярной фракции в их составе, обогащенной алифатическими цепями, углеводами и аминокислотами (Орлов, 1990; Василевич и др., 2019; Polyakov et al., 2023a). Согласно второй гипотезе (Piccolo et al., 2019; Schmidt et al., 2011), гуминовые кислоты представляют собой супрамолекулярный комплекс молекул с относительно небольшой массой (400–1000 Да), самоорганизующихся под действием слабых дисперсионных сил (Ван-дер-Ваальса, π - π , π -СН). Таким образом, прошло более 200 лет с первого упоминания о существовании гумусовых веществ в почве, но из-за высокой вариабельности и сложности строения, мы так и не можем дать ответ на вопрос о том, как происходит формирование гумусовых веществ и воспроизвести синтез гумуса в лабораторных условиях.

В 2015 году под авторством Lehmann J. и Kleber M. в журнале «Nature» вышла статья под названием «The contentious nature of soil organic matter», в которой отрицалось существование гуминовых веществ (Lehmann, Kleber, 2015). Согласно теории авторов, ПОВ является континуумом биомолекул, трансформация которых приводит к уменьшению молекулярных масс и лучшей растворимости. Таким образом, данная гипотеза не учитывает способность гумусовых веществ к образованию устойчивых макромолекулярных комплексов. Данная публикация вызвала очередную волну обсуждений о строении гумуса и на настоящий момент активно подвергается критике (Dou et al., 2020).

1.5. Экологическое значение гумусовых веществ в биосфере

Важнейшей экологической функцией почв Арктического пояса является секвестрация и депонирование органического углерода в почвах и в составе ММП. На сегодняшний день здесь накоплено до 1700 Пг ПОВ (Köchy et al., 2015; Biskaborn et al., 2019; Schiedung et al., 2022). В условиях изменяющегося климата эмиссия углерода в атмосферу может превышать его секвестрацию в почве и в составе ММП, что может негативно повлиять на изменение климата на планете

(Polyakov, Abakumov, 2021b). С увеличением температуры и активности почвенной микробиоты, существенный вклад в изменение климата могут внести экосистемы с высоким содержанием ПОВ. Для понимания взаимодействий между биогеохимическим циклом углерода и климатом критически важно изучение областей, где сосредоточено существенное количество ПОВ (Polyakov, Abakumov, 2021b). Изучение механизмов стабилизации органического вещества представляют собой важное направление в исследованиях ПОВ и гумусовых веществ (ГВ) (Семенов и др., 2013).

Под гумусовыми веществами понимается «серия обладающих повышенной кислотностью относительно высокомолекулярных веществ от желтой до темной окраски, образующихся в результате биохимических и химических реакций в процессе разложения и трансформации растительных и микробных остатков (процесс называется гумификация)» данное определение дано международным сообществом IHSS (Заварзина и др., 2021; Dou et al., 2020). Их состав и свойства обусловлены локальными условиями формирования (климат, прекурсоры гумификации, состав и активность почвенной микробиоты). ГВ состоят из гуминовых и фульвокислот, а также негидролизуемого остатка (Орлов, 1990), обуславливают целый комплекс механизмов, влияющих на состояние почв, растений и почвенный микробиом (Кононова, 1963; Орлов, 1997). Высокая активность гуминовых и фульвокислот обусловлена широким набором функциональных групп, включая карбоксильные, фенольные, спиртовые, амидные, хиноновые, аминные группы, которые способны к образованию электровалентных, ковалентных и внутрикомплексных соединений (Дымов, Милановский, 2014; Olk et al., 2019). Полидисперсность и полифункциональность обеспечивают высокую буферность гумусовых систем в отношении кислотно-основных, окислительно-восстановительных и многих других (Орлов и др., 1996).

Гуминовые кислоты (ГК), согласно Д.С. Орлову (1990), представляют собой растворимую в щелочах группу гумусовых веществ и являются наиболее характерным компонентом гумуса, они выполняют в значительной мере

консервационную роль, участвуя в депонировании ПОВ (Семенов и др., 2013). Исходя из этого можно выделить пять наиболее важных экологических функций ГВ: аккумулятивную, транспортную, регуляторную, протекторную и физиологическую (Olk et al., 2019). Аккумулятивная функция заключается в способности почв депонировать в составе ПОВ биогенные элементы необходимые для роста растений и микроорганизмов. При этом данные элементы также обладают функцией мобилизации, таким образом регулируя поступление питательных веществ (Орлов, 1997). Транспортная функция связана с формированием геохимических потоков веществ (минеральные и органические). Данные потоки в большей степени образуются в гумидных зонах с формированием легкорастворимых макромолекулярных комплексов ГК с катионами металлов, гидроксидами, биоорганическими молекулами или с образованием адсорбционных комплексов. Формирование подобных комплексов обуславливает миграционную способность ГВ в почве (Орлов, 1997). Регуляторная функция ГВ связана с формированием структуры, температурных и гидрологических свойств почв, а также с их участием в регуляции окислительно-восстановительных процессов, минерального питания растений (мобилизация) (Орлов, 1997). Протекторная функция связана со способностью ГВ формировать малоподвижные и труднодиссоциирующие органоминеральные соединения. Так, почвы с высоким содержанием ГВ способны снимать или сокращать негативное влияние высоких доз минеральных удобрений и служить в качестве буфера в системе «почва-грунтовые воды» (Орлов, 1997). Физиологическая функция ГВ обусловлена положительным влиянием органических веществ на растения, они участвуют в процессах активации дыхания и фотосинтеза, с чем связано их широкое применение в земледелии (Орлов, 1997). Помимо выявленных Орловым Д.С. пяти функций гумусовых веществ, Дергачева М.И. (2018) выявила наличие специфичности системы гумусовых веществ по отношению к природной среде на разных уровнях организации вещества, что может указывать на то, что гумусовые вещества могут обладать памятью (аналог памяти почв). Таким образом,

сведения о строении гумусовых веществ и их составе могут использоваться для палеогеографических реконструкций среды. В своих исследованиях Дергачева М.И. использовала в качестве объекта исследования палеопочвы под курганами в Саратовской области и лесостепной зоны Западной Сибири (Новосибирская обл.). В результате работы удалось сопоставить состав ГК из палеопочв с современными аналогами почв тех же типов и произвести палеореконструкцию изучаемой среды (Дергачева, 2018). Подобные исследования представляют определенный интерес для изучения древних ландшафтов и направленности их трансформации во времени. Это необходимо для анализа существующей природной среды в меняющемся климате и при антропогенной нагрузке. На сегодняшний день данные исследования могут быть актуальны в области изучения многолетнемерзлых почв, т.к. в результате разрушения береговой зоны в Арктике происходит экспонирование отложений ЛК и многолетнемерзлых пород (Губин, Лупачев, 2020). Данные отложения в дальнейшем подвергаются активному атмосферному влиянию, поэтому мы можем отслеживать трансформацию почв и мерзлых ландшафтов и провести моделирование данной трансформации.

С точки зрения экологических функций, ГВ в почвах участвуют в регуляции газового состава атмосферы. Это связано с формированием устойчивых (стабильных) к биотическим и абиотическим воздействиям соединений в составе ГК (Lodygin et al., 2014). На сегодняшний день актуальные исследования ГВ связаны с изучением влияния ГК на пахотные земли и в управлении земельными ресурсами, ГВ могут использоваться для предотвращения распространения нефтяных разливов, сокращения загрязнения водоемов от вносимых в почву минеральных удобрений (Розанова и др., 2018). Так, наибольшее применение ГВ приобрели в области точного земледелия, т.к. внесение различных гуматов положительно сказывается на росте сельскохозяйственной продукции, перераспределении биогенных элементов и их доступности для растений (мобилизация) (Федотов и др., 2017).

1.6. Депонирование углерода органических соединений в почвах Арктики

ПОВ представляет собой продукт, который накапливается в почве в виде живой биомассы (неразложившиеся растительные и животные остатки), а также органических веществ различной степени разложения (Polyakov, Abakumov, 2021b; Заварзина и др., 2021). ПОВ имеет решающее значение для стабилизации структуры почвы, удержания и высвобождения питательных веществ из органоминеральных комплексов для растений (Davis, 2001; Dutta et al., 2006; Schimel, 1995). Из-за различных биоклиматических и геоморфологических параметров среды, а также типов землепользования, почвы могут накапливать существенное количество органического вещества и участвовать в образовании крупнейшего пула углерода (Dai et al., 2002; Kutzbach et al., 2004; Мергелов, Таргульян, 2011; Voike et al., 2013; Polyakov et al., 2017). Согласно расчетам, крупнейшим хранилищем углерода в пределах педосферы являются почвы и ММП криолитозоны: здесь накапливается около 1700 Пг ПОВ в слое до 3 м, а также более 34 Пг азота (Jones et al., 2010; Zubrzycki et al., 2013, 2014). В Арктике органическое вещество накапливается в почвах в огромных количествах и в основном в виде неразложившихся, либо слабо трансформированных растительных и животных остатков в условиях низких температур, что приводит к консервации ПОВ в составе ММП (Cauwet, Sidorov, 1996; Ejarque, Abakumov, 2016). Деградация почв приводит к снижению содержания ПОВ, что отрицательно сказывается на доступности элементов питания для растений, а также оказывает существенное влияние на изменение климата на планете (Polyakov et al., 2022; Knoblauch et al., 2013).

1.7. Молекулярные методы анализа органического вещества почв

Анализ качественного и количественного состава ГК является важным этапом для исследования молекулярного состава ПОВ, так как они играют ключевую роль в почвенных процессах. Климат, качество прекурсоров гумификации и местоположение в ландшафте определяют разнообразие состава

и свойств ГК в почвах (Lodygin et al., 2014; Chukov et al., 2015; Ejarque, Abakumov, 2016; Поляков, Абакумов, 2021). Для исследования ГК используются разнообразные методы. Инфракрасная спектроскопия с преобразованием Фурье, ультрафиолетовая и видимая спектроскопия, кросс-поляризация, молекулярная флуоресцентная спектроскопия и спектроскопия электронного парамагнитного резонанса – все они весьма информативны и широко применяются в исследованиях ПОВ (Chen et al., 2002; Coccozza et al., 2003; Поляков, Абакумов, 2021; Polyakov et al., 2021b).

Метод электронного парамагнитного резонанса (ЭПР) используется для определения концентрации свободных радикалов в составе ГК, которые определяют степень гумификации ПОВ (Василевич и др., 2019). Данный метод обладает высокой чувствительностью и не разрушает исследуемый материал ГК. Он может быть использован для веществ, которые содержат свободные радикалы (молекулы, фрагменты молекул, а также атомы имеющие неспаренные электроны). Данный метод активно применяется для исследования строения ГК, формирующихся в почвах (Senesi, 1990; Coccozza et al., 2003).

Метод колебательной спектроскопии используется для определения отдельных структурных фрагментов в составе ГК. Данным методом можно определять алифатические и ароматические структурные фрагменты (Polyakov et al., 2021b). Данный метод по сравнению с ^{13}C ЯМР-спектроскопией, обладает меньшей точностью. Учитывая высокую гетерогенность молекул ГК, могут формироваться полосы поглощения в инфракрасных (ИК) спектрах, которые нельзя соотнести с колебаниями, относящимися к каким-либо структурным фрагментам (Polyakov, Abakumov, 2021b; Thompson, Chersters, 1970; Касаточкин и др., 1958).

Метод денситометрического фракционирования является простым и информативным способом выделения химически и биологически разнородных структур (Polyakov et al., 2021b). Метод позволяет разделить ПОВ на три группы: свободную, окклюдированную и органоминеральную. В результате использования данного метода анализа можно получить более глубокое

понимание состава органического вещества в почве и его роли в почвенных процессах (Polyakov, Abakumov, 2021b; Овсеян и др., 2020; Федотов, Артемьева, 2015).

ЯМР-спектроскопия. Наиболее точными и информативными методами исследования ГК почв являются одномерная (1D) и двумерная (2D) ЯМР спектроскопия. Одномерные твердотельные спектры ^{13}C ЯМР предоставляют информацию о строении различных типов структурных фрагментов молекул ГК (Chukov et al., 2015; Dai et al., 2002; Lodygin et al., 2014; Ejarque, Abakumov, 2016; Lupachev et al., 2017). Исследования качества ПОВ, образующегося в зоне воздействия ММП, показали, что молекулы ГК сохраняют значительную часть химической структуры материала предшественника гумификации из-за слабого процесса трансформации растительных и животных остатков (Dziadowiec et al., 1994). Однако одномерная структура не дает возможности подробно охарактеризовать различия между атомами, входящими в такие группы, и во многих случаях не позволяет четко различать сигналы в результате их значительного перекрытия из-за широких линий и разнообразия структур функциональных групп (Cao et al., 2014; Burdelnaya et al., 2014; Holland, Alam, 2006). Путем применения методов двумерного (2D) спектра ЯМР-спектроскопии такие проблемы перекрытия пиков могут быть уменьшены, и химическая структура, соответствующая данному пику, может быть идентифицирована с более высокой точностью. Поскольку дипольные взаимодействия действуют в пространстве, возможна корреляция углерода с неспаренными протонами, что дает дополнительную структурную информацию (Burdelnaya et al., 2014). Двумерная корреляция химических сдвигов ^{13}C с химическими сдвигами ^1H , называемая 2D-гетероядерной корреляцией ^1H - ^{13}C ЯМР, может предоставить больше структурной информации, чем спектроскопия ЯМР ^{13}C или ^1H по отдельности. Эксперимент HETCOR коррелирует химические сдвиги ^1H с химическими сдвигами X-ядер (например, ^{13}C , ^{15}N). Эксперимент обеспечивает отличное разрешение при косвенном измерении ^1H (Van Rossum et al., 1997; Massiot et al., 2002).

Для дальнейшего изучения фундаментальных процессов гумификации и структурных фрагментов в полярных регионах необходимо использование современных высокоточных инструментальных методов. Анализ молекулярного состава поможет понять фундаментальные процессы почвообразования и создать новые представления о сложном составе и строении природных высокомолекулярных соединений ГК в почвах, подверженных воздействию мерзлоты (Lodygin et al., 2014; Ejarque, Abakumov, 2016; Lupachev et al., 2017). Резервуар органического углерода криолитозоны представляет собой возможную угрозу для климата нашей планеты. С другой стороны, почвы арктической зоны в условиях потепления климата постепенно выходят из области влияния многолетнемерзлых пород, что открывает новые возможности для их рационального использования (Поляков, Абакумов, 2021). Таким образом, исследование криогенных почв является важной задачей криопедологии и современного почвоведения в целом.

1.8 Стабилизация органического вещества почв

Под стабилизацией понимается процесс, при котором формируется устойчивое к биотическим и абиотическим воздействиям ПОВ, способное к длительному сохранению в окружающей среде (Семенов и др., 2013). Обратным стабилизации процессом является дестабилизация, в ходе которой компоненты ПОВ становятся доступны для использования микроорганизмами. Существуют различные пути стабилизации органического вещества в почве: – химическая (формирование стабильных высокомолекулярных соединений, которые в меньшей степени доступны процессам трансформации); – физико-химическая, связанная с формированием органоминеральных комплексов; – физическая (формирование труднодоступных для микроорганизмов и различных ферментов органоминеральных комплексов в почве, а также физическая консервация ПОВ в составе ММП) (Семенов и др., 2013; Безносиков, Лодыгин, 2010; Cui et al., 2014).

Формирование устойчивых молекулярных ансамблей ГК связано с различными процессами, происходящими в почве, на сегодняшний день нет четкого ответа на вопрос согласно какой модели, происходит гумификация и формирование устойчивых молекул. Согласно полимерной модели (Орлов, 1990), молекулы ГК имеют ароматическое ядро с алифатической периферией, состоящей из различных структурных фрагментов. Основными источниками ароматических соединений в составе ГК, является лигнин, полифенолы и меланин (Орлов, 1990). В ходе процесса конденсации прекурсоров гумификации, формируются высокомолекулярные соединения в составе ГК, устойчивые к биодegradации. Это обусловлено сложной структурой ГК, которая в значительной мере недоступна для почвенной микробиоты. Однако синтез подобных высокомолекулярных соединений проводился только в лабораторных условиях и не подтвержден в полной мере (Семенов и др., 2009; Заварзина и др., 2021). Также существуют исследования, которые связывают стабильность гумусовых веществ с исходной прочностью прекурсоров гумификации (Sollins et al., 1996; Семенов и др., 2009). MacCarthy P. с соавторами (1990) выдвинули гипотезу о том, что ПОВ можно разделить на два пула (лабильный и стабильный). К стабильному пулу относятся молекулы, которые способны долгое время находиться в почве в составе минеральных горизонтов, тогда как лабильный пул, образованный из неразложившихся и частично разложившихся органических остатков, играет доминирующую роль в относительно быстрой трансформации органического вещества.

Супрамолекулярная модель (Piccolo, 2002) подразумевает что гумусовые вещества представляют собой континуум биомолекул, формирующийся в результате случайных химических преобразований и физико-химических взаимодействий разнообразных прекурсоров гумификации. Таким образом, из-за большой вариабельности состава ГК в почвах не всегда может присутствовать комплект ферментов, необходимых для трансформации органических молекул в составе ГК. Видимо, трансформация свежего растительного опада будет

осуществляться в первую очередь, нежели соединения с низкой молекулярной массой.

Химические механизмы стабилизации гумусовых веществ в почве основаны на гипотезах, связанных с их строением (Орлов, 1990; Семенов и др., 2009). Реакции конденсации, а также образование случайных химически прочных новообразований приводит к формированию устойчивых к биодegradации молекул (Lodygin et al., 2014). Таким образом, химическая стабилизация зависит от уровня содержания ароматических структурных фрагментов, которые являются более устойчивыми компонентами органического вещества в почве, с повышением содержания ароматических структурных фрагментов увеличивается уровень стабилизации органического вещества. Однако, стабильность гумусовых веществ обусловлена не только химическим строением, но и физико-химической и физической защищенностью. Характерной особенностью почв в зоне залегания ММП является извлечение углерода из биогеохимического цикла и его стабилизация в мерзлом состоянии (Семенов и др., 2013).

Физико-химическая стабилизация основана на формировании в почве органоминеральных комплексов путем комплексообразования (Sollins et al., 1996; Baldock, Skjemstad, 2000; Семенов и др., 2009). В ходе данного процесса происходит формирование координационных связей между органическим веществом и металлами, находящимися в почве. Наибольший вклад в физико-химическую стабилизацию ПОВ вносят глинистые минералы и гидроксиды железа. Формирование органоминеральных комплексов является важным механизмом стабилизации ПОВ и создает предпосылки для дальнейшей агрегации почвенных минералов (Семенов и др., 2013).

В ходе агрегации почвенных минералов происходит физическая стабилизация ПОВ (Sollins et al., 1996; Bronick, Lal 2005; Семенов и др., 2009, 2013). Почвенные агрегаты являются основным местом аккумуляции органического вещества и представляют собой различные комбинации органоминеральных веществ, состоящие из органических и неорганических

компонентов. Размер агрегатов играет важную роль в физической стабилизации: чем меньше их размер, тем меньше количество пор и соответственно путей для трансформации органического вещества (Семенов и др., 2009). Таким образом, в результате деградации почв, нарушения их строения может происходить разрушение почвенных агрегатов и высвобождение органических веществ. Jastrow et al. (1996) в своей работе пришел к выводам о том, что органическое вещество, находящееся в микроагрегатах, имеет значительно большее время оборачиваемости (412 лет) по отношению к углероду, которое находится в макроагрегатах (140 лет), что указывает на то, что ПОВ в составе микроагрегатов (20–250 мкм) более устойчиво к биогенной трансформации. Kemper и Koch (1966) отметили в своей работе, что высокий уровень физической стабилизации ассоциируется с наличием в почве глинистых минералов.

Учитывая длительную историю изучения ГК и ПОВ, до сих пор неясными остаются вопросы о механизмах формирования ГВ, их структурная организация, а также экологические функции ГК в различных природных зонах. За более чем 300 лет изучения ГВ удалось сформировать ряд различных представлений о строении ГК, разработать методы их извлечения из почв и методы их анализа. Однако из-за высокой сложности строения ГК, а также их высокой вариабельности в различных природных средах, до сих пор подвергается сомнению тот факт, что ГВ могут существовать как природное соединение (Lehmann, Kleber, 2015). На сегодняшний день мы стоим перед глобальными вызовами в отношении изучения ГВ, это в первую очередь связано с изменением климата на нашей планете. До сих пор нет однозначного ответа на вопрос, что будет происходить с ПОВ в Арктической зоне в результате деградации ММП, будет ли происходить активная эмиссии климатически активных газов в атмосферу в результате трансформации ПОВ, или же оно будет находится в стабильной форме. Данные вопросы требуют дальнейшего изучения.

ГЛАВА 2. ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

2.1. Особенности факторов почвообразования в дельте реки Лены

Дельта реки Лены является крупнейшей дельтой, расположенной в арктической зоне, с площадью около 30 тыс. км². Ее образование связано с деятельностью реки: выносом аллювиального материала, эрозией и абразией под влиянием флуктуаций уровня моря и перемещения земной коры (Большаинов и др., 2013; Поляков, Абакумов, 2021).

Западная и восточная части дельты существенно различаются между собой по таким параметрам как густота речной сети, количество островов и их размер (Polyakov et al., 2018a). Западная часть представлена большим количеством крупных островов, в то время как восточная часть находится в совершенно иных условиях: обильные речные протоки пересекают ее, разрушая и перераспределяя материал, что обуславливает формирование маленьких по площади островов (Polyakov et al., 2018a). Западная и северо-западная окраина дельты находится в зоне влияния акватории моря Лаптевых, что сказывается на температуре воды во внутренних протоках, которая здесь намного ниже (около +3°C), чем на восточной и северо-восточной окраине (от +4 до +9°C) (Большаинов и др., 2013). Среднегодовой расход воды в дельте составляет около 15000 м³/с, ежегодный сток растворенных минеральных веществ составляет до 58 млн т (Большаинов и др., 2013; Галабала, 1987; Иванов, 1963).

Климат – арктический континентальный, со среднегодовой температурой воздуха в центральной части –11,6°C. Самым холодным месяцем является февраль (–33,1°C), самым теплым – июль (+10,1°C), положительные среднемесячные температуры отмечаются с июня по август (Voike et al., 2013). Среднее количество осадков в летний период составляет 125 мм. Большая часть дождей (до 70%) является слабыми, с количеством влаги менее 1 мм. Глубина снежного покрова демонстрирует высокую степень пространственной изменчивости. Сильные потоки ветра активно перераспределяют снег в дельте,

на островах, где развита полигональная тундра, снег оседает преимущественно в центрах полигонов, тогда как края полигонов остаются оголенными и промерзают в большей степени. Средняя высота снежного покрова по краям полигонов составляет около 17 см, а в центре около 46 см. Снеготаяние начинается с середины мая и продолжается до начала июня (Voike et al., 2013).

В дельте развиты ММП, на глубине от 20 до 100 см (Polyakov et al., 2018a). По данным 66-метровой скважины на о. Самойловский (Большаянов и др., 2020) среднегодовая температура сезонно-талого слоя составляет $-8,4^{\circ}\text{C}$, что примерно на 3°C теплее, чем среднегодовая температура воздуха в тот же период ($-11,6^{\circ}\text{C}$). Температура поверхности почвы в течение года колеблется от $+20^{\circ}\text{C}$ до -35°C . Февраль отличается самой низкой температурой почвы: $-24,4^{\circ}\text{C}$. Наиболее высокие средние температуры почвы обычно отмечались в августе и составляли в среднем $+4,1^{\circ}\text{C}$ (Voike et al., 2013).

Активный слой, характеризующийся сезонным промерзанием/оттаиванием, демонстрирует большую пространственную и временную изменчивость. В дельте существуют различные типы ландшафтов (сухая и влажная тундра, пойма) на которых процессы промерзания/оттаивания происходят по-разному (Voike et al., 2013). Оттаивание почвы обычно начинается в начале-середине июня. Участки влажной тундры имеют несколько большую среднюю глубину протаивания (19 см), чем сухая тундра (15 см) в июне. В августе средняя глубина протаивания составляет около 49 см, максимальная – 79 см (сухая тундра), 61 см (влажная тундра) и до 1 м в пойменных частях дельты реки.

Геологическое строение дельты реки Лены сложное, она сложена различными по возрасту и составу отложениями. Дочетвертичные породы встречаются преимущественно по берегам Быковской, Оленекской и Булкурской протоков, а также в виде островов в центральной части дельты реки (Столб, Америка-Хая, Сардах) (Большаянов и др., 2013). Архейские образования предположительно залегают на о. Сардах и представлены гранатовыми и гранат-силлиманитовыми гнейсами. В дельте, согласно сейсмическим данным,

предполагается распространение ордовикских-нижне-каменноугольных терригенно-карбонатных отложений (Большиянов и др., 2013). Выше архея залегают породы среднего и верхнего девона, они вскрываются на окраине Харулахских гор и представлены плотными доломитизированными серыми известняками мощностью до 200 м (Izokh, Yazikov, 2017).

Четвертичные отложения в изученном районе довольно однородны. В западной части дельты, в районе пос. Нагым, Оленекская протока вскрывает песчано-алевритовую толщу до 25 м. Нижняя часть (7–15 м) представлена песками и алевритами, часто переслаивается слабо разложившимися растительными остатками с низким содержанием льда. Верхняя часть толщи представлена переслаивающимися алевритами и песком с большой долей слабо разложившихся растительных остатков (Большиянов и др., 2013). Также на территории дельты широко представлены голоценовые отложения, которые состоят из песков и переслаивающихся слабо разложившихся растительных остатков, которые принято называть термином «слоенка» (Большиянов и др., 2013).

Геоморфологическое строение характеризуется наличием в дельте трех геоморфологических уровней и активной поймы. Согласно Картозия А.А. (2021), традиционно в дельте реки Лены выделяется три геоморфологических уровня, которые различаются между собой геологическим строением, возрастом, и отметками абсолютных высот, однако для удобства данные уровни принято называть террасами. Первая терраса (1–12 м), область периодического затопления, сформировалась в течение среднего голоцена и, в основном, представлена в восточной части дельты (Schneider et al., 2009; Большиянов и др., 2013; Polyakov et al., 2018a). По данным бурения на участке первой террасы о. Самойловский, верхняя часть отложений в восточной незатапливаемой части острова представлена «слоенкой», которая датируется возрастом 2230 ± 70 лет (Большиянов и др., 2013). Вторая терраса (12–30 м), образовавшаяся между поздним плейстоценом и ранним голоценом, занимает примерно 23% общей площади дельты и состоит из песчаных отложений с небольшим содержанием

льда (Schneider et al., 2009; Поляков, Абакумов, 2021). Расположенная в северо-западной части дельты, она представлена песчаным образованием, с невысоким содержанием льда по сравнению с ледовым комплексом (ЛК) третьей террасы, а также низким содержанием детрита. Возраст верхней части песков на второй террасе о. Арга-Муора-Сисе характеризуется 12,5 тыс. лет, в то время как возраст нижней пачки песков (9,5 м над урезом воды) составил более 52 тыс. лет (Schneider et al., 2009; Большианов и др., 2013). Третья терраса (30–60 м) представлена отдельными островами позднего плейстоцена, сложенными мелкозернистым, насыщенным органическим веществом, песком и обледенелым материалом (Schneider et al., 2009; Polyakov et al., 2018a). Отложения ЛК, слагающие третью террасу, характеризуются возрастом более 44 тыс. лет, выше отложений ЛК располагаются маломощные голоценовые осадки (Большианов и др., 2013). Поверхность третьей террасы характеризуется нанопolygonальным рельефом, которая формируется вследствие развития криогенеза и термокарстовых процессов (Schneider et al., 2009; Большианов и др., 2013; Polyakov et al., 2018a).

Растительный покров представлен тундровой растительностью различных типов. Основными компонентами являются лишайники, мхи, травы (злаки и осоки), а также некоторые виды кустарничков (Поляков, Абакумов, 2021). В дельте формируются злаково-осоково-моховые ценозы, в понижениях рельефа – гипново-осоковые polygonальные болота. Растительный покров имеет мозаичную структуру. Моховые группировки преобладают на суглинистых, а лишайниковые – на грубоскелетных каменистых почвах (Поляков, Абакумов, 2021). На теплых южных склонах и на дренированных участках береговой зоны встречаются участки с травянистой растительностью (тундровые луговины и пойменные луга) (Поляков, Абакумов, 2021). Так, к влажной тундре (влажные центры polygonов, отрицательные формы рельефа) приурочены *Drepanocladus revolvens*, *Meesia triquetra*, *Rhizomnium punctatum*, *Calliergon giganteum*, *Carex chordorrhiza*, *Comarum palustre*, *Pedicularis sudetica*. В сухой тундре (хорошо дренированные поверхности) преобладают *Hylocomium splendens*, *Dryas*

punctata, Peltigera, Polygonum viviparum, Saxifraga punctata, Astra galusfrigidus, Luzula atundricola, Lagotis glauca, Saxifraga hirculus, Valeriana capitata. На пойменных лугах формируются *Salix glauca/reptans/lanata, Equisetum sp., Alopecurus alpinus, Festuca rubra, Deschampsia borealis.* Затопленные участки мелких озер изобилуют *Arctophila fulva* (Kutzbach et al., 2004; Schneider et al., 2009; Voike et al., 2013; Polyakov et al., 2018a). Таким образом, растительный покров представлен тундровыми видами: преобладают травяно-осоково-моховые сообщества, в низинах – мохово-осоковые полигональные болота.

2.2. Ключевые районы исследования

В результате полевых работ с 2015 по 2022 года в рамках экспедиции «Лена» были исследованы острова и почвы вдоль крупнейших протоков дельты реки Лены. Районы работ расположены вдоль Оленекской протоки, приурочены к первой и третьей террасам, включали в себя острова Харданг, Эбе-Басын-Сисе, Джан-Гылах, а также Самойловский, где расположена научно-исследовательская станция (НИС) «Самойловский». Помимо западной части, была также исследована и центральная часть дельты. Здесь исследования включали в себя работы на островах Курунгнах, Арга-Белир-Арыта, Тит-Ары и Столб. В северо-западной части, наиболее труднодоступной, был исследован о. Джипириес, который относится ко второй террасе. В восточной части дельты был исследован о. Сардах. Схема расположения ключевых районов исследований представлена на рисунке 2.1. Ниже представлена характеристика участков.

Остров Сардах третьей террасы реки расположен в восточной части дельты, сложен четвертичными и дочетвертичными породами.

Харулахский хребет, коренной берег восточной части дельты. Породы хребта состоят из ультратонкого или мелкодисперсного калькаренита и доларенита (с незначительным силикатным материалом) и песчаника. Литит-кварцево-полевошпатовый песчаник содержит небольшие обломки доломита и известняка и прослоен калькаренитом, аргиллитом, известковистым аргиллитом

и алевролитом, с интракластами и брекчиями, указывающими на случайные оползни (Izokh and Yazikov, 2017)

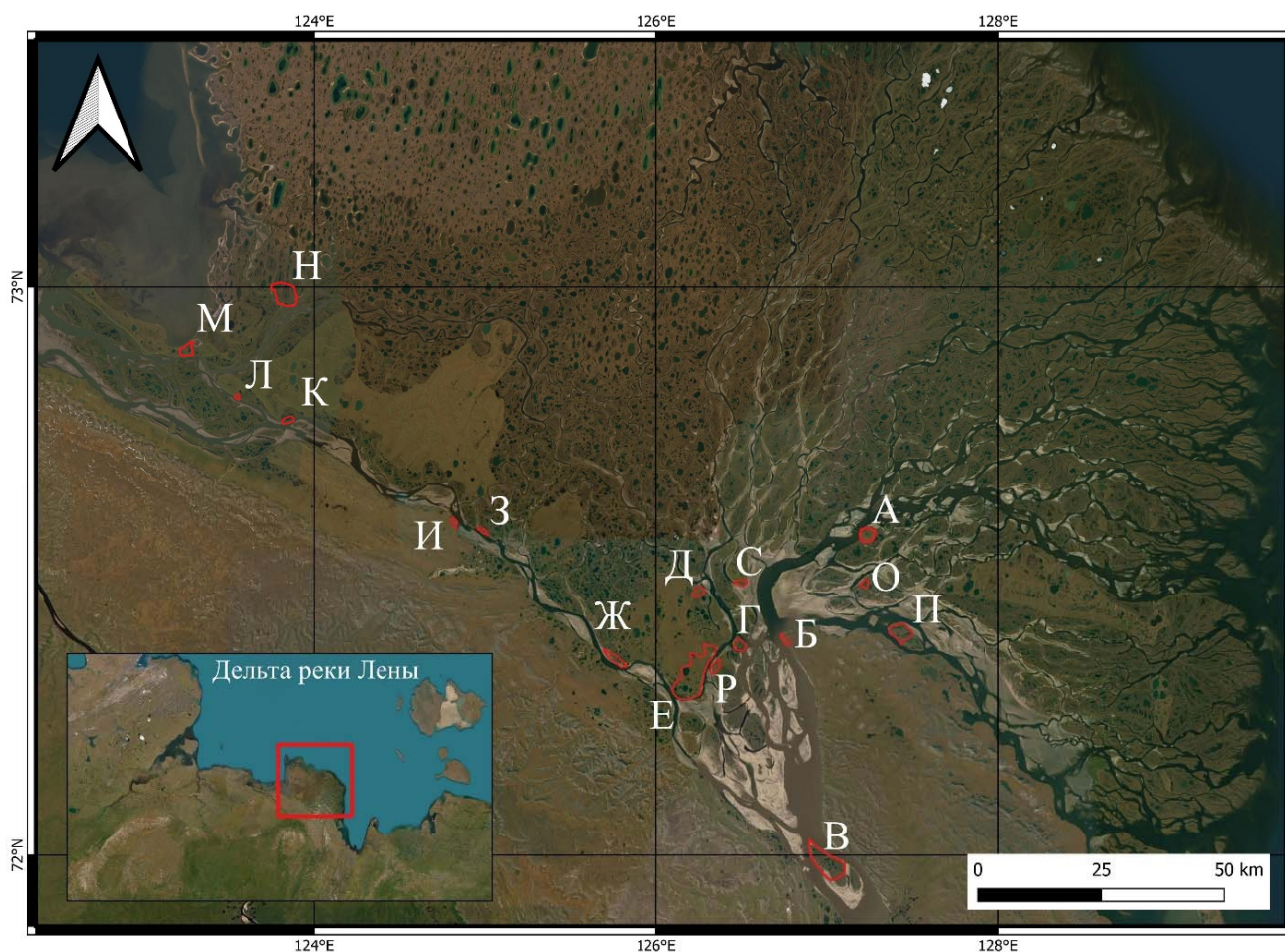


Рисунок 2.1 – Объекты исследования в дельте реки Лены. Условные обозначения: А – о. Сардах, Б – Харулахский хребет, В – о. Тит-Ары, Г – о. Самойловский, Д, Е, Ж – о. Курунгнах, З – о. Джан-Гылах, И – кряж Чекановского, К, Л – о. Харданг, М – о. Эби-Басын Сисе, Н – о. Джипириес, О – о. Ботулу-Сисе, П – о. Чай-Ары, Р, С – острова без названия

Остров Самойловский, первой террасы реки, расположен в центральной части дельты реки Лены, имеет площадь около 5 км². Западная часть образована недавними русловыми и эоловыми процессами. Восточная часть представлена ледяными жилами и небольшими термокарстовыми озерами.

Остров Курунгнах, третьей террасы реки, расположен вблизи вершины дельты. Сложен с поверхности отложениями ЛК и подстилающими их песками (Большаянов и др., 2013). На данном участке рассматривались особенности

формирования почв аласов, булгунняхов, а также отложений ЛК. Вопрос о происхождении ЛК до сих пор не решен. Существует несколько гипотез, объясняющих накопление песчано-иловых отложений и их одновременное промерзание. Некоторые исследователи (Wetterich et al., 2020) связывают этот процесс с эоловым переносом и отложением огромного количества минерального материала из атмосферы, а также существует теория об образовании ЛК в результате аллювиального накопления (Большиянов и др., 2013). Данная теория основана на том, что перед ледниковым щитом на шельфе моря Лаптевых находился застойный водоем, в котором происходило накопление отложений ЛК (Большиянов и др., 2013). Один из исследованных участков острова представлен «молодым» аласом, который начал формироваться в течении последних ста лет на участке бывшего озера, которое было спущено в результате береговой эрозии острова и термокарстовых процессов.

Остров Джан-Гылах третьей террасы реки, является продолжением о. Курунгнах и разделен небольшой протокой. Сложен с поверхности отложениями ЛК и подстилающими их песками.

Кряж Чекановского, коренной берег западной части дельты. Горный кряж, ограничивающий дельту с юго-запада. Сложен древними песчаниками, алевролитами и глинистыми сланцами.

Остров Харданг третьей террасы реки, с поверхности сложен отложениями ЛК. Характерен холмисто-бугорковатый рельеф как следствие размыва со стороны проток и внутренних частей острова по краям термокарстовых котловин и локальных эрозионно-термокарстовых долин. Остров подстилается горизонтальными слоистыми кварцевыми песками и алевролитами, содержащими растительные остатки.

Остров Эби-Басын-Сисе третьей террасы реки, с поверхности сложен отложениями ЛК, подстилаемыми песками и алевролитами с растительными остатками в виде детрита.

Остров Ботулу-Сисе третьей террасы реки, с поверхности сложен отложениями ЛК, подстилаемыми песками и алевритами с растительными остатками в виде детрита.

Остров Джипуриес второй террасы реки, является продолжением острова Арга и расположен в северо-западной части дельты. Состоит из песчаных отложений с небольшим содержанием льда. Высота поверхности до 30 м, рельеф представлен плато с расчлененными долинами озер.

Остров Тут-Ары первой террасы реки, расположен в пойме реки и состоит из «слоенки» и песчаных отложений с небольшим содержанием льда.

Остров Чай-Ары первой террасы реки, сложен аллювиальными осадками с включениями галечника и небольшим содержанием детрита, высота острова составляет 6–9 метров. Возраст отложений составляет от нескольких десятилетий до столетия (Большаянов и др., 2013).

Также были проведены работы на ряде островов первой террасы реки, не имеющих названия, что указывает на их молодой возраст, острова сложены аллювиальными осадками и затапливаются во время крупных половодий.

2.3. Методы исследования

Физические методы. Плотность твердой фазы образцов почв анализировалась весовым методом (Рожков и др., 2002), гранулометрический состав – методом Качинского (Рожков и др., 2002). Для исследования микроморфологического состава были подготовлены почвенные шлифы. Они изготовлены из сухих почвенных микромонолитов ненарушенной структуры. Полученные шлифы анализировали с помощью поляризационного микроскопа (Leica DM750P, Германия) в параллельных и скрещенных николях.

Химические методы. Содержание углерода и азота в образцах почв определялось методом сухого сжигания. Определение производилось при помощи элементного анализатора EA3028-НТ EuroVector (Pravia PV, Италия). Элементный состав ГК также определялся при помощи элементного

анализатора. Для определения химического состава исследуемых почв выполнен рентгенофлуоресцентный анализ на энергодисперсионном рентгенофлуоресцентном спектрометре EDX-800P (Shimadzu, Япония) (ГОСТ 33850-2016, 2016). Твердотельные спектры ГК определялись методом CP/MAS ^{13}C -ЯМР спектроскопии на ЯМР-спектрометре Bruker Avance 500 в роторе из ZrO_2 3,2 мм. Скорость вращения внутри датчика под «магическим углом» составляла 20 кГц, а частота нутации для кросс-поляризации u1/2p 1/4 62,5 кГц. Задержка повторения составила 3 секунды. Значения pH почвы измеряли в водной и солевой суспензии (ГОСТ 26423 – 85, 2002).

Экстракция ГК из почвы выполнялась в несколько этапов:

– пробоподготовка: из образца почвы отбирались органические остатки (корни, фрагменты листьев и т.п.), после чего образец пропусклся через сито 1 мм.

– декальцирование: навеску образца заливали 0,05 н H_2SO_4 (соотношение 1:10) и оставляли на 24 часа. Декальцирование проводят полностью, контролируя фильтрат на содержание кальция (качественная реакция с оксалатом аммония). После чего образец промывали дистиллированной водой чтобы избавиться от остатков кислоты.

– экстракция: после фильтрации образец почвы заливали 0,1 н NaOH (соотношение 1:10), взбалтывали и оставляли на 24 часа. После этого сливали надосадочный раствор с помощью сифона и заливали почву новой порцией раствора 0,1 н NaOH (соотношение 1:10). Перемешивали и оставляли на 24 часа.

– коагуляция минеральных коллоидов и центрифугирование: для коагуляции диспергированных в щелочном растворе минеральных коллоидов в него добавляли насыщенный раствор коагулятора Na_2SO_4 (соотношение 250 мл/1 л раствора вытяжки) на 1 час. После этого раствор центрифугировали при 6000 об/мин. Раствор после фильтровали.

– осаждение: ГК осаждали в очищенном щелочном экстракте постепенным добавлением 1 н H_2SO_4 до pH=1,1–1,2 и оставляли на 24 часа. На

следующий день сифонировали надосадочную жидкость на центрифуге при 3000 об/мин. в течение 15 мин и промывали в центрифужных стаканах.

– диализ: ГК после центрифугирования и промывки помещали в диализные пакеты и размещали в больших емкостях с дистиллированной водой на одну неделю, при этом вода менялась каждый день.

– сушка: препараты ГК из диализных пакетов переносили в чашки Петри и сушили на водяной бане. Далее препараты ГК перемещали в бюксы и при необходимости досушивали в эксикаторе.

– обеззоливание препаратов *ГК* проводилось при помощи плавиковой кислоты, после чего образцы *ГК* сушились в вытяжном шкафу. Далее образцы в трехкратной повторности промывались дистиллированной водой до полного удаления остатков плавиковой кислоты. После этого образцы сушились в вытяжном шкафу. Данная методика запатентована Абакумовым Е.В. и Чебыкиной Е.Ю. (Патент № 2786742, 2022).

Биологические методы. В образцах оценивали базальное (почвенное) дыхание по скорости образования CO_2 за неделю в закрытых камерах в лабораторных условиях при увлажнении почвы 70% от полной влагоемкости (ПВ) и температуре 24–25°C (Lal et al., 2001). Предварительно почва инкубировалась в течении 5 дней. Концентрацию CO_2 определяли методом титрования, уловленного в закрытой колбе CO_2 слабым раствором щелочи (NaOH) на протяжении 24 часов. Уровень потенциально минерализуемого углерода определялся по скорости образования CO_2 в течение 19 недель. Концентрация CO_2 определялась тем же методом, который использовался для анализа базального дыхания.

В полевом инкубационном эксперименте на о. Самойловском эмиссия CO_2 и CH_4 определялась на газовом хроматографе Agilent Technologies 6890 N Network GC (USA), снабженном пламенно-ионизационным детектором и метанатором (Гродницкая и др., 2017). Подсчет велся согласно (Lal, 2016).

Картографические методы. Для создания почвенно-геоморфологической карты о. Самойловский были проанализированы ранее полученные данные

дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) с применением БПЛА (Kartoziiia, 2019). для распознавания рельефа с предполагаемыми и установленными различными характеристиками почв. Основой для анализа послужили ортофотопланы, цифровые модели рельефа (ЦМР) и схемы морфометрии. Анализ данных ДЗЗ проводился в программном комплексе ГИС ArcGIS 10.6 компании ESRI CIS Limited и в QGIS 3.22. С помощью инструментов ArcGIS и QGIS были созданы несколько схем морфометрии рельефа. Затем мы распознали формы рельефа и вручную нанесли на карту почвы. В некоторых случаях мы знаем, что выявленные формы рельефа имеют различные почвенные характеристики. В других случаях мы предполагаем различия в почвенных параметрах рельефа в силу их очевидного различия в рельефе, растительном покрове и других видимых признаках. При ручном картографировании мы учитывали следующие характеристики: микрорельеф местности по ЦМР и схемам морфометрии, тональность фотоснимков поверхности по ортофотопланам, а также полученные характеристики почв различных островных рельефов.

Статистические методы. Химические и биологические показатели почв оценены в трех повторностях и выражены как среднее \pm стандартное отклонение. Для обобщения и визуализации пространственного варьирования данных выполнен анализ главных компонент, определен коэффициент корреляции Спирмена, а также проведен кластерный анализ, использовался метод Уорда. Для определения достоверности различий использовался факторный дисперсионный анализ (ANOVA), различия считались достоверными при $p \leq 0,1$. Статистический анализ данных и их визуализация выполнены в программах STATISTICA 12 (StatSoft, Inc. (2014)), PAST ver. 3.08, GraphPad Prism 9 (GraphPad software LLC).

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

Почвы дельты формируются на трех разновозрастных геоморфологических террасах, их образование обусловлено проявлением русловых, аллювиальных и криогенных процессов. В данном разделе приведены результаты изучения почв, формирующихся в условиях влияния реки, а также зональных и интразональных почв, формирующихся под действием криогенных процессов. Почвы дельты реки Лены формируются на аллювиальных отложениях реки в условиях близкого залегания ММП, и характеризуются низкой степенью выветривания первичных минералов, накоплением органических соединений, а также различной степенью проявления криогенеза (Polyakov et al., 2018b). Зональными типами почв являются подбуры, данные почвы развиваются на участках первой террасы, которые относительно недавно вышли из-под влияния реки и продолжают свое формирование под действием почвенного криогенеза; криоземы, их развитие происходит на всех трех рассматриваемых геоморфологических террасах, а также на коренных берегах дельты. Почвы характеризуются наличием срединного горизонта CR как правило, он представляет собой грязно-серую и/или грязно-бурую минеральную, бесструктурную, супесчано-легкосуглинистую массу. Интразональные почвы представлены следующими типами: – стратоземы, развиваются на участках первой террасы реки, находящейся в зоне периодического затопления и характеризуются стратифицированной толщей, которая состоит из серогумусовых и минеральных горизонтов; – торфяно-эутрофные почвы, развиваются на всех трех геоморфологических террасах дельты, их формирование приурочено к замкнутым локальным депрессиям рельефа; – глееземы, данный тип почв развивается на всех трех геоморфологических

террасах дельты, почвы формируются в наиболее переувлажненных участках, в большей степени в понижениях рельефа, а также на участках с преобладанием пылевых и глинистых частиц в гранулометрическом составе; – серогумусовые почвы, развиваются на участках «спущенных» озер на территории третьей террасы дельты, формирование серогумусовых почв здесь обусловлено развитием злаковых сообществ растений, формированием мощного дернового горизонта, а также наличием хорошо дренированных позиций. Также формирование серогумусовых почв было отмечено на о. Столб в центральной части дельты, который является останцом коренного берега реки, почвы здесь сформировались на выходах коренных пород, представленных доломитизированными известняками. Для анализа разнообразия почв приведено их морфологическое описание в зависимости от топографического положения и соответственно времени формирования. Описание основных типов почв исследованных островов представлены в Приложении А.1-А.17.

3.1.1. Почвы первой террасы, формирующиеся в условиях влияния реки, и на аллювиальных отложениях раннего голоцена

Почвы первой террасы занимают большую часть дельты и формируются на периодически-осаждающемся материале (в результате поемного процесса), а также на аллювиальных отложениях голоценового возраста (Поляков, Абакумов, 2021). В зависимости от времени формирования почв и процессов, происходящих в них, мы можем идентифицировать следующие отделы почв: *стратоземы, альфегумусовые, криогенные, глеевые, а также торфяные.*

3.1.1.1. Стратоземы первой террасы

Образование стратоземов происходит на участках, которые подвержены периодическому затоплению и соответственно привносу свежего речного материала. Согласно российской почвенной классификации (Шишов и др., 2004) отдел стратоземов относится к стволу синлитогенных почв и подразумевает

собой стратифицированную толщу мощностью более 40 см. В условиях дельты в этих почвах образуются гумифицированные стратифицированные горизонты, которые перекрываются минеральными отложениями, приносимыми сюда рекой.

В условиях дельты нами были идентифицированы *стратоземы серогумусовые супесчаные* на аллювиальных отложениях. В связи с этим, у специалистов может возникнуть вопрос, почему данные почвы идентифицируются нами как стратоземы, а не, например, аллювиальные почвы. Согласно современной классификации (Шишов и др., 2004) и аллювиальные почвы и стратоземы относятся к стволу синлитогенных почв, т.е. почвообразование идет вместе с накоплением свежего минерального материала. И аллювиальные почвы и стратоземы могут формироваться под действием речных процессов, при этом стратоземы могут формироваться и в условиях эолового привноса материала. В условиях низких температур и короткого периода почвообразования (имеется в виду арктическое лето) в данных почвах довольно четко прослеживаются гумусированные стратифицированные почвенные горизонты, которые залегают на минеральном речном материале. В зависимости от положения в рельефе, действия реки и положения над урезом воды, затопление различных территорий может происходить не ежегодно, а раз в несколько лет или даже десятилетий, что опять же четко отражается в почвенном профиле и сказывается на мощности серогумусового горизонта. Во время ледостава почвы, формирующиеся на высоте от 1 до 4–5 метров, могут быть механически абрадированы льдом, что приводит к стратификации.

Осадконакопление на различных участках дельты гетерогенно, т.е. помимо аллювиального накопления материала присутствует и эоловое накопление материала. Это напрямую связано с деятельностью реки и постоянным намыванием песчаных отложений, которые в зависимости от уровня воды в реке могут осушаться, переносится ветром до ближайших естественных преград (например, высоких островов) и затапливаться. Поэтому нами было принято

решение выделять почвы на аллювиальных отложениях дельты реки Лены как стратоземы серогумусовые.

Как уже было сказано выше, стратоземы серогумусовые супесчаные, характеризуются стратифицированной толщей, которая состоит из серогумусовых и минеральных горизонтов. Мощность почвенного профиля в зависимости от положения в рельефе колеблется от 60 см (в депрессиях рельефа) до 100 см (на относительных возвышенностях), до границы с ММП. Между типами почв в данном отделе также присутствуют различия, которые в первую очередь связаны со степенью гидроморфизма территории. Соответственно, почвы, формирующиеся в понижениях, более влажные, а также с более близким залеганием границы ММП. Нижние горизонты почв зачастую имеют охристый цвет, что указывает на редоксиморфную трансформацию хромоморфных элементов Fe и Al. Следов оглеения в данных почвах не отмечено, что, скорее всего, связано с легким гранулометрическим составом и латеральным движением влаги по границе ММП в сторону реки. Таким образом, влага не застаивается и препятствует образованию анаэробных условий. Морфологический профиль стратозема серогумусового представлен на рисунке 3.1.

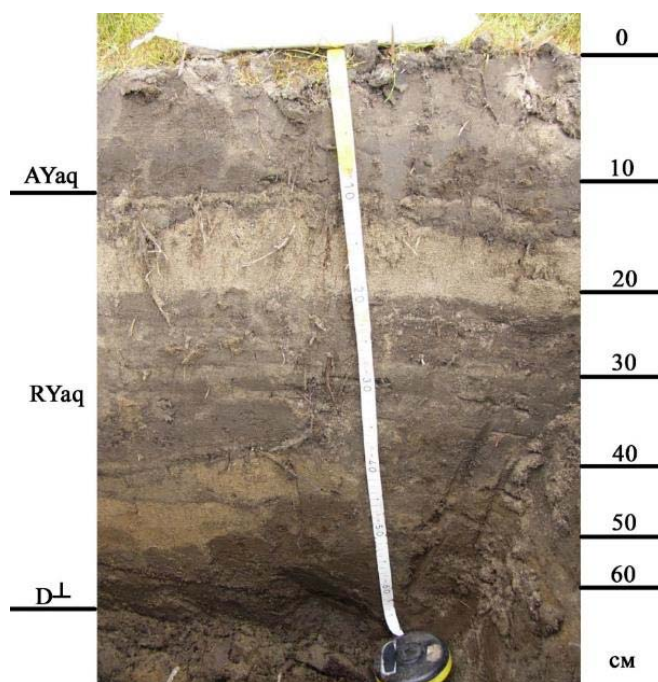


Рисунок 3.1 – Стратозем серогумусовый супесчаный (о. Самойловский)

На почвы дельты также влияют различные криогенные процессы, которые отражаются в изменениях почвенного профиля, а также в рельефе. В отношении стратоземов серогумусовых супесчаных следы влияния криогенных процессов слабо прослеживаются. Это связано с несколькими факторами почвообразования: (1) растительный покров представлен кустарниковыми ивами, различными цветковыми растениями, а также, на переувлажненных участках, пушицей и осокой. Отсутствие сплошного растительного покрова, в частности мохово-лишайниковых сообществ, создает условия активного теплообмена между почвой и атмосферой; (2) легкий гранулометрический состав с преобладанием фракции песка (около 80%) позволяет почвам прогреваться значительно быстрее, чем формирующимся на средних или тяжелых по гранулометрическому составу почвам; (3) вследствие отепляющего влияния реки почвы более длительное время находятся в незамёрзшем состоянии.

В случае золово-водного накопления материала соблюдается тот же принцип развития процессов почвообразования, лишь с той оговоркой, что материал может накапливаться не только под действием реки, но и ветра. При этом были отмечены такие варианты образования почв, в которых преобладает золовое накопление материала. Здесь почвы перекрываются речным аллювием и происходит опустынивание территорий.

При использовании российской классификации почв (Шишов и др., 2004) одновременно с международной реферативной базой почв (IUSS Working Group WRB, 2022) данный тип почв будет соответствовать *Umbric Cryosols*, это связано с тем фактом, что в международном варианте все почвы, в которых присутствуют ММП до 1 метра, считаются криогенными (Cryosols). Приставка *Umbric* указывает на формирование темноокрашенного минерального горизонта легкого гранулометрического состава с кислой реакцией pH и с содержанием органического углерода более 0,6%.

3.1.1.2. Альфегумусовые почвы первой террасы

Формирование альфегумусовых почв происходит на аллювиальных отложениях голоцена, данные почвы не подвержены активному влиянию реки или подвержены раз в несколько десятилетий. Характерной особенностью данных почв является наличие горизонта ВF, который имеет охристую окраску за счет железистых пленок на поверхности минеральных зерен. Мощность профиля таких почв варьируется до 40–60 см в зависимости от положения в рельефе: соответственно, в понижениях до 40 см, на повышениях до 60 см. Здесь фиксируется накопление оксидов железа и алюминия, которые в кислой среде могут становиться подвижными и мигрировать по профилю почв. В зависимости от гидроморфизма территории в нижележащих слоях могут возникать анаэробные условия, что приводит к развитию глеевых процессов. Гранулометрический состав таких почв представлен песчаной фракцией (до 70%). Растительность представлена сплошным мохово-лишайниковым покровом, который выступает в качестве теплоизолятора. В связи с этим более активно происходит проявление криогенных процессов в почвах, это отражается в более близком залегании ММП, а также присутствием слабых следов криотурбаций.

В целом, альфегумусовые почвы развиваются на участках, которые относительно недавно вышли из-под влияния реки и продолжают свое формирование под действием почвенного криогенеза. С увеличением возраста, данные почвы год за годом, видимо, будут накапливать все большее количество неразложившихся органических остатков в почвенном профиле, из-за развития криогенных процессов и формирования мощного мохового покрова, что может привести к слабому теплообмену с атмосферой, уменьшению сезонно-талого слоя почвы и в результате приведет к образованию криоземов. Такая тенденция довольно хорошо прослеживается в дельте, т.к. различные острова образовывались в разное время. Тем не менее, на данный момент довольно сложно сказать какое время необходимо для трансформации альфегумусовых почв в криогенные, это в первую очередь связано с изменениями климата, а

также недостаточностью данных по датированию отложений. Данный вопрос довольно интересен и может быть рассмотрен в будущих исследованиях.

Согласно международной классификации почв IUSS Working Group WRB (2022) данные почвы могут быть классифицированы как *Spodic Cryosols*: горизонт Spodic указывает на наличие темноокрашенного горизонта, состоящего из комплексов органического вещества и оксидов алюминия и (или) железа.

3.1.1.3. Криогенные почвы первой террасы (на аллювиальных отложениях раннего голоцена)

Развитие криогенных почв происходит на участках, не подверженных активному влиянию реки. Данные почвы имеют срединный горизонт CR, как правило, он представляет собой грязно-серую и/или грязно-бурую минеральную, бесструктурную, супесчано-легкосуглинистую массу. Верхний горизонт представлен моховым покровом со слабыми признаками разложения органических остатков, ниже он подстилается ММП. Глубина залегания мерзлоты составляет до 40 см на хорошо дренированных территориях, в понижениях рельефа глубина активного слоя может составлять до 20 см. Характерными особенностями криогенных почв является развитие криотурбационных процессов в виде вихревых рисунков, а также наличия морозобойных трещин. На первой террасе, в ходе развития термокарста, формируются термокарстовые озера, а также нанополигональный рельеф и бугры пучения до 20 см. В условиях водной эрозии происходит береговая абразия, при этом часть термокарстовых озер «спускается» в реку, таким образом на их месте формируются современные почвы, которые также представлены криоземами. Следовательно, при формировании нанополигонов и их дальнейшем развитии происходит трансформация рельефа, и вместе с ним эволюция почв (процессы морозного пучения, а также криогенный массообмен).

В целом, в условиях первой террасы такие процессы не так сильно выражены, как на участках третьей террасы, где располагается ледовый

комплекс. При этом, можно выявить некоторые особенности формирования криоземов даже в пределах нескольких островов, расположенных на первой террасе. Данные процессы были рассмотрены на о. Самойловский, т.к. здесь находится и активно затапливаемая территория, и участки, которые не подвергаются влиянию реки. Характерной чертой криоземов, формирующихся на первой террасе, является наличие погребенных древесных остатков, преимущественно на границе с ММП, данные осадки, видимо, переносились рекой и накапливались здесь в ходе формирования островов. При этом накопление имело место быть относительно недавно, на что указывает относительно молодой возраст данных почв. «Молодые» криоземы первой террасы формируются на легких по гранулометрическому составу отложениях, без признаков оглеения, в профиле присутствуют охристые пятна, а также над границей с ММП происходит накопление влаги. На пологих участках рельефа проявление криотурбаций слабо выражено, активность проявления криогенных процессов увеличивается с приближением к краям нанополигонов и максимальное их проявление достигается на самом краю нанополигона. Морозобойные трещины присутствуют во всех изученных профилях криогенных почв. Более зрелые криоземы имеют меньший деятельный слой, а также большее количество неразложенных органических остатков.

Верхний слой криоземов здесь представлен органогенным горизонтом О. Он состоит из слабо разложившихся моховых остатков. Морфологический профиль *криозема грубогумусового* представлен на рисунке 3.2. Согласно международной классификации IUSS Working Group WRB (2022) данные почвы будут соответствовать *Turbic Cryosol*, что указывает на признаки криотурбаций в почве.

3.1.1.4. Глеевые почвы первой террасы

Глеевые почвы формируются в наиболее переувлажненных участках, в большей степени в понижениях рельефа, а также на участках с преобладанием



Рисунок 3.2 – Криозем грубогумусовый на аллювиальных отложениях
о. Самойловский

пылеватых и глинистых частиц в гранулометрическом составе. Мощность таких почв составляет до 30 см, присутствует характерная сизая окраска и запах. Признаки криогенеза проявляются слабо, отмечается тиксотропия. В условиях изученной дельты может быть несколько причин формирования глеевых почв.

Первый механизм: минеральные частицы в ходе латерального переноса глинистых и пылевых частиц (наиболее мелких) могут перемещаться по надмерзлотному горизонту и накапливаться в депрессиях рельефа. Второй механизм: при формировании островов могли складываться условия с неравномерным накоплением песчаных и глинистых частиц (в условиях быстрого течения реки оседают преимущественно крупные частицы, в условиях медленного течения, накапливается илистая фракция), в связи с этим могло происходить неравномерное распределение минеральных частиц. Тем самым преобладание илистых частиц в профиле приводит к формированию геохимического барьера и развитию анаэробных условий. Третий механизм связан с долгосрочными процессами разрушения минеральных частиц под

действием криогенных условий (криоэлювиогенез). Данный механизм слабо развит на аллювиальных голоценовых отложениях. Более детально он будет описан в разделе 3.3. «Микроморфологические особенности разновозрастных криогенных почв».

Глеевые почвы в дельте р. Лены представлены криогенно-ожелезненным глееземами. В международной классификации данные почвы будут соответствовать *Reductaquic Cryosol*, данный классификатор указывает на восстановительные условия в почве. Тем не менее корректного названия нет, для этих почв в IUSS Working Group WRB существует тип *Gleysols*, но он не подразумевает наличия мерзлоты в пределах одного метра. Таким образом данный тип не подходит для почв, формирующихся в криогенных условиях, при этом классификаторы для *Cryosols* также не подразумевают наличия признаков оглеения.

3.1.1.5. Торфяные почвы первой террасы

Торфяно-эутрофные почвы формируются на участках водораздельных равнин и залегают под моховым покровом. Степень разложения торфа не превышает 50%, подстилается органогенным материалом с большей степенью разложения. На контакте с ММП возможно появление признаков оглеения.

В международной классификации IUSS Working Group WRB (2022) данные почвы соответствуют *Folic Cryosol*. Классификатор *Folic* указывает на наличие органогенного хорошо аэрируемого материала.

Почвенная катена о. Самойловский, включающая основные типы почв, распространённые на первой террасе представлена на рисунке 3.3.

Почвенный покров первой террасы является наиболее разнообразным в пределах дельты. Почвы второй и третьей террас подвержены более глубокому проявлению криогенных процессов, которые влияют на морфологическую организацию почв.

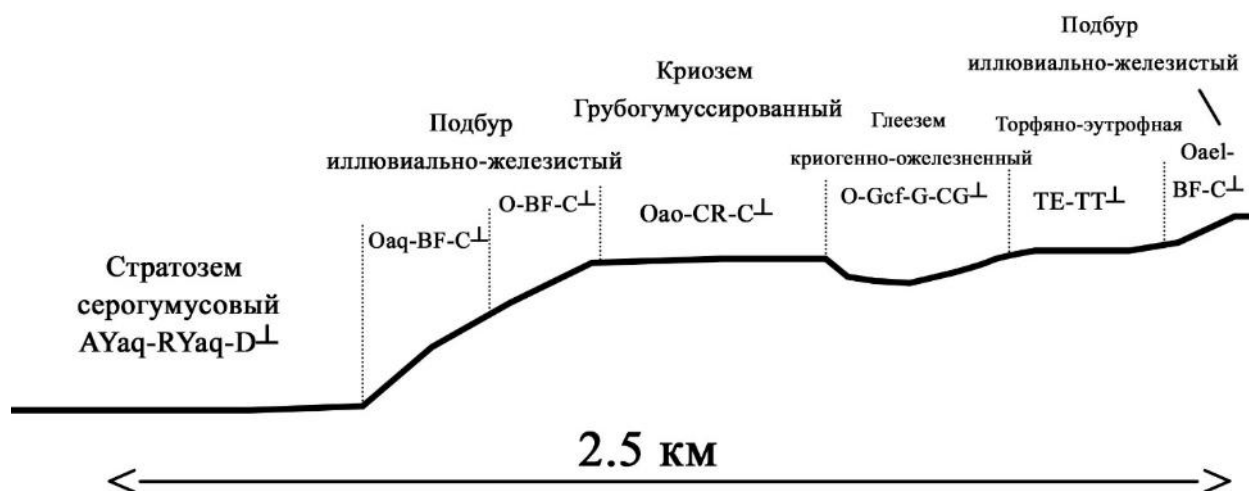


Рисунок 3.3 – Катенарное распределение основных типов почв на о. Самойловский

Таким образом, в пределах первой террасы мы можем выделить зональные почвы, которые представлены отделами криогенных и альфегумусовых почв, которые развиваются на незатапливаемых участках террасы, либо затапливаются в периоды особенно крупных половодий. Среди интразональных почв, мы можем выделить следующие отделы почв: стратоземы, торфяные, глеевые. Среди них, развитие стратоземов обусловлено активностью русловых и поемных процессов, в то время как развитие торфяных и глеевых почв отмечено в отрицательных формах рельефа с признаками переувлажнения.

В таблице 3.1 представлена обобщенная информация о составе почвенного покрова, формирующегося на первой террасе дельты реки Лены.

Таблица 3.1 – Почвенное разнообразие первой террасы дельты реки Лены

Отдел	Тип	Подтип	Морфологические признаки	Специфические морфологические признаки
Торфяные	Торфяные эутрофные	Аллювиально слоистые	Степень разложения торфа не превышает 50%,	В почвенном профиле отмечаются горизонтально-

			подстиляется органическим материалом с большей степенью разложения	волнистые линзы песка мощностью в несколько миллиметров
Стратоземы	Стратоземы серогумусовые	Водно-аккумулятивные	Почвенные горизонты имеют различный гранулометрический состав от легкого суглинка до песка, цвет, а также структуру	Нижние горизонты почвы могут иметь признаки оглеения, а также накопления алюмосиликатов
Альфегумусовые	Подбур	Иллювиально-железистый	Охристая окраска срединного горизонта, отмечаются признаки оглеения, гранулометрический состав меняется от супесчаного до песчаного в зависимости от положения в рельефе, верхний горизонт подстильно-торфяной	В зависимости от степени гидроморфизма территории проявление миграционной активности алюмосиликатов меняется от слабой на дренированных позициях до сильной на переувлажненных участках
Криогенные	Криоземы	Грубогумусированные	Горизонт CR, как правило, представляет собой грязно-серую и/или грязно-бурую минеральную, бесструктурную, супесчаную-легкосуглинистую массу	Слабая степень разложения органических остатков, отмечается накопление гумуса на границе ММП, низкая степень проявления криторурбационных процессов

Глеевые	Глееземы	Криогенно-ожелезненные	Характерная физическая окраска, тиксотропия, формирование геохимического барьера на границе с ММП	Низкая степень разложения органических остатков, низкая степень проявления криотурбационных процессов
---------	----------	------------------------	---	---

3.1.2. Почвы второй террасы (сформированные на отложениях позднего плейстоцена)

На второй террасе дельты реки Лены наблюдается полигональный рельеф, вызванный формированием сети мерзлотных тундровых полигонов с активными термокарстовыми процессами (Polyakov et al., 2018a). Данный участок является наиболее труднодоступным с точки зрения логистических операций, т.к. в речных протоках постоянно колеблется уровень воды, что затрудняет доступ к этому участку. Основным типом почв здесь выступают *криоземы*. Морфологический профиль криоземов о. Джипириес представлен на рисунке 3.4.



Рисунок 3.4 – Криозем перегнойный на древних аллювиальных песках (вторая терраса, о. Джипириес)

Формирующиеся здесь почвы довольно сильно отличаются от аналогов первой террасы в виду развития почвенного криогенеза и почвообразующих пород, подстилающих почвенный профиль. Растительность сомкнута, представлена злаковыми травами, мхами, лишайниками, а также цветковыми растениями. Почва с поверхности имеет темный органо-аккумулятивный горизонт с явным проявлением криотурбаций (вихревого рисунка), органическое вещество имеет относительно высокую степень трансформации, что указывает на активные процессы гумификации ПОВ. Срединный горизонт имеет бурый цвет с темными гумусовыми потеками, наличие корней прослеживается по всему почвенному профилю. На границе с ММП наблюдаются «гумусовые пятна», которые, судя по всему, перемещаются сюда из верхнего гумусового горизонта. Почвенная масса представлена однородными песками. Мощность почвенного профиля достигает 40 см. Отсутствуют признаки переувлажнения, это может быть связано с дренажом, обусловленным песчаным составом, а также с латеральным переносом влаги. Данный участок наиболее быстро освобождается от снега во время таяния, на него также не оказывает влияние река. В почвах практически не встречаются слаботрансформированные органические остатки.

Согласно международной классификации IUSS Working Group WRB (2022), данные почвы соответствуют *Umbric Turbic Cryosol*. Квалификатор *Umbric* указывает на накопление органического материала в верхней части профиля и является аналогом серогумусового горизонта в российской классификации (Шишов и др., 2004).

Вторая терраса наиболее интересна с точки зрения протекания почвообразующих процессов, она абсолютно не похожа на остальную часть дельтового комплекса. Это связано с более активными процессами трансформации органического вещества в почве по сравнению с первой и третьей террасами.

В таблице 3.2 представлена обобщенная информация о почвах, формирующихся на второй террасе дельты реки Лены.

Таблица 3.2 – Почвенное разнообразие второй террасы дельты реки Лены

Отдел	Тип	Подтип	Морфологические признаки	Специфические морфологические признаки
Криогенные	Криоземы	Перегнойные	Активные криотурбационные процессы, высокая степень трансформации органических остатков, песчаная	Отмечено формирование гумусовых затеков, происходит накопление органических веществ на границе с ММП

3.1.3. Почвы третьей террасы (сформировавшейся в период от раннего голоцена до позднего плейстоцена)

Третья терраса занимает около 23% территории дельты. Главной особенностью данной террасы является наличие ледового комплекса (ЛК), с формированием которого связано несколько теорий. По гипотезе российских ученых (Большаянов и др., 2013), данные отложения были сформированы в ходе затопления территории морскими водами, и она представляла собой подпруженное озеро, осадки которого послужили формированию ЛК. По версии ученых из Германии (Schirrmeister et al., 2011; Wetterich et al., 2020), это образование имело эоловое происхождение, в него ежегодно попадали минеральные частицы и органогенные остатки. ЛК представляет собой высокольдистое неоплейстоценовое образование сложного генезиса с повторно-жильными льдами (Картозия, 2021). В связи с этим поверхность третьей террасы подвергается существенной трансформации в результате развития термокарстовых процессов. Здесь происходит формирование аласов, булгунняхов, нанополлигональной тундры, наблюдается активная трансформация береговой зоны в результате таяния ЛК (Поляков, Абакумов, 2021). Почвенное разнообразие данной террасы складывается из криогенных, глеевых и торфяных почв. Большая часть почв, формирующихся здесь, представлена различными

типами криогенных почв, морфологическое строение которых изменяется в зависимости от положения в рельефе, а также торфяными почвами. Нами было рассмотрено развитие почв на примере аласов и булгунняхов о. Курунгнах.

3.1.3.1. Почвенный покров аласов и булгунняхов

Аласы это одна из форм термокарстового рельефа, возникающего в результате протаивания ледяного ядра в почве и формирования термокарстового озера (Горбатов и др., 2021). Глубина аласов в среднем составляет 25 метров. Почвенный покров аласов интересно рассматривать с позиций катены. Нами заложено 5 ключевых участков – на вершине аласа, его склоне, у подножия, на дне, а также в середине днища аласа, где представлен нанополигональный рельеф. На вершине аласа в хорошо дренируемых позициях формируются маломощные, до 27 см, *криоземы грубогумусированные*. Почва имеет облик гомогенной серой массы с хорошо обособленным криогенным горизонтом CR, пронизана слабо разложенным органическим материалом, признаки оглеения отсутствуют в виду относительно хорошего дренажа и латерального стока.

На склоновой поверхности аласа формируются относительно мощные, до 70 см, *криоземы*, с темно-серой окраской профиля, слабооструктуренные, легкосуглинистые, профиль пронизан корнями, подстилается ММП, по границе с которыми происходит перемещение влаги вниз по склону. Растительный покров здесь представлен маломощным моховым покровом (5 см) и большим количеством стелющейся ивы, корни которой пронизывают весь почвенный профиль.

Территория вблизи дна аласа характеризуется переувлажненными условиями, здесь развиваются *торфяно-эутрофные почвы*, до 29 см мощностью, ниже расположена граница ММП. Надмерзлотная влага встречается с 25 см, органические остатки в профиле практически не трансформированны. Растительность представлена мохово-лишайниковым фитоценозом.

На дне аласа, вблизи его склона, формируются маломощные (до 20 см) *криоземы грубогумусированные*. Моховой покров достигает 8 см, бесструктурный, серый горизонт CR пронизан органическими остатками, с 18 см встречается надмерзлотная влага, на глубине 20 см залегают ММП. Растительность представлена мохово-лишайниковым сообществом.

В районе нанополлигонов, располагающихся в центре дна аласа, происходит формирование бесструктурных маломощных (до 18 см) *глееземов криотурбированных*. Для них характерно наличие сизых пятен, признаков почвенной тиксотропии, по гранулометрическому составу глееземы относятся к суглинистым почвам. Растительный покров представлен мохово-лишайниковым фитоценозом.

Таким образом, начиная с вершины аласа и следуя вниз по склону, отмечается увеличение степени гидроморфизма территории, с этим связано развитие криогенных, торфяных и глеевых почв. Почвенная catena исследованного аласа представлена на рисунке 3.5.

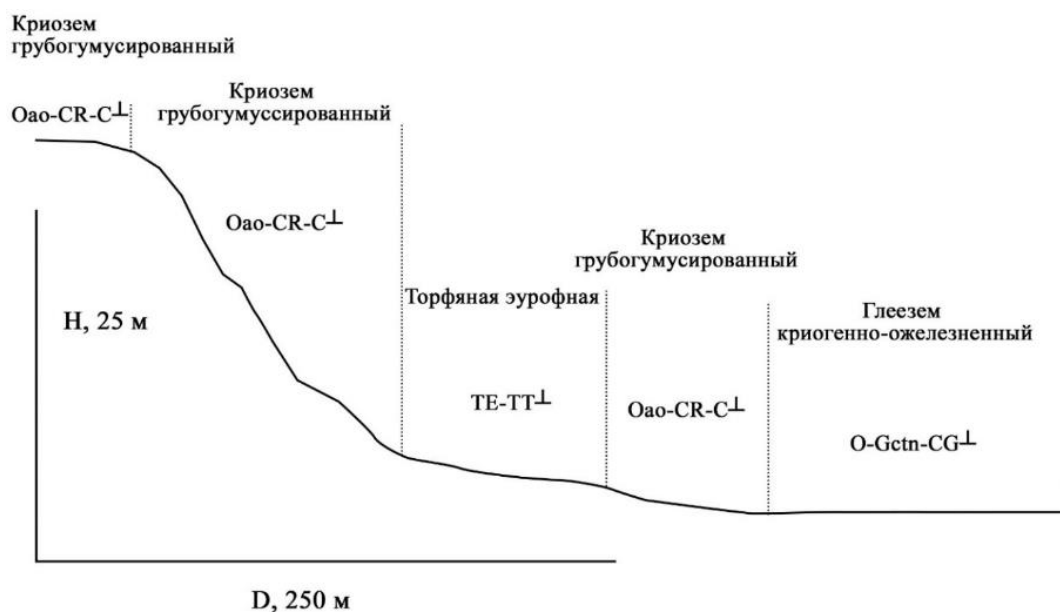


Рисунок 3.5 – Катенарное распределение почв на поверхности аласа о. Курунгнах. Условные обозначения: Н – глубина аласа, м, D – расстояние, м

Булгунняхы (пинго) представляют собой бугры пучения, которые формируются в результате формирования таликов при восходящем развитии

ММП. Их высота может достигать 70 м, а диаметр основания – нескольких сотен метров (Васильчук и др., 2014). По примеру аласов, мы также рассмотрим изученные нами ключевые профили почв на вершине булгуннях о. Курунгнах, его склоне и у подножия. На хорошо дренированной вершине формируются *дерново-подбуры*, мощностью до 50 см, без признаков переувлажнения. Верхний органо-аккумулятивный горизонт густо пронизан корневой системой, растительность представлена злаковыми формациями и стелющимися кустарничками ивы. Срединная часть профиля характеризуется наличием горизонта ВF ореховатой структуры, в котором накапливаются оксиды железа, диагностируемые в профиле по рыжим пятнам. Гранулометрический состав почв представлен легкими суглинками. Видимо, с таянием ледяного ядра внутри булгуннях верхняя часть почв на его вершине становится менее подверженной процессам криогенеза, а также отсутствует избыточное переувлажнение, поэтому типичных признаков криоморфизма не наблюдается.

Почвенный покров склонов булгуннях представлен *криоземами глееватыми* с малой мощностью (до 30 см). Почвы образуются под моховым покровом, горизонт CR представлен гомогенной суглинистой бесструктурной массой с признаками переувлажнения и оглеения на границе с ММП.

Вокруг основания булгуннях формируется заболоченная территория, образовавшаяся в ходе процесса деградации его ледяного ядра. У подножия склона формируются *криоземы грубогумусированные глееватые* малой мощности (до 20 см). Профиль характеризуется накоплением с поверхности грубогумусового материала в виде органогенного горизонта мощностью до 6 см, который подстилаются горизонтом CR, ниже залегают ММП. Горизонт представлен серо-бурой массой с сизыми пятнами, присутствует морозная трещиноватость. ММП выступает здесь водоупором, на их поверхности накапливается влага. Почвенная катена исследованного булгуннях представлена на рисунке 3.6.

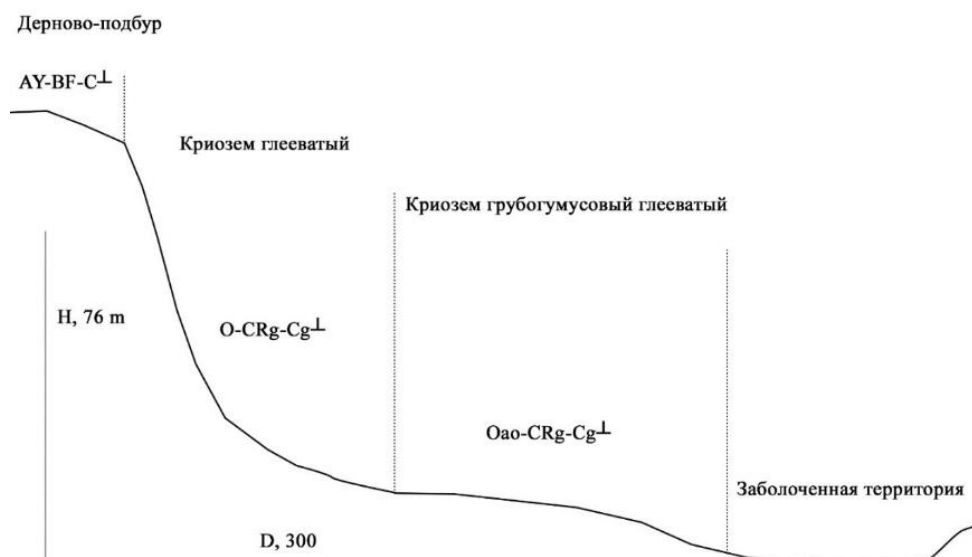


Рисунок 3.6 – Катенарное распределение почв на поверхности булгуннях на о. Курунгнах. Условные обозначения: Н – высота булгуннях, м, D – расстояние, м

Таким образом, почвенный покров основных форм рельефа третьей террасы дельты р. Лены, представлен зональными почвами – подбурами и криоземами на хорошо дренированных позициях, а также интразональными почвами – торфяными и глеевыми почвами в локальных переувлажненных депрессиях. Наличие ЛК на третьей террасе реки обуславливает довольно пестрый рельеф, который состоит из аласов, булгунняхов, относительно ровных плато и нанополлигональной тундры.

При этом, стоит отметить и нехарактерные почвенные формации, имеющие место на рассматриваемой террасе. Таковыми являются почвы, формирующиеся на молодых осадках термокарстового озера о. Курунгнах, которое деградировало в ходе процесса эрозии береговой линии. Оно представляет собой переувлажненное понижение в рельефе среди множества небольших, до 3 метров высотой, булгунняхов, на вершинах которых формируются высокопродуктивные злаковые фитоценозы. На вершине булгунняхов формируется *серогумусовая иллювиально-железистая криотурбированная почва* мощностью до 50 см. Серогумусовый горизонт (AY) мощный, до 30 см, имеет ореховатую структуру, а также наличие рыжих пятен в

районах расположения растительных корней, ниже подстиляется маломощным горизонтом CR с погребенными слаборазложёнными органическими остатками, здесь выражены признаки криотурбации и рыжие пятна на контакте с ММП.

В таблице 3.3 представлена обобщённая информация о составе почвенного покрова, формирующегося на третьей террасе дельты реки Лены.

Таблица 3.3 – Почвенное разнообразие третьей террасы дельты реки Лены

Отдел	Тип	Подтип	Морфологические признаки	Специфические морфологические признаки
Торфяные	Торфяные эутрофные	Перегноино-торфяная	Степень трансформации органических остатков до 50%, с увеличением глубины, степень трансформации увеличивается, почва переувлажнена	Присутствует надмерзлотная влага вблизи границы с ММП
Криогенные	Криоземы	Грубогумусированные	Гомогенная серая, темно-серая масса, легкосуглинистая, верхний горизонт Оао слаботрансформирован	Развивается на хорошо дренированных склоновых позициях, в зависимости от положения на склоне. Глубина промерзания различается в широких пределах, от 20 до 70 см. Признаки криотурбации

				и, накопление органических веществ на границе с ММП
Глеевые	Глееземы	Криогенно-ожелезненные	Маломощные, до 18 см, грубогумусные, минеральная часть представлена слабооструктуренными суглинками. Наличие сизых пятен	Присутствуют признаки криотурбации, происходит накопление органических веществ на границе с ММП
Органо-аккумулятивные	Серогумусовая	Иллювиально-ожелезненная криотурбированная	Серогумусовый горизонт достигает глубины 30 см, легко суглистый, ореховатый. Ниже подстиляется горизонтом CR, легко суглинистым	В горизонте CR присутствует большое количество неразложившихся растительных остатков. Отмечаются признаки криотурбации, на границе с ММП отмечается формирование рыжих пятен
Альфегумусовые	Дерново-подбуры	Иллювиально-железистые	Отмечается развитие мощного горизонта BF с ореховатой структурой, легко суглинистый с характерными	Формируются на хорошо дренированных позициях с относительно глубоким залеганием ММП более

			признаками миграции железа, верхний серогумусовый горизонт густо пронизан корнями	50 см. Признаков криотурбации не отмечено
--	--	--	---	---

3.1.4. Почвы, формирующиеся на коренном берегу дельты р. Лены (кряж Чекановского, Харулахский хребет)

Почвенный покров Харулахского хребта представлен слаборазвитыми криогенными почвами (мощностью до 20 см), а также литоземами. *Криоземы* характеризуются морфологическим обликом, сходным с почвами вершины аласов. *Литоземы* формируются на щебнистой горной породе, имеют торфяно-подстилочный горизонт мощностью до 10 см. Почвообразование здесь ограничено относительно низким содержанием мелкозема, формирование почв происходит на выходах коренных пород. Почвы кряжа Чекановского представлены более мощными криоземами (до 30 см), данные почвы формируются в более влажных условиях и распространены в пределах узкой полосы (2–5 км), разделяющей Оленекскую протоку дельты и кряж Чекановского. Формирование почв на кряже Чекановского сходно с Харулахским хребтом, т.к. развитие почв происходит на выходах коренных пород.

3.1.5. Почвенно-геоморфологическое картирование о. Самойловский на основе снимков беспилотных летательных аппаратов

Нами был предложен метод почвенно-геоморфологического картирования о. Самойловский, т.к. его территория формируется как в условиях затопления, так и вне его. Выделение почвенных районов на основе геоморфологических единиц является мощным механизмом уточнения существующих почвенно-геоморфологических карт (Nauman et al., 2022). Для Арктики этот метод исследования особенно актуален, поскольку труднодоступность многих

регионов затрудняет исследовательскую деятельность (Ardelean et al., 2020). Например, в дельте реки Лены хорошо изучена только ее центральная часть, а северная остается практически недоступной для исследователей. Использование беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) для съемки местности, выделение геоморфологических единиц совместно с почвенными исследованиями в сходной по структуре ландшафтной обстановке позволяет создавать почвенно-геоморфологические карты высокой точности.

В 2019 году в дельте реки Лены, на о. Самойловский была проведена съемка с применением БПЛА (Kartoziiia, 2019). Мы использовали данные съемки для составления цифровой геоморфологической модели острова, а затем и его почвенно-геоморфологической карты (см. раздел 2.3. Методы исследований) (рис. 3.7., расшифровка легенды дана в табл. 3.4). На карте были выделены следующие отделы почв: стратоземы, торфяные, альфегумусовые, криогенные, глеевые. Физико-химические параметры исследованных почв представлены в Приложении Б.1-Б.3.

Примененный нами метод выделения геоморфологических элементов при сопоставлении с почвенными исследованиями показал удовлетворительные результаты и может быть использован в дальнейшем для картирования территорий, подверженных влиянию ММП, а также активному влиянию реки. На основе выделения геоморфологических элементов рельефа, а также почв, можно создавать крупномасштабные почвенно-геоморфологические карты, выделять предполагаемые участки, где может происходить активное накопление ПОВ, а также участки, подвергающиеся активным эрозионным процессам и деградации ММП.

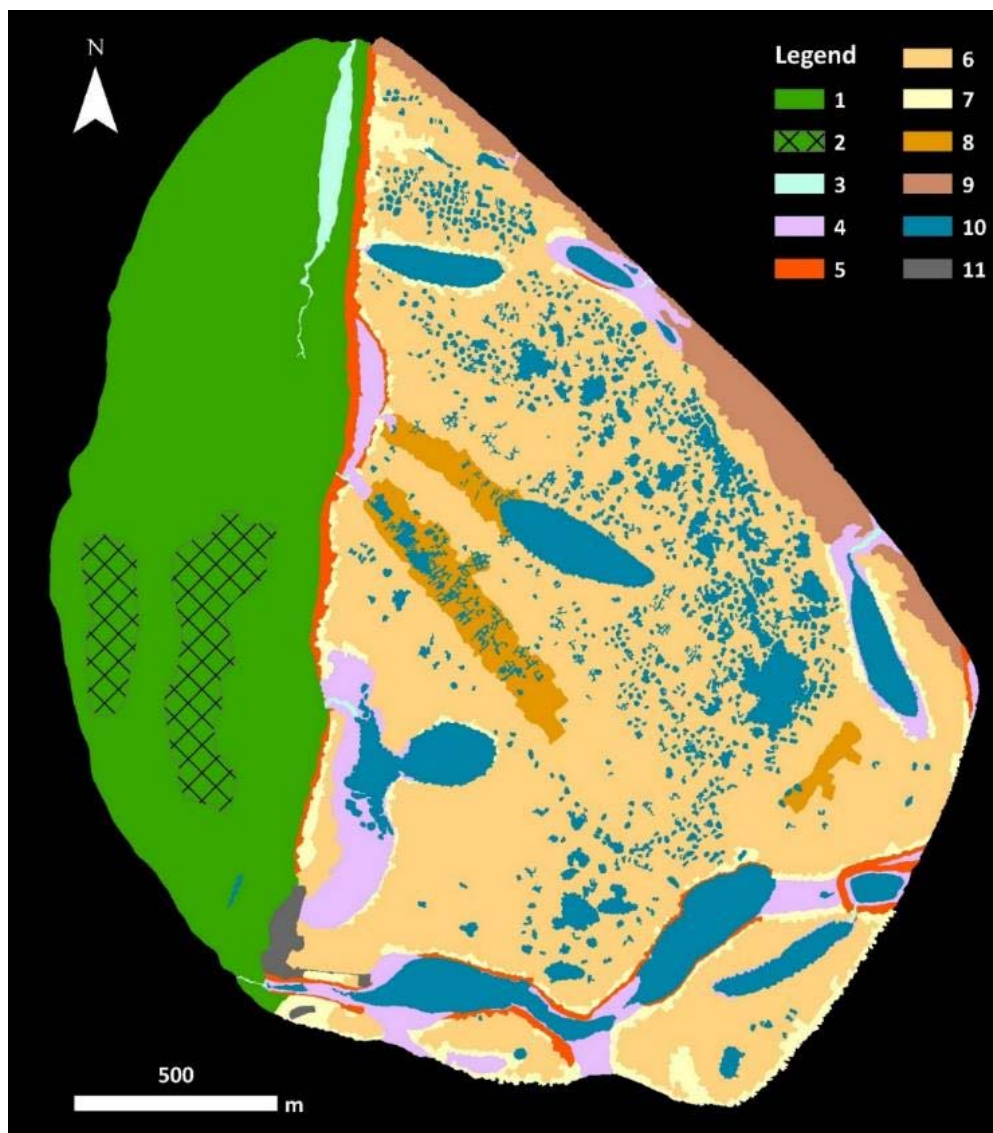


Рисунок 3.7 – Почвенно-геоморфологическая карта о. Самойловский (условные обозначения даны в табл. 3.4)

Таблица 3.4. – Легенда к почвенно-геоморфологической карте

№ на карте	Характеристика ландшафта	Почва	Формула профиля	Площадь ландшафта	
				км ²	%
Стратоземы					
1	Слабо дренированная территория, характеризуется наличием бревен, принесенных рекой, растительный покров	Стратозем серогумусовый на аллювиальных песках	AYaq-RYaq-D ⁺	0,97	24,3

	представлен кустарниковой тундрой				
2	Невысокие гряды, растительность представлена кустарниковой тундрой высотой до 2 м	Стратозем серогумусовый на аллювиальных песках на погребенной почве	AYaq-AC-C-RYaq-C ⁺	0,14	3,7
Торфяные почвы					
4	Затапливаемые территории вблизи водотоков и крупных озер	Торфяная эутрофная на аллювиальных песках	TE-TT ⁺	0,18	4,7
Подбуры					
5	Склоны долин, образовавшиеся в результате развития термокарста	Подбур иллювиально-железистый на аллювиальных песках	Oaq-BF-C ⁺	0,08	2,0
Криоземы					
6	Перигляциальный ландшафт с влажными полигонами, типичная тундра	Криозем типичный на аллювиальных песках	O-CR-C ⁺	0,16	4,0
7	Перигляциальный ландшафт с дренированными полигонами	Криозем грубогумусовый на аллювиальных песках	Oao-CR-C ⁺	1,64	41,1
Глееземы					
8	Влажные долины, образовавшиеся в результате термокарстовых процессов	Глеезем криогенно-ожелезненный на аллювиальных песках	O-Gcf-G-CG ⁺	0,11	2,5
Слоисто-эоловая на погребенном подбуре					
9	Сглаженный полигональный ландшафт, покрытый песком под воздействием эолового процесса	Слоисто-эоловая на погребенном подбуре на аллювиальных песках	C ⁺⁺⁺⁺ -O-BF-C ⁺	0,12	3,1

Почвы в районе исследовательской станции					
11	Территория НИС	Урбанозем на аллювиальных песках	С	0,02	0,4
Водные объекты					
3	Ручьи, куда стекает вода с верхней террасы острова, а также с крупных и сети мелких озер	–	–	0,03	0,7
10	Озера, крупные пруды	–	–	0,54	13,6
ИТОГО:				3,99	100

Таким образом, мы можем сделать вывод, что 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 существенное влияние на почвообразование, оно выражено в отепляющем эффекте на почвы, и 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 затоплению. Почвообразование в дельтах крупных рек довольно тесно связано с возрастом аллювиальных отложений и интенсивностью влияния на них реки, т.к. река является основной движущей силой, может происходить абразия береговой линии, небольшие острова и песчаные косы могут быть смыты рекой во время половодья, из-за отепляющего эффекта может происходить деградация ММП, вынос ПОВ и его миграция в море Лаптевых и Северный Ледовитый океан. Поэтому исследование почв дельты реки Лены, в условиях изменения климата является важной задачей современного почвоведения в области почвенного криогенеза, т.к. мы до сих пор не имеем четких ответов на такие вопросы как: каковы запасы ПОВ в дельтах крупных рек, как быстро происходит

деградация почв, как качественный состав ПОВ будет влиять на эмиссию климатически активных газов.

3.2. Физико-химическая характеристика почв дельты реки Лены

3.2.1. Кислотно-основные параметры

Почвы дельты имеют кислую (4,5–5,5), слабокислую (5,5–6,5), нейтральную (6,5–7) и слабощелочную (7–7,5) реакцию. В зависимости от положения в ландшафте и приуроченности почв к террасам прослеживается четкая смена реакции. Почвы, формирующиеся в условиях активного затопления, имеют нейтральную и слабощелочную реакцию среды, это связано с активным влиянием реки, а также моря. Уровень рН в центральной части дельты колеблется от 7,5 до 8,1. Река Лена в нижнем и среднем течении размывает карбонатные породы, которые могут переноситься и аккумулироваться в дельте (Оконешникова, 2013). Наличие карбонатов также отмечается и в породах Харулахского хребта и кряжа Чекановского (Izokh and Yazikov, 2017). Во время снеготаяния гидрокарбонаты вместе с талыми водами могут переноситься в реку и также оседать в дельте (Izokh and Yazikov, 2017). Стоит отметить, что во время ледостава, соленые морские воды также могут попадать на участки, относящиеся к затапливаемой территории.

На участках первой террасы, на более высоких участках, которые не подвержены активному влиянию реки, формируются почвы с нейтральной и слабокислой средой, это связано с влиянием растительного покрова и почвенных микроорганизмов.

Почвы второй и третьей террасы характеризуются слабокислой и кислой реакцией среды. В условиях повышенной кислотности увеличивается подвижность соединений железа и алюминия в почве, происходит угнетение почвенной биоты и, как следствие, депонирование слаборазложившихся органических остатков в почве.

Характерной чертой криогенных почв является наличие геохимического барьера на границе с ММП. В надмерзлотных горизонтах почв уровень рН зачастую ниже (кислее), чем в верхних горизонтах почв, что связано с процессами криогенного массообмена и накопления органических остатков на границе с ММП.

3.2.2. Физические свойства почв

В мелкоземе всех изученных почв отмечается преобладание песчаной фракции, это связано с условиями осадконакопления в дельте реки Лены (Добровольский и др., 2011). В зависимости от положения в ландшафте и длительности процессов почвообразования были выделены песчаные, супесчаные, а также легко- и среднесуглинистые почвы. Песчаные почвы формируются на участках первой террасы, подверженных активному затоплению. В ходе поемного процесса накапливаются преимущественно песчаные и пылеватые частицы, с доминированием песчаных. В стратоземах, как уже было сказано ранее, присутствует переслаивание песчаных осадков супесчаными и легкосуглинистыми. Данный процесс обусловлен разной скоростью осадконакопления. В условиях быстрого речного потока первыми осаждаются песчаные частицы и по мере уменьшения скорости потока осаждаются пылеватые и илистые частицы.

Почвы второй террасы характеризуются супесчаным составом, их генезис не совсем ясен, т.к. до сих пор нет достоверного объяснения формирования второй террасы дельты. Если сослаться на отечественных ученых (Большаинов и др., 2013), данный комплекс сформирован из древних морских песков, которые в ходе процессов криоэлювиогенеза и процессов выветривания разрушаются на более мелкие физические частицы (пыль и глина). Распределение фракций гранулометрического состава в исследованных почвах представлено на рисунке 3.8.

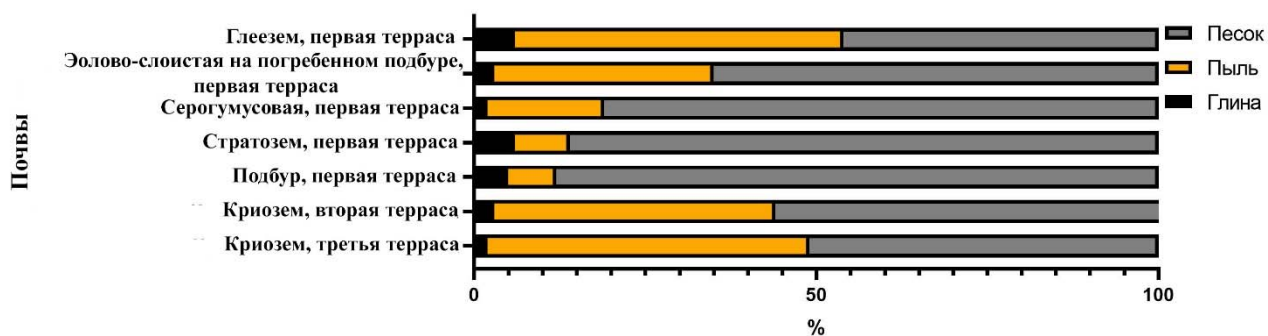


Рисунок 3.8 – Распределение фракций песка, пыли и глины в различных почвах дельты реки Лены

В почвах третьей террасы накапливается большее число пылеватых частиц относительно первой и второй террасы. Их количество возрастает в зависимости от возраста отложений. Так, на более молодых участках формируются преимущественно супесчаные и легкосуглинистые почвы, а на более древних – легко- и среднесуглинистые почвы. Данная тенденция, по-видимому, связана с долгосрочными процессами промерзания/оттаивания, а также с активностью процессов выветривания в изучаемых почвах.

На основе выше представленных результатов, мы можем сделать вывод о том, что с увеличением доли пылеватых и илистых частиц увеличивается водоудерживающая способность почв. Стратоземы серогумусовые песчаные, распространенные на территории первой периодически-затапливаемой террасы, удерживают меньшее количество влаги по сравнению с почвами, формирующимися на третьей террасе, тем самым, стратоземы менее подвержены криогенным процессам. Из статистического анализа данных следует, что наибольшая корреляция наблюдается между показателями почвенно-гидрологических констант (полная и наименьшая влагоемкость, гигроскопичная влажность) и показателем физической глины. Из этого мы можем сделать вывод, что в ходе процессов выветривания происходит разрушение песчаных частиц, накопление пылеватых и илистых частиц, которые в большей степени связаны с накоплением влаги в изученных почвах.

Таким образом, процессы выветривания напрямую связаны с развитием термокарстовых и криогенных процессов в почве. При этом длительное воздействие криогенеза приводит к формированию криогенных почв в дельте реки, что подтверждает тезис о трансформации альфегумусовых почв в криогенные.

3.2.3. Химический состав почв

Химический состав был изучен у почв о. Самойловский, т.к. на данном острове представлены как зональные варианты почв, так и интразональные, а также у почв о. Сардах с наиболее выраженными признаками криогенных процессов. Для анализа химического состава был использован рентгенфлюоресцентный метод.

Полученные данные показали, что наиболее распространёнными соединениями являются SiO_2 , Fe_2O_3 , Al_2O_3 (Приложение Б.1-Б.3). В связи с увеличением почвенной кислотности происходит миграция оксидов железа и алюминия, что приводит к формированию железистых пленок на поверхности почвенных агрегатов. Данный процесс приводит к образованию ожелезненных биогенных агрегатов, в которых заключено ПОВ, и которые являются устойчивыми к биодegradации. Высокое содержание оксидов железа и алюминия в исследуемых почвах связано с накоплением в результате выветривания различных слюд, таких как мусковит, биотит, а также гидрослюд, таких как иллит, вермикулит и глауконит (Polyakov and Abakumov, 2021a). Наибольшее содержание кварца отмечено в горизонтах CR. Наблюдаемое увеличение содержания оксидов железа в верхних горизонтах сопровождается уменьшением доли кварца, что, вероятно, связано с активным процессом криогенного массообмена (Polyakov and Abakumov, 2021a). В анаэробных условиях формируются конкреции Fe-Mn, данная тенденция отмечается в развитых криогенных почвах о. Сардах. Пространственное распределение доминирующих оксидов (SiO_2 и Fe_2O_3) на о. Самойловский представлено на рисунках 3.9–3.10.

Для выявления тесноты корреляционной связи между исследуемыми химическими соединениями рассчитан коэффициент корреляции Спирмена (рис. 3.11). Отмечена высокая корреляция между SiO_2 и K_2O ($r=0,99$), SrO и SiO_2 ($r=0,91$), SrO и K_2O ($r=0,92$), а также высокая отрицательная корреляция между Fe_2O_3 и SiO_2 ($r= -0,99$), Fe_2O_3 и K_2O ($r= -0,99$), CaO и Fe_2O_3 ($r= -0,90$), Fe_2O_3 и SrO ($r= -0,94$). По-видимому, элементы с высокой положительной корреляцией могут иметь речное происхождение, т.к. SiO_2 в большей степени накапливается на затопляемой территории.

Дельта реки Лена – место скопления (до 80%) различных химических компонентов, которые приносятся сюда рекой. На рисунке 3.12 показано распределение химических элементов в изученных почвах разного возраста и ландшафтного положения.

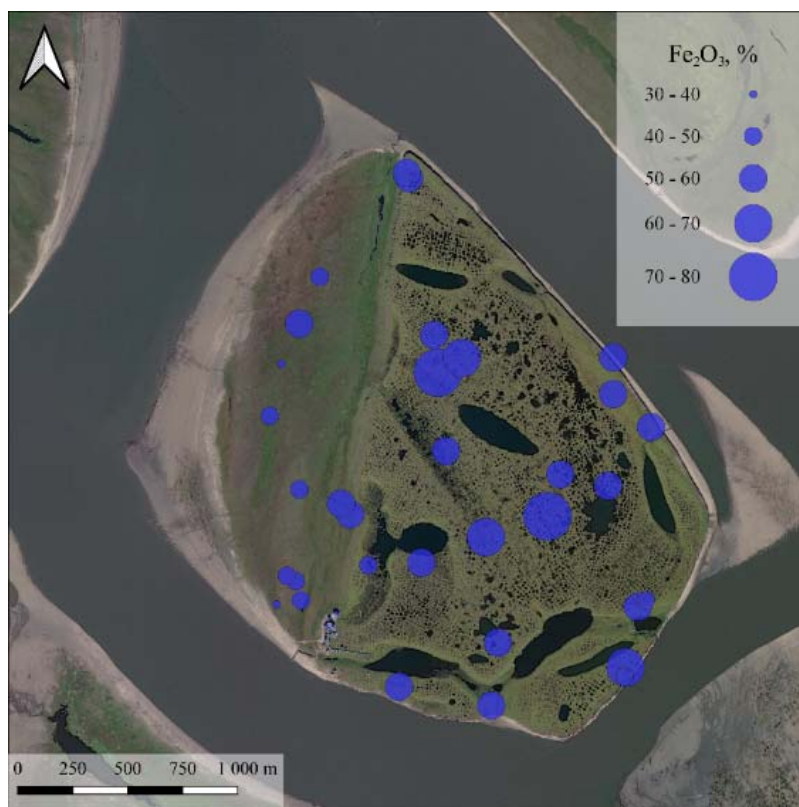


Рисунок 3.9 – Пространственное распределение Fe_2O_3 в почвах о. Самойловский

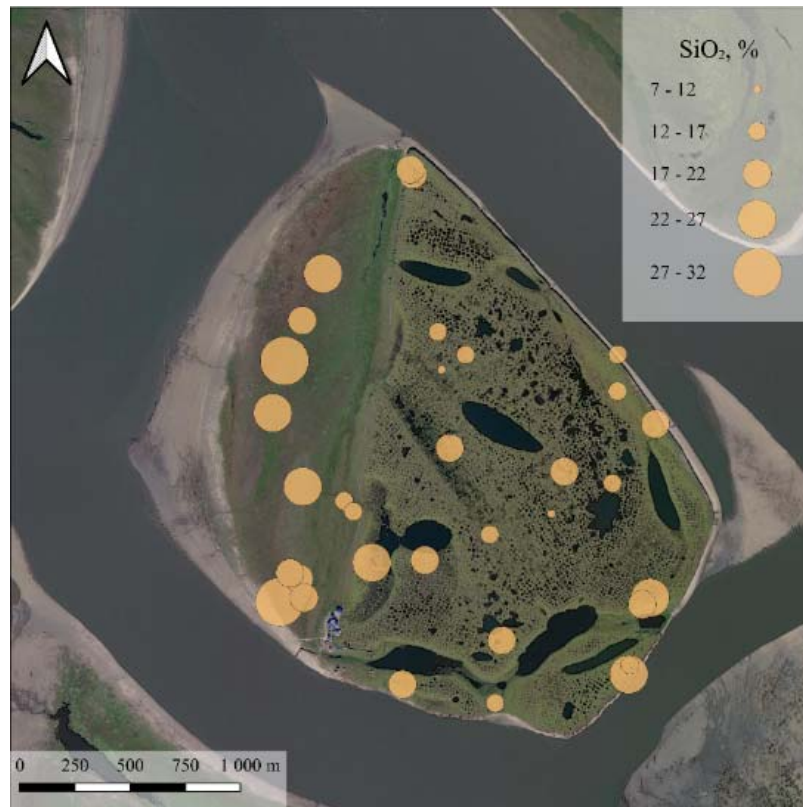


Рисунок 3.10 – Пространственное распределение SiO_2 в почвах о. Самойловский

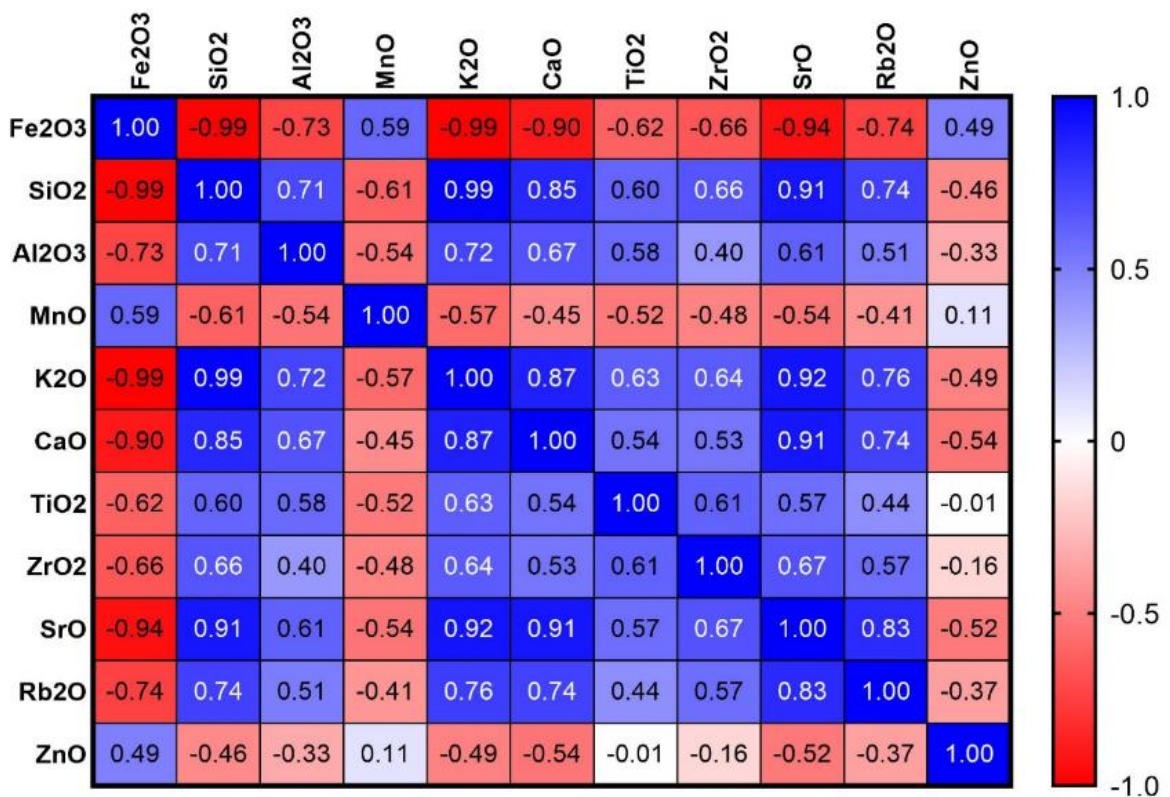


Рисунок 3.11 – Коэффициент корреляции Спирмена для исследуемых химических соединений

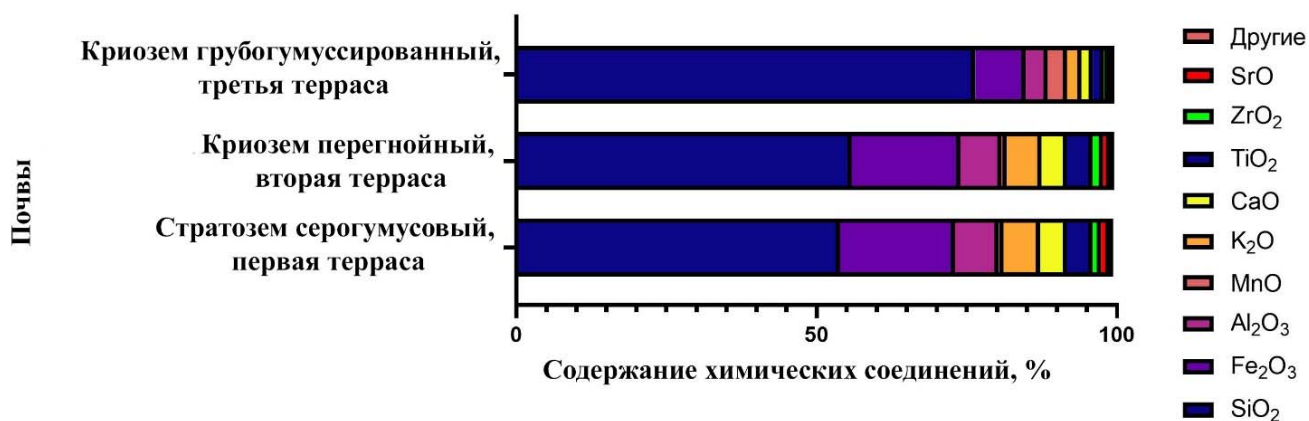


Рисунок 3.12 – Распределение химических соединений в исследованных почвах

Согласно рисунку 3.12, на о. Сардах (третья терраса) происходило активное накопление кварца под воздействием реки. Во время сезонных процессов промерзания/оттаивания минералы разрушаются и происходит аккумуляция SiO₂. В криоземах грубогумусированных третьей террасы отмечается уменьшение содержания оксидов Fe₂O₃, Al₂O₃, K₂O, CaO, а также TiO₂ (Polyakov and Abakumov, 2021a). Та же динамика отмечена в работе (Sizov et al., 2020), где в почвах р. Надым показано, что содержание SiO₂ увеличивалось с возрастом и глубиной, в то время как содержание оксидов Fe₂O₃, Al₂O₃, K₂O, CaO и TiO₂ снижалось. В результате развития процесса криогенеза, оксиды металлов в кислых условиях проявляют миграционную активность и могут накапливаться на границе с ММП в результате криогенного массообмена.

Также в изученных почвах нами было обнаружено накопление оксидов CaO и TiO₂, содержание которых в исследованных образцах значительно выше, чем в типичных криоземах (Szymański et al., 2015; Sizov et al., 2020). Это может быть связано с тем, что коренные берега дельты реки Лены сложены карбонатными горными породами, а также в среднем и нижнем течении реки происходит размывание карбонатных пород. Таким образом, накопление кальция может быть связано как с деятельностью реки, так и с эоловым фактором накопления материала. В условиях криогенеза эти соединения CaO будут накапливаться в почве и ММП, что приведет к их депонированию. При

статистической обработке данных содержания химических соединений в почве и их связи с гранулометрическим составом отмечено, что большая часть исследованных соединений связана с накоплением песчаной фракции (рис. 3.13).

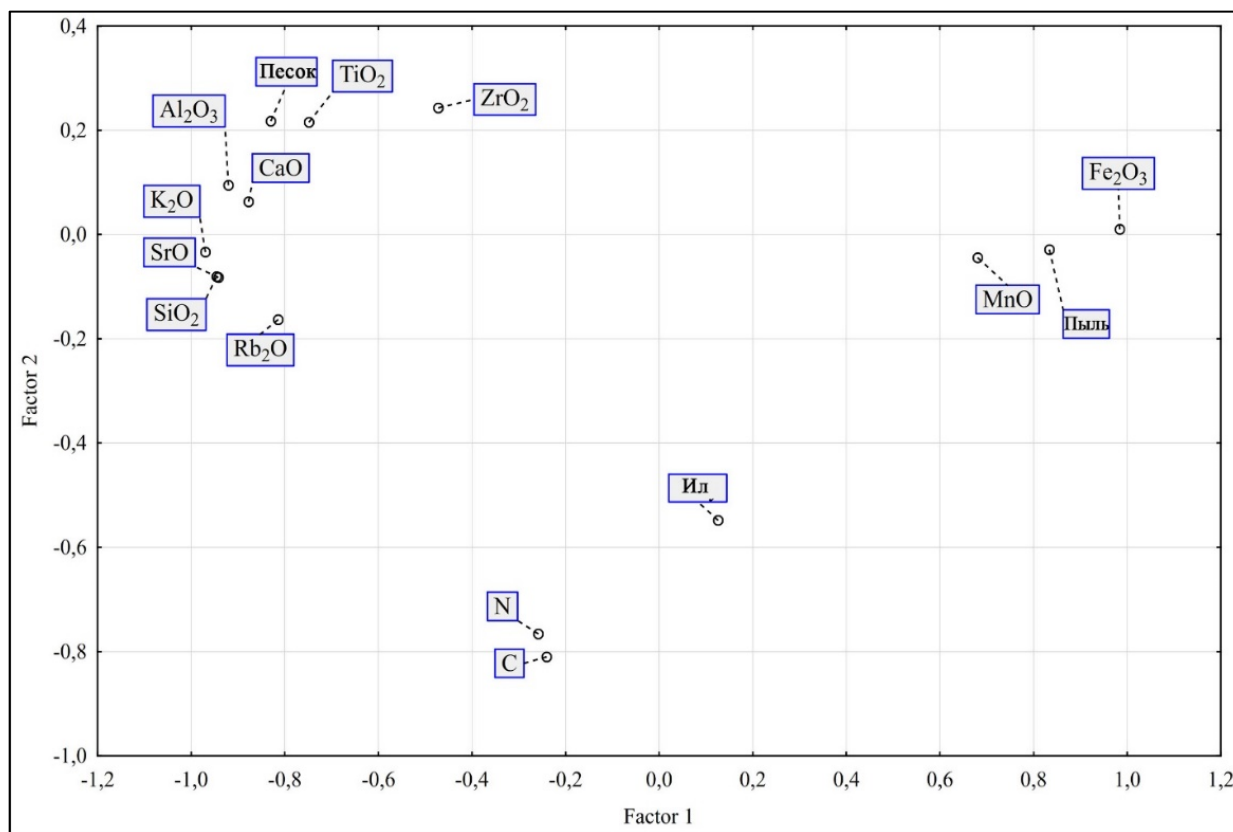


Рисунок 3.13 – Результаты анализа главных компонент для физико-химических параметров изученных почв

Таким образом, мы можем сделать вывод о том, что большая часть химических соединений в составе аллювиального материала переносится в дельту вместе с водами реки. Далее, в условиях выветривания почвенных первичных и вторичных минералов происходит накопление оксидов железа и марганца в почвах.

3.3. Микроморфологические особенности разновозрастных криогенных почв

Длительный процесс промерзания/оттаивания вносит существенные изменения в физические параметры почв (Конищев and Рогов, 1977; Gerasimova

et al., 2011). В холодном климате широко распространен механизм физического выветривания, известный как криоэлювиогенез. В результате этого процесса в почве накапливаются мелкодисперсные (илистые) частицы.

3.3.1. Микроморфологическая характеристика исследуемых почв первой террасы в условиях периодического затопления

Первая терраса дельты характеризуется молодым возрастом аллювиальных отложений. Микростроение почвенной массы представлено плохо сортированным песком с кольцевым типом ориентации, аморфным органическим веществом, слюдами (мусковит/биотит) и Fe/Mg конкрециями в виде железистых пленок на поверхности минералов (рис. 3.14).

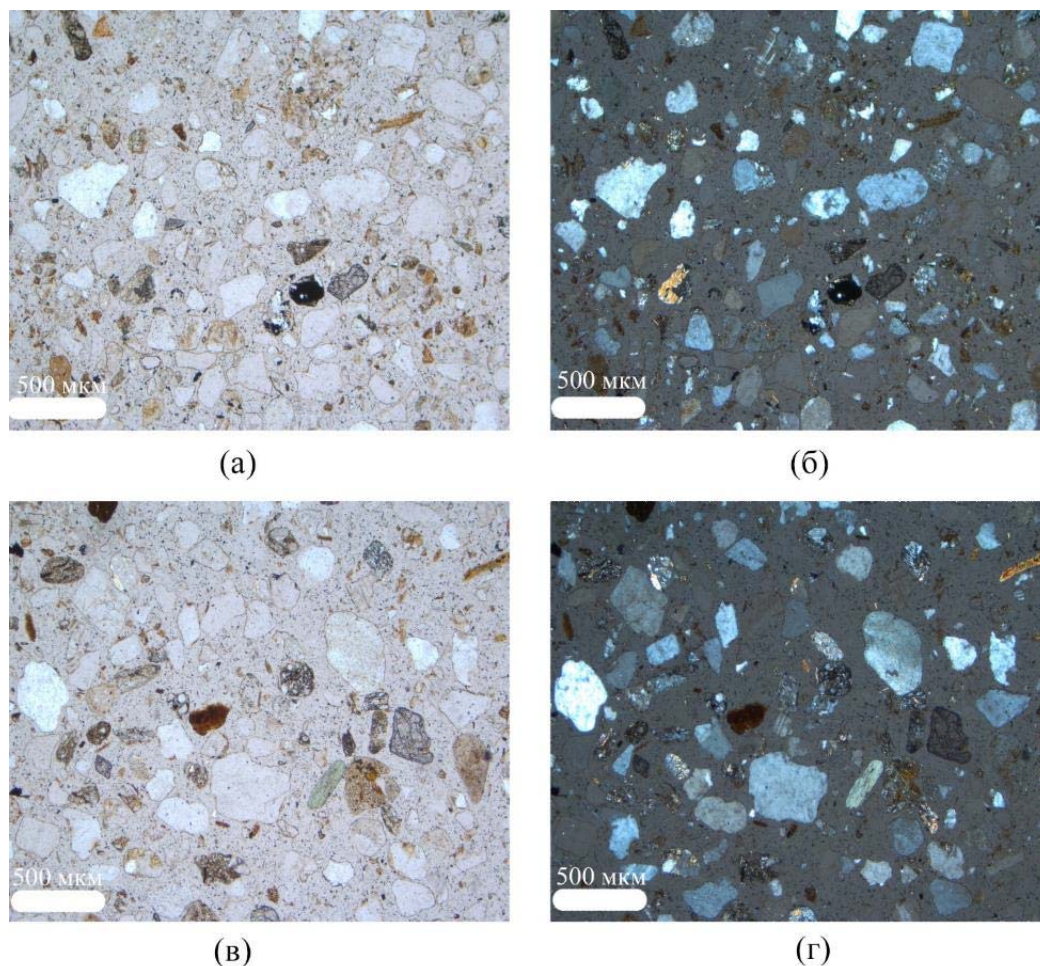


Рисунок 3.14 – Микростроение почвы, находящейся в условиях активного затопления: а, в – проходящий поляризованный свет; б, г – скрещенный поляризованный свет

Изучение почвенных микрошлифов показало слабое влияние криогенеза на микростроение почв, минералогический состав почв имеет низкую степень трансформации, что обусловлено низким содержанием новообразований. Микростроение почвы имеет мозаичный тип оптической ориентации (Поляков, Абакумов, 2021). Аллювиальные отложения первой террасы и формирующиеся на них стратоземы имеют относительно молодой возраст, а условия промерзания/оттаивания препятствуют процессу выветривания минеральных частиц.

3.3.2. Микроморфологическая характеристика исследуемых голоценовых почв первой террасы (о. Самойловский)

Изученные почвы имеют относительный возраст 2230 ± 70 лет (Большаянов и др., 2020). Фотографии почвенных микрошлифов представлены на рисунке 3.15 и в Приложении В.1-В.7.

Минералогический состав изученных микрошлифов схож с минералогическим составом микрошлифов почв с активно затапливаемой территории, рассмотренных выше. Это связано с гомогенным накоплением вещества в условиях влияния крупной реки (Polyakov and Abakumov, 2021a). Отмечается наличие биогенных агрегатов из органических тонкодисперсных материалов, инкорпорированных в минеральную матрицу почвы, имеющих признаки ожелезнения, по трещинам крупных минералов. В дополнение к интрузивным новообразованиям в исследуемых почвах на рисунке 3.16 наблюдается выветривание различных слюд (биотит и мусковит).

Голоценовые почвы первой террасы характеризуются более продолжительным влиянием криогенных процессов относительно ежегодно затапливаемых территорий, это отражается в микростроении почв в виде трещин, а также вертикальной ориентации минералов. Почвы, не подверженные активному влиянию реки, отличаются более развитыми криогенными процессами, что связано с длительными процессами замораживания/оттаивания,

это проявляется в наличии биогенных агрегатов и железистых новообразований по микротрещинам в минералах.

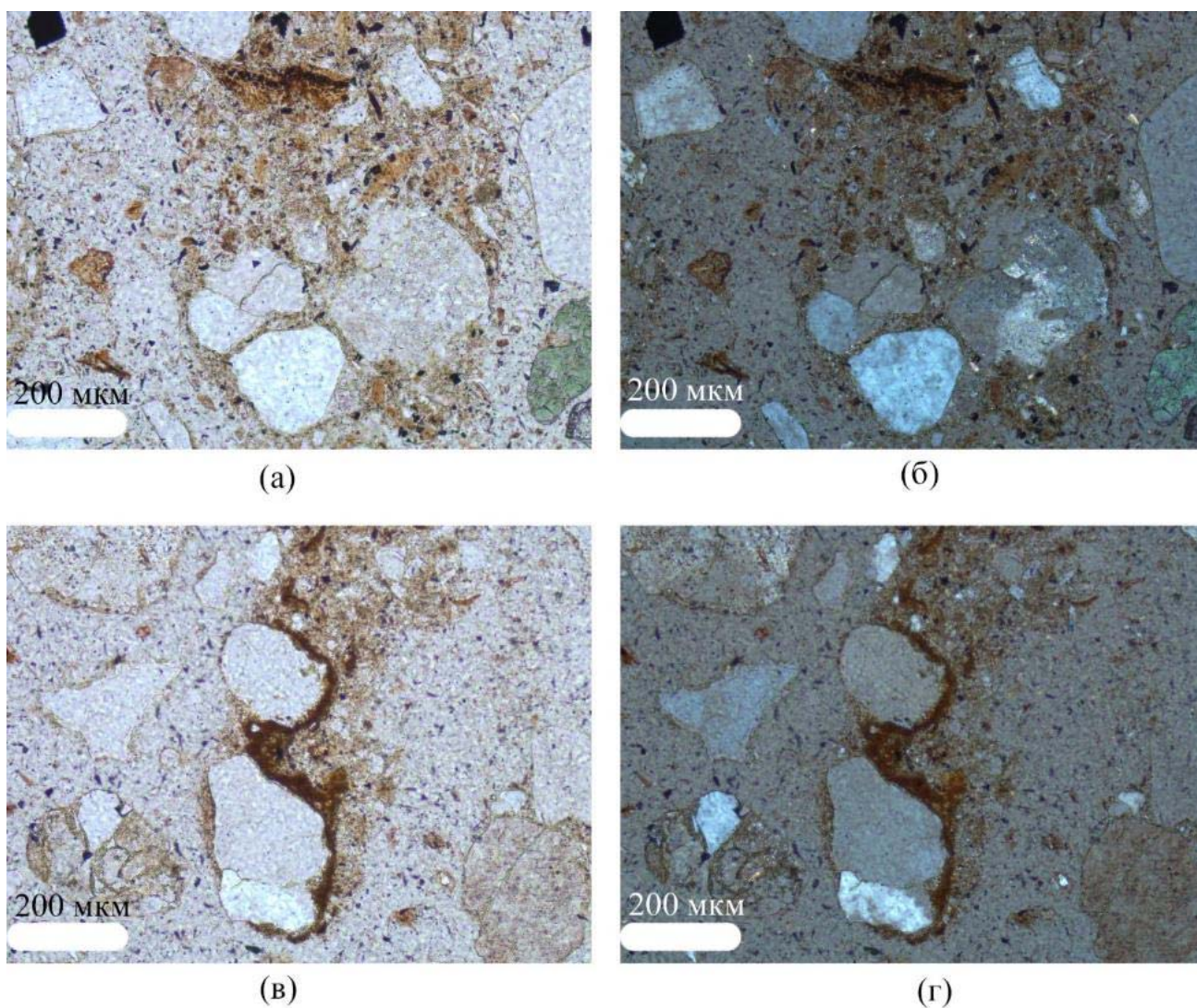


Рисунок 3.15 – Формирование органоминеральных комплексов вокруг зерен кварца. Остров Самойловский: а, в – проходящий поляризованный свет; б, г – скрещенный поляризованный свет

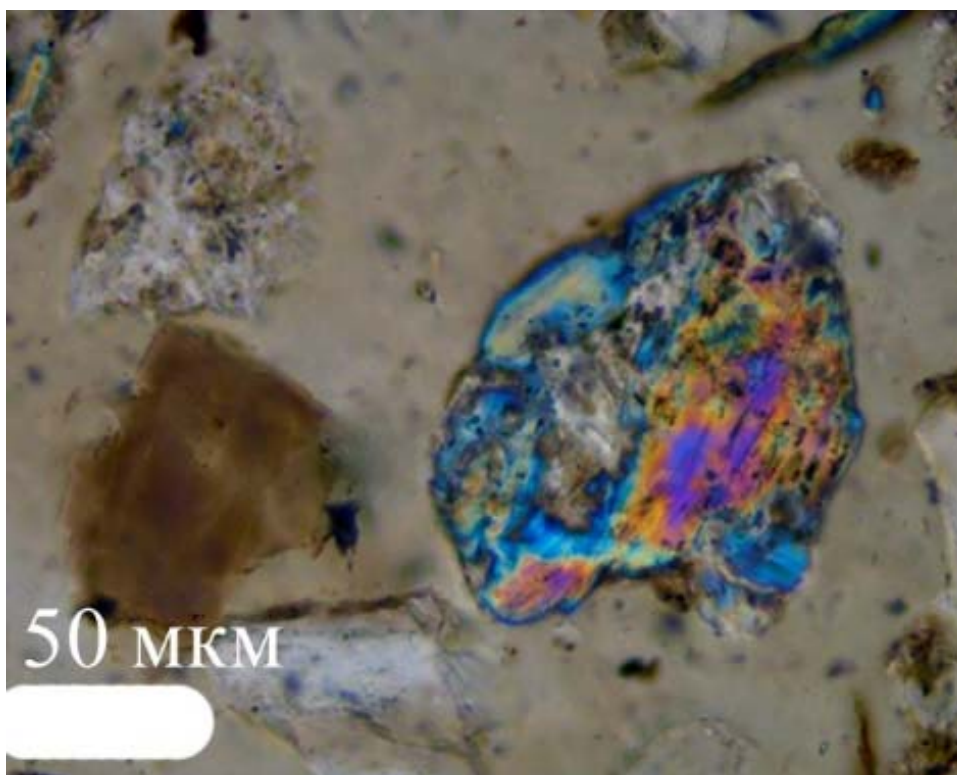


Рисунок 3.16 – Биотит/мусковит. Остров Самойловский. Скращенный поляризованный свет

3.3.3. Микроморфологическая характеристика исследуемых почв третьей террасы (о. Сардах)

Стратиграфия данного острова включает дочетвертичные материнские породы, образцы для изучения микростроения были отобраны из верхнего горизонта почв, сформированных на древних песках, имеющих возраст более 50 тыс. лет (Schirrmeister et al., 2003). Почвенные микрошлифы с о. Сардах представлены на рисунке 3.17.

В изученных шлифах почв о. Сардах наблюдается формирование пылевато-песчаных агрегатов с инкорпорированным в них органическим веществом. Это обусловлено физическим выветриванием первичных минералов и дальнейшей адгезией разрушенных частиц с образованием Fe-Mn конкреций на поверхности почвенных минералов, а также во внутрипоровом пространстве (Поляков, Абакумов, 2021). В почвах данного острова отмечен процесс серитизации первичных минералов (рис. 3.18). Формирование трещин в

минералах происходит в ходе долгосрочных процессов промерзания/оттаивания (рис. 3.19).

По-видимому, некоторая часть обнаруженных здесь слюд является вторичными минералами. Органические остатки включают как аморфные органические тонкодисперсные материалы, так и растительные ткани (Polyakov and Abakumov, 2021a).

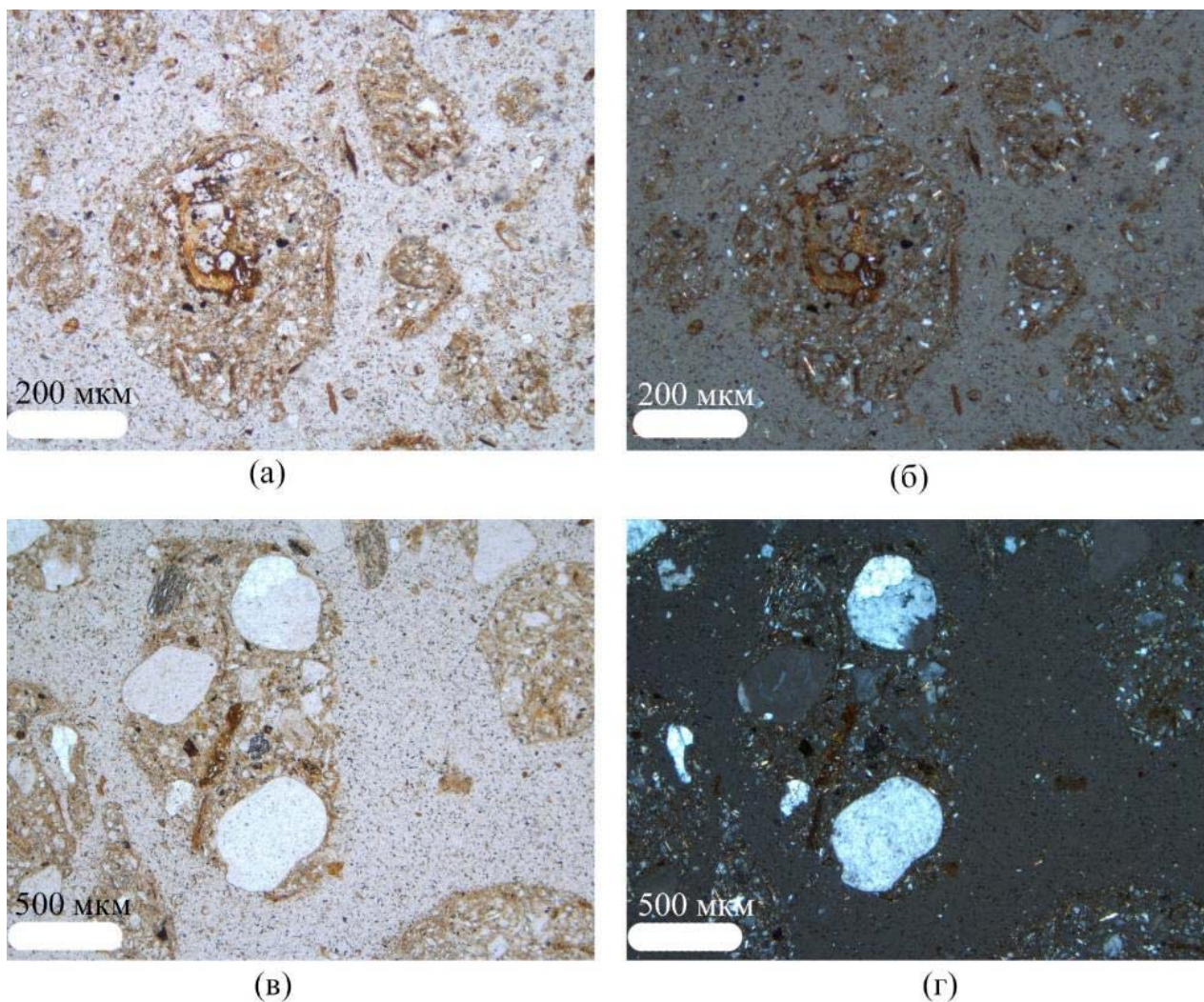


Рисунок 3.17 – Биогенный агрегат (а–b) и агрегат, формирующийся вокруг частицы кварца (с–d). Остров Сардах: а, в – проходящий поляризованный свет; б, г – скрещенный поляризованный свет

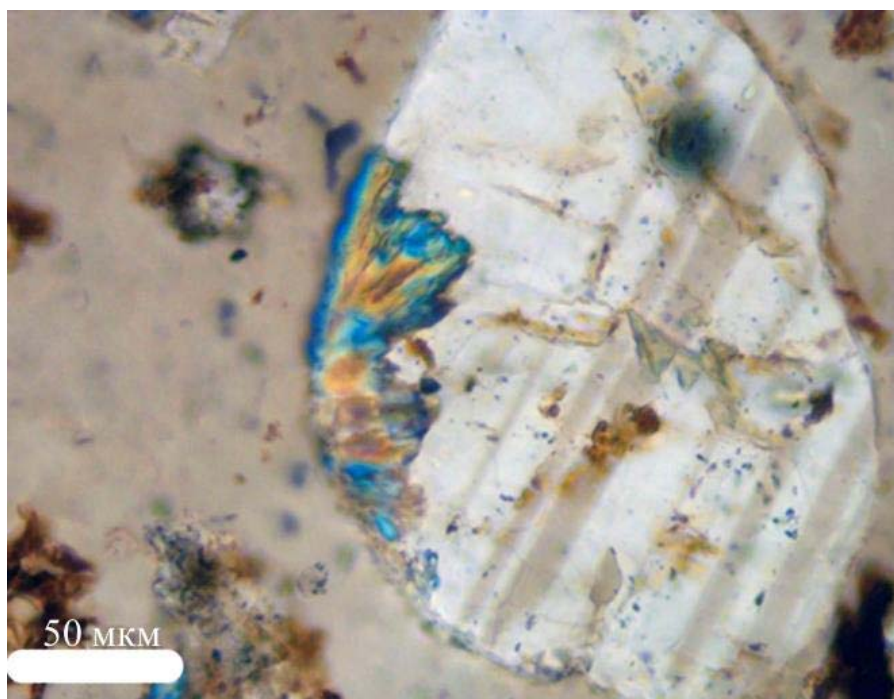
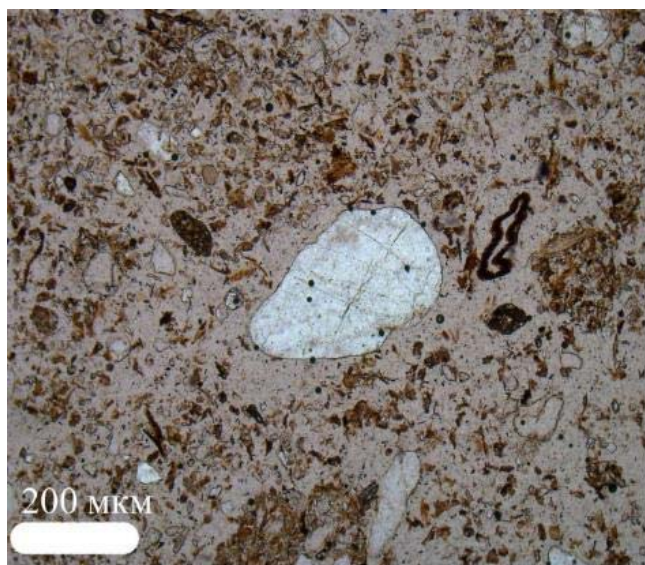
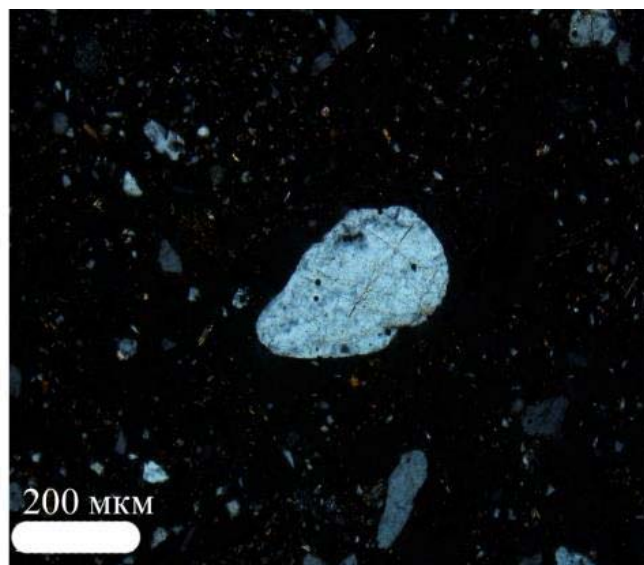


Рисунок 3.18 – Серитизация полевого шпата. Скращенный поляризованный свет



(а)



(б)

Рисунок 3.19 – Формирование трещин в результате процессов промерзания/оттаивания: а – проходящий поляризованный свет; б – скращенный поляризованный свет

Таким образом, судя по изученным микрошлифам разновозрастных почв дельты реки Лены наиболее разнообразными по минералогическому составу являются почвы третьей террасы, что обусловлено длительным воздействием почвенного криогенеза (Pogosyan et al., 2022). Основными типами изученных минералов является группа минералов-аллюмосиликатов: мусковит, биотит, иллит, вермикулит и глауконит. Молодые почвы о. Самойловский представлены плохо сортированными песками с кольцевым типом ориентации, низким содержанием агрегатов и высоким содержанием неразложившихся органических остатков (Поляков, Абакумов, 2021). Исследованные почвы можно рассматривать как модель трансформации органоминеральной матрицы почв в условиях процесса криогенеза, характерного для аллювиальных отложений.

Длительное воздействие криогенеза оказывает значительное влияние на микростроение почв и приводит к трещинообразованию и измельчению почвенных минералов (Конищев, Рогов, 1977; Rogov, Konistsev, 2008). Дальнейшая адгезия разрушенных частиц минералов приводит к увеличению размеров агрегатов, и формированию новообразований в микростроении почв (Конищев, Рогов, 1977; Vliet-Lanoë et al., 2004). Присутствие железа и магния в подвижной форме приводит к тому, что развивается процесс образования железистых пленок на поверхности минералов, в пустотах и трещинах (Lindbo et al., 2010; Конищев и др., 1974; Stolt and Lindbo, 2010; Vliet-Lanoë, 2010). Почвенный криогенез играет важную роль в формировании почв в дельте реки Лены, при этом физическое выветривание является ведущим типом выветривания для данной территории, а физическая стабилизация ПОВ обеспечивается формированием органоминеральных комплексов.

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

4.1. Микробиологическая активность почв и уровни потенциального минерализуемого углерода

Почвенная эмиссия углекислого газа (CO_2), охватывает процессы микробиологического разложения ПОВ и автотрофного дыхания корней растений (Ejarque, Abakimov, 2016). Интенсивность эмиссии CO_2 напрямую зависит от доступности биогенных элементов и гидротермального режима почвы (Knoblauch et al., 2013).

В почвах, подверженных влиянию ММП, мы можем наблюдать три пика микробиологической активности внутри профиля: 1) тип А – максимальная микробиологическая активность приходится на верхние горизонты почв и уменьшается с глубиной. Это характерно для подбуров; 2) тип Б – максимальные значения приходятся на надмерзлотный горизонт, такое распределение можно отметить в криоземах и глееземах. В ходе процесса криогенного массообмена доступное органическое вещество может перемещаться и накапливаться на границе с ММП, где и трансформируется микроорганизмами; 3) тип В – пик приходится на срединный горизонт, такое распределение можно наблюдать в стратоземах. Из-за стратификации их почвенных горизонтов также может наблюдаться несколько пиков, в зависимости от почвенного гидроморфизма и почвенной аэрации (рис. 4.1).

Также был исследован показатель микробиологической активности среди почв, развивающихся на разных геоморфологических позициях (рис. 4.2). Исходя из полученных данных, мы можем отметить, что наибольшая активность отмечена в подбурах, развивающихся на затапливаемой территории. Видимо, в условиях периодического затопления и привноса питательных веществ, в почве формируются благоприятные термические условия для относительно активной микробиологической деструкции органического вещества.

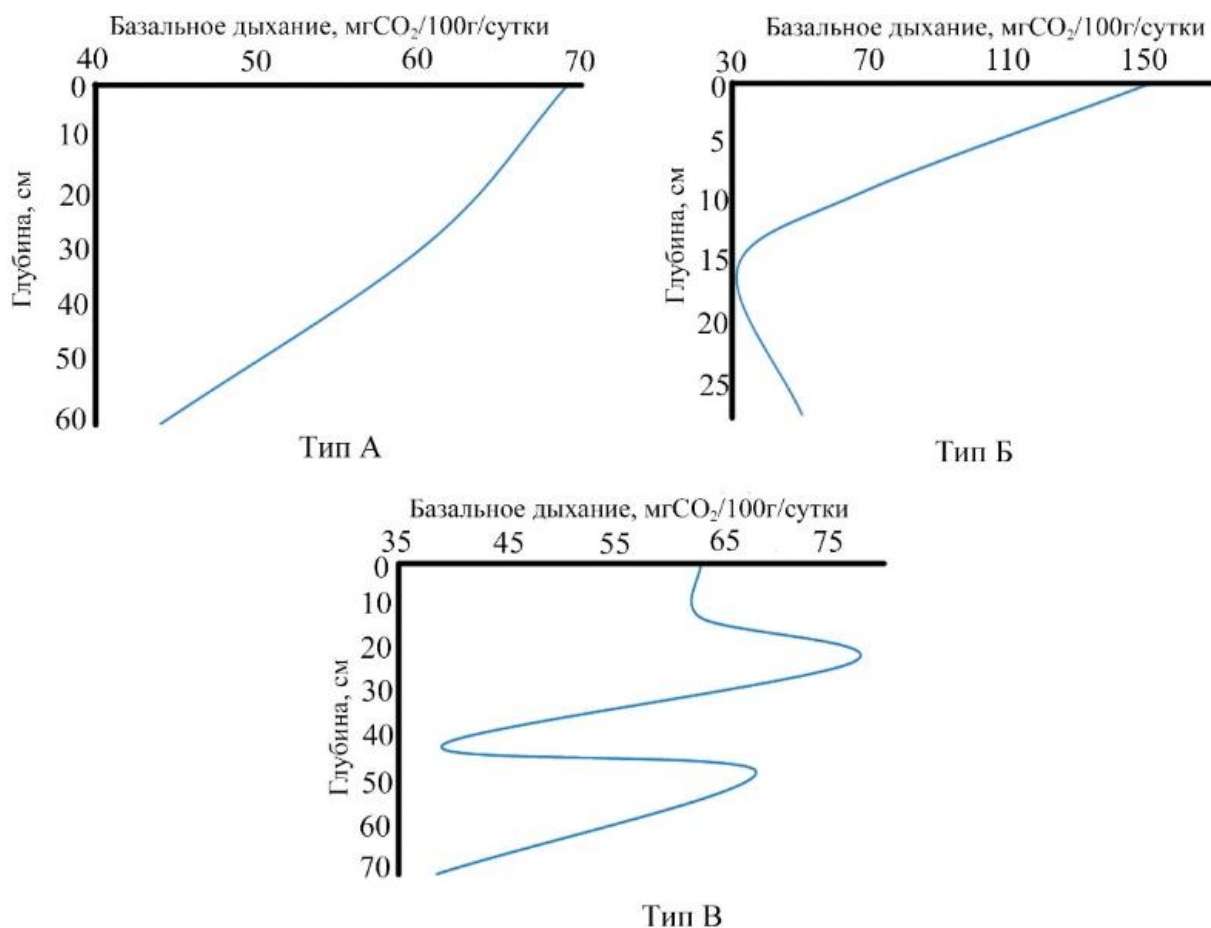


Рисунок 4.1 – Типы микробиологической активности в изученных почвах: тип А – подбур иллювиально-железистый, тип Б – криозем грубогумусовый, тип В – стратозем серогумусовый

Это может быть обусловлено также тем фактом что в данных почвах скапливается относительно небольшое количество влаги, из-за преобладания песчаных частиц, при этом в процессе выветривания почвенных минералов накапливается достаточное количество пылевых и илистых частиц и поддерживаются 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, т.к. растительный покров в течении сезона может быть полностью погребен под песчаным чехлом, и тем самым в

отсутствие поступления свежих органических остатков может быть отмечено снижением микробиологической активности (рис. 4.2).

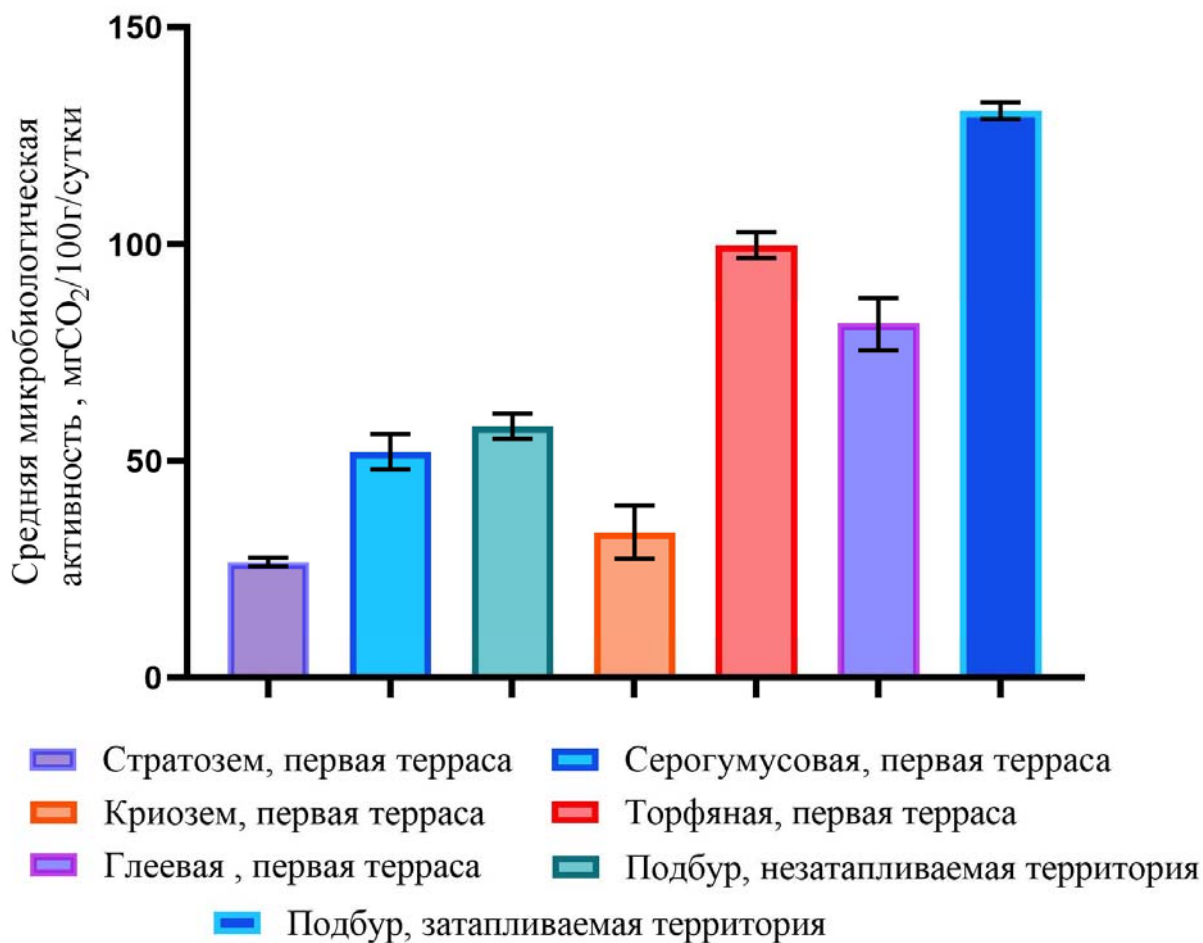


Рисунок 4.2 – Средние значения микробиологической активности среди различных отделов почв. Среднее±стандартное отклонение, различие средних значимо при $p \leq 0,1$

Также нами был проведен анализ потенциальной минерализации органического вещества в почвах дельты (рис. 4.3.) Полученные данные свидетельствует об активных процессах минерализации в изученных почвах. На рисунке 4.3 мы можем наблюдать несколько пиков, которые говорят об увеличении эмиссии углекислоты. Такое распределение в первую очередь связано с различным временем трансформации микробиотой различных фракций органического вещества исследуемых почв. Таким образом, в первую очередь, видимо, подвергаются деструкции низкомолекулярные соединения, С-

СН, а также простые ароматические соединения (моноциклические углеводороды) в составе органического вещества.

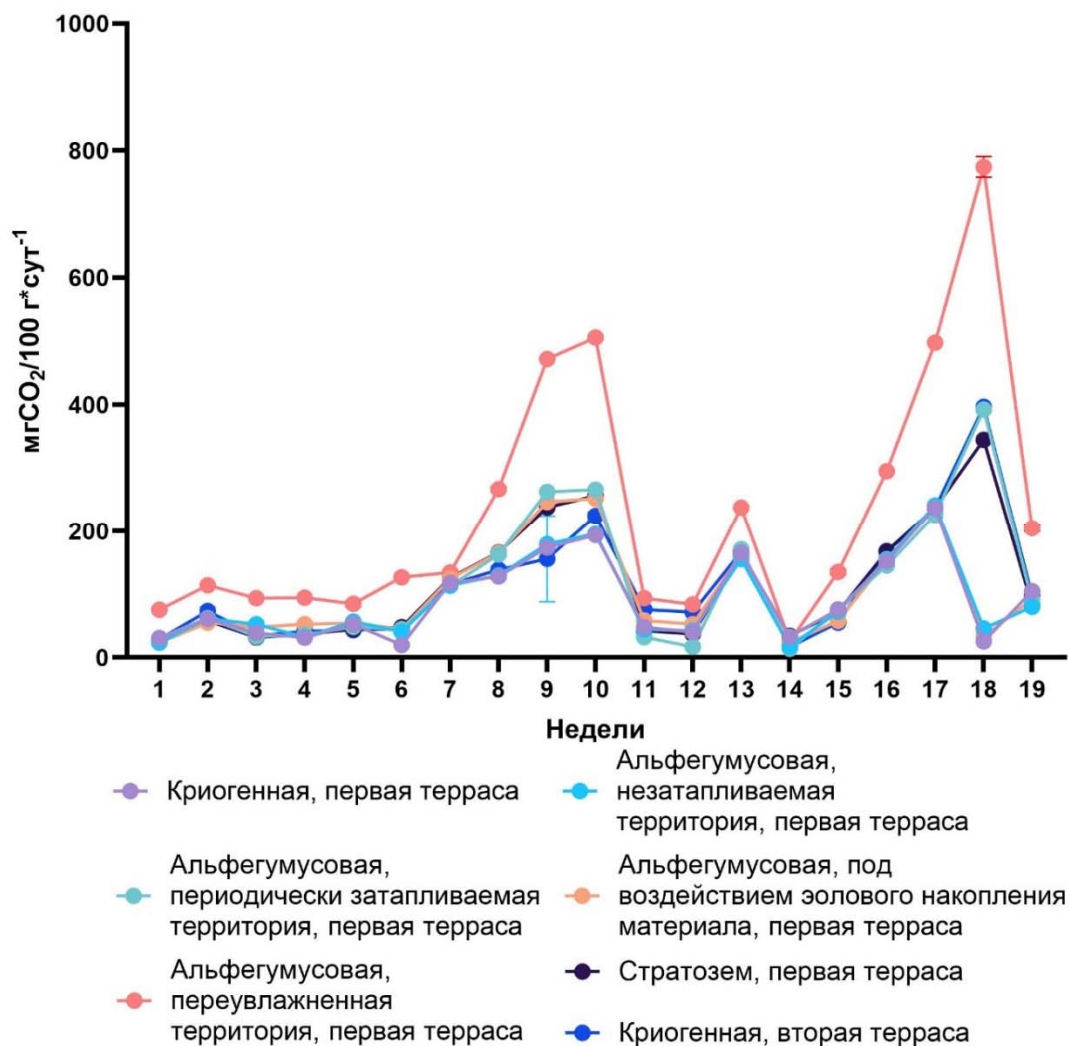


Рисунок 4.3 – Значения потенциального уровня минерализации углерода.

Ось ОУ – микробиологическая активность ($\text{mgCO}_2/100 \text{ г} \cdot \text{сут}^{-1}$), ось ОХ – недели

Полученные значения эмиссии довольно велики, скорость минерализации органических остатков тесно связана с качественным составом органического вещества. Далее нами будет показано (см. раздел 4.2.1), что состав органического вещества в изученных почвах связан с формированием алифатических соединений в своем составе и зависит от прекурсоров гумификации. Основными структурными фрагментами, входящими в состав органического вещества, являются алифатические структурные фрагменты ($(\text{CH}_2)_n/\text{CH}/\text{C}$ и CH_3),

ароматические структурные фрагменты (C=C/C–H, C–O) и кислородсодержащая группа (ОН). На наш взгляд, в первую очередь подвергаются деструкции соединения ОН группы (ОН/ОСq), которые также являются группой алифатических соединений, далее может происходить их минерализация ((СН₂)_n/СН/С и СН₃), т.к. их больше всего в составе и пик на 10 неделе наибольший по эмиссии углекислоты (см. рис. 4.3). В последнюю очередь, скорее всего, минерализуется ароматическая часть органического вещества, что связано с ее относительно высокой степенью стабилизации по сравнению с алифатическими фрагментами (Ejarque, Abakumov, 2016).

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

Почвы дельты характеризуются относительно высоким содержанием ПОВ в органоминеральных и торфяных горизонтах, а также его относительно низким содержанием в минеральных горизонтах. В изученных почвах можно выделить три типа накопления органического вещества (рис. 4.4).

В типе А накопление происходит в верхних гумусо-аккумулятивных горизонтах, что характерно для подбуров. Тип Б характеризуется наличием пика в срединном горизонте и верхнем, что характерно для стратоземов, также в развитых подбурах может наблюдаться аккумуляция ПОВ в срединном горизонте, что связано с перераспределением органического вещества по профилю. Тип В характеризуется накоплением органического вещества на контакте с многолетнемерзлыми породами, данное распределение характерно для криоземов грубогумусных. В ходе процесса криогенного массообмена, органоминеральные комплексы мигрируют в нижележащие горизонты и накапливаются на границе с ММП. Увеличение доли мелких частиц приводит к уплотнению срединных почвенных горизонтов, насыщению их влагой и развитию почвенного криогенеза. Таким образом, разрушение минеральных

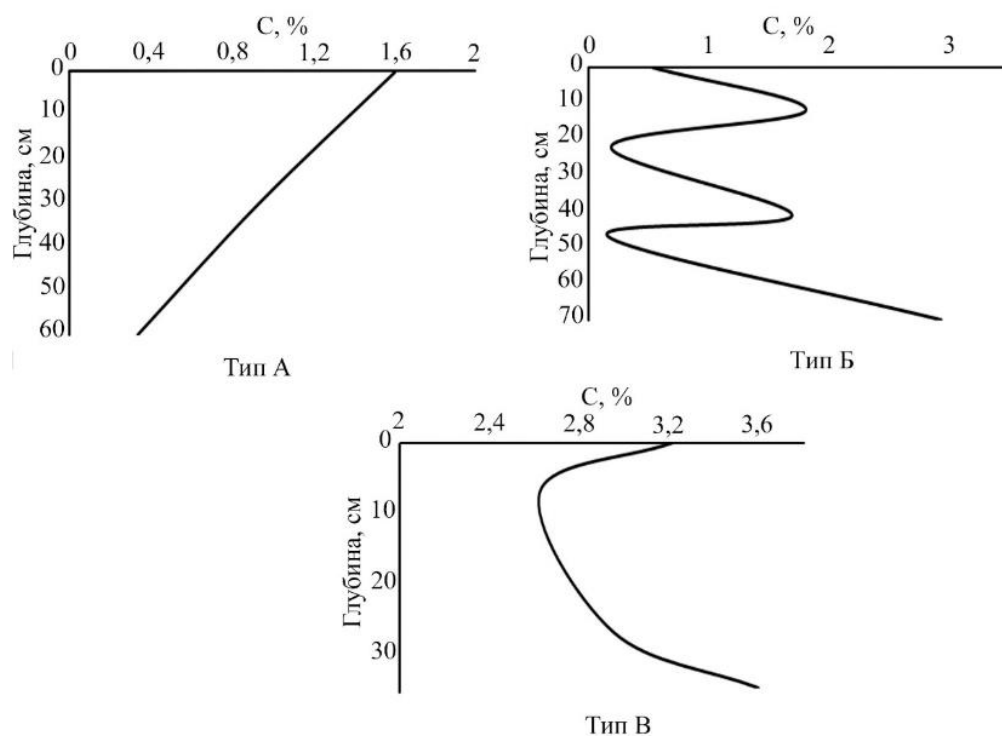


Рисунок 4.4 – Типы распределения органического углерода в почвенном профиле: тип А – подбур иллювиально-железистый, тип Б – стратозем серогумусовый, тип В – криозем грубогумусовый

частиц, связывание их с ПОВ и перемещение к границе ММП приводит к депонированию почвенного органического вещества в составе мерзлых пород (см. рис. 4.4).

Для исследования закономерностей распределения ПОВ был проведен анализ содержания органического вещества в различных ландшафтных позициях о. Самойловский (рис. 4.5). Как видим на рисунке 4.5, наибольшее содержание ПОВ отмечается на первой террасе, на участках, которые не подвержены процессу затопления. Участки с наибольшим содержанием ПОВ находились в зоне распространения криоземов и торфяных почв. В стратоземах, на затопляемой территории острова, накапливается меньшее количество ПОВ в верхнем органо-аккумулятивном горизонте, что связано со стратификацией почвенных горизонтов.

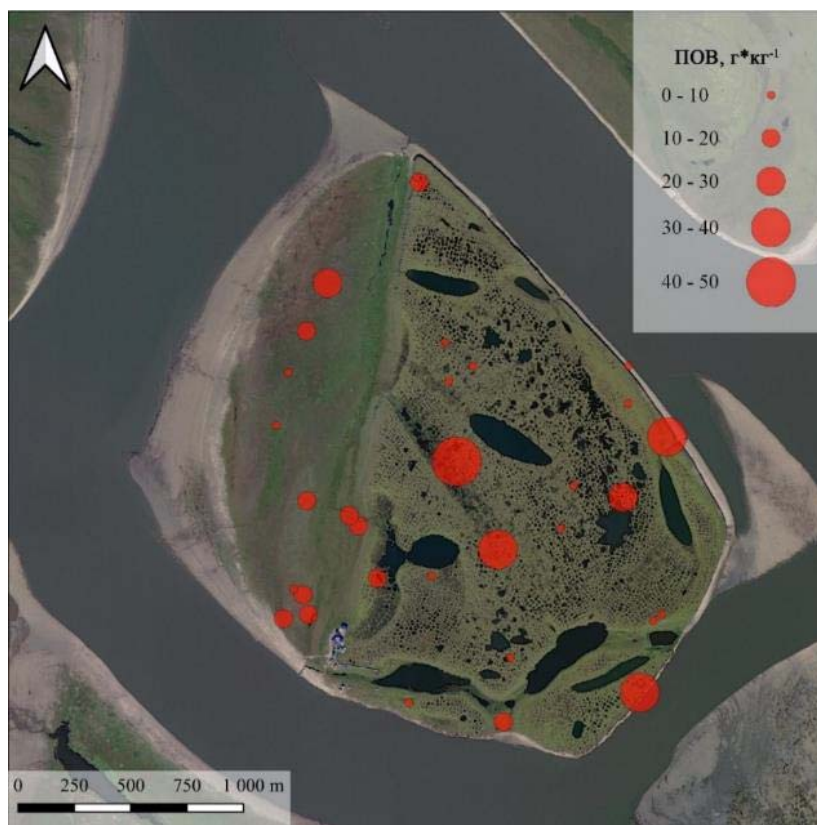


Рисунок 4.5 – Пространственное распределения органического вещества в почвах на о. Самойловский в верхних 0–20 см

В целом, по остальным изученным участкам соблюдается тот же принцип в накоплении ПОВ, а наиболее высокое содержание углерода наблюдается в криоземах и торфяных почвах дельты. Запасы ПОВ в различных отделах почв представлены на рисунке 4.6. Наибольшие запасы углерода характерны для стратоземов, в среднем $35,1 \text{ кг/м}^2$, 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.

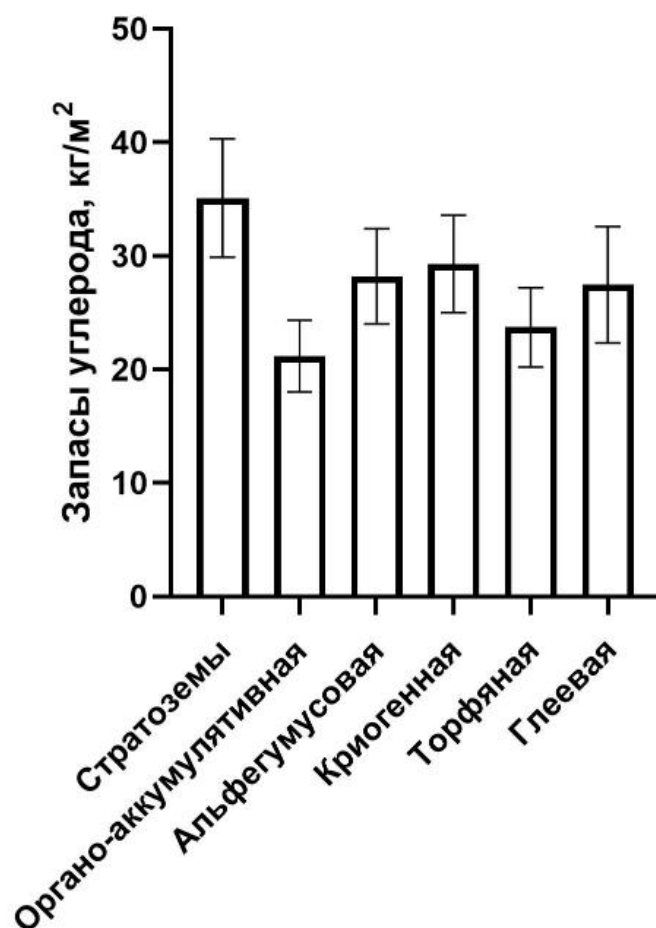


Рисунок 4.6 – Запасы углерода на глубине 0–100 см в почвах дельты

В альфегумусовых почвах наблюдается несколько меньший запас органического вещества, чем в стратоземах, и составляет в среднем 28,2 кг/м². В глеевых почвах накапливается в среднем 26,8 кг/м² ПОВ, оно происходит на контакте с ММП. В криоземах накапливается в среднем 29,3 кг/м² ПОВ, это связано с накоплением слаборазложившихся растительных остатков, их медленной трансформацией, а также с накоплением ПОВ как в срединном, так и в нижележащем горизонтах, что связано с процессом криогенного массообмена. В торфяных и органо-аккумулятивных почвах (формирующихся на вершинах булгунняхов третьей террасы) запасы ПОВ достигают до 23,7 кг/м². В целом, постлитогенные почвы отличаются меньшим запасом ПОВ по сравнению с синлитогенными, что обусловлено низкими темпами трансформации ПОВ и его депонированием в составе ММП.

4.3. Молекулярное строение почвенного органического вещества

4.3.1. Характеристика гуминовых кислот, извлеченных из почв и осадков ледового комплекса

Для определения элементного и молекулярного состава органического вещества были отобраны пробы почв на аласе о.Курунгнах (третья терраса), пробы органоминерального материала из ЛК и почвенные пробы на участки вне дельтового комплекса – на Харулахском хребте и кряже Чекановского (табл. 4.1).

Таблица 4.1 – Описание почв дельты, из которых отобраны пробы для анализа

№ пробы	Описание почвенных разрезов	Растительное сообщество	Название почвы
о. Курунгнах			
1	Вершина аласа. Темный материал (окраска* 10YR6/1), корни, признаки ожелезнения, супесчаный, признаки криогенного массообмена, граница ММП от 27 см	Травяно-мохово-лишайниковая тундра (<i>Cetraria nivalis</i> , <i>Sphagnum</i> , <i>Carex aquatilis</i>)	Криозем грубогумусированный
2	Подножие аласа. Темный материал (окраска 10YR6/1), корни, признаки оглеения, супесчаный, профиль затапливается на границе 25 см, граница ММП 29 см	Травяно-мохово-лишайниковая тундра (<i>Cetraria nivalis</i> , <i>Sphagnum sp.</i> , <i>Carex aquatilis</i>)	Криозем грубогумусированный
3	Середина аласа. Окраска 10YR6/1, корни, супесчаный, профиль затапливается на границе 65 см, граница ММП 70 см	Кустарничково-мохово-осоковая тундра (<i>Sphagnum sp.</i> , <i>Carex aquatilis</i> , <i>Salix glauca</i>)	Торфяно-эутрофная
4	Край полигона. Органический материал, окраска 10YR4/3	Мохово-лишайниковое болото (<i>Cetraria nivalis</i> , <i>Sphagnum sp.</i>)	Криозем грубогумусированный
5	Полигональный центр аласа. Органический материал, окраска 10YR4/3	Травяно-мохово-лишайниковое болото (<i>Cetraria nivalis</i> , <i>Sphagnum</i> , <i>Carex aquatilis</i>)	Глеезем криогенно-ожелезненный

6	Органоминеральные осадки ЛК (~34,299 ± 500 лет БП)**, окраска 10YR3/2	—	Почвоподобное тело
Харулахский хребет			
7	Вершина хребта. Орагноминеральный материал, окраска 10YR3/2, тиксотропия, супесчаный, высокая скелетность	Мохово-лишайниковая тундра (<i>Cetraria nivalis</i> , <i>Sphagnum</i> , <i>Leptogium lichenoides</i>)	Торфяно-литозем
8	Вершина хребта. Органоминеральный материал, окраска 10YR3/2, тиксотропия, супесчаный, высокая скелетность	Мохово-лишайниковая тундра (<i>Cetraria nivalis</i> , <i>Sphagnum</i> , <i>Leptogium lichenoides</i>)	Торфяно-литозем
Кряж Чекановского			
9	Ветровое убежище, окраска мелкозема 10YR3/2	Мохово-лишайниковая тундра (<i>Trisetum</i> , <i>Phragmites</i> , <i>Sphagnum</i>)	Криозем грубогумусированный перегнойный

*Munsell Color (Firm) (2010)

** Schirrmeister et al., 2003

Элементный состав гуминовых кислот (ГК) является наиболее важным показателем, который дает сведения о процессах гумификации, окисления и степени конденсации ГК (Lurachev et al., 2017; Polyakov, Abakumov, 2021b). Данные элементного состава представлены в таблице 4.2. Судя по полученным данным (табл. 4.2), содержание углерода в исследуемых образцах ГК, извлеченных из почв дельтового комплекса и коренных берегов, довольно низкое и находится в узком диапазоне (43–46%), в то время как содержание углерода в образце из мерзлых грунтов ЛК (проба №6) заметно ниже (38%). Это может указывать на высокую степень окисления углерода в составе ГК. Отношение C/N варьирует от 12 до 16, что указывает на относительно высокую изменчивость условий гумификации в пространстве и времени.

Таблица 4.2 – Элементный состав ГК, извлеченных из почв дельты (на беззольную навеску)

№ пробы	N, %	C, %	H, %	O, %	C/N	H/C	O/C	w
о. Курунгнах								
1	3,66	43,36	5,47	47,51	13,81	1,50	0,82	0,15
2	3,90	46,54	5,59	43,97	13,91	1,43	0,71	-0,01
3	3,55	46,22	5,52	44,71	15,17	1,43	0,73	0,03
4	3,49	45,39	5,50	45,62	15,19	1,44	0,76	0,07
5	3,24	46,64	5,41	44,71	16,82	1,38	0,72	0,06
6	3,20	38,16	5,09	53,55	13,93	1,59	1,05	0,52
Харулахский хребет								
7	3,59	46,64	5,56	44,21	15,16	1,42	0,71	0,01
8	4,05	43,96	5,40	46,59	12,65	1,46	0,80	0,13
Кряж Чекановского								
9	3,78	45,35	5,32	45,55	14,01	1,40	0,75	0,11

Примечание. N, C, H, O представлены массовыми долями вещества, C/N, H/C, O/C – представлены мольными отношениями, w – степень окисленности. Номера на рисунке соответствуют номерам проб в табл. 4.1.

Содержание кислорода в исследованных образцах сопоставимо с содержанием углерода, в образце ГК из ЛК отмечено высокое содержание кислорода (53%). Основными диагностическими параметрами элементного состава ГК являются отношения H/C и O/C. Чем ниже значение данных отношений, тем выше вклад углерода в построение молекул ГК, и тем выше содержание в них ароматических структур. Соответственно, чем выше данные отношения, тем больше вклад боковых алифатических структурных фрагментов в строение ГК (Дергачева, 2018). Из отношения H/C в ГК почв с о. Курнугнах (см. табл. 4.2), мы видим, что данное отношение уменьшается от вершины к подножию аласа (пробы № 1–3), что может указывать на увеличение содержания ароматических структурных фрагментов в составе ГК и увеличение степени стабилизации. Это, видимо, связано с увеличением степени гидроморфизма в почве при движении к подножию аласа. Судя по значениям степени окисленности (W), большая часть исследуемых образцов находится в окисленном состоянии, только проба №2, отобранная в нижней части аласа, имеет восстановительные условия, связанные с относительно высоким уровнем гидроморфизма в почве. С увеличением

степени гумификации ГК происходит увеличение степени окисленности (Безносиков, Лодыгин, 2010; Lodygin et al., 2014).

Одним из методов визуализации элементного состава ГК из почв является графическое представление соотношения Н/С к О/С (рис. 4.7).

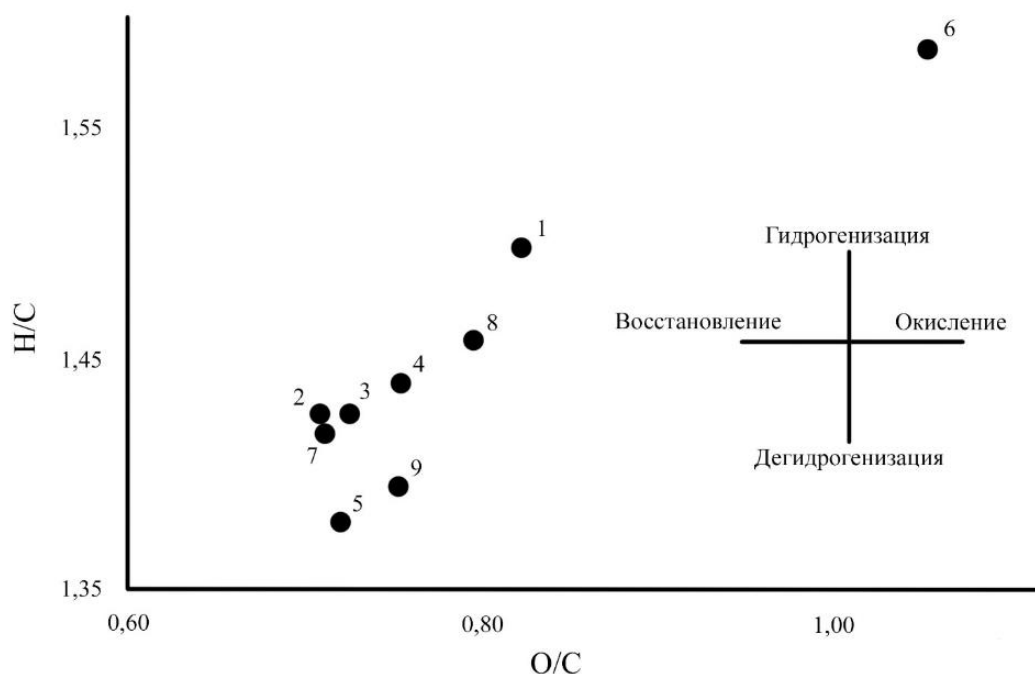


Рисунок 4.7 – Поля распределения показателей элементного состава в координатах Н/С-О/С гуминовых кислот (номера на рисунке соответствуют номерам проб в табл. 4.1)

В результате анализа элементного состава ГК было выявлено, что их образец, 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 Н/С и О/С, что указывает на сходные условия формирования ГК.

Методом СР/MAS ^{13}C ЯМР-спектроскопии идентифицированы различные фрагменты молекул в составе ГК (табл. 4.3).

Таблица 4.3 – Типы структурных фрагментов в зависимости от диапазонов химических сдвигов в ГК на основе ^{13}C ЯМР спектроскопии

Химические сдвиги, ppm	Сокращения, используемые в работе	Тип молекулярных фрагментов
0–46	$(\text{CH}_2)_n/\text{CH}/\text{C}$	Углерод концевых метильных групп (CH_3), углерод метиленовых групп длинноцепочечных алкильных цепей (CH_2), а также углерод метиленовых групп разветвлённых алкильных цепей (CH , C).
46–60	OCH_3	Углерод метоксильных и этоксильных групп ($\text{O}-\text{CH}_3$), O , N – замещенные алифатические фрагменты
60–105	OCH/OCq	Углерод CH_2OH групп углеводных фрагментов (CH_2OH), углерод CHOH групп полисахаридных колец и эфиров (CHOH), а также углерод ацеталей (OCO)
105–144	Aromatic C-C/C-N	Незамещенный ароматический углерод (H-Arom), а также аллил-замещенный ароматический углерод (C-Arom)
144–164	Aromatic O,N	O,N-замещенный ароматический углерод (O,N-Arom)
164–183	$\text{COO}/\text{N}-\text{C}=\text{O}$	Углерод карбоксильных групп, сложных эфиров и амидов ($\text{COO}-\text{R}$)
183–190	Aromatic=O	Углерод хинонных фрагментов (Arom=O)
190–204	$\text{C}=\text{O}$	Углерод фрагментов альдегидов и кетонов ($\text{C}=\text{O}$)

Из полученных данных можно выделить три основные группы структурных фрагментов, которые накапливаются в ГК почв. Это C, H – алкилы (0–46 ppm), углерод углеводных фрагментов CH_2OH , эфиров, ацеталей (60–105 ppm), а также ароматические структурные фрагменты (105–164 ppm) (Поляков, Абакумов, 2021). Распределение структурных фрагментов в исследованных образцах ГК представлено в таблице 4.4. В изученных почвах отмечено преобладание алифатических структурных фрагментов ГК (59–67%), что указывает на относительно низкую степень устойчивости ПОВ к биодegradации (рис. 4.8).

Таблица 4.4 – Содержание структурных фрагментов ГК в исследованных пробах почв

№ проб	Химические сдвиги, %								AR	AL	AR/AL	AL h,r + AR h,r, %	C,H –AL/O,N – AL
	0–46	46–60	60–105	105–144	144–164	164–183	183–190	190–204					
1	28	9	17	23	9	12	1	1	33	67	0,49	51	1,08
2	26	9	16	26	9	12	1	1	36	64	0,56	52	1,04
3	23	9	18	26	10	12	1	1	37	63	0,59	49	0,85
4	24	8	17	27	10	12	1	1	38	62	0,61	51	0,96
5	26	8	18	25	9	11	1	2	35	65	0,54	51	1,00
6	21	8	16	30	10	13	1	1	41	59	0,69	46	0,79
7	23	8	21	23	9	13	1	2	33	67	0,49	44	0,69
8	20	10	19	24	10	14	1	2	35	65	0,54	51	0,88
9	28	8	18	24	8	11	2	1	34	66	0,52	52	1,08

Примечание. AR – сумма ароматических фрагментов; AL – сумма алифатических фрагментов; AL h,r + AR h,r, % – степень гидрофобности; C,H–AL/O,N–AL – степень гумификации органического вещества. Номера проб: 1–5 – алас, 6 – отложения ЛК 7–8 – проба почв Харулахского хребта, 9 – проба почв кряжа Чекановского

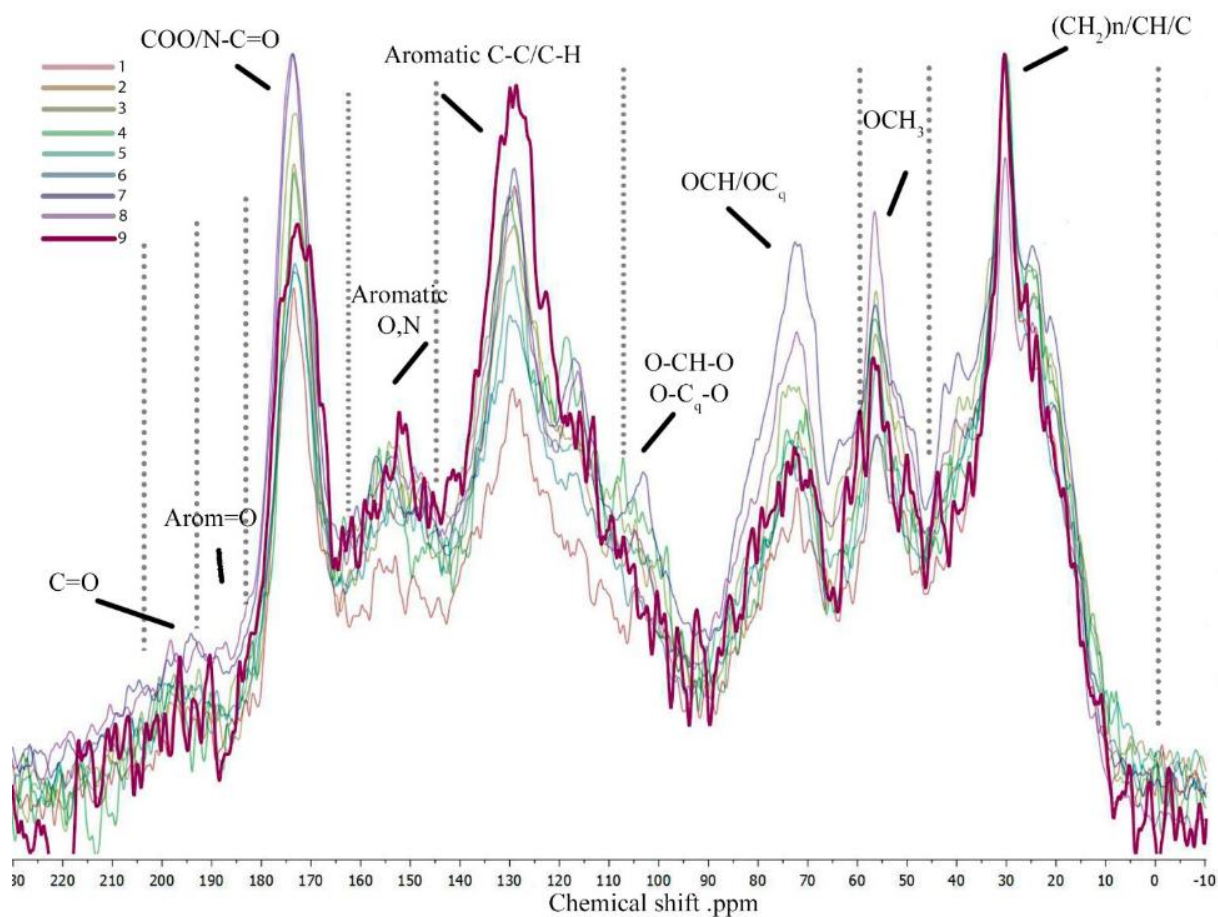


Рисунок 4.8 – CP/MAS ^{13}C – ЯМР спектры ГК. (номера на рисунке соответствуют номерам проб в табл. 4.1)

Преобладание алифатических фрагментов свидетельствует о их высоком содержании в составе прекурсоров гумификации, а также о низкой степени трансформации растительных остатков в почве. Преобладание алифатических структур также характерно для гуминовых веществ, образующихся в гидроморфных условиях, т.к. биомасса микробов и водорослей состоит из белков и мембранных липидов. 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 биодegradации (Василевич и др., 2019; Лодыгин и др., 2014). Такое соотношение AR/AL характерно для ГК извлеченных почв таежной зоны (Безносиков, Лодыгин, 2010).

4.3.1.1. Характеристика гуминовых кислот, извлеченных из почв аласа (о. Курунгнах)

В зависимости от степени гидроморфизма и качества прекурсоров гумификации, в почвах накапливается разное количество ароматических и алифатических фрагментов ГК. Это обусловлено формированием различных типов растительности, а также влиянием криогенных процессов на процесс гумификации растительных остатков в почве. На ветреной вершине аласа преобладают мхи и лишайники, они характеризуются наличием алифатических прекурсоров гумификации, которые составляют существенную часть ГК в почвах (рис. 4.9).

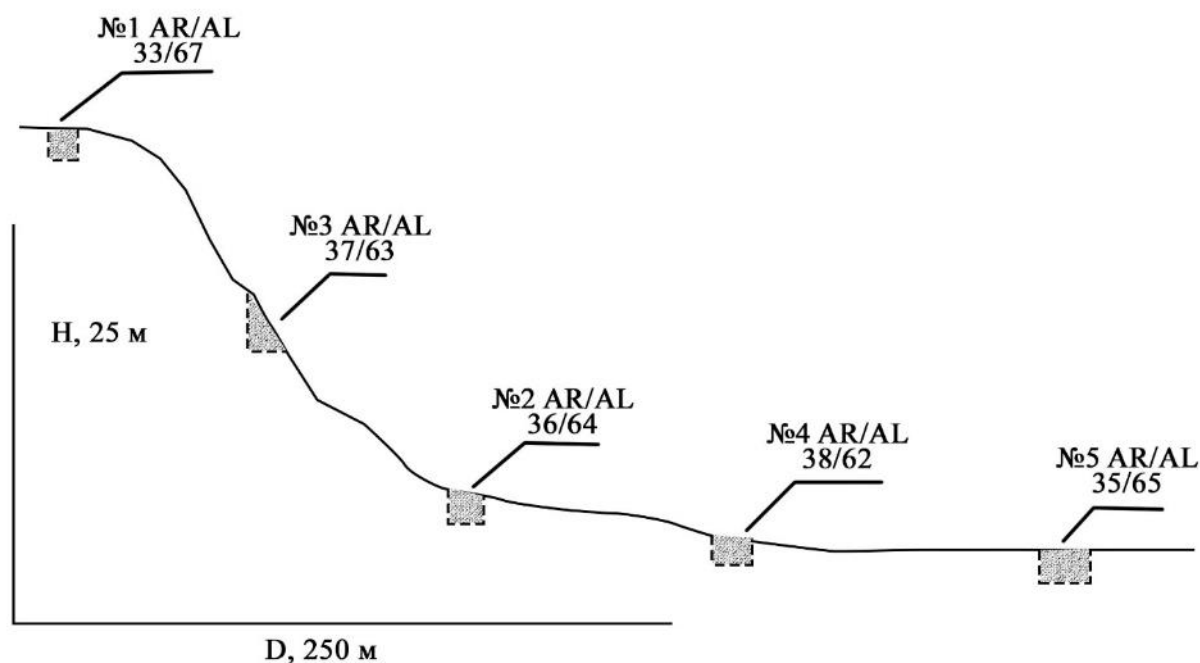


Рисунок 4.9 – Пространственное распределение отношения AR/AL в почвах аласа (номера на рисунке соответствуют номерам проб в табл. 4.1)

Образец со склона аласа отличается повышенным содержанием ароматических фрагментов за счет более благоприятных локальных климатических параметров и отсутствия застойной влаги, что обуславливает трансформацию растительных остатков в почве (Polyakov, Abakimov, 2020a). Образец у подножия характеризуется наибольшим содержанием ароматических

структурных фрагментов, отношение AR/AL достигает 0,61, это может быть связано с аккумуляцией здесь гидрофобных молекул ГК, которые устойчивы к растворению. В образцах ГК, извлеченных из почв нанополгона в центре аласа, наблюдается снижение содержания ароматических структурных фрагментов что может быть вызвано формированием ГК в условиях с относительно высокой степенью гидроморфизма.

Полученные данные о строении ГК, извлеченных из почв аласа на о. Курунгнах указывают на то, что ГК здесь характеризуются достаточно однородным составом, что может свидетельствовать о схожих факторах, влияющих на трансформацию органического вещества.

4.3.1.2. Характеристика гуминовых кислот почв Харулахского хребта и кряжа Чекановского

Образовавшиеся здесь почвы являются зональным вариантом почвообразования, данные участки не находятся под активным влиянием реки. Они представлены слаборазвитыми почвами, а почвообразование происходит на каменистых породах, в том числе карбонатных материалах. Тем не менее, ГК, которые здесь формируются, имеют относительно высокий уровень содержания ароматических структурных фрагментов (до 33–35%). Помимо участков, на которых формируются торфяно-литоземы, также была исследована проба почв, сформировавшихся в ветровом убежище на кряже Чекановского – в ней содержание ароматических структурных фрагментов достигает 34%. Почвы, формирующиеся в относительной близости от дельты реки Лены, образуются на слабовыветрелых горных породах, мощность профиля почвы здесь редко превышает 30 см, однако в таких условиях формируются относительно устойчивые к биодegradации молекулы ГК. Относительно высокое содержание ароматических структурных фрагментов может быть связано с более глубоким залеганием ММП в почве, так как почвенный покров формируется

непосредственно на материнской породе, а наличие множества трещин в камнях препятствует скоплению здесь лишней влаги.

4.3.1.3. Характеристика ГК из почвоподобного тела ледового комплекса

Ежегодно из-за воздействия береговой эрозии и абразии происходит разрушение ЛК дельты реки Лены и огромное количество органоминеральных отложений поступает в окружающую среду из мерзлого состояния. При взаимодействии органоминеральных компонентов с атмосферой происходит минерализация ПОВ с выделением углекислого газа, воды и зольных элементов. Согласно радиоуглеродному датированию, возраст этих отложений составляет около 34299 ± 500 лет (Schirrmeister et al., 2003). В ходе наших исследований мы обнаружили, что этот материал содержал наибольшее количество ароматических структурных фрагментов среди исследованных нами образцов. Замороженное органическое вещество из ЛК является наиболее стабильным из всех исследованных нами образцов. Видимо, в результате накопления здесь различных органических остатков и их длительной трансформации происходит конденсация высокомолекулярных соединений, что приводит к увеличению содержания ароматических структурных фрагментов ГК.

4.3.1.4 Темпы стабилизации органического вещества в почвах и отложениях ледового комплекса третьей террасы, а также коренных берегов дельты

В исследуемых препаратах ГК накапливается до 41% ароматических структурных фрагментов, что может обуславливать стабилизацию органического вещества в исследуемых почвах (Polyakov and Abakimov, 2020a). В то же время, алифатические фрагменты ГК продолжают оставаться доминирующими. Снижение содержания ароматических структурных фрагментов в составе ГК может быть связано с относительно низкой микробиологической активностью, степенью гидроморфизма территории и

качеством предшественников гумификации (Поляков, Абакумов, 2021). Наибольшее соотношение AR/AL (0,69) наблюдалось в образце из ЛК. Это может быть связано с длительными процессами оттаивания и замораживания, которые приводят к селективному отбору наиболее устойчивых молекулярных соединений. На участках, которые формируются в условиях минимального содержания лигнина, заметно уменьшение ароматических фрагментов в ГК из-за низкого содержания ароматических предшественников гумификации. Дельта реки Лены довольно сильно отличается от континентальной части Сибири, теплые воды реки способствуют относительно быстрому прогреванию воздуха и почв. Таким образом, влияние реки, способствует развитию почв и образованию ГК с относительно высокой долей ароматических структурных фрагментов, что обусловлено стабилизацией ПОВ. По соотношению ароматических и алифатических структурных фрагментов в ГК данный регион схож с таежной зоной и лесотундрой (Polyakov and Abakumov, 2020a).

Для стандартизации количественных характеристик макромолекул ГК были использованы следующие параметры: степень разложения органического вещества (C-алкил/O-алкил) и интегральный показатель гидрофобности ГК ($AL_{h,r} + AR_{h,r}$) (рис. 4.10).

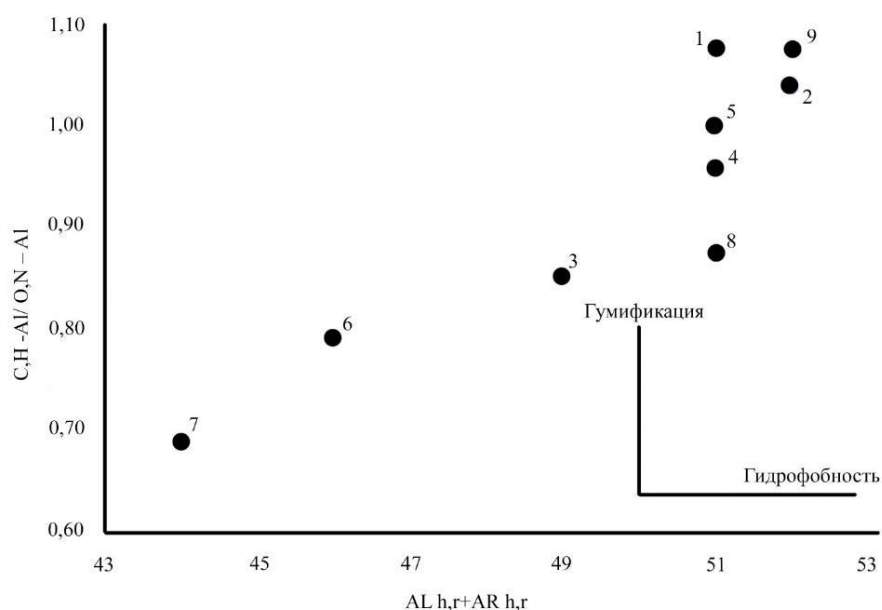


Рисунок 4.10 – Диаграмма интегральных показателей молекулярного состава ГК (номера на рисунке соответствуют номерам проб в табл. 4.1)

Согласно полученным данным, можно сделать вывод о наибольшем вкладе в молекулярное строение ГК алифатических $((\text{CH}_2)_n/\text{CH}/\text{C}$ и CH_3) структурных фрагментов. Соотношение ароматических и алифатических фрагментов колеблется от 0,49 для вершины аласа и до 0,69 для органоминеральных отложений ЛК. Следует отметить, что в условиях дельты в почвах менее развиты криогенные процессы, по сравнению с континентальной части северной Якутии. Высокая степень аэрации почв обеспечивает эффективный теплообмен с атмосферой и влияет на уровень микробиологической активности в почве, а также обуславливает активную гумификацию ПОВ. В условиях активной гумификации органического вещества в почвах формируются ГК с относительно высоким содержанием ароматических структурных фрагментов, что обусловлено стабилизацией ПОВ (Поляков, Абакумов, 2021). Увеличение содержания ароматических ненасыщенные структур (105–164 ppm), указывает на повышение степени гидрофобности органического вещества почвы и его низкую доступность для почвенных микроорганизмов (Семенов и др., 2009; Поляков, Абакумов, 2021). Накопление ароматических структурных фрагментов, связано с трансформацией лигнин-содержащих компонентов в составе сосудистых растений (Polyakov, Abakumov, 2021b).

Распределение точек исследования вдоль главной компоненты (ГК1) связано с варьированием содержания в ГК ароматических структурных фрагментов (C,H-Arom) и кислорода (O), вдоль ГК2 – алифатических структурных фрагментов (C,H-Alkyl) и ароматических структурных фрагментов (Arom=O) (рис. 4.11).

В целом, ординация структурных фрагментов и элементного состава ГК в пространстве двух главных компонент демонстрирует формирование кластера из ГК, выделенных из почв аласа на о. Крунугнах, что указывает на сходные условия формирования. Остальные образцы ГК показывают отсутствие связи между собой, что обусловлено формированием ГК в различных условиях среды отличных друг от друга.

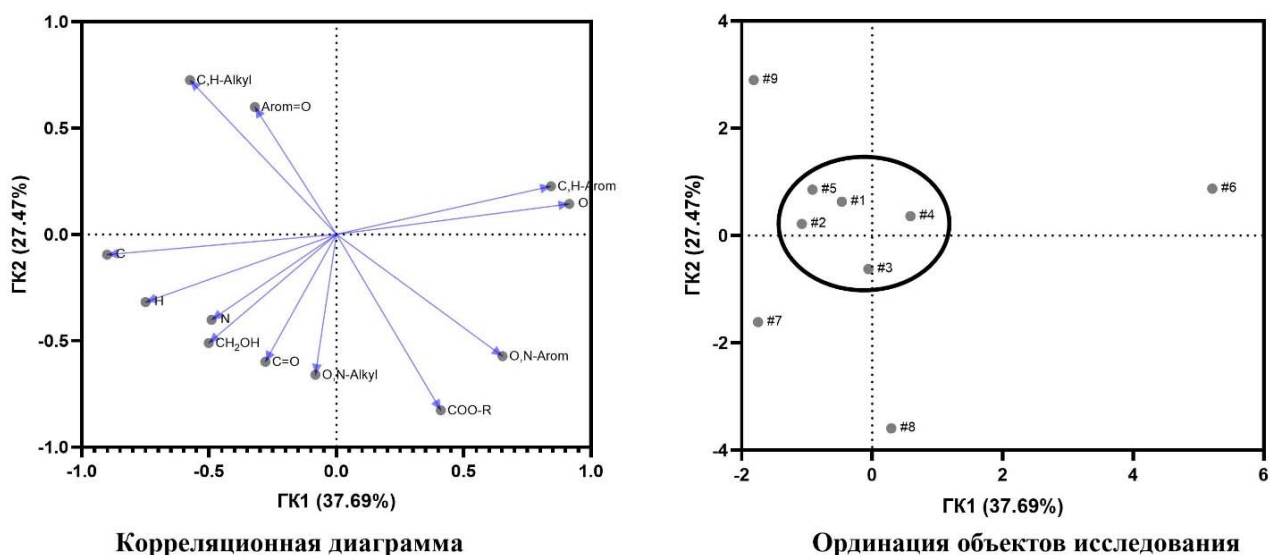


Рисунок 4.11– Результаты анализа главных компонент для структурных фрагментов и элементного состава ГК (номера на рисунке соответствуют номерам проб в табл. 4.1)

4.3.2. Внутрипрофильное распределение гуминовых кислот из почв второй и третьей террасы

Был проведен анализ внутрипрофильного распределения ГК из почв второй и третьей террас дельты реки Лены, т.к. в условиях почвенного криогенеза и массообмена может происходить накопление ПОВ на границе ММП. Ключевыми районами исследований являются почвы о-вов Курунгнах и Джипириес (вторая терраса) (рис. 4.12).

Пробы были отобраны из верхних органоминеральных и нижних горизонтов, в которых происходит надмерзлотное накопление органического вещества (табл. 4.5). Образцы почв для выделения ГК отбирались с вершин трех булгунняхов высотой от 1,3 до 1,5 м на о. Курунгнах и с вершины второй террасы о. Джипириес (рис. 4.13). Результаты элементного состава представлены в таблице 4.6.



Рисунок 4.12 – Точки отбора проб для внутрипрофильного анализа ГК на островах Курунгнах и Джипириес (номера точек соответствуют номерам проб из табл. 4.5)

Таблица 4.5 – Описание исследуемых почв, из которых были извлечены образцы ГК для анализа их внутрипрофильного распределения

Индекс почвы	№ пробы	Описание	Растительное сообщество	Название почвы
о. Курунгнах (3 терраса)				
У1	1	Темный материал, окраска 10 YR 4/3, корни, средняя степень разложения органических остатков	Разнотравная тундра (<i>Trisetum</i> , <i>Phragmites</i>).	Криозем грубогумусированный
	2	Погребенный органоминеральный горизонт, окраска 10YR3/2, средняя степень разложения растительных остатков, граница с ММП		

У2	3	Темный материал, окраска 10YR4/3, корни, средняя степень разложения органических остатков	Разнотравная тундра (<i>Trisetum</i> , <i>Phragmites</i>)	Криозем грубогумусированный
	4	Погребенный органоминеральный горизонт, окраска 10YR3/2, средняя степень разложения растительных остатков, граница с ММП		
У3	5	Темный материал, окраска 10YR4/3, корни, средняя степень разложения органических остатков	Разнотравная тундра (<i>Trisetum</i> , <i>Phragmites</i>)	Криозем грубогумусированный
	6	Погребенный органоминеральный горизонт, окраска 10YR3/2, средняя степень разложения растительных остатков, граница с ММП		
о. Джипириес (2 терраса)				
Л1	7	Темный материал, окраска 10YR3/2, корни, однородный, без включения растительных остатков	Мохово-лишайниково-разнотравная тундра (<i>Sphagnum</i> , <i>Cetraria nivalis</i> , <i>Carex aquatilis</i> , <i>Trisetum</i> , <i>Phragmites</i>)	Криозем грубогумусированный перегнойный
	8	Погребенный, темный, окраска 10 YR 3/2, без включения растительных остатков, граница с ММП		

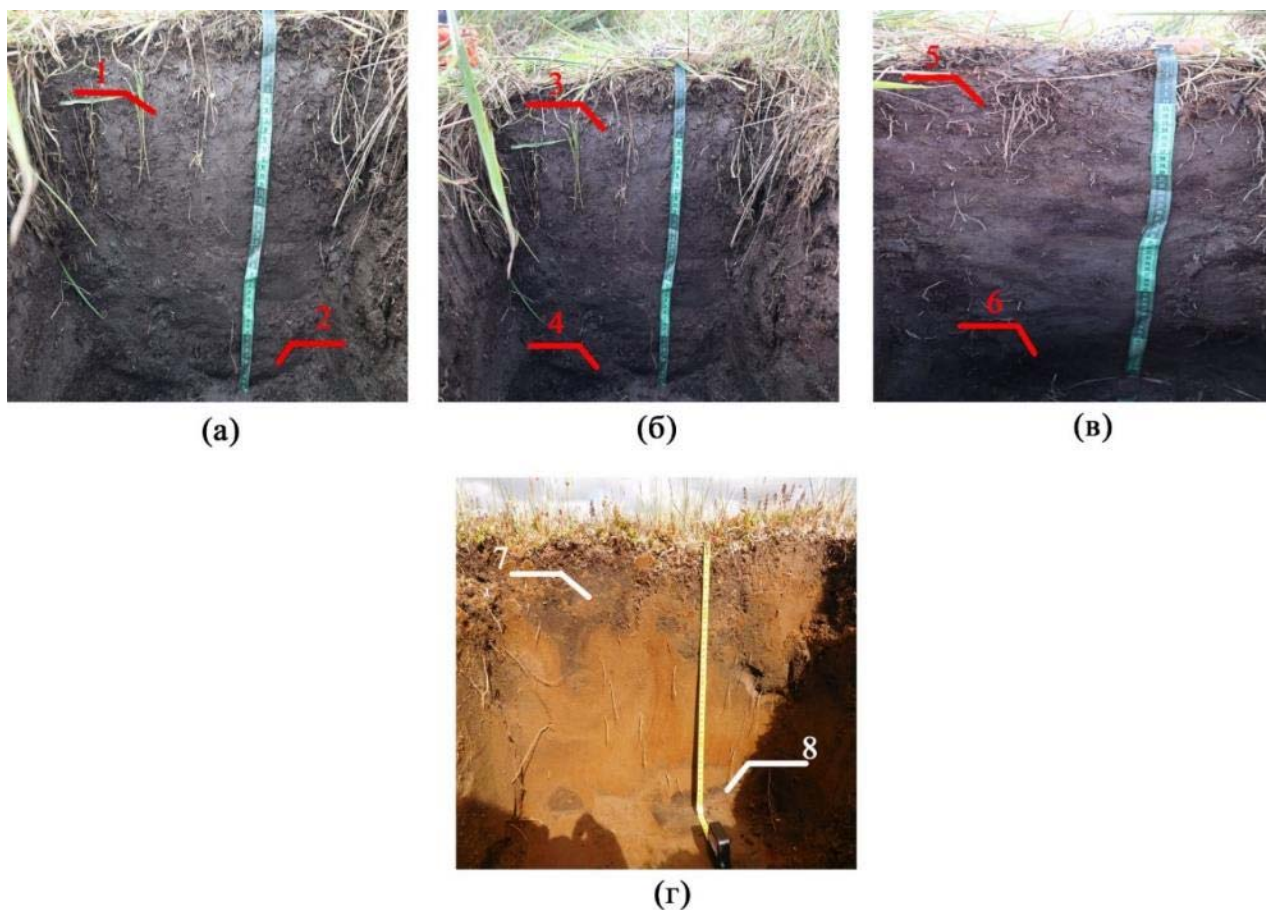


Рисунок 4.13 – Точки отбора проб в профилях исследуемых почв с о-вов. Курунгнах (№1–6) и Джипириес (№7–8). Номера точек соответствуют номерам проб из табл. 4.5.

Таблица 4.6 – Элементный состав ГК (беззольная навеска) извлеченных из почв

№	N, %	C, %	H, %	O, %	C/N	H/C	O/C	w
о. Курунгнах								
1	4,30	54,37	6,01	35,32	14,73	1,32	0,49	-0,35
2	3,58	51,47	5,31	39,64	16,75	1,23	0,58	-0,07
3	3,55	47,46	5,56	43,43	15,61	1,39	0,69	-0,02
4	2,28	47,37	5,14	45,21	24,20	1,29	0,72	0,14
5	4,17	49,68	5,85	40,30	13,89	1,40	0,61	-0,18
6	3,69	53,08	5,61	37,62	16,79	1,26	0,53	-0,19
о. Джипириес								
7	3,41	41,60	5,75	49,24	14,22	1,64	0,89	0,13
8	4,08	52,18	6,33	37,41	14,91	1,44	0,54	-0,36

Примечание. N, C, H, O представлены массовыми долями вещества, C/N, H/C, O/C представлены мольными отношениями, w – степень окисленности. Номера в первом столбце соответствуют номерам проб из таблицы 4.5.

В исследуемых препаратах ГК содержание углерода варьирует от 41 до 54%, с наибольшим количеством в ГК из верхнего гумусово-аккумулятивного горизонта криозема грубогумусированного (У1) с о. Курунгнах. Полученные значения содержания углерода выше, чем в ГК из криоземов с о. Курунгнах, там значения углерода достигают 46%. Растительные сообщества, формирующиеся на участке «спущенного» озера о. Курунгнах, сильно отличаются от типичных сообществ, формирующихся на данном острове (зональная мохово-лишайниковая тундра). В исследованных почвах образуются мощные (до 25 см) органоминеральные горизонты, а характерной особенностью почв «спущенного» озера является наличие погребенных растительных остатков средней степени разложения, аккумулирующихся на границе с ММП. Выявлена различная динамика накопления углерода в составе ГК в пределах трех исследованных булгунняхов. В почве У1 содержание углерода, водорода и азота в составе ГК уменьшается с глубиной, а содержание кислорода увеличивается (см. табл. 4.6). Такая динамика, по-видимому, может быть связана с процессами окисления углерода, из показателя степени окисления W мы можем отметить снижение активности восстановительных условий от $-0,35$ до $-0,07$. В булгунняхе У2 не отмечено изменение в содержании углерода в ГК, извлеченных из верхних органоминеральных и нижних погребенных горизонтов, было зафиксировано незначительное повышение содержания кислорода в ГК выделенного из погребенного органического вещества (с 43 до 45%). В ГК из булгунняха У3 наблюдается увеличение содержания углерода (с 49 до 53 %) (см. табл. 4.6). Изменение содержания углерода в исследованных ГК может быть объяснено высокой активностью криогенных процессов на дне «спущенного» озера. В результате дренажа началась активная трансформация рельефа и формирование булгунняхов, о различной степени активности мерзлотных процессов можно также судить по размерам булгунняхов, которые колеблются в пределах нескольких метров по всему озеру.

Поля распределения показателей элементного состава в координатах Н/С-О/С гуминовых кислот, извлеченных из почв о. Курунгнах и о. Джипириес представлены на рисунке 4.14.

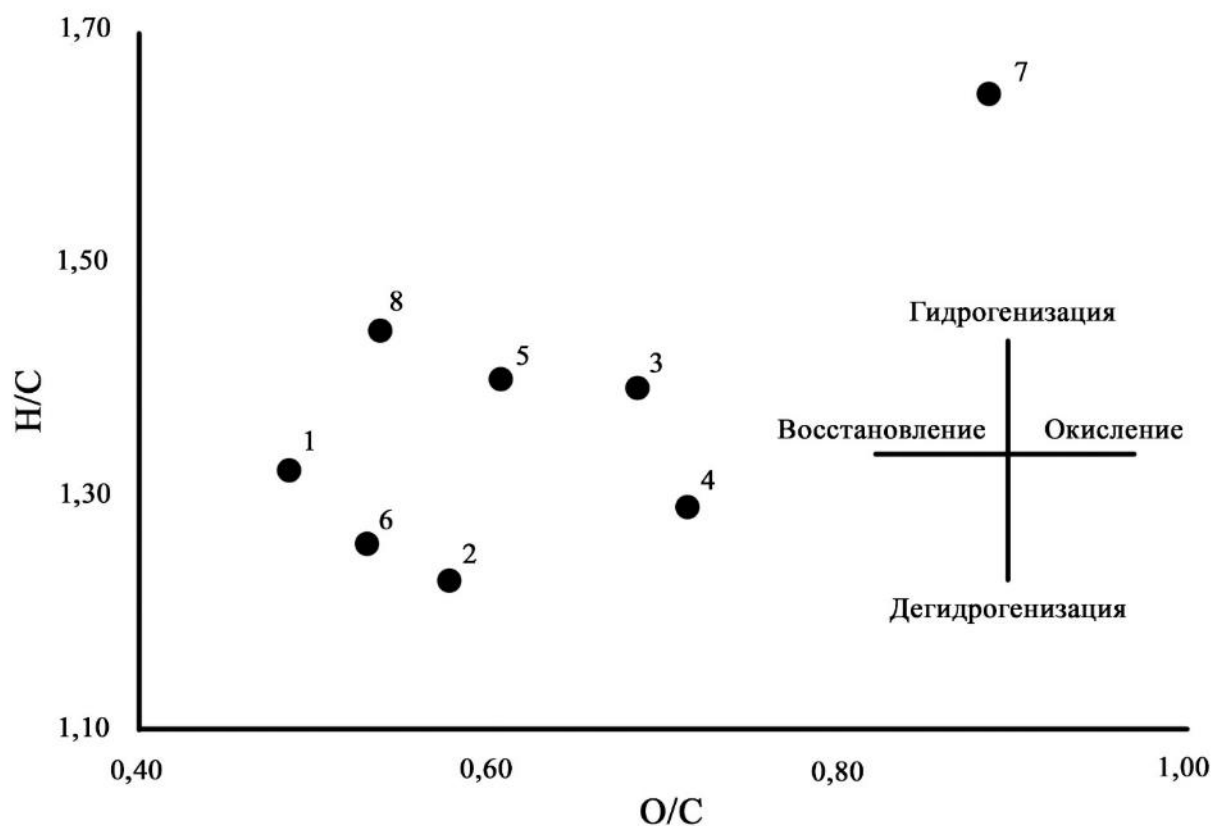


Рисунок 4.14 – Поля распределения показателей элементного состава в координатах Н/С-О/С гуминовых кислот. №1–2 ГК, извлеченные из почвы У1, №3–4 ГК, извлеченные из почвы У2, №5–6 ГК, извлеченные из почвы У3, №7–8 ГК, извлеченные из почвы J1. Номера точек соответствуют номерам проб из табл. 4.5.

В результате анализа элементного состава ГК было выявлено, что образец ГК, извлеченный из гумусово-аккумулятивного горизонта с о. Джипириес, характеризуется относительно высокой степенью окисления и гидрогенизации, что может указывать на активные процессы внутримолекулярной трансформации ГК и расширение алифатической периферии (см. рис. 4.14). ГК из почв «спущенного» озера формируют один кластер и в меньшей степени отличаются друг от друга. Можно отметить, что в парах (гумусово-

аккумулятивный/надмерзлотный горизонт) ГК нижележащие горизонты характеризуются более активным процессом дегидрогенизации, что может указывать на консервацию органических соединений на границе с мерзлотным слоем почвы. Полученные спектры исследованных ГК представлены на рисунке 4.15.

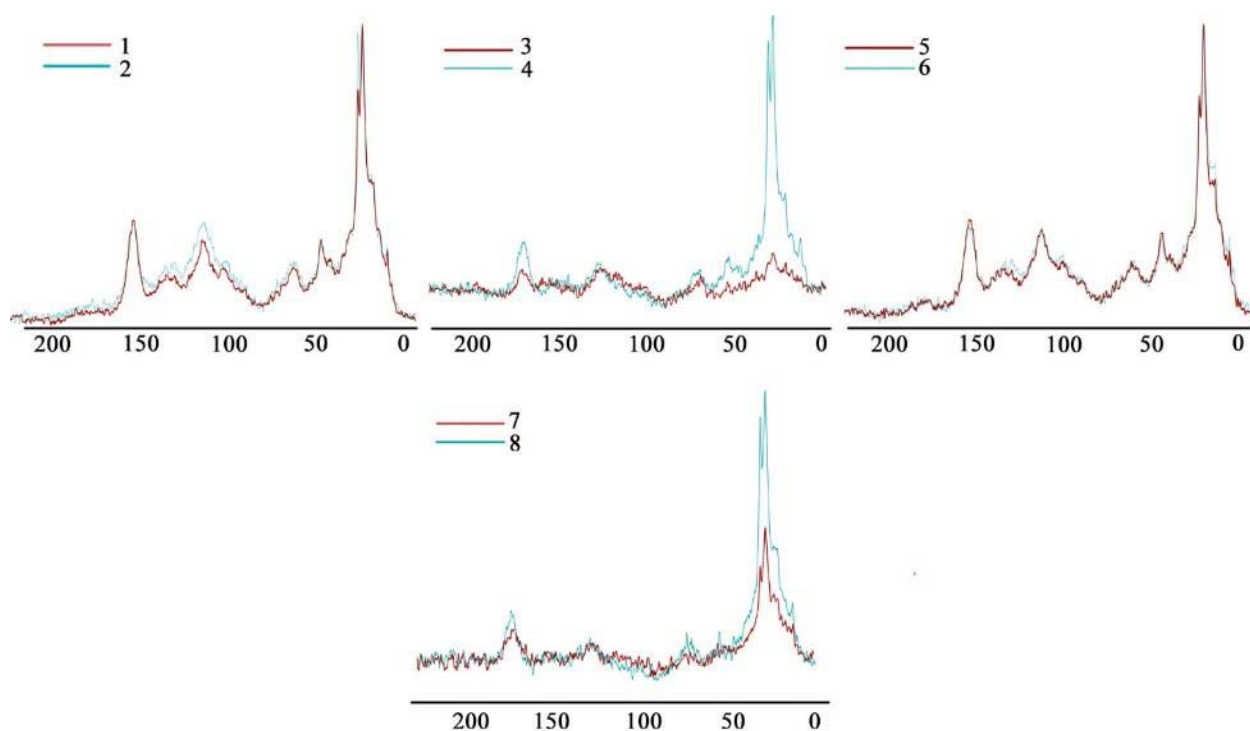


Рисунок 4.15 – CP/MAS ¹³C – ЯМР спектры ГК Номера точек соответствуют номерам проб из табл. 4.5.

Исследуемые ГК представлены в основном алифатическими структурными фрагментами C,H-Алкил ((CH₂)_n/CH/C и CH₃), OCH (OCH/OCq), а также незамещенным ароматическим углеродом (H-Arom) и аллил-замещенным ароматическим углеродом (C-Arom) (табл. 4.7).

Исследуемые ГК характеризуются повышенным содержанием до 79% алифатических структурных фрагментов. Наибольшее содержание отмечается в ГК, выделенных из погребенного органического вещества с о. Джипириес, у кровли многолетнемерзлых пород (см. табл. 4.7). ГК, формирующиеся в криогенной почве на второй террасе, по молекулярному составу соответствуют

Таблица 4.7 Содержание структурных фрагментов ГК в исследованных образцах

№	Химические сдвиги, %								AR	AL	AR/AL	AL h,r + AR h,r, %	C,H –AL/ O,N – AL
	0–46	46– 60	60–105	105–144	144–164	164–183	183– 190	190– 204					
1	41	8	13	20	7	9	1	1	28	72	0,39	61	1,95
2	38	7	13	22	8	9	1	2	31	69	0,45	60	1,90
3	44	7	14	18	7	8	1	1	26	74	0,35	62	2,10
4	22	5	20	30	11	9	1	2	42	58	0,72	52	0,88
5	40	8	14	20	7	9	1	1	28	72	0,39	60	1,82
6	41	7	13	21	8	8	1	1	30	70	0,43	62	2,05
7	43	6	13	20	7	9	1	1	28	72	0,39	63	2,26
8	51	6	14	15	5	7	1	1	21	79	0,27	66	2,55

Примечание. Условные обозначения см.табл. 4.5. Номера в первом столбце соответствуют номерам проб на рис. 4.15.

континентальным вариантам ГК, извлеченных из почв с территории европейской части России (Василевич и др., 2019; Лодыгин и др., 2014). Это, видимо, связано с наиболее активными проявлениями процессов криогенеза на территории второй террасы. В исследованных ГК, выделенных из почв булгунняхов, можно отметить слабую вариабельность молекулярного состава ГК. Однако, во всех исследованных почвах с о. Курунгнах мы можем наблюдать увеличение содержания ароматических структурных фрагментов с глубиной, что может указывать на относительную устойчивость ГК к биодegradации в следствии эволюционного отбора наиболее устойчивых молекул ГК. Таким образом, формирование ГК в почвах дельты связано с развитием криогенных процессов и степенью гидроморфизма почв, которые в свою очередь зависят от особенностей формирования дельтового комплекса. Так, ГК, извлеченные из почв, формирующихся на второй террасе, характеризуются образованием алифатических структурных фрагментов, что обусловлено активным проявлением криогенных процессов в почве, за счет того, что эта часть дельты более длительное время находится в мерзлом состоянии по сравнению с центральной и восточной частями. Это вызвано тем, что большая часть речного стока движется в восточном направлении, а западная, наоборот, мелеет. Таким образом, сюда поступает меньше теплой воды, которая бы могла прогревать воздух и почву. В свою очередь ГК, извлеченные из почв центральной части дельты, характеризуются относительно высоким содержанием ароматических структурных фрагментов, что может быть связано с менее активным проявлением криогенных процессов в почве.

4.3.2.1. Характеристика гуминовых кислот почв «спущенного» озера острова Курунгнах третьей террасы

Почвы «спущенного» озера, возрастом около 200 лет, имеют существенные отличия от криоземов о. Курунгнах. Формирование озера связано с береговой абразией. На сегодняшний день данный объект представляет собой

понижение с большим количеством булгунняхов, на вершинах которых формируется разнотравная тундра. Характерной особенностью «спущенного» озера является наличие погребенных органических остатков в почвах на его поверхности, накопление которых может быть связано с процессом осадконакопления в процессе существования озера, в результате береговой абразии данные осадки были перекрыты современными почвами.

ГК, извлеченные из погребенных горизонтов почв, отличаются относительно высоким содержанием ароматических структурных фрагментов по сравнению с верхними горизонтами современных почв. Относительно исследованных ГК здесь отмечено самое высокое содержание ароматических структурных фрагментов, что может подтверждать тезис о том, что в результате термодинамического отбора, полимеризации происходит отбор наиболее устойчивых молекул в составе ГК, и они могут накапливаться на границе с ММП (Polyakov, Abakimov, 2020a). С увеличением доли ароматических структурных фрагментов мы можем говорить о стабилизации ПОВ, таким образом, оно менее подвержено процессу биodeградации. Это может быть связано с преобладанием в растительном покрове сосудистых растений с развитой корневой системой. Это приводит к интенсивному поступлению в почвы производных лигнина (фенилпропановых фрагментов). В травянистых растениях и их корневой системе накапливается до 30% лигнинсодержащих фрагментов. Лигнин является важнейшим компонентом образования макромолекул ГК. Химически это трехмерный полимер с сильно разветвленной молекулой, состоящий из фенольных звеньев с сильной внутримолекулярной связью (Mišurcová et al., 2012). В результате трансформации лигнина происходит его распад на мономеры, что приводит к изменению макромолекул и уменьшению содержания кислородсодержащих структурных фрагментов в составе ГК. Таким образом, увеличение доли сосудистых растений может приводить к формированию макромолекул, более устойчивых к микробному разложению (Polyakov, Abakimov, 2020a).

4.3.2.2. Характеристика гуминовых кислот почв второй террасы

Почвы второй террасы характеризуются активным развитием термокарстовых процессов и проявлением почвенного криогенеза. Здесь отмечается наименьшее содержание ароматических структурных фрагментов по сравнению с остальными исследованными объектами, и данные ГК по отношению AR/AL наиболее близки по молекулярному составу к континентальным вариантам ГК извлеченных из типичных криогенных почв (Лодыгин и др., 2014). Видимо, активное развитие почв на дренированных позициях в условиях протекания активных криогенных процессов приводит к формированию разветвлённой алифатической периферии в структуре ГК. Хотя молекулярное строение ГК извлеченных из верхнего гумусоаккумулятивного горизонта схоже со строением ГК из почв, погребенный органоминеральный горизонт отличается резким снижением содержания ароматических структурных фрагментов. Судя по всему, здесь в меньшей степени развит процесс термодинамического отбора высокомолекулярных соединений и данное POV более подвержено процессам биологической деструкции.

4.3.2.3. Темпы внутрипрофильной стабилизации органического вещества в почвах второй и третьей террас

В исследуемых препаратах ГК из почв второй и третьей террасы содержится от 21 до 42% ароматических структурных фрагментов (см. табл. 4.7). Это указывает на высокую вариабельность условий формирования ГК в пределах обеих террас. В результате исследования ГК, извлеченных из почв террас, было отмечено изменение молекулярного состава ГК. Диаграмма интегральных показателей ГК, извлеченных из почв «спущенного» озера и почв второй террасы представлены на рис. 4.16.

Из полученных данных можно отметить, что наиболее активные процессы гумификации происходят в ГК, извлеченных из погребенного органоминерального горизонта почвы со второй террасы, что, видимо, связано с

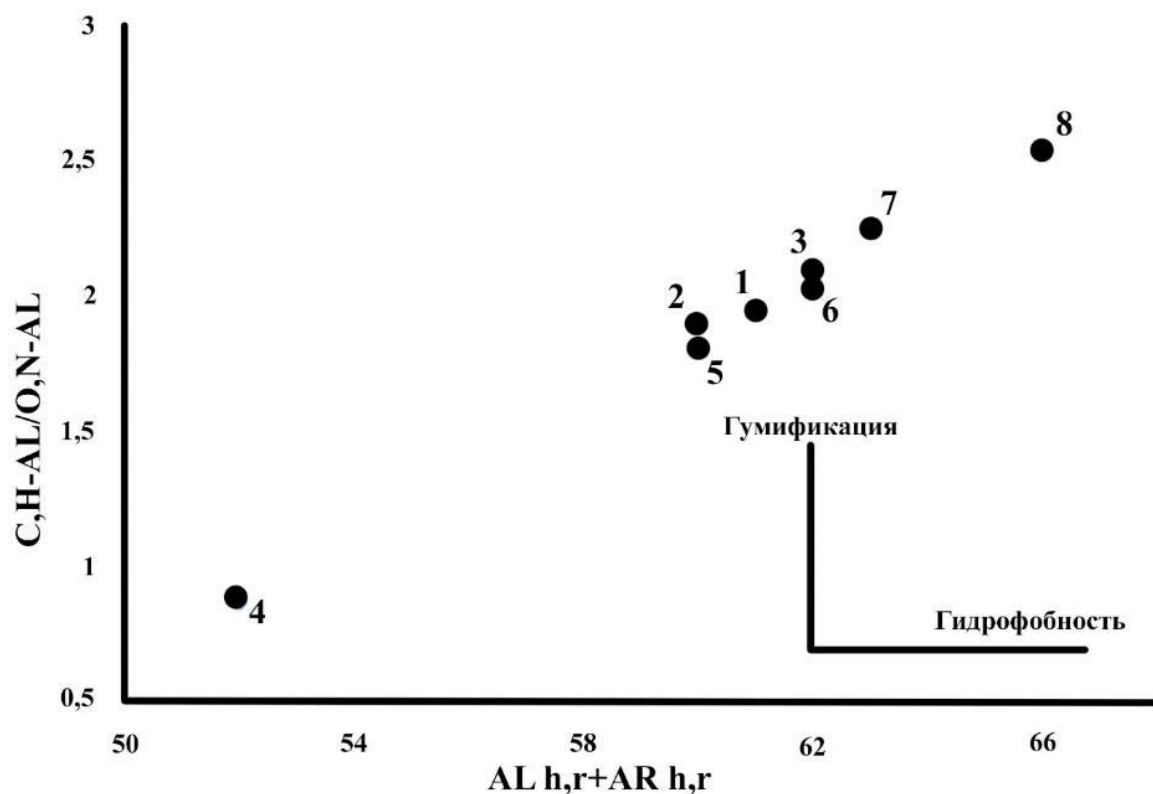


Рисунок 4.16 – Диаграмма интегральных показателей молекулярного состава ГК (Номера точек соответствуют номерам проб из табл. 4.7.)

трансформацией алифатических структурных фрагментов. В ГК, извлеченных из погребенного ПОВ с относительно высокой долей ароматических структурных фрагментов, наблюдаются менее активные процессы гумификации, что указывает на стабилизацию ПОВ. Наиболее быстро минерализуемыми компонентами являются углеводы и аминокислоты, затем олиго- и полисахариды, лигнин (Cocozza et al., 2003; Perminova et al., 2021; Szymański et al., 2017). Наиболее устойчивыми соединениями являются высоко- и низкомолекулярные соединения «вторичной» природы, продукты, формирующиеся при изменении исходных веществ. Стабильность этих соединений объясняется тем, что они способны вступать только в определенные реакции, например, с молекулярным кислородом (Polyakov, Abakumov, 2021b). Таким образом, эти вещества могут представлять собой первую форму термодинамически устойчивых органических соединений в почве. Они придают

почве устойчивость, а также определенный биохимический фон (Lodygin, Beznosikov, 2010, Lodygin et al., 2017).

Выполнен статистический анализ корреляции Спирмена для структурных фрагментов и элементного состава ГК. Высокая положительная корреляция наблюдается между содержанием метоксильных, этоксильных и O,N – замещенных алифатических структурных фрагментов и азотом ($R=0,78$ $p<0,05$), между содержанием O,N-Arom и C,H-Arom ($R=0,95$ $p<0,05$), что может указывать на комплексное формирование ароматических структурных фрагментов, связанных с замещенным и незамещенным ароматическим углеродом. Молекулярный состав ГК сильно варьируется в зависимости от биологических (биохимических) процессов, что нашло отражение в элементном и качественном составе ГК.

Для выявления различий между исследуемыми образцами был проведен кластерный анализ (метод Уорда) (рис. 4.17). На основании полученных данных мы можем отметить, что препараты ГК из верхних гумусоаккумулятивных горизонтов сосредоточены в одних кластерах (№1–5, №3–7), а также ГК нижних погребенных горизонтов (№2–6), при этом ГК погребенных горизонтов №4 и №8 имеют наибольшие отличия от данной выборки.

4.3.3 Трансформация погребенного почвенного органического вещества

Погребенный органический материал является потенциальным субстратом для микробиологической трансформации и, как следствие, эмиссии климатически активных газов в атмосферу. Последствия изменения климата, особенно повышение температуры, изучались в ходе многочисленных лабораторных исследований и полевых экспериментов. Как правило, все эксперименты по естественному нагреву почвы проводились в тундре с наличием ММП или в лесах без ММП на севере Америки и севере Европы (Peterjohn et al., 1993; Melillo et al., 2003).

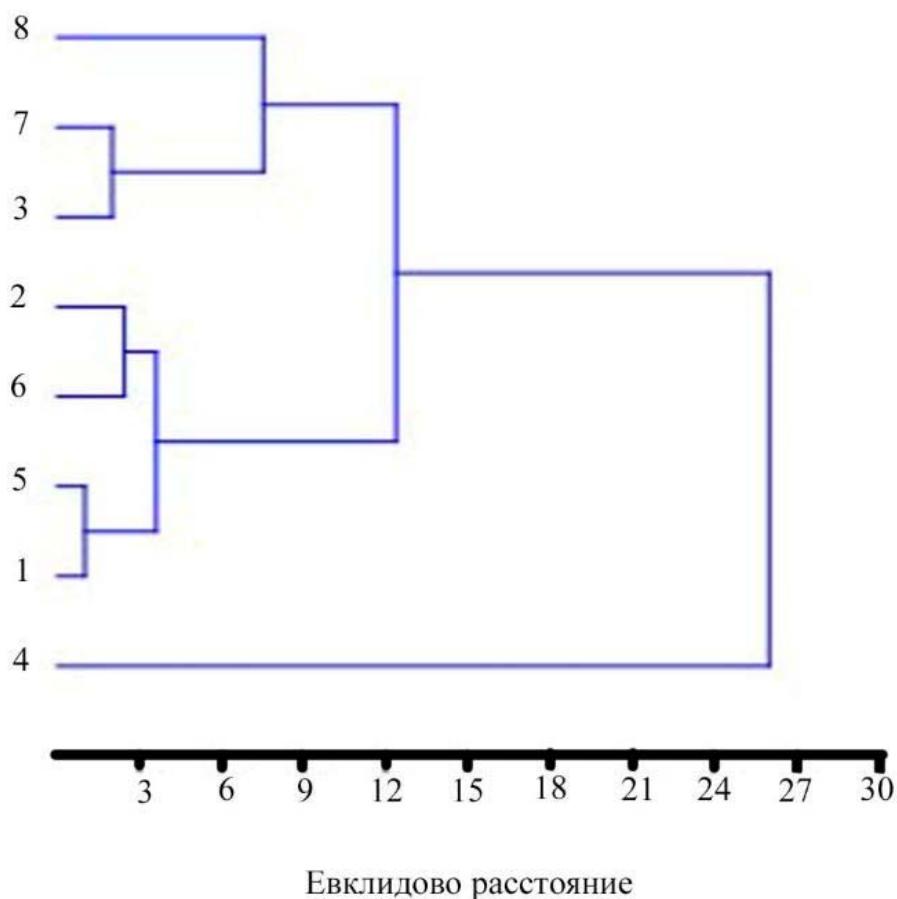


Рисунок 4.17 – Кластерный анализ по методу Уорда (номера точек соответствуют номерам проб из табл. 4.7.)

Для оценки степени трансформации погребенного органического вещества нами, совместно с учеными из Института леса им. В. Н Сукачева, был проведен эксперимент по анализу эмиссии CO_2 , CH_4 из погребенного органического вещества и криозема, и проанализирован состав их ГК.

В эксперименте участвовало погребенное органическое вещество с о. Самойловский (естественное POV) отобранное в 2016 году, часть из него было заморожена, другая часть была покрыта естественным растительным покровом (покрытое POV) и еще одна часть не покрыта растительным покровом (открытое POV). Измерения эмиссия CO_2 и CH_4 проводилось в течение июля–августа 2016 г., а также в августе 2017–2019 гг. методом закрытых камер. Для контроля эмиссии CH_4 и CO_2 были заложены такие же эксперименты, но без участия

погребенного органического вещества. Погребенное органическое вещество содержало относительно много органического углерода (5,67% органического углерода и 0,24% общего азота), которое, согласно широкому соотношению C/N, равному 23,5, не подвергалось значительной микробной трансформации. Предполагаемый возраст погребенного органического вещества около 5000 лет (Schirrmeister et al., 2003).

Нами был проанализирован элементный состав ГК фоновой почвы (криозем с о. Курунгнах) и погребенного органического вещества, участвующего в эксперименте, полученные данные представлены в таблице 4.8. Для анализа элементного состава использовали диаграмму Ван Кревелена (рис. 4.18).

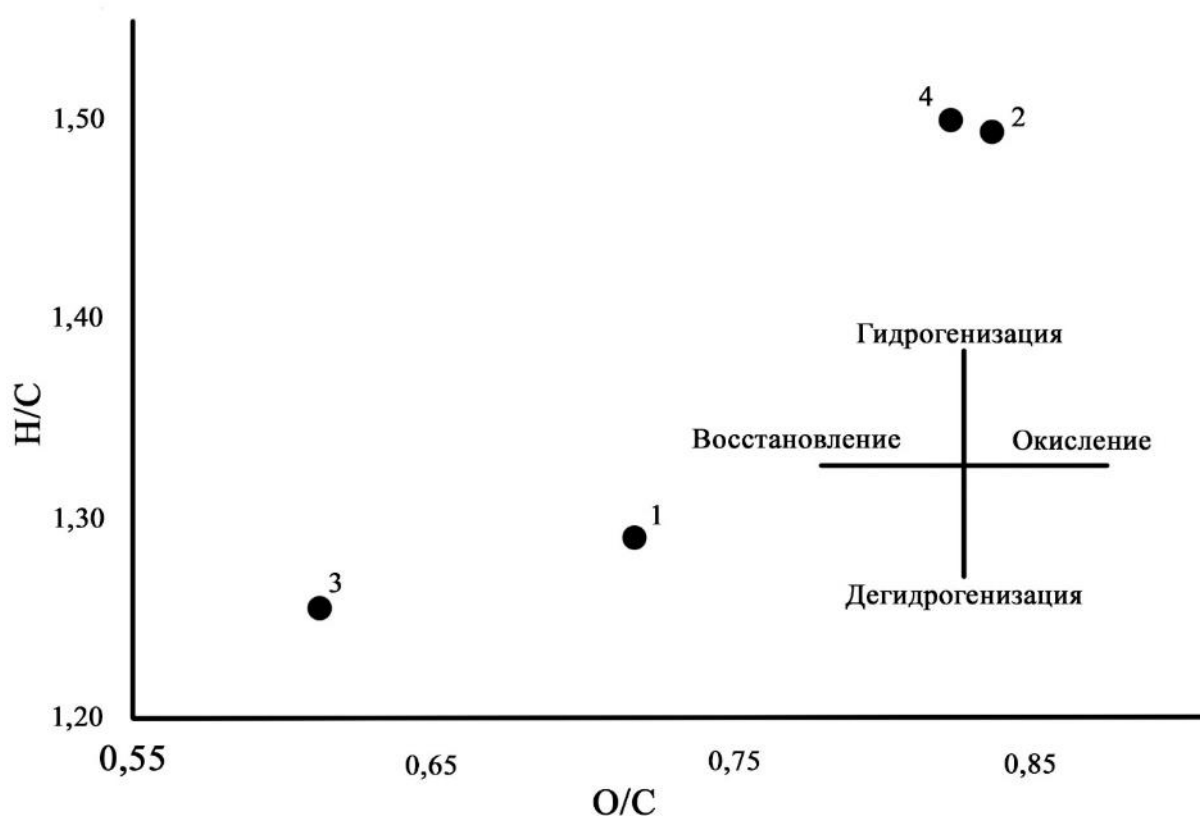


Рисунок 4.18 – Поля распределения показателей элементного состава в координатах H/C-O/C гуминовых кислот (номера на рисунке соответствуют номерам проб в табл. 4.8)

Таблица 4.8 – Элементный состав изученных ГК почвы и погребенного органического вещества (беззольная навеска)

Область		№ пробы	N, %	C, %	H, %	O, %	C/N	H/C	O/C	w
о.Самой-ловский, первая терраса	Естеств. ПОВ	1	3,66	43,36	5,47	47,51	13,81	1,50	0,82	0,15
	Открытое ПОВ	2	3,90	46,54	5,56	44,00	13,91	1,43	0,71	-0,01
	Покрытое ПОВ	3	3,55	46,22	5,52	44,71	15,17	1,43	0,73	0,03
о.Курунгнах, криозем, третья терраса	ГК из фоновой почвы	4	3,49	45,39	5,50	45,62	15,19	1,44	0,76	0,07

Примечание. N, C, H, O представлены массовыми долями вещества, C/N, H/C, O/C представлены мольными отношениями, w – степень окисленности.

В изученном погребенном органическом веществе содержание углерода ГК значительно ниже, чем в почвах более южных биоклиматических районов, однако сравнимо с фоновым криоземом о. Курунгнах, развивающимися в дельте (см. табл. 4.8). Эта особенность объясняется влиянием кислой реакции почвы и чрезмерной влажностью территории. Наблюдается пониженное содержание азота, что связано с низким его содержанием в предшественниках гумификации (мхи, лишайники) и повышенным содержанием водорода. По элементному составу наибольшее содержание углерода содержится в образце открытого ПОВ, что свидетельствует о низкой степени трансформации органических веществ. Из графика следует, что процесс гидрирования (разветвление алифатической периферии в структуре ГК) наиболее характерен для образца, открытого ПОВ, что свидетельствует об образовании относительно разветвленной системы алифатических соединений вокруг ароматического ядра. Наименьшее отношение Н/С наблюдается в образце покрытого ПОВ, это может быть связано с качеством органического материала и составом предшественников гумификации. Из показателя степени окисленности (W) следует, что большинство исследованных образцов находятся в окислительных условиях (см. табл. 4.8). Окислительные условия обусловлены трансформацией органического вещества в аэробных условиях и свидетельствуют о протекающих процессах гумификации. Методом спектроскопии ^{13}C ЯМР были идентифицированы структурные фрагменты ГК (табл. 4.9). В Приложении Г.1-Г.2 представлены данные о молекулярном строении ГК из почв о. Самойловский, подверженных и не подверженных затоплению.

В исследованных образцах ГК преобладают алифатические структурные фрагменты (60–65%). Преобладание алифатических структурных фрагментов в составе ГК может быть связано с качеством предшественников гумификации, а также низкой «зрелостью» гуминовых веществ. В образцах ГК накапливается до 40% ароматических соединений, что обусловлено стабилизацией ПОВ.

Таблица 4.9 – Процентное содержание углерода в основных структурных фрагментах ГК из почвы по данным CP/MAS ¹³C-ЯМР-спектроскопии

Образец	№ пробы	Химические сдвиги, %								AR, %	AL, %	AR/AL	AL _{h,r} +AR _{h,r}	C,H - Al/ O,N - Al
		0-46	46-60	60-105	105-144	144-164	164-183	183-190	190-204					
Естествен. ПОВ	1	25	9	15	29	10	10	1	1	40	60	0,67	54	1,04
Открытое ПОВ	2	27	9	15	27	11	9	1	1	39	61	0,64	54	1,13
Покрытое ПОВ	3	26	8	20	25	9	10	1	1	35	65	0,54	51	0,93
Фон, криозем с о. Курунгнах	4	28	9	17	23	9	12	1	1	33	67	0,49	51	1,08

Примечание. Условные обозначения см.табл. 4.8

Молекулярный состав ГК реликтового ПОВ очень похож на современное. В целом, процесс трансформации реликтового ПОВ изучен недостаточно, так как в результате криогенного массообмена органоминеральные компоненты почв способны перемещаться по почвенному профилю, что затрудняет отделение реликтового ПОВ от современного. Поэтому данные, полученные из ледяных жил и ледового комплекса, представляют собой надежный инструмент для анализа реликтового органического вещества. Данные о молекулярном строении ГК, полученные из ледового комплекса, согласуются с молекулярным строением ГК из ПОВ эродированного берега о. Самойловский и отражают главную особенность строения ГК: это относительно низкое содержание углерода и относительно высокого содержания ароматических фрагментов в составе ГК. Длительное формирование ЛК привело к стабилизации ПОВ, микробиологическая трансформация которого займет больше времени, чем в других районах Арктики.

Распределение точек исследования вдоль ГК1 связано с варьированием содержания углеводных фрагментов (CH_2OH) в составе ГК, вдоль ГК2 – $\text{Arom}=\text{O}$ (рис. 4.19). Из диаграммы ординации исследованных ГК следует, что мы можем отметить кластер образцов ГК из фоновой почвы и покрытого ПОВ. Здесь заметна большая вариация содержания углеводных фрагментов (CH_2OH) в составе ГК. Это может быть обусловлено сходными условиями формирования ГК в результате трансформации погребенного в составе ЛК органоминерального материала, покрытого тундровой растительностью.

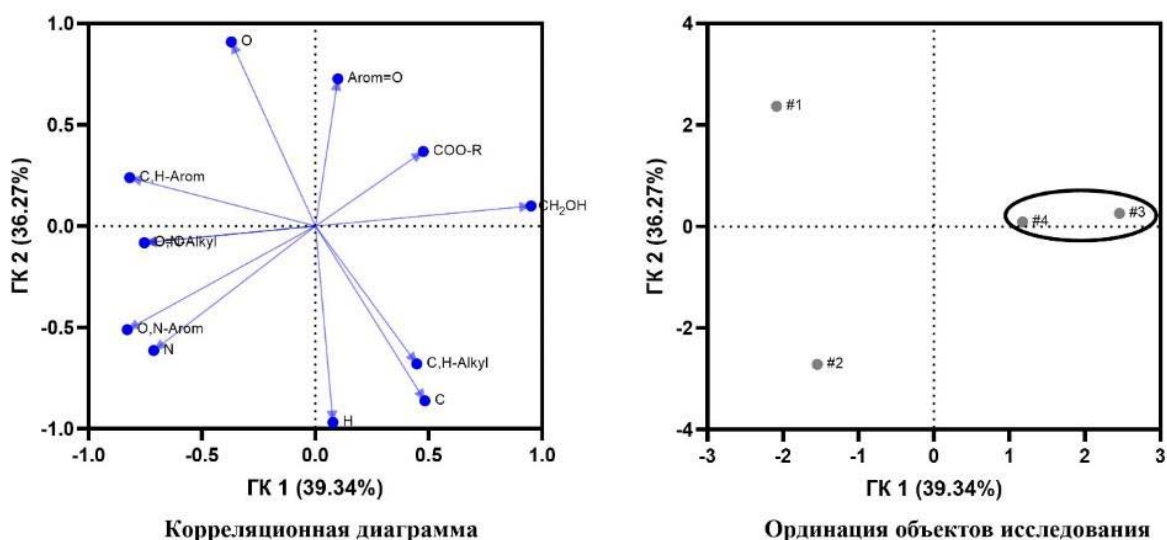


Рисунок 4.19 – Результаты анализа главных компонент для структурных фрагментов и элементного состава ГК. Номера на рисунке соответствуют номерам проб в табл. 4.8

4.3.3.1. Эмиссия CH_4 и CO_2 из погребенного органического вещества на острове Самойловский

На рисунке 4.20 представлена эмиссия климатически-активных газов за все время эксперимента, для покрытого (погребенное органическое вещество, покрытое естественным растительным покровом) и открытого (не покрытое растительным покровом) ПОВ, в качестве контроля использовались свежие аллювиальные отложения дельты реки Лены (покрытые естественным почвенным покровом и не покрытые).

Со снижением содержания ароматических структурных фрагментов происходит увеличение эмиссии углекислого газа и метана из погребенного органического вещества. Так, наименьшее содержание ароматических структурных фрагментов отмечено в ГК из покрытого ПОВ. Для данного образца также отмечается относительно высокий уровень эмиссии CO_2 и CH_4 . Эксперимент с открытым ПОВ, с содержанием 39% ароматических структурных фрагментов, показывает относительно низкую эмиссию CO_2 и CH_4 . В результате

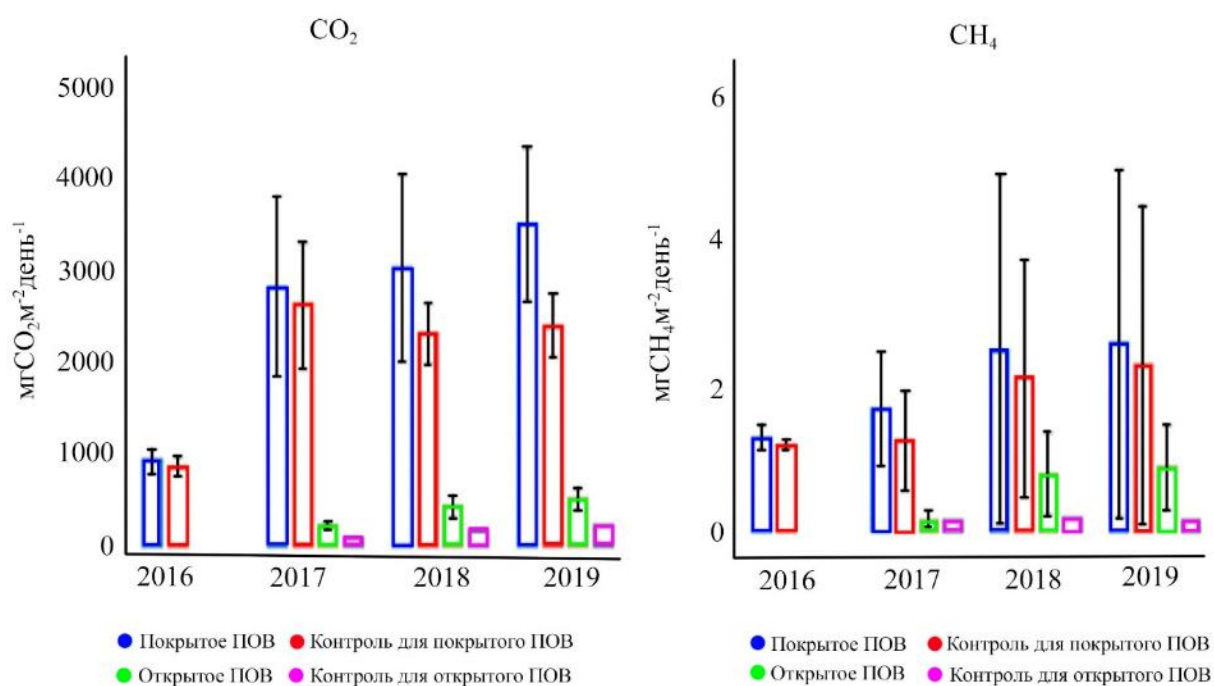


Рисунок 4.20 – Эмиссия климатически активных газов в полевом инкубационном эксперименте (среднее \pm стандартное отклонение., различие средних значимо при $p \leq 0,1$)

эксперимента по эмиссии климатически-активных газов и ЯМР спектроскопии можно сделать вывод, что за время проведения эксперимента произошло снижение содержания ароматических структурных фрагментов ГК (естественное ПОВ – 40%, покрытое ПОВ – 35%, открытое ПОВ – 39%), что может указывать на активную трансформацию органического вещества в результате микробиологической активности. Открытое ПОВ, которое не было покрыто 5-см слоем почвы, в меньшей степени вносит вклад в эмиссию климатически активных газов, также в меньшей степени подвергается процессу трансформации органического вещества. Фоновые концентрации климатически активных газов были ниже, чем в образцах покрытого ПОВ, однако были выше, чем в эксперименте с открытым ПОВ. Это указывает на то, что наличие растительного покрова вносит существенный вклад в эмиссию парниковых газов в тундровой экосистеме.

Наши данные подтверждаются ранее опубликованными материалами ученых, работающих в арктическом секторе, для почв, подверженных

воздействию мерзлоты (Beznosikov, Lodygin, 2010; Abakumov et al., 2015; Ejarque, Abakumov, 2016; Vasilevich et al., 2018; Polyakov et al., 2019). Преобладание алифатических фрагментов в ГК обусловлено специфическим составом растительности (прекурсорами гумификации), а также локальными климатическими параметрами территории (Lurachev et al., 2017). Молекулярное строение ГК почв дельты реки Лены более схоже с ГК, извлеченными из почв таежной зоны, здесь содержание ароматических соединений в ГК подзолов увеличивается до 44%, а европейской Арктике России до 50% (Lodygin et al., 2014; Pengerud et al., 2017). Для тундровой и таежной зоны характерно преобладание мохово-лишайниковой растительности, являющейся основным источником углеводов и липидов, которые вносят существенный вклад в формирование алифатических структурных фрагментов, которые менее стабильны в окружающей среде. Так, в своей работе мы подтверждаем данные Beznosikov, Lodygin (2010), Lodygin et al. (2014) и Василевича и др. (2019), что формирование растительных сообществ с преобладанием сосудистых растений, относительно низкая степень активности криогенных процессов способствует образованию ароматических структурных фрагментов в ГК, что обусловлено стабилизацией органического материала в почве. В результате стабилизации ПОВ в почвах дельты накапливается до 42% ароматических структурных фрагментов в составе ГК, это указывает на то, что ПОВ менее подвержено процессам биodeградации по отношению к ПОВ, формирующемуся в криогенных почвах континентальной Арктики.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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 слаботрансформированных 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.

С помощью микроморфологического метода анализа шлифов почв были оценены процессы разрушения минеральной матрицы и формирования биогенных пылевато-глинистых агрегатов. В условиях процессов промерзания/оттаивания активизируются процессы криоэлювиогенеза, что связано с разрушением крупных минеральных частиц. Увеличение содержания железа и марганца в почве приводит к ожелезнению органоминеральных агрегатов, которые формируются в данных почвах. Данные процессы хорошо прослеживаются в разновозрастных почвах дельты реки Лены. Таким образом, исследование морфогенеза постлитогенных и синлитогенных почв дельты реки Лены позволило выявить следующие почвообразовательные процессы: на макроуровне – синлитогенез почв, находящихся под активным влиянием реки, миграцию органического вещества и соединений Fe и Mn по профилю, криогенный массообмен, морозное пучение, глееобразование, а также торфонакопление; на микроуровне – физическое разрушение первичных минералов и формирование устойчивых биогенных агрегатов в почвах.

Развитие почв на различных геоморфологических террасах обуславливает их химический и минералогический состав. На участках подверженных

периодическому затоплению, кислотно-основные свойства почв способны меняться в пределах рН от слабощелочного до нейтрального, что обусловлено размыванием карбонатных пород в среднем и нижнем течении реки, а также близким расположением моря Лаптевых. На участках, вышедших из зоны периодического затопления в результате изменения течения реки, формируются слабокислые почвы.

Гранулометрический состав изученных почв характеризуется преобладанием фракции песка, что обусловлено аллювиальным происхождением почвообразующих пород. При уменьшении влияния русловых процессов в почвах увеличивается доля пылеватой и глинистой фракций, что связано с внутрпочвенным выветриванием минералов.

Влияние реки и криогенных процессов также 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 затопливаемых участках, в то время как Fe_2O_3 , и MnO , накапливается на участках, не подверженных влиянию реки, и связаны с процессами выветривания в почве.

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 целом, 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. По всей видимости, в первую очередь происходит минерализация С,N-алкильных и кислородосодержащих фрагментов, которые преобладают в молекулярном составе ГК почв, формирующихся в условиях переувлажнения.

Депонирование ПОВ является важной экологической функцией арктических почв. Наибольшее содержание ПОВ отмечается в криогенных и торфяных почвах дельты реки Лены. 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. В изученных почвах запасается существенное количество ПОВ, наибольшие запасы имеют стратоземы водно-аккумулятивного генезиса.

Элементный состав ГК изученных почв характеризуется относительно низким содержанием углерода, до 43%. На основе рассчитанных атомных отношений Н/С и О/С, 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%. Отношение AR/AL в ГК колеблется от 0,27 до 0,72. 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 говорит о зрелости органического вещества в районе дельты Лены.

Река Лена формирует крупнейшую дельту, расположенную в Арктическом биоклиматическом поясе. В данной работе были рассмотрены почвы формирующиеся в центральной и западной частях дельты. Восточная часть дельты в настоящее время изучена недостаточно. Имеются обрывочные данные о процессах формирования почв и трансформации в них органических соединений, что вызывает необходимость дальнейших исследований в данном регионе. Дальнейшая работа должна быть направлена на расширение географии исследований, а также на изучение процессов, связанных с трансформацией ПОВ при выходе его из депонированного состояния.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

ММП	Многолетнемерзлые породы
ПОВ	Почвенное органическое вещество
ГК	Гуминовые кислоты
ЯМР	Ядерно-магнитный резонанс
БПЛА	Беспилотный летательный аппарат
ВИП ГЗ	Важнейший инновационный проект государственного значения
IHSS	Международная группа по изучению гумусовых веществ
ГВ	Гумусовые вещества
ЭПР	Электронный парамагнитный резонанс
ИК	Инфракрасный
ЛК	Ледовый комплекс
НИС	Научно-исследовательская станция
ПВ	Полная влагоемкость
ДЗЗ	Дистанционное зондирование Земли
ЦМР	Цифровая модель рельефа

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Абакумов, Е. В. Особенности почвообразования в Русской Арктике (на примере дельты реки Лены и п-ова Ямал) / Е. В. Абакумов, В. И. Поляков, К. С. Орлова // Научный вестник Ямало-Ненецкого автономного округа. – 2018. – № 1 (98). – С. 14–23.
2. Александрова, Л. Н. Гумус как система полимерных соединений / Л. Н. Александрова // Тр. юбил. сес., посв. 100-летию со дня рождения В.В. Докучаева. – М. : АН СССР, 1949. – С. 225–232.
3. Безносиков, В. А. Высокомолекулярные органические соединения в почвах / В. А. Безносиков, Е. Д. Лодыгин // Известия Коми научного центра УрО РАН. – 2010. – № 1(1). – С. 24–30.
4. Большианов, Д. Ю. Первичные результаты бурения 66-метровой скважины на острове Самойловском в дельте р. Лены в 2018 г. / Д. Ю. Большианов, М. Н. Григорьев, Г. Максимов, Й. Штраус [и др.] // Рельеф и четвертичные образования Арктики, Субарктики и Северо-запада России. – 2020. – № 7. – С. 24–31.
5. Большианов, Д. Ю. Происхождение и развитие дельты реки Лены / Д. Ю. Большианов, А. С. Макаров, В. Шнайдер, Г. Штоф. – СПб : ААНИИ, 2013. – 268 с.
6. Василевич, Р. С. Молекулярная структура гумусовых веществ мерзлотных бугристых торфяников лесотундры / Р. С. Василевич, В. А. Безносиков, Е. Д. Лодыгин // Почвоведение. – 2019. – № 3. – С. 317–329.
7. Васильевская, В. Д. Генетические особенности почв пятнистой тундры / В. Д. Васильевская // Почвоведение. – 1979. – № 7. – С. 20–31.
8. Васильевская, В. Д. Криогенные почвы / В. Д. Васильевская // Почвоведение. – М. : Высшая школа, 1988. – Ч. 2. – С. 49–73.
9. Васильевская, В. Д. Почвообразование в тундрах Средней Сибири / В. Д. Васильевская. – М. : Наука, 1980. – 235 с.
10. Васильчук, Ю. К. Изотопный состав ледяного ядра позднеголоценового булгуньяха на месторождении Песцовое в долине реки Евояха на юге

- Тазовского полуострова / Ю. К. Васильчук, Н. А. Буданцева, А. К. Васильчук [и др.] // Криосфера Земли. – 2014. – Т. 18. – № 4. – С. 47–58.
11. Величко, А. А. К оценке динамики зоны многолетней мерзлоты в Северной Евразии при глобальном потеплении климата / А. А. Величко, В. П. Нечаев // Доклады АН СССР. – 1992. – Т. 324. – № 3. – С. 667–671.
 12. Водяницкий, Ю. Н. Диагностика переувлажненных минеральных почв / Ю. Н. Водяницкий – М. : ГНУ Почвенный институт им. В.В. Докучаева, 2008. – 81 с.
 13. Галабала, Р. О. Новые данные о строении дельты Лены. Четвертичный период Северо-Востока Азии / Р. О. Галабала – Магадан : СВКНИИ ДВО АН СССР, 1987. – С. 125–171.
 14. Герасимов, И. П. Опыт генетической диагностики почв СССР на основе элементарных почвенных процессов / И. П. Герасимов // Почвоведение. – 1973. – № 5. – С. 102–113.
 15. Глазовская, М. А. Почвы мира / М.А. Глазовская – М. : МГУ, 1972. – Ч. 1. 321 с. – Ч. 2. – 427 с.
 16. Глинка, К. Д. Почвоведение. / К. Д. Глинка – М. : Сельхозгиз, 1933. – 663 с.
 17. Глинка, К. Д. Предварительный отчет об организации и исполнении работ по исследованию почв Азиатской России в 1909 г. / К. Д. Глинка – СПб : Переселенческое управление Главного управления землеустройства и земледелия, 1910. – 89 с.
 18. Горбатов, Е. С. Разновозрастные древние аласы на Северо-Востоке России / Е. С. Горбатов, С. Ф. Колесников, С. А. Кузьмина // Геоморфология. – 2021. – Т. 52. – № 1. – С. 33–43.
 19. Гормогенова, А. Ю. Особенности почвообразования луговых почв пойм и аласов Центральной Якутии / А. Ю. Гормогенова, Р. В. Десяткин // Наука и образование. – 2007. – № 3. – С. 93–97.
 20. Горячкин, С. В. Биоклиматогенные и геогенные проблемы географии почв Северной Евразии / С. В. Горячкин, Ю. Н. Водяницкий, Д. Е. Конюшков,

- С. Н. Лесовая [и др.] // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. – 2008. – № 62. – С. 48–68.
21. Горячкин, С. В. География почв Арктики: современные проблемы / С. В. Горячкин, Н. А. Караваева, В. О. Таргульян // Почвоведение. – 1998. – №5. – С. 520–530.
22. ГОСТ 26423–85. Почвы. Методы определения удельной электрической проводимости, рН и плотного остатка водной вытяжки. – М.: Изд-во стандартов, 2002. – 7 с.
23. ГОСТ 33850-2016. Почвы. Определение химического состава методом рентгенофлуоресцентной спектроскопии. – М.: Изд-во стандартов, 2016. – 12 с.
24. Григорьев, Н. Ф. Криолитозона прибрежной части Западного Ямала / Н. Ф. Григорьев – Якутск : ИМЗ СО АН СССР, 1987. – 112 с.
25. Гродницкая, И. Д. Микробиологическая трансформация углерода CH₄ и CO₂ в криогенных почвах тундровых и лесных экосистем Сибири / И. Д. Гродницкая, Н. Д. Сорокин, С. Ю. Евграфова, Г. И. Антонов [и др.] // Лесоведение. – 2017. – №2. – С. 111–127.
26. Губин, С. В. Взаимосвязь формирования почв тундр Севера Якутии с развитием ландшафтной обстановки / С. В. Губин // Известия РАН. Сер. Географическая. – 2013. – № 1. – С. 89–98.
27. Губин, С. В. Голоценовая история формирования почв на приморских низменностях Севера Якутии / С. В. Губин // Почвоведение. – 2001. – № 12. – С. 1413–1420.
28. Губин, С. В. Динамика верхней границы многолетней мерзлоты и проблемы ретинизации гумуса в тундровых почвах Северо-Востока России / С. В. Губин. – Пушино : Проблемы эволюции почв, 2003. – С. 168–172.
29. Губин, С. В. Почвообразование и подстилающая мерзлота / С. В. Губин, А. В. Лупачев // Почвоведение. – 2008. – № 6. – С. 655–667.

30. Губин, С. В. Почвы суглинистых водоразделов приморских тундр Севера Якутии: условия и процессы формирования / С. В. Губин, А. В. Лупачев // Почвоведение. – 2017а. – № 2. – С. 147–157.
31. Губин, С. В. Роль пятнообразования в формировании и развитии криоземов приморских низменностей Севера Якутии / С. В. Губин, А. В. Лупачев // Почвоведение. – 2017б. – № 11. – С. 1283–1295.
32. Губин, С. В. Почвообразование в тундровой зоне приморских низменностей северо-востока Сибири / С. В. Губин, А. В. Лупачев // Почвоведение. – 2020. – № 10. – С. 1182–1191.
33. Гынинова, А. Б. Почвы дельты реки Селенги (генезис, география, геохимия) / А. Б. Гынинова, С. А. Шоба, Л. Д. Балсанова, Б. Д. Гынинова. – Улан-Удэ : БНЦ СО РАН, 2012. – 344 с.
34. Данилова, А. А. Взаимозависимость динамики органического вещества и биологических свойств мерзлотных пойменных почв (Центральная Якутия) / А. А. Данилова, Н. В. Барашкова, А. П. Аржакова, В. Д. Дьячковская // Наука и образование. – 2012. – № 3. – С. 38–44.
35. Дергачева, М. И. Система гумусовых веществ как основа диагностики палеопочв и реконструкции палеоприродной среды / М. И. Дергачева. – Новосибирск : СО РАН, 2018. – 292 с.
36. Десяткин, Р. В. Почвы аласов Лено-Амгинского междуречья / Р. В. Десяткин. – Якутск : ЯФ СО АН СССР, 1984. – 168 с.
37. Десяткин, Р. В. Почвы Якутии / Р. В. Десяткин, М. В. Оконешникова, А. Р. Десяткин. – Якутск : Бичик, 2009. – 64 с.
38. Десяткин, Р. В. Палевые почвы Центральной Якутии: генетические особенности, свойства, классификация / Р. В. Десяткин, С. Н. Лесовая, М. В. Оконешникова, Т. С. Зайцева // Почвоведение. – 2011. – № 12. – С. 1425–1435.
39. Десяткин, Р. В. Температурный режим мерзлотно-таежных почв Центральной Якутии / Р. В. Десяткин, А. Р. Десяткин, П. П. Федоров // Криосфера Земли. – 2012. – Т. 14. – № 2. – С. 70–78.

40. Днепровская, В. П. Изучение изменений термокарста в зоне прерывистого распространения вечной мерзлоты Западной Сибири на основе космических снимков / В. П. Днепровская, Н. А. Брыксина, Ю. М. Полищук // Исследование земли из космоса. – 2009. – № 4. – С. 88–96.
41. Добровольский, В. В. Основные черты геохимии арктического почвообразования / В. В. Добровольский // Почвоведение. – 1994. – № 6. – С. 85–93.
42. Добровольский, Г. В. Почвы речных пойм центра Русской равнины / Г. В. Добровольский. – М. : МГУ, 2005. – 293 с.
43. Добровольский, Г. В. Аллювиальные почвы речных пойм и дельт и их зональные отличия / Г. В. Добровольский, П. Н. Балабко, Н. В. Стасюк, Е. П. Быкова // Аридные экосистемы. – 2011. – Т. 17. – №3(48). – С. 5–13.
44. Добровольский, С. Г. Проблема глобального потепления и изменение стока российских рек / С. Г. Добровольский // Водные ресурсы. – 2007. – Т. 34. – № 6. – С. 643–655.
45. Докучаев, В. В. Русский чернозем / введ. ст. и ред. В. Г. Вильямс. – М. : ОГИЗ Сельхозиздат, 1936. – 551 с.
46. Докучаев, В. В. Классификация почв (Северное полушарие) (1990 г.) / Избранные сочинения. В 3-х т. Т. 3. – М. : Сельхозгиз, 1949. – С. 375–380.
47. Драгунов, С. С. Характеристика гуминовых кислот различных типов / С. С. Драгунов // Тр. юбил. сессии, посвящ. 100-летию со дня рождения В. В. Докучаева. – 1949. – С. 219–229.
48. Дубиков, Г. И. Состав и криогенное строение мерзлых толщ Западной Сибири / Г. И. Дубиков. – М. : Геос, 2002. – 246 с.
49. Дымов, А. А. Почвы северной части приполярного Урала: морфология, физико-химические свойства, запасы углерода и азота / А. А. Дымов, Е. В. Жангуров, В. В. Старцев // Почвоведение. – 2013. – №5. – С. 507–516.
50. Дымов, А. А. Оценка комплексообразующих свойств органического вещества почв с использованием ИМАС-хроматографии (на примере ионов меди) / А. А. Дымов, Е. Ю. Милановский // Гуминовые вещества в биосфере :

- мат. VI Всеросс. науч. конф. с международным участием (Сыктывкар, 06–10 октября 2014 года). – Сыктывкар : Институт биологии Коми НЦ УрО РАН, 2014. – С. 55–57.
51. Дюкарев, А. Г. Ландшафтно-динамические аспекты таежного почвообразования в Западной Сибири / А. Г. Дюкарев. – Томск : НТЛ, 2005. – 284 с.
52. Еловская, Л. Г. Почвы Северной Якутии / Л. Г. Еловская, Е. И. Петрова, Л. В. Тетерина. – Новосибирск : Наука, 1979. – 303 с.
53. Заварзина, А. Г. Гуминовые вещества – гипотезы и реальность (обзор) / А. Г. Заварзина, Н. Н. Данченко, В. В. Демин, З. С. Артемьева [и др.] // Почвоведение. – 2021. – № 12. – С. 1449–1480.
54. Зазовская, Э. П. Криокониты как факторы развития почв в условиях быстрого отступления ледника Альдегонда, Западный Шпицберген / Э. П. Зазовская, Н. С. Мергелов, В. А. Шишков, А. В. Долгих [и др.] // Почвоведение. – 2022. – № 3. – С. 281–295.
55. Зольников, В. Г. Почвы восточной половины Центральной Якутии и их использование / В. Г. Зольников // Материалы о природных условиях и сельском хозяйстве Центральной Якутии. АН СССР. Якутск. – 1954. – № 1. – С. 55–221.
56. Иванов, А. Л. Инициатива «4 промилле» – новый глобальный вызов для почв России / А. Л. Иванов, В. С. Столбовой // Бюл. Почв. ин-та им. В. В. Докучаева. – 2019. – № 98. – С.185–202.
57. Иванов, В. В. Сток и течения основных протоков дельты р. Лены / В. В. Иванов // Тр. ААНИИ. Вып. 5. Гидрология рек Советской Арктики. – 1963. – Т. 234. – С. 76–86.
58. Игнатенко, И. В. Почвы восточно-европейской тундры и лесотундры / И. В. Игнатенко. – М. : Наука, 1979. – 279 с.
59. Каплина, Т. Н. Аласные комплексы северной Якутии / Т. Н. Каплина // Криосфера Земли. – 2009. – Т. 13. – № 4. – С. 3–17.

60. Караваяева, Н. А. Тундровые почвы Северной Якутии / Н. А. Караваяева. – М. : Наука. – 1969. – 205 с
61. Картозия, А. А. Геолого-геоморфологическое и геокриологическое строение кайнозойских отложений в районе дельты р. Лены : дис. ... канд. г.-м. наук : 25.00.01 / А. А. Картозия ; Новосибирский Государственный Университет. – Новосибирск, 2021. – 98 с.
62. Касаточкин, В. И. Инфракрасные спектры поглощения гуминовых веществ почвы / В. И. Касаточкин, М. М. Кононова, О. П. Зильбербранд // Докл. АН СССР. – 1958. – Т. 119. – №4. – С. 135–140.
63. Катасонов, Е. М. Аласные отложения и таберальные образования Якутии / Е. М. Катасонов. – Якутск : Геология кайнозоя Якутии. СО АН СССР, 1982. – С. 110–121.
64. Ковда, В. А. Основы учения о почвах / В. А. Ковда. – М. : Наука, 1973. – Т. 1. – 447 с.
65. Конищев, В. Н. Особенности льдовыделения в сезонно-мерзлом слое и морфология покровных лессовидных образований Воркутского района // Подземный лед / В. Н. Конищев. – М. : Моск. ун-т, 1965. – С. 172–182.
66. Конищев, В. Н. Криогенное выветривание / В. Н. Конищев // II междунар. конф. по мерзлотоведению (Якутск, 1973). – Якутск : 1973. № 3. – С. 10–15.
67. Конищев, В. Н. Влияние Криогенных процессов на глинистые минералы / В. Н. Конищев, В. В. Рогов, Г. Н. Щурина // Вестник МГУ. Сер. геогр. – 1974. – № 4. – С. 40–46.
68. Конищев, В. Н. Микроморфология криогенных почв и грунтов / В. Н. Конищев, В. В. Рогов // Почвоведение. – 1977. – № 2. – С. 119–25.
69. Кононова, М. М. Проблема почвенного гумуса и современные задачи его изучения / М. М. Кононова. – М. : АН СССР, 1951. – 389 с.
70. Кононова, М. М. Органическое вещество почвы / М. М. Кононова. – М. : АН СССР, 1963. – 315 с.
71. Костычев, П. А. Почвы черноземной области России, их происхождение, состав и свойства / П. А. Костычев. – М. : ОГИЗ Сельхозгиз, 1937. – 243 с.

72. Ливеровский, Ю. А. Почвы Крайнего Севера и некоторые вопросы их генезиса и классификации / Ю. А. Ливеровский // Почвоведение. – 1983. – № 5. – С. 5–15.
73. Лодыгин, Е. Д. Молекулярный состав гумусовых веществ тундровых почв (13С-ЯМР-спектроскопия) / Е. Д. Лодыгин, В. А. Безносиков, Р. С. Василевич // Почвоведение. – 2014. – № 5. – С. 546–552.
74. Лупачев, А. В. Участие почвообразования в формировании и организации переходного слоя многолетнемерзлых пород / А. В. Лупачев, С. В. Губин // Криосфера Земли. – 2008. – Т. 12. № 2. – С. 75–83.
75. Лупачев, А. В. Органогенные надмерзлотно-аккумулятивные горизонты криоземов тундр Севера Якутии / А. В. Лупачев, С. В. Губин // Почвоведение. – 2012. – № 1. – С. 57–68.
76. Макеев, О. В. Криогенные почвы и их рациональное использование / О.В. Макеев, Е.И. Керженцев, Е.И. Несмелова. – М. : Наука, 1977. – 272 с.
77. Макеев, О. В. Криогенный почвенно-грунтовый комплекс / О. В. Макеев // Эволюционные геокриологические процессы в Арктических регионах и проблемы глобальных изменений природной и климата на территории криолитозоны: Тез. докл. (Пушино, 1995). – Пушино, 1995. – С. 146–148.
78. Макеев, О. В. Криология почв / О. В. Макеев. – М. : РАН, 2019. – 464 с.
79. Макеев, О. В. Криопедосфера. Теория развития и практика использования / О. В. Макеев // Почвенный криогенез и мелиорация мерзлотных и холодных почв. – М. : Наука, 1975. – С. 5–26.
80. Макеев, О. В. Мерзлота как фактор почвообразования / О.В. Макеев // Проблемы почвоведения: советские почвоведы к 11 Международному конгрессу почвоведов в Канаде. – М. : Наука, 1978. – С. 196–201.
81. Макеев, О. В. Почвенный криогенез (теоретические и практические аспекты) / О. В. Макеев // Почвы и растительность мерзлотных районов СССР. Биологические проблемы Севера: мат. V Всесоюзного симпозиума. (Магадан, 1973). – Магадан : 1973. – С. 17–23.

82. Макеев, О. В. Фации почвенного криогенеза и особенности организации в них почвенных профилей / О. В. Макеев. – М. : Наука, 1981. – 88 с.
83. Мартынов, В. П. Почвы горного Прибайкалья / В. П. Мартынов. – Улан-Удэ : Бурятское книжное издательство, 1965. – 168 с.
84. Мергелов, Н. С. Почвы и почвоподобные тела Антарктиды (оазис «Холмы Ларсеманна») / Н. С. Мергелов, С. В. Горячкин // VIII Сибирцевские чтения. Генезис, география, классификация почв и оценка почвенных ресурсов: мат. науч. конф., посв. 150-летию со дня рождения Н.М. Сибирцева. (Архангельск, 2010 г.). – С. 38–42.
85. Мергелов, Н. С. Процессы накопления органического вещества в минеральной толще мерзлотных почв приморских низменностей Восточной Сибири / Н. С. Мергелов, В. О. Таргульян // Почвоведение. – 2011. – № 3. – С. 275–287.
86. Мишустин Е. Н. Определение биологической активности почвы / Е.Н. Мишустин, А. Н. Петрова // Микробиология. – 1963. – Т. 32. – № 3. – С. 478–483.
87. Ногина, Н. А. Почвенный покров Витимского нагорья / Н. А. Ногина // Вопросы генезиса и географии почв АН СССР. – 1957. – С. 128–161.
88. Овсепян, Л. А. Изменение денситометрического фракционного состава органического вещества почв лесостепной зоны в процессе постагрогенной эволюции / Л. А. Овсепян, И. Н. Курганова, В. О. Лопес Де Гереню, А. В. Русаков [и др.] // Почвоведение. – 2020. – № 1. – С. 56–68.
89. Оконешникова, М. В. Современное состояние и прогноз изменений почв долины Средней Лены (Центральная Якутия) / М. В. Оконешникова // Вестник Томского государственного университета. – 2013. – № 3(23). – С. 7–18.
90. Оконешникова, М. В. Гумусное состояние мерзлотных пойменных почв долины средней Лены / М. В. Оконешникова // Наука и образование. – 2015. – № 3. – С. 94–97.
91. Орлов, Д. С. Гумусовые кислоты почв / Д. С. Орлов. – М. : МГУ, 1974. – 333 с.

92. Орлов Д. С. Гумусовые кислоты почв и общая теория гумификации / Д. С. Орлов. – М. : МГУ, 1990. – 325 с.
93. Орлов, Д. С. Гуминовые вещества в биосфере / Д. С. Орлов // Соросовский образовательный журнал. – 1997. – № 2. – С. 56–63.
94. Орлов, Д. С. Органическое вещество почв Российской Федерации / Д. С. Орлов, О. Н. Бирюкова, Н. И. Суханова. – М. : Наука, 1996. – 258 с.
95. Орловский Н.В. Сезонная мерзлота и ее влияние на генезис и плодородие почв Сибири. Исследования почв Сибири и Казахстана / Н. В. Орловский. – Новосибирск : Наука. Сиб. отд., 1979. – С. 263–274.
96. Пастухов, А. В. География и классификационное положение автоморфных почв на покровных суглинках северной тайги Республики Коми / А. В. Пастухов, В. Д. Тонконогов, И. В. Забоева // Вестник Института биологии Коми научного центра Уральского Отделения РАН. – 2005. – № 1(87). – С. 11–15.
97. Патент № 2786742 С1 Российская Федерация, МПК В01Д 15/08, G01N 1/34, В01J 20/20. Способ очистки препаратов гуминовых кислот от золы: № 2022112335: заявл. 04.05.2022: опубл. 26.12.2022 / Е. В. Абакумов, Е. Ю. Чебыкина; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет».
98. Переверзев, В. Н. Почвы на аллювиальных и пролювиальных отложениях в долине реки Грёндалсэлта (остров Западный Шпицберген) / В. Н. Переверзев, Т. И. Литвинова // Почвоведение. – 2012. – № 5. – С. 547–554.
99. Пестерев, А. П. Почвенный покров Западной Якутии / А. П. Пестерев // Вестник СВФУ. – 2013. – № 3. – С. 10–17.
100. Польшов, Б. Б. Особенности условий выветривания и почвообразования в Амурской области / Б. Б. Польшов // Ежегодник по геологии и минералогии России. Ново-Александрия. – 1910. – Т. 12. – № 5–6. – С. 133–137.
101. Поляков, В. И. Проблемы гумификации и стабилизации органического вещества в почвах дельты Р. Лены / В. И. Поляков // Гуминовые вещества в

- биосфере : мат. VII Всерос. науч. конф. с междунар. участием, посв. 90-летию со дня рождения профессора Д.С. Орлова и III Международной научной школы (Москва, 04–08 декабря 2018 года). – М. : ООО «МАКС Пресс», 2018а. – С. 66–67.
102. Поляков, В. И. Опыт верификации классификации речных почв на примере дельты реки Лены / В. И. Поляков, Е. В. Абакумов // Устойчивое развитие территорий: теория и практика : мат. IX Всерос. науч.-практ. конф. (Сибай, 24–26 мая 2018 года). – Сибай : Сибайский информационный центр – филиал ГУП РБ Издательский дом «Республика Башкортостан», 2018б. – С. 250–251.
103. Поляков, В. И. Геоэкологическое состояние почв на водораздельных ландшафтах дельты реки Лены / В. И. Поляков, К. С. Орлова // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Северо-Востока России: мат. VIII Всерос. науч.-практ. конф. (Якутск, 18–20 апреля 2018 г.). – Якутск : Северо-Восточный федеральный университет имени М. К. Аммосова, 2018в. – Том II – С. 260–263.
104. Поляков, В. И. Гуминовые вещества почв дельты реки Лена: элементный и структурный состав / В. И. Поляков, К. С. Орлова // Ломоносов–2018 : тез. докл. XXV Междунар. науч. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых (Москва, 09–13 апреля 2018 г.). – М. : ООО «МАКС Пресс», 2018г. – С. 93-94.
105. Поляков, В. И. Молекулярный состав гуминовых кислот почв Российской Арктики / В. И. Поляков // Беломорская научная сессия СПбГУ (Санкт-Петербург, 6–7 февраля 2020 года). – СПб : Свое издательство, 2020. – С. 52–53.
106. Поляков, В. И. Особенности гумусообразования в почвах дельты реки Лены / В. И. Поляков, Е. В. Абакумов // Почвы и окружающая среда. – 2021. – №4 (4). – С. 1–16.
107. Поляков, В. И. Оценка стабилизации органического вещества криогенных почв дельты реки Лены с помощью ¹³C ЯМР-спектроскопии / В. И. Поляков, Е. В. Абакумов // Почвы и окружающая среда : мат. Всерос. науч. конф. с междунар. участием, посв. 55-летию Института почвоведения и агрохимии СО РАН (Новосибирск, 02–06 октября 2023 года). – Новосибирск : Федеральное

- государственное бюджетное учреждение науки Институт почвоведения и агрохимии Сибирского отделения Российской академии наук, 2023а. – С. 714–716.
108. Поляков, В. И. Молекулярный состав гуминовых кислот криогенных почв дельты реки Лены / В. И. Поляков, Е. В. Абакумов, Е. Д. Лодыгин, Р. С. Василевич // Мерзлотные почвы в антропоцене : сб. тез. Всерос. науч.-практ. конф. (Салехард-Лабытнанги, 20–26 августа 2023 года). – Сыктывкар : Коми научный центр УрО РАН, 2023б. – С. 119–120.
109. Пономарева, В. В. Методические указания по определению содержания и состава гумуса в почвах / В. В. Пономарева, Т. А. Плотникова. – Л., 1975. – 106 с.
110. Попов, А.И. Покровные суглинки и полигональный рельеф Большеземельской тундры / А. И. Попов // Вопросы географического мерзлотоведения и перигляциальной морфологии. – М. : МГУ, 1962. – С. 109–130.
111. Прасолов, Л. И. О «вечной» мерзлоте в степной полосе Забайкалья / Л. И. Прасолов // Почвоведение. – 1911. – №4. – С. 33–57.
112. Приказ Минобрнауки России от 5 февраля 2021 г. № 74 «О полигонах для разработки и испытаний технологий контроля углеродного баланса» / Минобрнауки России. – М. : Кремль, 2021. – 17 с.
113. Пукемо, М. Н. Криогенные процессы и связанные с ними формы рельефа о. Западный Шпицберген / М. Н. Пукемо // Криогенные процессы. – М. : МГУ, 1987. – С. 129–141.
114. Распоряжения Правительства РФ № 2515-р от 02.09.2022 года. Реализация важнейшего инновационного проекта государственного значения (ВИП ГЗ) «Национальная система мониторинга климатически активных веществ в наземных экосистемах РФ». – М. : Правительство РФ, 2022. – 24 с.
115. Рогов, В. В. Основы криогенеза / В. В. Рогов. – Новосибирск : «Гео», 2009. – 203 с.

116. Роде, А. А. Основы учения о почвенной влаге / А. А. Роде. – Л. : Гидрометиздат, 1969. – Т.2. – 287 с.
117. Рожков, В. А. Физические и водно-физические свойства почв: Учебно-методическое пособие для студентов специальностей 2604.00 и 2605.00 / В. А. Рожков, А. Г. Бондарев, И. В. Кузнецова, Х. Р. Рахматуллоев. – М. : МГУЛ, 2002. – 73 с.
118. Розанова, М. С. Оценка эффективности растворов гуминовых препаратов как промывных агентов для нефтезагрязненных почв и торфа в условиях модельного эксперимента / М. С. Розанова, О. И. Мыльникова, О. И. Кляйн, О. И. Филиппова [и др.] // Почвоведение. – 2018. – № 9. – С. 1160–1166.
119. Романовский, Н. Н. Основы криогенеза литосферы / Н. Н. Романовский. – М. : МГУ, 1993. – 336 с.
120. Русанова, Г. В. Почвы лесных и тундровых ландшафтов северной лесотундры (Бассейны Рек Сейда и Хоседа-Ю) / Г. В. Русанова, О. В. Шахтарова, А. В. Пастухов // Вестник СПбГУ. Сер. 3. – 2014. – № 3. – С. 50–61.
121. Савич, В. И. Влияние криогенеза на генезис и плодородие мерзлотных и мерзлотно-таежных почв / В. И. Савич, Д. С. Скрябина, Ж. Норовсурэн // Известия ТСХА. – 2015. – № 2. – С. 5–14.
122. Семенов, В. М. Гумификационные и негумификационные пути стабилизации органического вещества в почве (обзор) / В. М. Семенов, А. С. Тулина, Н. А. Семенова, Л. А. Иванникова // Почвоведение. – 2013. – № 4. – С. 393–407.
123. Семенов, В. М. Стабилизация органического вещества в почвах / В. М. Семенов, Л. А. Иванников, А. С. Тулина // Почвоведение. – 2009. – № 10. – С. 77–96.
124. Соколов, И. А. Гидроморфное неглеевое почвообразование / И. А. Соколов // Почвоведение. – 1980. – № 1. – С. 21–32.
125. Соколов, И. А. Почвообразование и экзогенез / И. А. Соколов. – М. : Почв. ин-т им. В.В. Докучаева. – 1997. – 244 с.

126. Соколов, И. А. О зональном типе почв в области многолетней мерзлоты / И. А. Соколов, Т. А. Соколова // Почвоведение. – 1962. – № 10. – С. 23–32.
127. Соколова, Т. А. О горно-таежных почвах Восточного Забайкалья / Т. А. Соколова, И. А. Соколов // О почвах Восточной Сибири. – М. : Изд-во АН СССР. – 1963. – С. 3–52.
128. Сумгин, М. И. Условия почвообразования в области вечной мерзлоты / М. И. Сумгин // Почвоведение. – 1931. – № 3. – С. 5–15.
129. Таргульян, В. О. Основные черты почв острова Западный Шпицберген / В. О. Таргульян, А. В. Куликов // Биологические проблемы Севера: тез. докл. X Всесоюзного симпозиума (Магадан, 1983 г.). – Магадан, 1983. – Ч. 1. – С. 272–273.
130. Таргульян, В. О. Почвообразование и выветривание в холодных гумидных областях / В. О. Таргульян. – М. : Наука, 1971. – 262 с.
131. Тищенко, В. В. Опыт химического исследования гуминовых кислот различных почвенных типов / В. В. Тищенко, М. Д. Рыдалевская // Докл. АН СССР. – 1936. – Т.4. – №3 (107). – С. 137–140.
132. Томирдиаро, С. В. Криогенно-эоловые отложения Восточной Арктики и Субарктики / С. В. Томирдиаро, Б. И. Черненький. – М. : Наука, 1987. – 198 с.
133. Тонконогов, В. Д. Общие черты и особенности тундрово-таежного автономного мезоморфного почвообразования на Русской и Западно-Сибирской равнинах / В. Д. Тонконогов // Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева. – 2008. – № 62. – С. 100–107.
134. Трусков, А. Г. Материалы к изучению почвенного гумуса. Процессы образования гуминовой кислоты / А. Г. Трусков. – СПб, 1917. – 44 с.
135. Тюрин, И. В. Органическое вещество почв и его роль в почвообразовании и плодородии учение о почвенном гумусе / И. В. Тюрин. – М. : Сельхозгиз, 1937. – 288 с.
136. Указ Президента РФ Об основах государственной политики Российской Федерации в Арктике на период до 2035 года. – М. : Кремль. – 2020. – № 164. – 17 с.

137. Федоров, К. Н. Генезис, эволюция и диагностическая микроморфология почв водно-аккумулятивных равнин аридной зоны : автореф. дис. ... д-р биол. наук : 03.00.27 / Федоров Ким Николаевич ; Моск. гос. ун-т им. М. В. Ломоносова. – М., 1993. – 52 с.
138. Федоров-Давыдов, Д. Г. Содержание подвижного железа и возможность оглеения в почвах Колымской низменности / Д. Г. Федоров-Давыдов, С. В. Губин, О. В. Макеев // Почвоведение. – 2003. – № 2. – С. 158–170.
139. Федотов, Г. Н. Биологическая активность гумусовых веществ и их влияние на свойства семян / Г. Н. Федотов, М. Ф. Федотова, В. С. Шалаев, Ю. П. Батырев // Лесной вестник. – 2017. – Т. 21. – № 2. – С. 26–36.
140. Федотов, Г. Н. Коллоидная составляющая грануло-денсиметрических фракций почв / Г. Н. Федотов, З. С. Артемьева // Почвоведение. – 2015. – № 1. – С. 61–70.
141. Филатов, М. М. Почвы бассейнов Белого Урюма и Куэнги Забайкальской области / М. М. Филатов // Труды Почвенно-ботанической экспедиции по исследованию колонизационных районов Азиатской России. – Ч.1 Почвенные исследования 1908 года. – 1910. – № 9. – 69 с.
142. Фотиев, С. М. Закономерности формирования ионно-солевого состава природных вод Ямала / С. М. Фотиев // Криосфера Земли. – 1999. – Т. 3. – № 2. – С. 40–65.
143. Худяков, О. И. Криогенез и почвообразование / О. И. Худяков. – Пущино : ОНТИ НЦБИ АН СССР, 1984. – 196 с.
144. Цели устойчивого развития ООН и России. Доклад о человеческом развитии в Российской Федерации. – М. : Аналитический центр при Правительстве Российской Федерации, 2016. – С. 298.
145. Цытович, Н. А. Механика мерзлых грунтов / Н. А. Цытович. – М. : Высшая школа, 1973. – 448 с.
146. Шишов, Л. Л. Классификация и диагностика почв России / Л. Л. Шишов, В. Д. Тонконогов, И. И. Лебедева, И. П. Герасимова. – Смоленск : Ойкумена, 2004. – 342 с.

147. Шмук, А. А. К химии органического вещества почвы / А. А. Шмук // Труды Кубанского с.-х. ин-та. – 1924. – Т. 1. – № 2. – С. 1–24.
148. Шур, Ю. Л. Верхний горизонт толщи мерзлых пород и термокарст / Ю. Л. Шур. – Новосибирск : Наука, 1988. – 212 с.
149. Abakumov, E. ¹³C NMR and ESR characterization of humic substances isolated from soils of two Siberian arctic islands / E. Abakumov, E. Lodygin, V. Tomashunas // International Journal of Ecology. – 2015. – Vol. 2015 – 390591.
150. Anderson, H. A. Possible relationship between soil fulvic acid and polymaleic acid / H. A. Anderson, J. D. Russel // Nature. – 1976. – Vol. 260. – 597 p.
151. Ardelean, F. Assessment of spatio-temporal landscape changes from VHR images in three different permafrost areas in the Western Russian Arctic / F. Ardelean, A. Onaca, M.-A. Chetan, A. Dornik et al. // Remote Sensing. – 2020. – Vol. 12. – 3999.
152. Baldock, J. A. Role of the soil matrix and minerals in protecting natural organic materials against biological attack / J. A. Baldock, J. O. Skjemstad // Organic Geochem. – 2000. – Vol. 31. – № 7–8. – P. 697–710.
153. Beznosikov, V. A. High-molecular organic substances in soils / V.A. Beznosikov, E.D. Lodygin // Transactions of the Komi Scientific Center of Ural Branch of Russian Academy of Sciences. – 2010. – Vol. 1. – P. 24–30.
154. Biskaborn, B. K. Permafrost is warming at a global scale / B. K. Biskaborn, S. L., Smith, J. Noetzli, H. Matthes et al. // Nature Communications. – 2019. – Vol. 10. – 264.
155. Bockheim, J. G. Characteristics and significance of the transition zone in drained thaw-lake basins of the Arctic Coastal Plain, Alaska / J. G. Bockheim, K. M. Hinkel // Arctic. – 2005. – Vol. 58(4). – P. 406–417.
156. Boike, J. Baseline characteristics of climate, permafrost and land cover from new permafrost observatory in the Lena River Delta, Siberia (1998–2011) / J. Boike, B. Kattenstroth, K. Abramova, N. Bornemann et al. // Biogeosciences. – 2013. – Vol. 10. – P. 2105–2128.

157. Bronick C. J. Soil structure and management: a review / C. J. Bronick, R. Lal // *Geoderma*. – 2005. – Vol. 124. – № 1–2. – P. 3–22.
158. Burdelnaya, N. Experimental study of kerogen maturation by solid-state ^{13}C NMR spectroscopy / N. Burdelnaya, D. Bushnev, M. Mokeev, A. Dobrodumov // *Fuel*. – 2014. – Vol. 118. – P. 308–315.
159. Cao, X. Sorption selectivity in natural organic matter probed with fully deuterium-exchanged and carbonyl- ^{13}C -labeled benzophenone and ^1H - ^{13}C NMR / X. Cao, C. Latta, J.J. Pignatello, J. Mao et al. // *Spectroscopy Environmental Science & Technology*. – 2014. – Vol. 48(15). – P. 8645–8652.
160. Cauwet, G. The biogeochemistry of Lena River: organic carbon and nutrients distribution / G. Cauwet, I. Sidorov // *Marine Chemistry*. – 1996. – Vol. 53. – P. 211–227.
161. Chen, J. Spectroscopic characterization of the structural and functional properties of natural organic matter fractions / J. Chen, B. Gu, E. Leboeuf, H. Pan // *Chemosphere*. – 2002. – Vol. 48. – P. 59–68.
162. Chen, L. Determinants of carbon release from the active layer and permafrost deposits on the Tibetan Plateau / L. Chen, J. Liang, S. Qin, L. Liu et al. // *Nature Communications*. – 2016. – Vol. 7. – 13046.
163. Chukov, S. N. Characterization of humic acids from Antarctic soils by nuclear magnetic resonance / S. N. Chukov, E. V. Abakumov, V. M. Tomashunas // *Eurasian Soil Science*. – 2015. – Vol. 48(11). – P. 1207–1211.
164. Cocozza, C. Characterization of solid and aqueous phases of a peat bog profile using molecular fluorescence spectroscopy, ESR and FT-IR, and comparison with physical properties / C. Cocozza, V. D'orazio, T.M. Miano, W. Shotyk // *Organic Geochemistry*. – 2003. – Vol. 34. – P. 49–60.
165. Cui, J. Physical and chemical stabilization of soil organic carbon along a 500-year cultivated soil chronosequence originating from estuarine wetlands: Temporal patterns and land use effects / J. Cui, Z. Li, B. Ge, C. Fang et al. // *Agriculture, Ecosystems & Environment*. – 2014. – Vol. 196. – P. 10–20.

166. Dai, X. Y. Characterizing soil organic matter in Arctic tundra soils by different analytical approaches / X. Y. Dai, C. L. Ping, G. J. Michaelson // *Organic Geochemistry*. – 2002. – Vol. 33(4). – P. 407–419.
167. Davidson, E. A. Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change / E. A. Davidson, I. A. Janssens // *Nature*. – 2006. – Vol. 440. – P. 165–173.
168. Davis, T. N. *Permafrost: A guide to frozen ground in transition*. Fairbanks, AK / T. N. Davis. – USA : University of Alaska Press, 2001. – 351 p.
169. Dou, S. Are humic substances soil microbial residues or unique synthesized compounds? A perspective on their distinctiveness / S. Dou, J. Shan, X. Song, R. Cao et al. // *Pedosphere*. – 2020. – Vol. 30(2). – P. 159–167.
170. Dutta, K. Potential carbon release from permafrost soils of Northeastern Siberia / K. Dutta, E. A. G. Shuur, J. C. Neff, S. A. Zimov // *Global Change Biology*. – 2006. – Vol. 12(12). – P. 2336–2351.
171. Dziadowiec, H. Properties of humic acids of Arctic tundra soils in Spitsbergen / H. Dziadowiec, S. Gonet, W. Plichta // *Polish Polar Research*. – 1994. – Vol. 15 (1–2). – P. 71–81.
172. Ejarque, E. Stability and biodegradability of organic matter from arctic soils of Western Siberia: Insights from ¹³C-NMR spectroscopy and elemental analysis / E. Ejarque, E. Abakumov // *Solid Earth*. – 2016. – Vol. 7(1). – P. 153–165.
173. Gavrilov, A. V. Dynamics of permafrost in the coastal zone of eastern-asian sector of the arctic / A. V. Gavrilov, E. I. Pizhankova // *Geography, Environment, Sustainability*. – 2018. – Vol. 11(1). – P. 20–37.
174. Gerasimova, M. I. Micromorphological terms: the state of the art in soil microfabric research / M. I. Gerasimova, I. V. Kovda, M. P. Lebedeva, T. V. Tursina // *Eurasian Soil Science*. – 2011. – Vol. 44(7). – P. 739–752.
175. Hinkel, K. M. Spatial and temporal patterns of active layer thickness at Circumpolar Active Layer Monitoring (CALM) sites in Northern Alaska, 1995–2000 / K. M. Hinkel, F. E. Nelson // *J. Geophys. Res.* – 2003. – Vol. 108. – 8168.

176. Höfle, S. Organic matter composition and stabilization in a polygonal tundra soil of the Lena Delta / S. Höfle, J. Rethemeyer, C. W. Mueller, S. John // *Biogeosciences*. – 2013. – Vol. 10. – P. 3145–3158.
177. Holland, G. P. Multi-dimensional ^1H – ^{13}C HETCOR and FSLG-HETCOR NMR study of sphingomyelin bilayers containing cholesterol in the gel and liquid crystalline states / G. P. Holland, T. M. Alam // *Journal of Magnetic Resonance*. – 2006. – Vol. 181(2). – P. 316–326.
178. Hugelius, G. Large stocks of peatland carbon and nitrogen are vulnerable to permafrost thaw / G. Hugelius., J. Loisel, S. Chadburn, R. B. Jacon et al. // *Proceedings of the National Academy of Sciences*. – 2020. – Vol. 117. – P. 20438–20446.
179. IUSS Working Group WRB. World reference base for soil resources 2022. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. – Rome: FAO, 2022. – 236 p.
180. Izokh, N. Discovery of early carboniferous conodonts in northern Kharaulakh Ranges (lower reaches of the Lena River, Northeastern Siberia, Arctic Russia) / N. Izokh, A. Yazikov // *Revue de Micropaléontologie*. – 2017. – Vol. 60(2). – P. 213–232.
181. Jackson, R. B. The Ecology of soil carbon: pools, vulnerabilities, and biotic and abiotic controls / R. B. Jackson, K. Lajtha, S. E. Crow, G. Hugelius et al. // *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*. – 2017. – Vol. 48. – P. 419–445.
182. Jastrow, J. D. Carbon dynamics of aggregate-associated organic matter estimated by carbon-13 natural abundance / J. D. Jastrow, R. M. Miller, T. W. Boutton // *Soil Science Society of America Journal*. – 1996. – Vol. 60. – P. 801–807.
183. Jauhiainen, E. Age and degree of podzolization of sand soils on the coastal plain of northwest Finland / E. Jauhiainen // *Soc. Sci. Fenn. Commentat. Biol.* – 1973. – Vol. 68. – P. 1–32.
184. Jones A. Soil Atlas of the Northern Circumpolar Region. European Commission / A. Jones, V. Stolbovoy, C. Tarnocai, G. Broll et al. – Luxembourg : Publications Office of the European Union, 2010. – 144 p.

185. Kaiser, C. Conservation of soil organic matter through cryoturbation in arctic soils in Siberia / C. Kaiser, H. Meyer, C. Biasi, O. Rusalimova et al. // *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*. – 2007. – Vol. 112. – G02017.
186. Kartoziia, A. Assessment of the ice wedge polygon current state by means of UAV Imagery analysis (Samoylov Island, the Lena Delta) / A. Kartoziia // *Remote Sensing*. – 2019. – Vol. 11. – 1627.
187. Kemper, W.D. Aggregate stability of soils from Western USA and Canada. USDA Technical Bulletin No. 1355 / W. D. Kemper, E. J. Koch. – Washington DC : US Government Printing Office, 1966. – 58 p.
188. Knoblauch, C. Predicting long-term carbon mineralization and trace gas production from thawing permafrost of North-East Siberia / C. Knoblauch, C. Beer, A. Sosnin, D. Wagner // *Global Change Biology*. – 2013. – Vol. 19(4). – P. 1160–1172.
189. Köchy, M. Global distribution of soil organic carbon – Part 1: Masses and frequency distributions of SOC stocks for the tropics, permafrost regions, wetlands, and the world / M. Köchy, R. Hiedere, A. Freibauer // *Soil*. – 2015. – Vol. 1. – P. 351–365.
190. Kokelj, S. V. Geochemistry of the active layer and near surface permafrost, Mackenzie delta region, Northwest Territories, Canada / S. V. Kokelj, C. R. Burn // *Can. J. Earth Sci.* – 2005. – Vol. 42. – P. 37–48.
191. Kutzbach, L. Effect of microrelief and vegetation on methane emission from wet polygonal tundra. Lena Delta, Northern Siberia / L. Kutzbach, D. Wagner, E.-M. Pfeiffer // *Biogeochemistry*. – 2004. – Vol. 69. – P. 341–362.
192. Lal, R. *Encyclopedia of Soil Science, Third Edition* / R. Lal. – Boca Raton: CRC Press, 2016. – 3068 p.
193. Lal, R. *Assessment methods for soil carbon* / R. Lal, J. M. Kimble, R. F. Follet, B.A. Stewart. – USA : Lewis Publishers, 2001. – 676 p.
194. Lehmann, J. The contentious nature of soil organic matter / J. Lehmann, M. Kleber // *Nature*. – 2015. – Vol. 528. – P. 60–68.

195. Lindbo, D. L. Redoximorphic features / D. L. Lindbo, M. H. Stolt, M. J. Vepraskas // Interpretation of Micromorphological Features of Soils and Regoliths. – Amsterdam : Elsevier, 2010 – P. 129–147.
196. Lodygin, E. D. The molecular structure and elemental composition of humic substances from Albeluvisols / E. D. Lodygin, V. A. Beznosikov // Chemistry and Ecology. – 2010. – Vol. 26(2). – P. 87–95.
197. Lodygin, E. D. Molecular composition of humic substances in tundra soils (¹³C-NMR spectroscopic study) / E. D. Lodygin, V. A. Beznosikov, R. S. Vasilevich // Eurasian Soil Science. – 2014. – № 47. – P. 400–406.
198. Lodygin, E. Humic substances elemental composition of selected taiga and tundra soils from Russian European North-East / E. Lodygin, V. Beznosikov, E. Abakumov // Polish Polar Research. – 2017. – Vol. 38. – P. 125–147.
199. Lupachev, A. 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) / A. Lupachev, E. Abakumov, S. Gubin // Geosciences (Switzerland). – 2017. – Vol. 7. – 24 p.
200. MacCarthy, P. An introduction to soil humic substances / P. MacCarthy, R. L. Malcolm, C. E. Clapp, P. R. Bloom // Humic substances in soil and crop sciences: selected readings. – Madison, USA, 1990. – 12 p.
201. Mann, D. H. Soil development at Kongsfjord, Spitsbergen / D. H. Mann, R. S. Sletten, F. C. Ugolini // Polar Res. – 1986. – Vol. 4(1). – P. 1–16.
202. Massiot, D. Modelling one and two-dimensional solid-state NMR spectra / D. Massiot, F. Fayon, M. Capron, I. King et al. // Magn Reson Chem. – 2002. – Vol. 40. – P. 70–76.
203. Melillo, J. Soil Warming and carbon-cycle feedbacks to the climate system / J. Melillo, P. A. Steudler, J. Aber, K. Nwekirk et al. – New York : Science, 2003. – Vol. 298. – P. 2173–2176.
204. Melkerud, P.-A. Chemical, mineralogical and morphological characterization of three podzols developed on glacial deposits in northern Europe / P.-A. Melkerud,

- D. C. Bain, A. G. Jongmans, T. Tarvainen // *Geoderma*. – 2000. – Vol. 94. – P. 125–148.
205. Mergelov, N. Alteration of rocks by endolithic organisms is one of the pathways for the beginning of soils on Earth / N. Mergelov, C. W. Mueller, I. Prater, I. Shorkunov et al. // *Scientific Reports*. – 2018. – Vol. 8. – P. 33–67.
206. Michaelson, G. J. Soils and frost boil ecosystems across the North American Arctic Transect / G. J. Michaelson, C. L. Ping, H. E. Epstein, J. M. Kimble et al. // *J. Geophys. Res.* – 2008. – Vol. 113. – G03S11.
207. Mišurcová, L. Health benefits of algal polysaccharides in human nutrition / L. Mišurcová, S. Škrovánková, D. Samek, J. Ambrožová et al. // *Advances in Food and Nutrition Research*. – 2012. – Vol. 66. – P. 75–145.
208. Mokma, D.L. Podzol formation in sandy soils of Finland / D. L. Mokma, M. Uli-Halla, K. Linfquist // *Geoderma*. – 2004. – Vol. 120. – P. 259–272.
209. Mulder G.J. Humic substances / G. J. Mulder // *J. Prakt. Chem.* – 1839. – Vol. 16. – P. 495–497.
210. Munsell Color (Firm). Munsell soil color charts: with genuine Munsell color chips. – Grand Rapids, MI: Munsell Color, 2010. – 9 p.
211. Nauman, T. Quantitative soil-geomorphic framework for developing and mapping ecological site groups / T. Nauman, S. Burch, J. Humphries, A. Knight et al. // *Rangeland Ecology and Management*. – 2022. – Vol. 81(1). – P. 9–33.
212. Olk, D. C. Environmental and agricultural relevance of humic fractions extracted by alkali from soils and natural waters / D. C. Olk, P. R. Bloom, E. M. Perdue, D. M. McKnight et al. // *J. Environ. Qual.* – 2019. – Vol. 48. – P. 217–232.
213. Pengerud, A. Soil organic matter molecular composition and state of decomposition in three locations of the European Arctic / A. Pengerud, M.-F. Dignac, G. Certini, L. T. Strand et al. // *Biogeochemistry*. – 2017. – Vol. 135 (3). – P. 277–292.
214. Perminova, I. V. Humic substances and living systems: Impact on environmental and human health / I. V. Perminova, J. M. Garcia-Mina, D. C. Podgorski, F. J. Cervantes // *Environ. Res.* – 2021. – Vol. 194. – 110726.

215. Peterjohn, W. T. Soil warming and trace gas fluxes: experimental design and preliminary flux results / W. T. Peterjohn, J. M. Melillo, F. P. Bowles, P. A. Steudler // *Oecologia*. – 1993. – Vol. 93. – P. 18–24.
216. Piccolo, A. The supramolecular structure of humic substances: A novel understanding of humus chemistry and implications in soil sciences / A. Piccolo // *Adv. Agron.* – 2002. – Vol. 75. – P. 57–134.
217. Piccolo, A. The soil humeome: chemical structure, functions and technological perspectives / A. Piccolo, R. Spaccini, D. Savy, M. Drosos et al. // *Sustainable Agrochemistry*. Vaz Jr., S. (eds). – Springer, Cham, 2019. – P. 183–222.
218. Ping, C. L. Permafrost soils and carbon cycling / C. L. Ping, J. D. Jastrow, M. T. Jorgenson, G. J. Michaelson et al. // *Soil*. – 2015. – Vol. 1. – P. 147–171.
219. Pogosyan, L. Polygenesis of loamy soils in North-West Siberia in the context of environmental history of the Eurasian Arctic region during the Late Quaternary / L. Pogosyan, S. Sedov, A. Yartaev, A. Rusakov // *Quaternary International*. – 2022. – Vol. 630. – P. 110–120.
220. 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.
221. Polyakov, V. Soils of the Lena River Delta, Yakutia, Russia: diversity, characteristics and humic acids molecular composition / V. Polyakov, K. Orlova, E. Abakumov // *Polarforschung*. – 2018a. – Vol. 88 (2). – P. 135–150.
222. Polyakov, V. Landscape-dynamic aspects of soil formation in the Lena River Delta / V. Polyakov, K. Orlova, E. Abakumov // *Czech Polar Reports*. – 2018b. – № 8(2). – P. 260–274.
223. Polyakov, V. Soil humic substances of selected soils of Lena delta River landscapes: elemental and molecular composition / V. Polyakov, K. Orlova, E. V. Abakumov // *Polar Systems under Pressure : Proceedings (Rostock, March 25–29th 2018)*. – Rostock: Alfred-Wegener-Institut, Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung, 2018c. – Vol. 716. – P. 148–149.

224. Abakumov, E. Soil water holding capacity and the main physical properties of soils of the Russian Arctic (on examples of Lena River Delta and Yamal Peninsula) / E. Abakumov, V. Polyakov, K. Orlova, I. Alekseev // EGU General Assembly : Proceedings (Vienna, April, 8–13th 2018). – Vienna, 2018d. – Vol. 20. – EGU2018-18496-1.
225. 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.
226. 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. – 2020a. – Vol. 10(2). – P. 170–190.
227. 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. – 2020b. – № 71(1). – P. 37–46.
228. Polyakov, V. Micromorphological characteristic of different-aged cryosols from the east part of Lena River Delta, Siberia, Russia / V. Polyakov, E. Abakumov // Geosciences. – 2021a. – Vol. 11. – 118.
229. 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. – 2021b. – Vol. 8(6). – 87.
230. Polyakov, V. Stabilization of organic matter from the Ice Complex, Lena River Delta, Russia / V. Polyakov, E. Abakumov // Focus Siberian Permafrost – Terrestrial Cryosphere and Climate Change : Proceedings (Hamburg, May 24–25th 2021). – Hamburg: Hamburg University, 2021c. – P. 74–75.
231. Polyakov, V. Soil geomorphological mapping of Samoylov Island based on UAV imaging / V. Polyakov, A. Kartoziia, T. Nizamutdinov, W. Wang et al. // Front. Environ. Sci. – 2022. – Vol. 10. – 948367

232. Polyakov, V. Molecular weight distribution of humic acids isolated from buried soils and yedoma sediments / V. Polyakov, E. Abakumov, E. Lodygin, R. Vasilevich // *Agronomy*. – 2023a. – № 13. – 1483.
233. 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*. – 2023b. – № 63. – P. 24–42.
234. Rogov, V. The influence of cryogenesis on clay materials / V. Rogov, V. Konistsev // *Cryosphere of Earth*. – 2008. – Vol. 12. – P. 51–59.
235. Schiedung, M. Organic carbon stocks, quality and prediction in permafrost-affected forest soils in North Canada / M. Schiedung, S.-L. Bellè, A. Malhotra, S. Abiven // *Catena*. – 2022. – Vol. 213. – 106194.
236. Schimel, D. S. Terrestrial ecosystems and the carbon cycle / D. S. Schimel // *Global Change Biology*. – 1995. – Vol. 1(1). – P. 77–91.
237. Schirrmeister, L. Late Quaternary history of the accumulation plain north of the Chekanovsky Ridge (Lena Delta, Russia): A multidisciplinary approach / L. Schirrmeister, T. V. Kuznetsova, M. V. Dorozhkina, E. Y. Pavlova et al. // *Polar Geography*. – 2003. – Vol. 27(4). – P. 277–319.
238. Schirrmeister, L. Late Quaternary paleoenvironmental records from the western Lena Delta, Arctic Siberia / L. Schirrmeister, G. Grosse, M. Schnelle, M. Fuchs et al. // *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. – 2011. – Vol. 299 (1–2). – P. 175–196.
239. Schmidt, M. W. I. Persistence of soil organic matter as an ecosystem property / M.W.I. Schmidt, M.S. Torn, S. Abiven et al. // *Nature*. – 2011. – Vol. 478. – P. 49–56.
240. Schneider, J. Land cover classification of tundra environments in the Arctic Lena Delta based on Landsat 7 ETM+ data and its application for upscaling of methane emissions / J. Schneider, G. Grosse, D. Wagner // *Remote Sens. Environ.* – 2009. – Vol. 113. – P. 380–391.
241. Schnitzer, M. Aromaticity of soil fulvic acid / M. Schnitzer // *Nature*. – 1985. – Vol. 316. – 658.

242. Schuur, E. A. G. Climate change and the permafrost carbon feedback / E.A.G. Schuur, A. D. McGuire, C. Schädel, G. Grosse et al. // *Nature*. – 2015. – Vol. 520. – P. 171–179.
243. Senesi, N. Application of electron spin resonance (ESR) spectroscopy in soil chemistry / N. Senesi // *Advances in Soil Science*. – 1990. – Vol. 14. – P. 77–130.
244. Sizov, O. Lithological and geomorphological indicators of glacial genesis in the upper Quaternary strata, Nadym River basin, Western Siberia / O. Sizov, A. Volvakh, A. Molodkov, A. Vishnevskiy et al. // *Solid Earth*. – 2020. – Vol. 11. – P. 2047–2074.
245. Sollins, P. Stabilization and destabilization of soil organic matter: mechanisms and controls / P. Sollins, P. Homann, B.A. Caldwell // *Geoderma*. – 1996. – Vol. 74. – № 1–2. – P. 65–105.
246. Sprengel, C. Ueber Pflanzenhumus, Humussäure und humussaure humussäure Salze, *Kastener's Arch // Gesamte Naturlehre*. – 1826. – Vol. 8 – P. 145–220.
247. Stevenson, F.J. *Humus Chemistry* / F. . Stevenson. – N.Y. : John Wiley, 1982. – 496 p.
248. Stolt, M. H. Soil organic matter / M. H. Stolt, D. L. Lindbo // *Interpretation of micromorphological features of soils and regoliths*. – Amsterdam : Elsevier, 2010. – P. 369–396.
249. Szymański, W. 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) / W. Szymański // *Catena*. – 2017. – Vol. 156. – P. 325–337.
250. Szymański, W. Organic carbon and nutrients (N, P) in surface soil horizons in a non-glaciated catchment, SW Spitsbergen / W. Szymański, B. Wojtuń, M. Stolarczyk, J. Siwek, et al. // *Polish Polar Research*. – 2016. – Vol. 37. – P. 49–66.
251. Szymański, W. Soil properties, micromorphology, and mineralogy of Cryosols from sorted and unsorted patterned grounds in the Hornsund area, SW Spitsbergen / W. Szymański, M. Skiba, B. Wojtuń, M. Drewnik // *Geoderma*. – 2015. – Vol. 253–254. – P. 1–11.

252. Tarnocai, C. Arctic permafrost soils / C. Tarnocai // Soil biology. Permafrost soils. Margesin R., ed. – Berlin : Springer, 2009. – P. 3–16.
253. Thompson, S. O. Infrared spectra and differential thermograms of lignins and soil humic material saturated with different cations / S. O. Thompson, G. Chersters // Soil Sci. – 1970. – Vol. 21. – P. 265–272.
254. Turetsky, M. R. Carbon release through abrupt permafrost thaw / M. R. Turetsky, B. W. Abbot, M. C. Jones, K. W. Anthony et al. // Nature Geoscience. – 2020. – Vol. 13. – P. 138–143.
255. Valerio, M. W. Distribution and properties of podzolized soils in the northern Rocky Mountains / M. W. Valerio, P. A. McDaniel, P. E. Gessler // Soil Science Society of America Journal. – 2016. – Vol. 80(5). – P. 1308–1316.
256. Van Krevelen, D. W. Studies of gas absorption. Vi. A graphical representation for the efficiency of physical absorption / D. W. van Krevelen // Recueil des Travaux Chimiques des Pays-Bas. – 1950. – Vol. 69(4). – P. 503–508.
257. Van Rossum, B.-J. High-field and high-speed CP–MAS ¹³C NMR heteronuclear dipolar-correlation spectroscopy of solids with frequency-switched lee-goldburg homonuclear decoupling / B.-J. Van Rossum, H. Förster, H. J. M. de Groot // J. Magn Reson. – 1997. – Vol. 124. – P. 516–519.
258. Vasilevich, R. The molecular composition of humic acids in permafrost peats in the European Arctic as paleorecord of the environmental conditions of the Holocene / R. Vasilevich, E. Lodygin, E. Abakumov // Agronomy. – 2022. – Vol. 12. – 2053.
259. Vasilevich, R. Molecular composition of raw peat and humic substances from permafrost peat soils of European North-East Russia as climate change markers / R. Vasilevich, E. Lodygin, V. Beznosikov, E. Abakumov // Science of the Total Environment. – 2018. – Vol. 615. – P. 1229–1238.
260. Vliet-Lanoë, B. V. Frost Action / B.V. Vliet-Lanoë // Interpretation of micromorphological features of soils and regoliths. – Amsterdam : Elsevier, 2010. – P. 81–108.

261. Vliet-Lanoë, B. Micromorphology of cryosols / B. Vliet-Lanoë, C.A. Fox, S.V. Gubin // *Cryosols: permafrost-affected soils*. – Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2004. – P. 365–390.
262. Waksman, S. A. Humus / S. A. Waksman. – London : Bailliere, Tindall & Cox, 1938. – 494 p.
263. Walker, D. A. Arctic patterned-ground ecosystems: A synthesis of field studies and models along a North American Arctic Transect / D. A. Walker, H. E. Epstein, V. E. Romanovsky, C. L. Ping et al. // *J. Geophys. Res.* – 2008. – Vol. 113. – G03S01.
264. Wallerius, J. G. *Agriculturae Fundamenta Chemical Spez. De. Humo* / J. G. Wallerius. Diss., first ed. – Sweden : Uppsala University, 1761. – 404 p.
265. Wetterich, S. The cryostratigraphy of the Yedoma cliff of Sobo-Sise Island (Lena delta) reveals permafrost dynamics in the central Laptev Sea coastal region during the last 52 kyr / S. Wetterich, A. Kizyakov, M. Fritz, J. Wolter et al. // *The Cryosphere*. – 2020. – Vol. 14. – P. 4525–4551.
266. Zubrzycki, S. Organic carbon and total nitrogen stocks in soils of the Lena River Delta / S. Zubrzycki, L. Kutzbach, G. Grosse, A. Desyatkin et al. // *Biogeosciences*. – 2013. – Vol. 10. – P. 3507–3524.
267. Zubrzycki, S. Permafrost-affected soils and their carbon pools with a focus on the Russian Arctic / S. Zubrzycki, L. Kutzbach, E.-M. Pfeiffer // *Solid Earth*. – 2014. – Vol. 5. – P. 595–609.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Морфологическое описание почв, диагностированных на островах в дельте реки Лены

А) остров Самойловский

Первая терраса, вне зоны затопления

Sam 1

Кустарничковая мохово-осоковая тундра. Кочкарно-бугорковатый микрорельеф.

Горизонт	Глубина, см	Описание
О	0-10	Моховой очес
CRg	10-42	Серовато-бурый с зернами отмытых минералов, свежий, признаки ожелезнения, обилие корней, бесструктурный, легкий суглинок. Граница многолетнемерзлых пород



Рисунок А.1 – Криозем глееватый на аллювиальных песках

Sam 2

Первая терраса, зона периодического затопления.

Ивово-кустарничково-мохово-осоковая тундра. Кочкарно-бугорковатый микрорельеф.

Горизонт	Глубина, см	Описание
AУ	0-17	Свежий, органоминеральный, темный, обилие корней, песчаный, бесструктурный, переход по цвету, граница ровная
RУ	17-79	Стратифицированная толща, бесструктурный, представлена линзами песка темных и светлых оттенков. Граница с многолетнемерзлыми породами



Рисунок А.2 – Стратозем серогумусовый песчаный на аллювиальных песках
 Б) Остров Харданг

Хар 1

Мохово-осоково-злаковая тундра. Микрорельеф мелкобугорковатый с перепадами высот 10-20 см.

Горизонт	Глубина, см	Описание
АУ	0-7	Серый, супесчаный, бесструктурный, обилие корней, светлые зерна минералов, граница ровная по цвету и плотности, переход резкий
С	7-12	Темнее предыдущего, бурые пятна, обилие корней, легкий суглинок, граница ровная, переход по цвету

[RY]	12-22	Палевый, мелкозернистый песок, бесструктурный, встречаются корни, граница ровная, переход по цвету
[C]	22-41	Темный, плотнее предыдущего, легкий суглинок, линзы песка, супесчаный, бесструктурный, встречаются корни, граница ровная, переход по цвету
[RY]	41-47	Палевый, песчаный, встречаются корни, бесструктурный, граница неровная, переход по цвету
[C]	47-70	Темный, легкий суглинок, темно-бурые затеки, на глубине 67 см линза органического материала слабой степени разложения, непрочнокомковатая структура. Граница с многолетнемерзлыми породами



Рисунок А.3 – Стратозем серогумусовый на аллювиальных песках

Хар 2

Мохово-лишайниковая тундра. Мелкобугорковатый микрорельеф.

Горизонт	Глубина, см	Описание
О	0-7	Моховой очес
АН	7-20	Темно-бурый, обилие корней, влажный, легкий суглинок, непрочнокомковатая структура, граница ровная, переход по цвету
Г	20-25	Серый с рыжими пятнами, плотный, тяжелый суглинок, плитчатая структура. Граница с многолетнемерзлыми породами



Рисунок А.4 – Торфяно-глеезем на аллювиальных отложениях

В) Остров Эбе-Басын-Сисе

Эси 1

Осоково-моховая тундра. Холмисто-увалистый микрорельеф.

Горизонт	Глубина, см	Описание
О	0-5	Моховой очес
TE	5-9	Темный с бурыми пятнами, ореховатая структура, обилие корней, легкий суглинок, граница неровная, переход по цвету
CR	9-15	Темно-серый, пронизан корнями, бурые пятна, легкий суглинок, непрочнокомковатая структура, граница ровная, переход по цвету
CRg	15-27	Бурый, фрагменты древесины, встречаются корни, линза песка, легкий суглинок. Граница с многолетнемерзлыми породами



Рисунок А.5 – Торфяно-глеезем на аллювиальных отложениях

Г) Остров Джан-Гылах

Джан 1

Мохово-кустарничковая тундра. Западинный микрорельеф.

Горизонт	Глубина, см	Описание
АУ	0-15	Светло-серый, супесчаный, пронизан корнями, непрочнокомковатая структура, граница ровная, переход по цвету
ВНН	15-28	Песчаный, палевый, бесструктурный, рыжие пятна, свежий, граница ровная, переход по цвету
СRg	28-60	Серый, легкий суглинок, рыжие пятна, непрочнокомковатая структура. Граница с многолетнемерзлыми породами

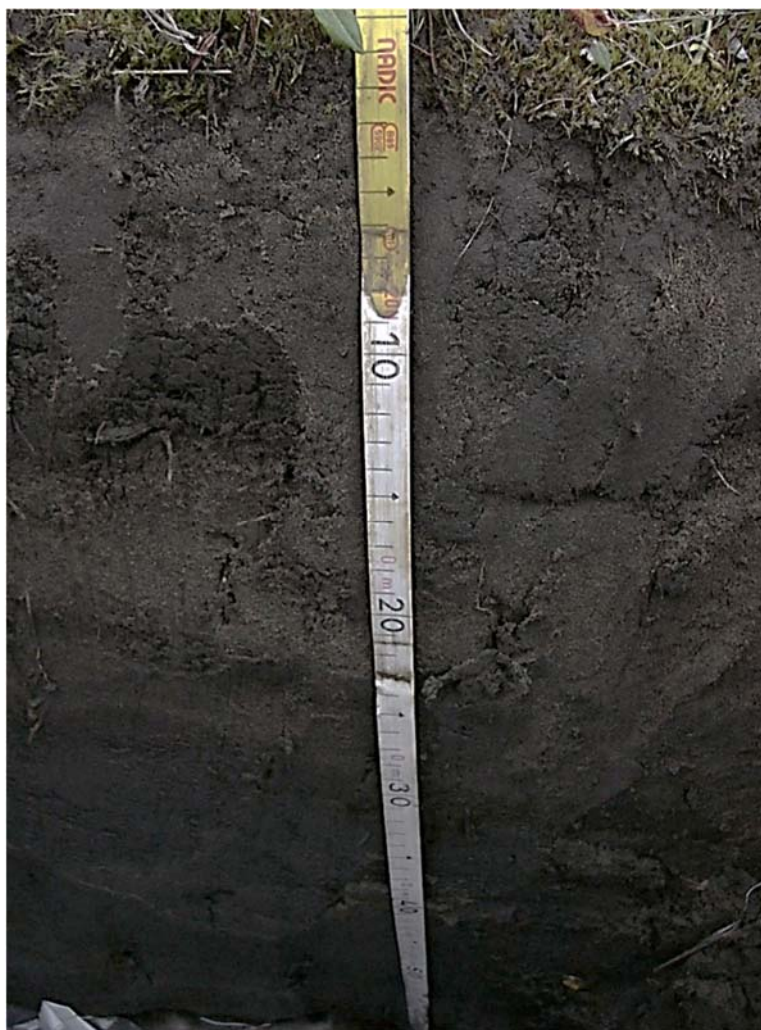


Рисунок А.6 – Дерново-подбур глееватый криотурбированный на аллювиальных песках

Д) Остров Курунгнах

Кур 1

Гора Америка-Хая. Мохово-ивовая тундра. Вершина горы

Горизонт	Глубина, см	Описание
ТЕох	0-19	Суглинок, темный, рыжие пятна, комковатая структура, граница с породой, линзы льда



Рисунок А.7 – Торфяная окисленно-глеевая на плитчатых мелкокристаллических известняках

Кур 2

Полигональная тундра. Мохово-осоково-лишайниковая тундра.

Нанополигональный микрорельеф.

Горизонт	Глубина, см	Описание
OT	0-13	Моховой очес, оторфованный
CR	13-22	Супесчаный, бесструктурный, темно-серый, отмытые зерна минералов, рыжие пятна, обилие корней, граница с многолетнемерзлыми породами



Рисунок А 8. – Криозем оторфованный на аллювиальных песках

Кур 3

Вершина булгуньяха. Злаково-моховая тундра. Бугристый микрорельеф.

Горизонт	Глубина, см	Описание
АУ	0-6	Темный, легкий суглинок, комковатая структура, обилие корней, неразложившиеся растительные остатки, граница неровная, переход по цвету
ВНФ	6-46	Темно-серый, рыжие пятна, ореховатая структура, отмытые зерна минералов, плотный. Граница с многолетнемерзлыми породами



Рисунок А.9 – Дерново-подбур иллювиально-железистый на аллювиальных песках

Кур 4

«Спущенное» озеро. Злаково-моховая тундра. Бугорковатый микрорельеф.

Горизонт	Глубина, см	Описание
AY	0-35	Темный, легкий суглинок, обилие корней, ореховатая структура, неразложившиеся растительные остатки, граница ровная, переход по цвету
CR	35-50	Темно-серый, легкий суглинок, рыжие пятна, включения неразложившихся органических остатков, ореховатая структура, граница неровная, переход по цвету
[OT]	50-60	Погребенное слаборазложившееся органическое вещество. Граница с многолетнемерзлыми породами.



Рисунок А.10 – Криозем серогумусовый на аллювиальных песках

Е) Остров Столб

Столб 1

Вершина острова. Мохово-ивово-лишайниковая тундра. Бугристый микрорельеф.

Горизонт	Глубина, см	Описание
АУ	0-40	Темный, пронизан корнями, комковатая структура, супесчаный. Граница с породой



Рисунок А.11 – Серогумусовая почва на мелкокристаллических известняках

Ж) Остров Арга-Белир-Арыта

Арба 1

Пологий остров, находится в зоне затопления. Осоково-ивово-моховая тундра.
Бугристый микрорельеф.

Горизонт	Глубина, см	Описание
AУ	0-12	Светлый, песчаный, бесструктурный, граница неровная, переход по цвету
CRg	12-39	Темный, серый, сочится влага, рыжие пятна, песчаный, пронизан корнями, бесструктурный. Граница с многолетнемерзлыми породами



Рисунок А.12 – Криозем серогумусовый оглееный на аллювиальных песках

3) Остров Тит-Ары

Тит 1

Первая терраса. Листвиннично-ерниково- ивово- мохово-лишайниковая лесотундра. Бугристо-кочкарный микрорельеф.

Горизонт	Глубина, см	Описание
OT	0-10	Моховой очес, оторфованный
G	10-30	Темно-серый до сизого, суглинок, комковатый, рыжие пятна. Граница с многолетнемерзлыми породами



Рисунок А.13 – Глеезем оторфованный на аллювиальных песках

И) Остров Сардах

Третья терраса. Мохово-осоково-лишайниковая тундра. Нанополигональный микрорельеф.

Горизонт	Глубина, см	Описание
О	0-10	Моховой покров, граница волнообразная
ОТ	10-16	Растительные остатки различной степени разложения, граница волнообразная
CR	16-28	Серый, рыжие пятна, суглинок, плитчатая структура. Граница с многолетнемерзлыми породами



Рисунок А.14 – Криозем оторфованный на древних аллювиальных песках

К) Харулахский хребет. Коренной берег

Вершина хребта. Мохово-лишайниковая тундра.

Горизонт	Глубина, см	Описание
О	0-3	Моховой покров, граница волнообразная
CR	3-20	Криотурбированный, серый, легкий суглинок, включения грубого скелета, комковатая структура, граница с коренными породами



Рисунок А.15 – Криозем на мелкокристаллических известняках

Л) Остров Ботулу-Сисе

Третья терраса. Мохово-ивово-лишайниковая тундра.

Горизонт	Глубина, см	Описание
О	0-16	Моховой покров
CR	16-36	Серый, рыжие пятна, сочится вода, включения грубого органического вещества, признаки оглеения, бесструктурный, суглинок. Граница с многолетнемерзлыми породами



Рисунок А.16 – Криозем грубогумуссированный глееватый на древних аллювиальных песках.

М) Остров Чай-Ары

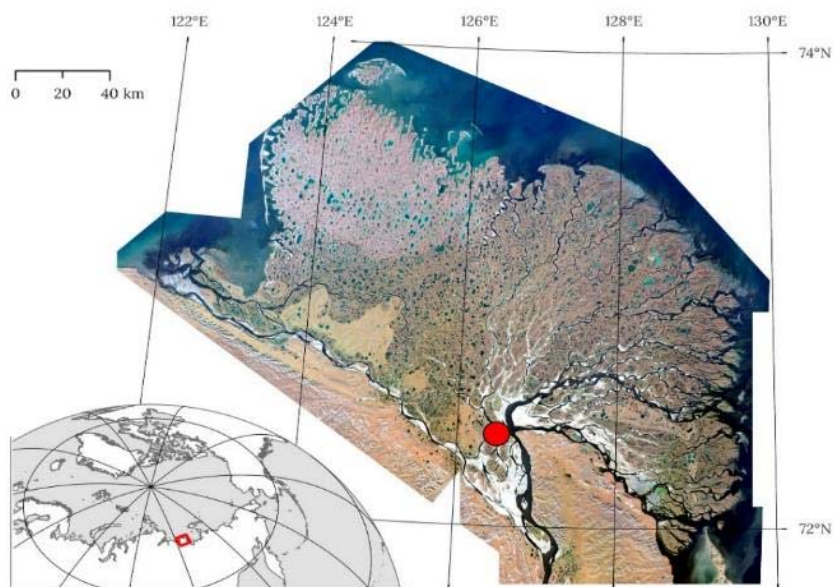
Первая терраса, незатапливаемая территория. Мохово-ивово-лишайниковая тундра.

Горизонт	Глубина, см	Описание
OT	0-10	Моховой покров, оторфованный
CRg	10-42	Серый, рыжие пятна, включения различной степени разложённости растительных остатков, признаки оглеения на границе многолетнемерзлых пород, легкий суглинок, включения грубого скелета. Граница с многолетнемерзлыми породами

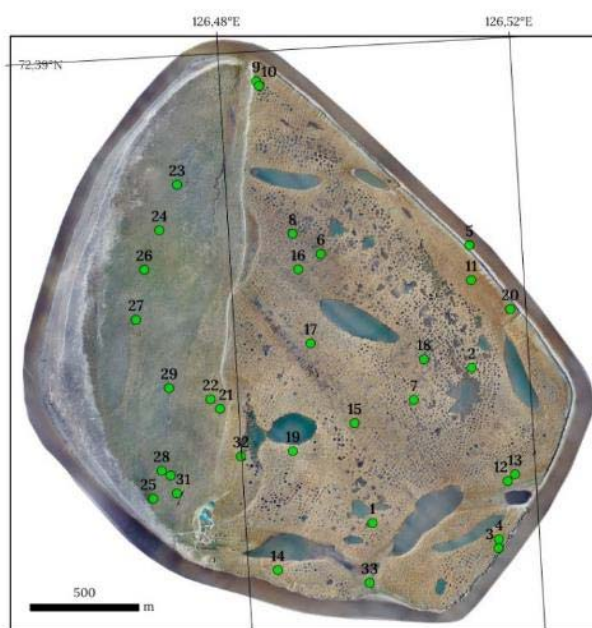


Рисунок А.17 – Криозем оторфованный глееватый на аллювиальных песках

Физико-химические параметры почв острова Самойловский



(a)



(b)

Рисунок Б.1 – Район исследования. (а) о. Самойловский (красный квадрат) в дельте р. Лены; (б) места отбора проб

Таблица Б.1 – Номер точек и их координаты (согласно рис. Б.1)

№	Координаты		№	Координаты	
	Широта	Долгота		Широта	Долгота
1	72,369619	126,49731	18	72,376472	126,50569
2	72,376	126,51211	19	72,372878	126,48702
3	72,368239	126,51432	20	72,3784	126,51787
4	72,368617	126,51445	21	72,374853	126,47743
5	72,381228	126,51282	22	72,375278	126,47619
6	72,381214	126,49245	23	72,384508	126,47338
7	72,374769	126,50396	24	72,382606	126,47059
8	72,382145	126,48875	25	72,371178	126,46758
9	72,388733	126,48504	26	72,380964	126,46821
10	72,388528	126,48538	27	72,378853	126,46664
11	72,379736	126,51279	28	72,372347	126,46894
12	72,371078	126,5161	29	72,375861	126,47064
13	72,37135	126,51718	30	72,372128	126,47014
14	72,367833	126,484	31	72,371347	126,47083
15	72,373919	126,49568	32	72,372778	126,47989
16	72,380611	126,48925	33	72,367069	126,49642
17	72,377428	126,49032			

Таблица Б.2 – Физико-химические показатели изученных почв
(согласно рис. Б.1)

№	ОН, %	ОС, %	Гранулометрический состав		
			Глина (< 0,001 мм)	Пыль (0,05-0,001 мм)	Песок (1-0,05 мм)
1	0,010	0,222	3	32	65
2	0,420	2,257	34	22	44
3	0,830	3,350	28	1	71
4	0,030	0,595	4	36	60
5	0,001	0,080	3	35	62
6	0,001	0,160	9	64	27
7	0,001	0,190	6	68	24
8	0,001	0,290	6	26	68
9	0,001	0,130	1	41	58
10	0,372	1,268	3	28	69
11	0,129	0,544	1	18	81
12	0,153	0,499	3	18	79
13	0,079	0,224	6	15	79
14	0,054	0,106	2	41	57
15	1,625	3,051	10	70	20
16	0,004	0,271	8	58	34
17	0,223	4,959	2	47	51
18	0,108	0,092	3	40	57
19	0,001	0,241	3	35	62
20	0,984	3,337	3	32	65
21	1,044	1,611	3	15	82
22	0,807	1,061	2	17	85
23	1,119	2,935	2	13	85

24	0,863	1,064	3	21	76
25	1,135	1,363	5	13	82
26	0,060	0,535	1	4	95
27	0,053	0,331	1	8	91
28	0,001	0,991	11	13	76
29	1,142	1,599	6	8	86
30	1,057	1,233	1	8	91
31	0,114	1,600	1	3	96
32	1,331	1,597	5	7	88
33	0,889	1,136	6	28	66

Таблица Б.3 – Химический состав исследованных почв (согласно рис. Б.1.)

№	Химический состав											
	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MnO	K ₂ O	CaO	TiO ₂	ZrO ₂	SrO	Rb ₂ O	ZnO	Other
1	56,1	17,1	6,8	0,9	5,6	5,6	3,9	1,6	1,4	0,4	0,2	0,94
2	58,2	16,7	6,7	1,1	5,3	4,2	3,5	2	1,2	0,3	0,2	0,6
3	45,4	24	7,6	0,6	7,8	5,8	4,3	1,5	1,8	0,4	0,1	0,7
4	65,3	13,1	5,1	1,7	4,4	3,9	3,3	1,1	1,2	0,3	0,2	0,4
5	57,3	16,7	7,4	0,8	5,5	4,4	4,2	1,3	1,2	0,3	0,2	0,7
6	68,1	13,4	5,4	0,6	3,9	2,3	3,3	1,2	0,7	0,3	0,3	0,5
7	79,3	7,2	2,7	0,7	2,4	3,8	2,1	0,4	0,4	0,2	0,2	0,5
8	58,6	16,3	7,2	0,7	5,1	4,2	4,1	1,6	1,2	0,3	0,2	0,56
9	51	20,1	7,8	0,5	6,4	4,8	4,7	2,2	1,4	0,4	0,2	0,5
10	52,5	20,7	6,6	0,8	6,3	4,8	3,8	2	1,4	0,4	0,2	0,5
11	57,5	17	7	0,7	5,4	4,2	4	1,6	1,2	0,3	0,3	0,8
12	56,4	17,8	7,2	0,7	5,6	4,1	4,3	1,6	1,1	0,3	0,3	0,6
13	45	23,6	7,8	0,5	7,6	5,9	4,2	2,6	1,8	0,4	0,1	0,5
14	55,1	18,9	6,7	0,6	5,8	4,4	4,3	1,9	1,3	0,3	0,2	0,5
15	67,5	13	5,1	0,8	3,9	3	3,5	1,1	0,9	0,3	0,3	0,6
16	76,5	8,3	3,8	3,1	2,5	1,8	1,7	0,9	0,6	0,2	0,2	0,4

17	53,8	19,1	6,9	0,4	5,8	4,8	4,5	2	1,6	0,4	0,3	0,4
18	55,7	18,2	6,8	0,8	5,8	4,3	4,3	1,7	1,3	0,3	0,2	0,6
19	56,4	17,7	6,9	0,6	5,6	4,1	4,2	2,2	1,3	0,3	0,3	0,4
20	53,8	19,3	7,2	0,7	6,2	4,6	4,1	1,5	1,4	0,4	0,2	0,6
21	59,4	15,8	7	1,3	5,3	4,2	3,8	1,2	1	0,3	0,3	0,4
22	58,6	16,9	6,8	0,8	5,4	3,6	3,9	1,7	1,2	0,4	0,2	0,5
23	43,2	26,9	8,1	0,4	8	5,2	3,7	1,7	1,8	0,4	-	0,6
24	53,2	20,1	7,7	0,7	6,1	4,5	3,8	1,4	1,3	0,3	0,2	0,7
25	37	31,6	8	0,4	8,6	5,8	4,5	1,1	2,1	0,4	-	0,5
26	37,3	30,4	8,5	0,4	9,9	5,7	4,1	0,7	2,2	0,5	-	0,3
27	48,2	22,6	8,1	0,5	7,3	5,3	3,6	1,3	1,8	0,4	0,2	0,7
28	49,7	21	7,6	0,5	6,2	5,2	4,9	2,3	1,4	0,3	0,2	0,7
29	47,9	23,4	7,7	0,5	7,5	4,6	3,9	1,7	1,7	0,4	0,2	0,5
30	50	21,1	7,9	0,6	7	5,1	3,9	1,6	1,5	0,4	0,2	0,7
31	48,7	20,9	7,3	0,5	6,9	5,2	5,4	2,5	1,6	0,3	0,2	0,5
32	47,1	24,3	7	0,4	7,3	5,3	3,9	1,9	1,9	0,4	-	0,5
33	58	16,6	7,2	0,8	5,6	4,2	3,8	1,6	1,1	0,3	0,2	0,6

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Микроморфологическая характеристика почв дельты реки Лены

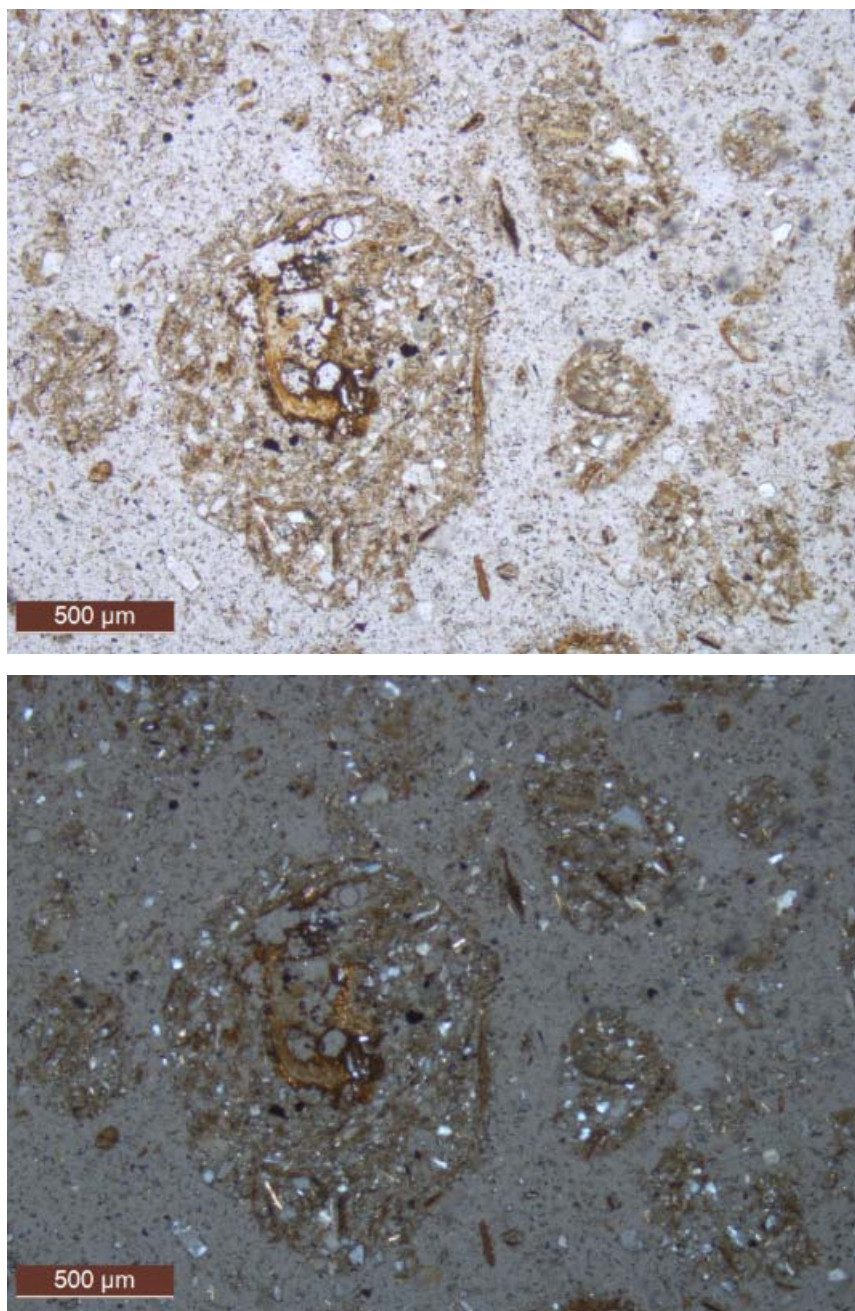


Рисунок В.1 – Вытаивающий органоминеральный материал из ледового комплекса. Третья терраса, о. Ботуло-Сисе, деградирующая береговая зона острова. Наличие биогенных агрегатов, которые состоят из органических тонкодисперсных материалов. Агрегаты формируются вокруг крупных растительных остатков

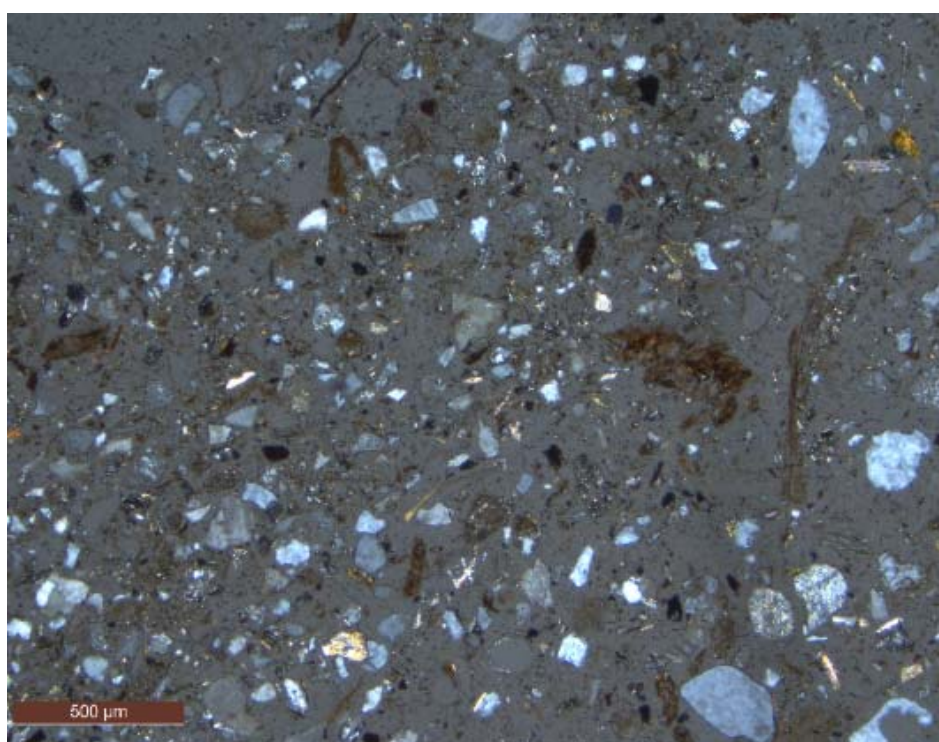
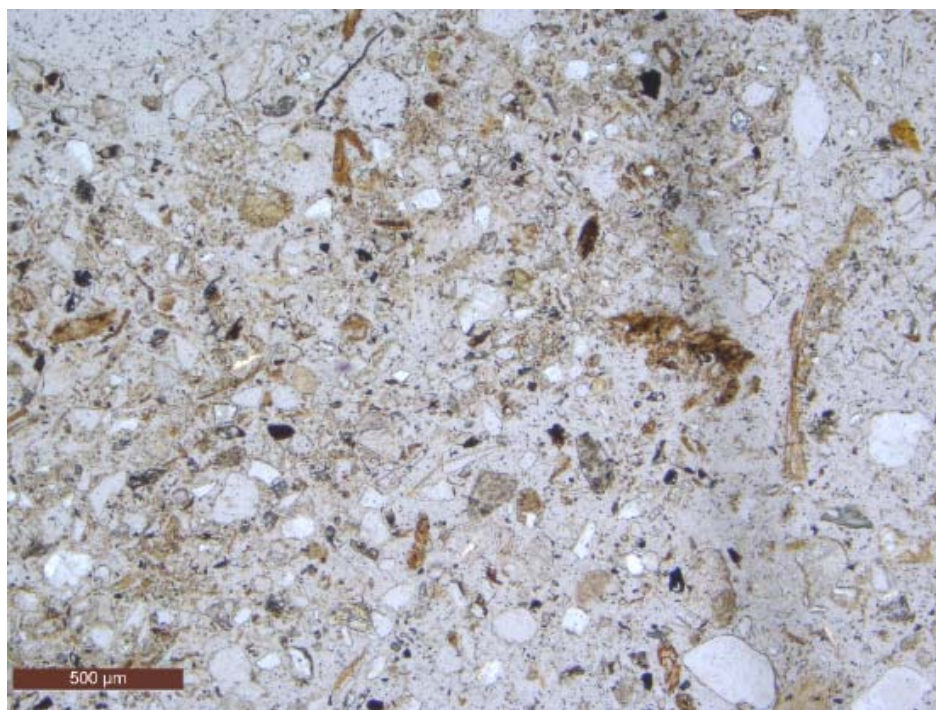


Рисунок В.2 – Первая терраса, о. Буор-Хая. Не затапливаемая территория. Микростроение почвенной массы представлено плохо сортированным песком с кольцевым типом ориентации, что указывает на влияние реки. Присутствуют крупные растительные остатки

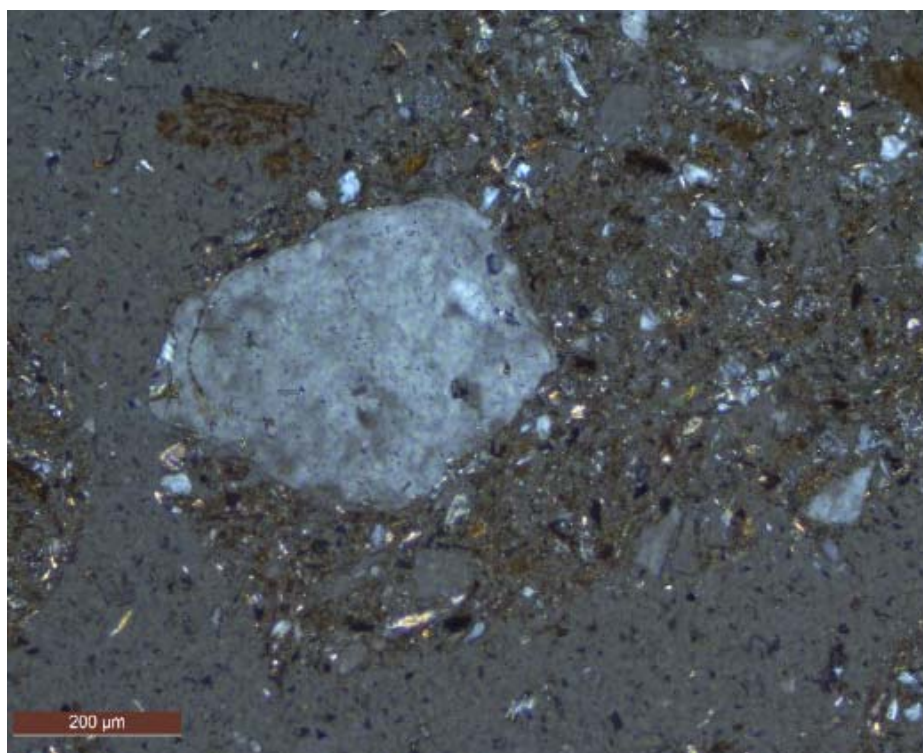
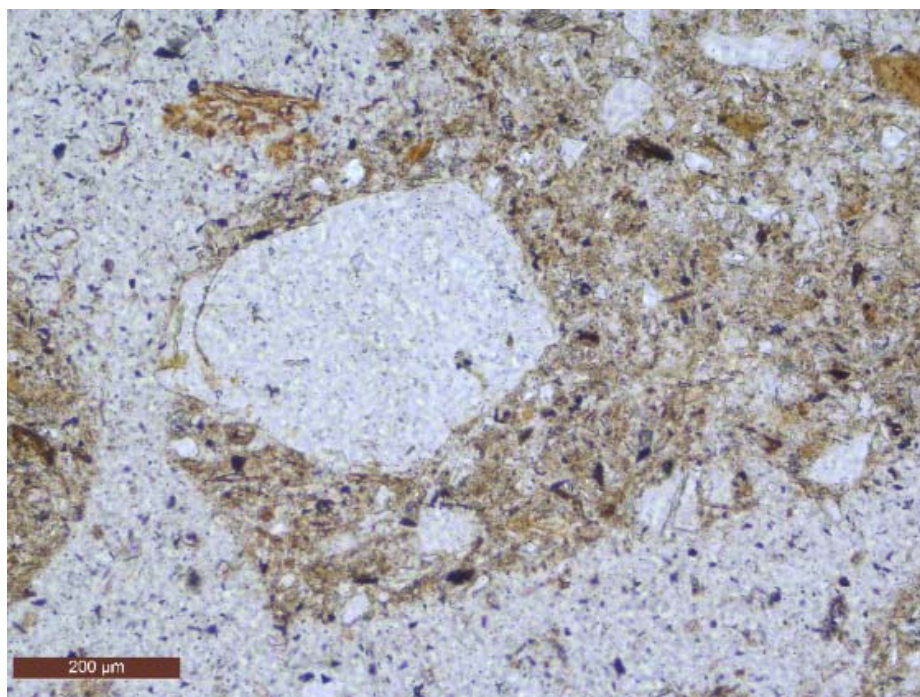


Рисунок В.3 – Первая терраса, о. Ивовый. Периодически затапливаемая территория. Наличие биогенных агрегатов, которые состоят из органических тонкодисперсных материалов, инкорпорированных в минеральную матрицу ПОЧВЫ

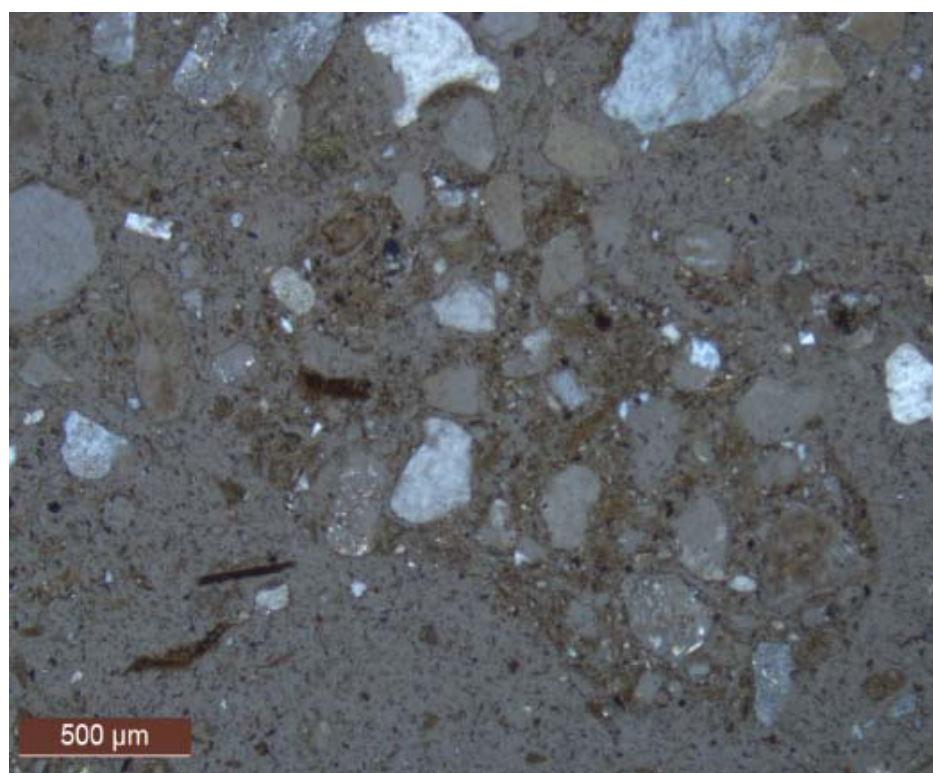
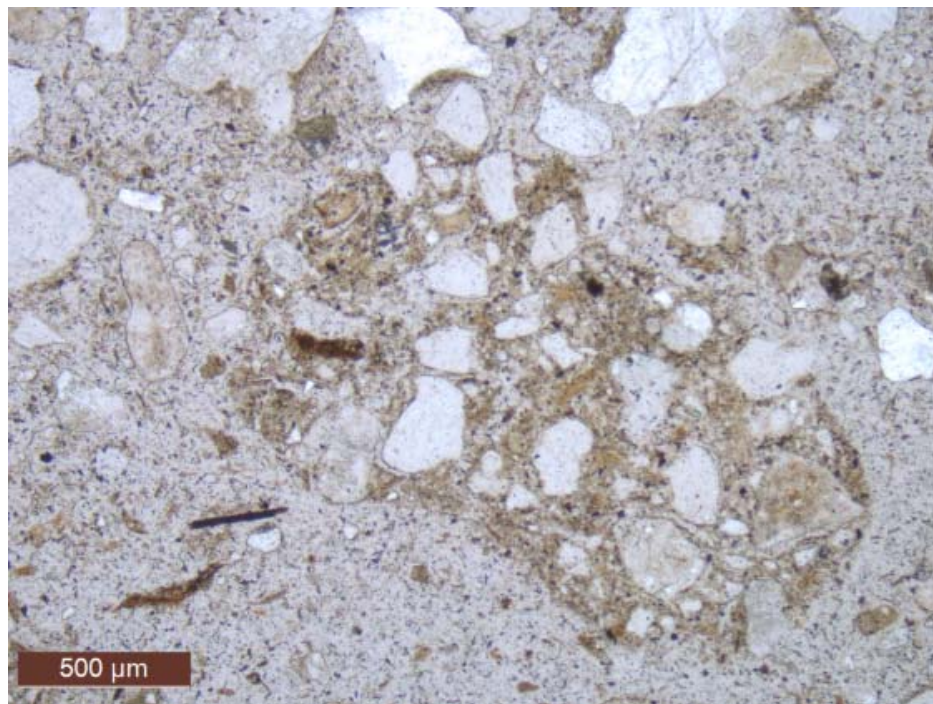


Рисунок В.4 – Третья терраса, о. Курунгнах. Органоминеральные отложения ледового комплекса. Наличие биогенных агрегатов, которые состоят из органических тонкодисперсных материалов, инкорпорированных в минеральную матрицу почвы. Встречаются мелкие аморфные органические остатки

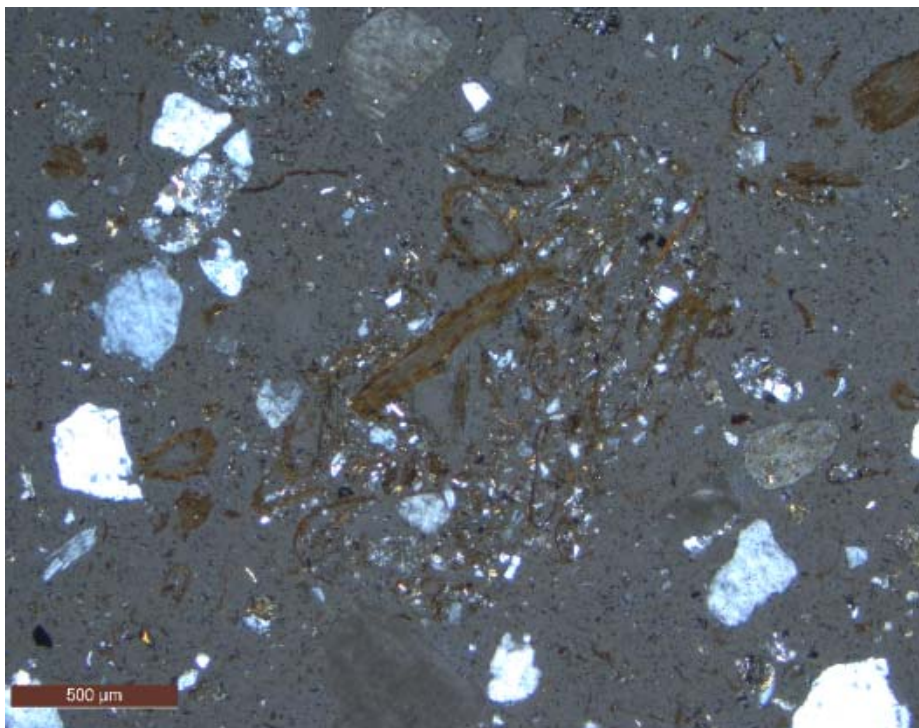
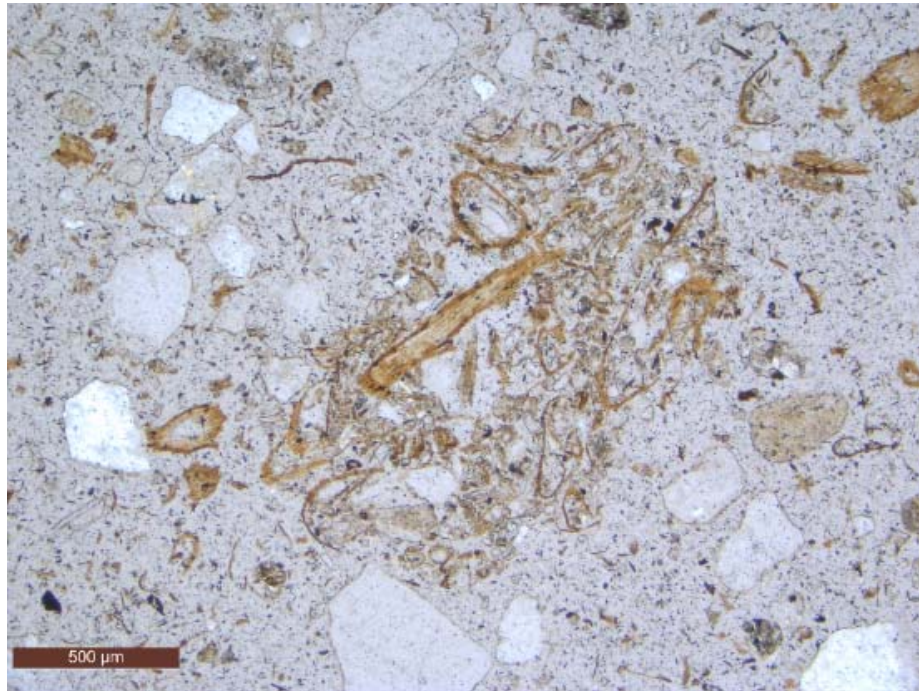


Рисунок В.5 – Третья терраса, о. Курунгнах. Вытаявший материал из ледового комплекса, находится на берегу реки. Наличие биогенных агрегатов, которые состоят из органических материалов разной степени трансформации, инкорпорированных в минеральную матрицу почвы. Большое количество слабо-трансформированного кварца

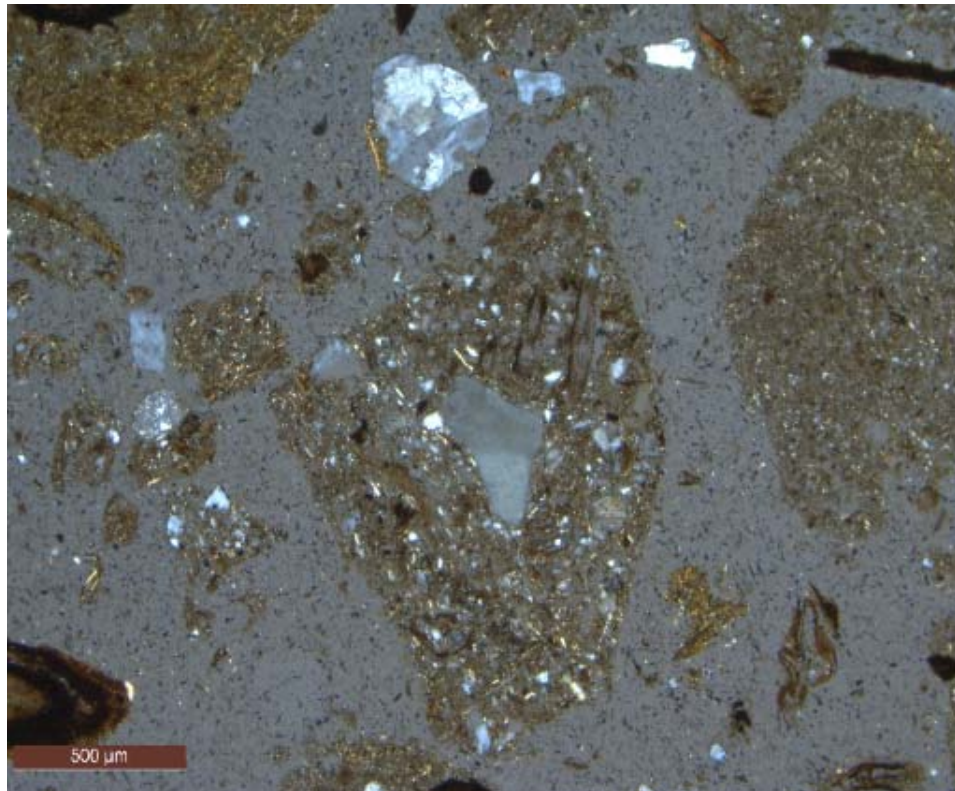
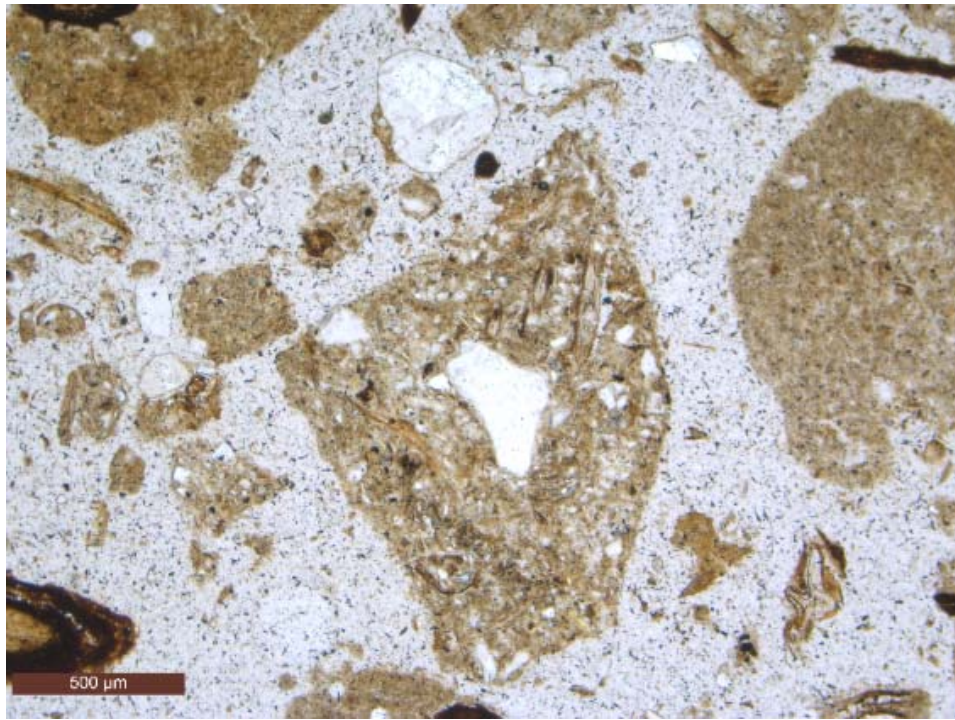


Рисунок В.6 – Третья терраса. О. Курунгнах. Эрозионный берег острова. Наличие биогенных агрегатов, которые состоят из органических тонкодисперсных материалов вокруг минеральных зерен кварца

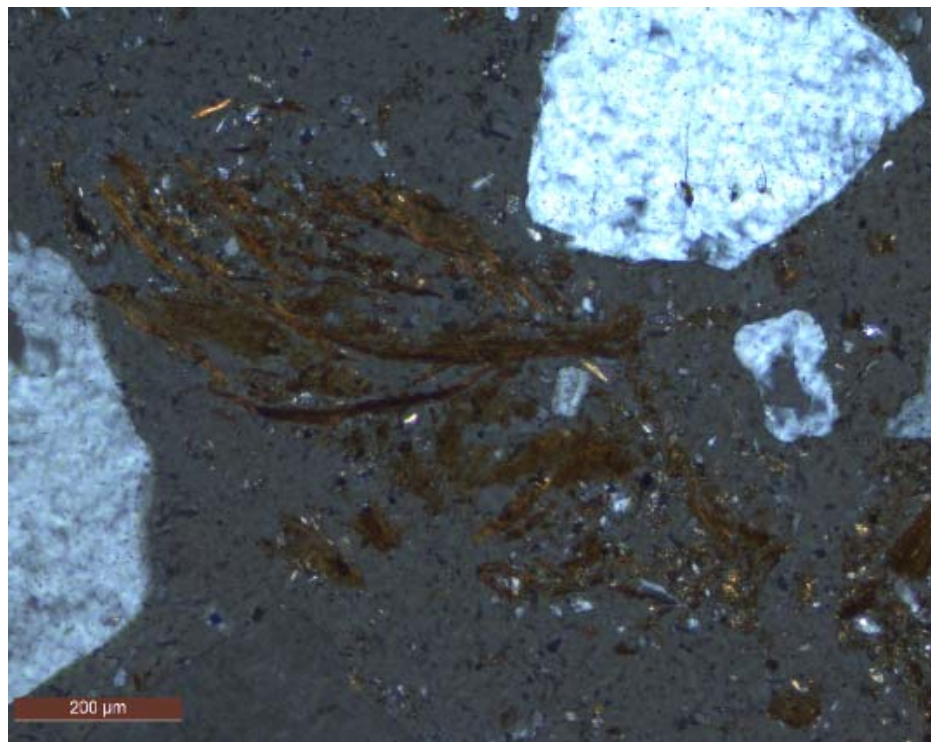
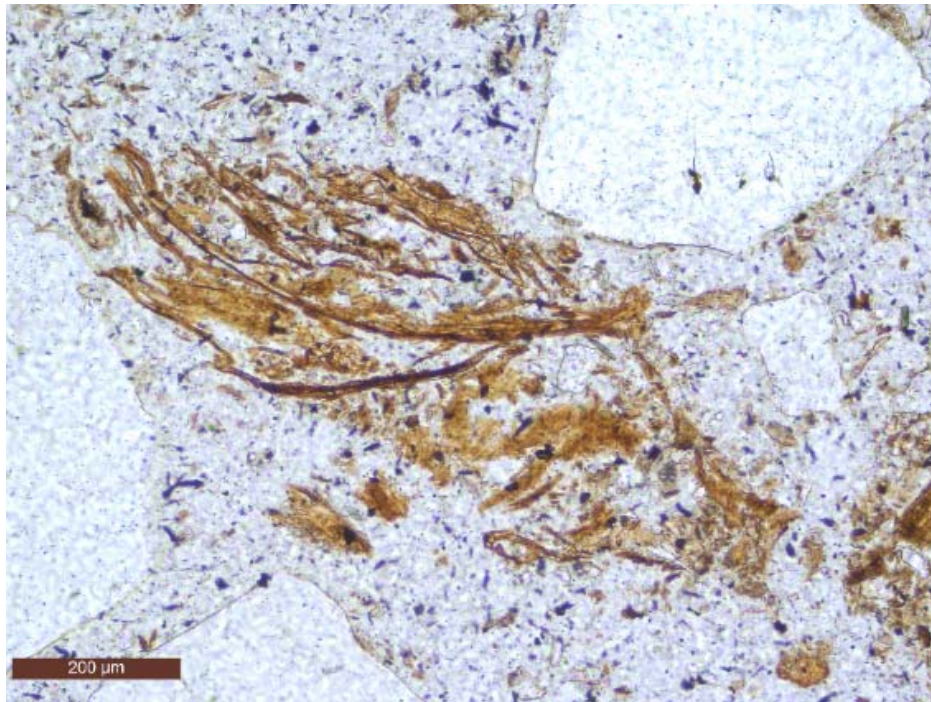


Рисунок В.7 – Первая терраса, о. Чай-Ары. Не затапливаемая территория. Криогенный горизонт CR (10–37 см). Серый, суглинистый, непрочнокомковатая структура, признаки ожелезнения, включения галечника, линзы песка. Микростроение представлено плохо сортированным песком с кольцевым типом ориентации, встречаются крупные аморфные растительные остатки

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

13С-ЯМР спектры ГК, извлеченных из почв остров Самойловский

Таблица Г.1 – Описание исследуемых ГК, извлеченных из верхних гумусово-аккумулятивных горизонтов почв о. Самойловский

№	Описание почвенного горизонта	Растительное сообщество	Название почвы
S1-1	Незатапливаемая территория, первая терраса. Серый, включения слабо трансформированных растительных остатков, супесчаный, комковатая структура,	Кустарничково-мохово-осоковая тундра (<i>Sphagnum sp.</i> , <i>Carex aquatilis</i> , <i>Salix glauca</i>)	Криозем серогумусовый на аллювиальных песках
S1-2	Незатапливаемая территория, первая терраса. Серый, включения слабо трансформированных растительных остатков, легкий суглинок, признаки ожелезнения, плитчатая структура.	Кустарничково-мохово-осоковая тундра (<i>Sphagnum sp.</i> , <i>Carex aquatilis</i> , <i>Salix glauca</i>)	Криозем грубогумуссированный на аллювиальных песках
S1-6	Незатапливаемая территория, первая терраса. Серый, супесчаный, плотный,	Кустарничково-мохово-осоковая тундра (<i>Sphagnum sp.</i> ,	Криозем оглееный на аллювиальных песках

	бесструктурный, включения корней.	<i>Carex aquatilis</i> , <i>Salix glauca</i>)	
S1-7	Незатапливаемая территория, первая терраса. Серый, ожелезненный, включения слабо трансформированных растительных остатков, супесчаный, включения корней.	Кустарничково-мохово-осоковая тундра (<i>Sphagnum sp.</i> , <i>Carex aquatilis</i> , <i>Salix glauca</i>)	Криозем грубогумуссированный на аллювиальных песках
S2-1	Периодически затапливаемая территория, первая терраса. Темный, супесчаный, непрочнокомковатая структура, корни.	Травяно-мохово-лишайниковая тундра (<i>Cetraria nivalis</i> , <i>Sphagnum</i> , <i>Carex aquatilis</i>)	Криозем серогумусовый на аллювиальных песках
S2-2	Периодически затапливаемая территория, первая терраса. Серый, супесчаный, бесструктурный, включение растительных остатков различной степени разложения, включения корней.	Травяно-мохово-лишайниковое болото (<i>Cetraria nivalis</i> , <i>Sphagnum</i> , <i>Carex aquatilis</i>)	Криозем серогумусовый на аллювиальных песках

S2-5	Периодически затапливаемая территория, первая терраса. Серый, супесчаный, бесструктурный, включение растительных остатков различной степени разложения, включения корней.	Травяно-мохово- лишайниковое болото (<i>Cetraria</i> <i>nivalis</i> , <i>Sphagnum</i> , <i>Carex aquatilis</i>)	Криозем серогумусовый на аллювиальных песках
------	---	---	--

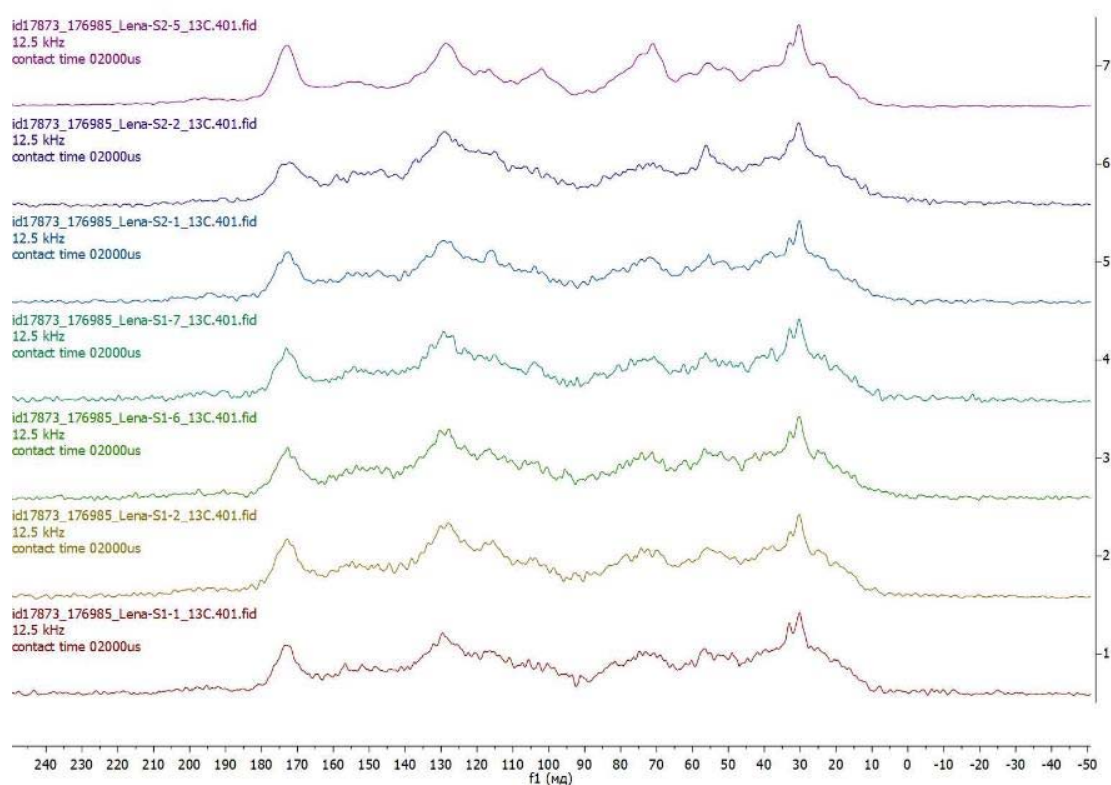


Рисунок Г.1 – ¹³C ЯМР спектры ГК извлеченных из верхних гумусо-аккумулятивных горизонтов почв о. Самойловский

Таблица Г.2 – Содержание структурных фрагментов в исследованных образцах ГК из почв о.Самойловский

№ пробы	Химические сдвиги, %								AR, %	AL, %
	0–46	46–60	60–105	105–144	144–164	164–183	183–190	190–204		
S1-1	26	10	21	28	8	7	0	0	36	64
S1-2	22	9	21	29	8	9	1	1	37	63
S1-6	25	10	21	29	8	7	0	0	37	63
S1-7	25	9	21	29	8	8	0	0	37	63
S2-1	25	9	21	28	8	8	0	1	36	64
S2-2	25	10	20	31	8	7	0	0	39	61
S2-5	23	9	25	25	7	10	0	1	32	68

Примечание. AR – сумма ароматических фрагментов; AL – сумма алифатических фрагментов