

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Федеральный исследовательский центр  
комплексного изучения Арктики имени академика Н.П. Лавёрова  
Уральского отделения Российской академии наук  
(ФГБУН ФИЦКИА УрО РАН)

*На правах рукописи*

**Орлов Александр Сергеевич**

**Влияние физико-химических условий на накопление и распределение  
радионуклидов в торфяных залежах Архангельской области  
(на примере Иласского болотного массива)**

Специальность: 1.6.4. – Минералогия, кристаллография.  
Геохимия, геохимические методы поисков полезных ископаемых

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата геолого-минералогических наук

Научный руководитель:  
кандидат геолого-минералогических наук  
Яковлев Евгений Юрьевич

Архангельск – 2024

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА.....	13
1.1 Распространение и геохимические функции болотных экосистем на Европейском Севере России .....	13
1.2 Источники радиационного загрязнения Европейского Севера России.....	19
1.3 Современное представление о торфяной залежи, как о геохимическом барьере.....	22
1.4 Основные физико-химические показатели состояния торфяных залежей.....	26
1.5 Краткие сведения о свойствах некоторых природных и техногенных радионуклидов.....	35
1.6 Разработанность темы исследования.....	41
2 ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	44
2.1 Обоснование и описание района и объектов исследования.....	44
2.2 Описание методик исследования.....	51
2.2.1 Отбор и подготовка к исследованию проб торфа.....	51
2.2.2 Определение Eh, pH и минерализации в торфяной залежи...	53
2.2.3 Определение структуры и степени разложения торфа.....	54
2.2.4 Определение влажности, насыпной плотности и плотности сложения торфа.....	54
2.2.5 Определение содержания водорастворимых солей, активной и обменной кислотности торфа.....	55
2.2.6 Определение зольности, органического вещества и потерь при прокаливании в торфе.....	56
2.2.7 Определение группового химического состава торфа.....	57
2.2.8 Определение содержания С, Н, N и О в торфе.....	58
2.2.9 Определение содержания макроэлементов (Fe, Mn, Al, Na, К, Mg и Са) в торфе.....	58

2.2.10	Определение радионуклидов $^{137}\text{Cs}$ и $^{241}\text{Am}$ в торфе.....	59
2.2.11	Определение радионуклида $^{210}\text{Pb}$ в торфе.....	59
2.2.12	Определение изотопов $^{234}\text{U}$ и $^{238}\text{U}$ в торфе.....	61
2.2.13	Датирование торфяных отложений по изотопу $^{210}\text{Pb}$ .....	62
2.2.14	Моделирование вертикальной миграции и оценка связывания $^{137}\text{Cs}$ торфом.....	63
2.2.15	Методы статистической обработки данных.....	65
3	ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	66
3.1	Физические, химические и физико-химические параметры залежей.....	67
3.2	Распределение Fe, Mn, Al, Na, K, Mg и Ca в залежах.....	78
3.3	Активности и распределение искусственных ( $^{137}\text{Cs}$ , $^{241}\text{Am}$ ) и естественных ( $^{210}\text{Pb}$ , $^{238}\text{U}$ и $^{234}\text{U}$ ) радионуклидов в залежах .....	81
3.4	Моделирование вертикальной миграции $^{137}\text{Cs}$ в залежи.....	89
3.5	Связывание $^{137}\text{Cs}$ торфом в статических условиях.....	91
3.6	Связь активностей радионуклидов в торфе с физико-химическими условиями.....	93
4	ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ И РЕКОМЕНДАЦИИ.....	100
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	102
	СОКРАЩЕНИЯ.....	105
	СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	106
	ПРИЛОЖЕНИЕ А.....	131
	ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	136
	ПРИЛОЖЕНИЕ В.....	138
	ПРИЛОЖЕНИЕ Г.....	141
	ПРИЛОЖЕНИЕ Д.....	142
	ПРИЛОЖЕНИЕ Е.....	148

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы исследования.** Болотные экосистемы занимают огромные площади (до 30% от территорий Российской Арктики) и являются основными биоценозами Европейского Севера России (Сирин, 2017). Верховые (омбротрофные) торфяники, в связи с преимущественным атмосферным питанием, с одной стороны являются уникальными экологическими архивами, исследование которых дает ценную информацию для понимания прошлых экологических и климатических событий, а с другой стороны содержат данные об антропогенных загрязняющих нагрузках, связанных с накоплением широкого спектра атмосферных загрязнителей (Межибор, 2009; Шевченко и др., 2015; Savichev et al., 2020). Торфяные залежи, как неотъемлемый компонент болотных экосистем, стали основными концентраторами техногенной радиоактивности, поступившей на поверхность Земли с начала атомной эры (Mroz et al., 2017; Roux, Marshall, 2011; Yakovlev et al., 2021). Особенно остро эта проблема стоит для Архангельской области, где в 60-е гг. XX в. на территории о. Новая Земля проводились масштабные ядерные испытания, в результате которых в окружающую среду поступило значительное количество радиоактивных материалов. Ряд выпавших на поверхность торфяников радионуклидов оказался зафиксирован органическими и минеральными компонентами торфа в толще залежей болотных массивов. Депонированные в северных торфяниках радионуклиды вызывают озабоченность как с точки зрения повышения дозовых нагрузок на биоту торфяно-болотных экосистем, так и требуют проявления осторожности при хозяйственном использовании торфа, например, в качестве удобрений или топлива (Helariutta et al., 2000). В связи с глобальным потеплением климата и возрастающей техногенной нагрузкой на болотные экосистемы, связанной с курсом государственной политики, направленным на активное освоение Арктических территорий и в том числе Архангельской области (Указ Президента..., 2020), значительно меняются

гидрологические (Пономарева, 2022) и физико-химические характеристики торфяных отложений. Такое изменение физико-химических параметров и условий торфяных залежей может послужить причиной миграции зафиксированных ими радионуклидов, что создает дополнительные экологические риски. При этом структура связей между гидрологическим режимом, физико-химическими и радиационными параметрами бореальных верховых торфяников является очень сложной и до конца не изучена, а представленные в литературе результаты весьма противоречивы. Они ограничиваются в основном изучением вертикального распределения радионуклидов в залежах болот северной части Западной Европы в контексте исторических поступлений (Fialkiewicz-Koziel et al., 2020; Lokas et al., 2014; Mroz et al., 2017; Roux, Marshall, 2011), торфяников Западной Сибири (Межибор, 2009). Для Северо-Западной части РФ, а в частности для Архангельской области, исследования такого рода практически вовсе отсутствуют (Яковлев, 2024). Поэтому получение новых знаний о физико-химическом режиме торфяных залежей данных территорий и изучение его влияния на особенности иммобилизации и перераспределения радионуклидов в торфяных отложениях под действием ряда негативных факторов естественного и антропогенного генезиса является актуальной задачей, составляющей суть данного диссертационного исследования.

**Объект исследования** – торфяные залежи Иласского болотного массива Архангельской области и их основные компоненты - торф и болотные воды.

**Предмет исследования** – физические, химические, физико-химические и радиационные параметры торфяных залежей, их связь с гидрологическим режимом; влияние физико-химических параметров на накопление и распределение радионуклидов в торфяных залежах Иласского болотного массива.

**Цель исследования.** Оценка влияния основных физико-химических параметров торфяных залежей на накопление и особенности распределения

радионуклидов в торфяно-болотных экосистемах Архангельской области (на примере Иласского болотного массива).

**Задачи исследования:**

1. изучить особенности изменения основных физических, химических и физико-химических параметров по вертикальному профилю залежей естественного, осушенного и постмелиоративно заболоченного участков верхового болота;
2. оценить активности техногенных ( $^{241}\text{Am}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ) и естественных ( $^{238}\text{U}$ ,  $^{234}\text{U}$  и  $^{210}\text{Pb}$ ) радионуклидов, и их распределение в профилях исследуемых залежей;
3. на основе полученных экспериментальных данных выявить связи между физико-химическими и радиационными параметрами исследуемых залежей с разной степенью осушения;
4. с помощью модельного эксперимента оценить подвижность  $^{137}\text{Cs}$  в торфяной залежи и изучить особенности его связывания верховым торфом и его компонентами;
5. на основании полученных геохимических результатов дать оценку изменения радиэкологической обстановки в пределах торфяно-болотных экосистем под влиянием природных и антропогенных факторов и дать рекомендации по природосберегающему освоению и использованию болотных экосистем Северо-Запада РФ.

**Научная новизна работы.** Научная новизна исследования состоит в получении новых данных о накоплении, распределении и миграции радионуклидов в верховых торфяниках южноприбеломорского типа с учетом влияния физико-химических условий залежи. Впервые построены и охарактеризованы профили вертикального распределения радионуклидов с учетом особенностей изменения основных физических, химических и физико-химических параметров для естественных и антропогенно нарушенных (осушенных) залежей верхового бореального болота на примере Иласского болотного массива Архангельской области. На основе

экспериментальных данных, полученных в результате проведения комплекса натуральных и модельных исследований, для исследуемых объектов выявлена структура связей между гидрологическим режимом, физико-химическими и радиационными параметрами.

#### **Теоретическая и практическая значимость исследования.**

Теоретическая и практическая значимость исследования заключаются в том, что полученные в ходе выполнения работы экспериментальные результаты могут служить фундаментальной основой прогнозирования изменения радиоэкологической обстановки в пределах торфяно-болотных экосистем под воздействием природных и антропогенных факторов. Оценка влияния физико-химических параметров на накопление, распределение и вертикальную миграцию природных и техногенных радионуклидов в торфяных отложениях является важной для моделирования процессов перераспределения радиоактивных веществ и их воздействия на биоту в природных ландшафтах материковой субарктики России. Исследования по теме диссертации направлены на решение фундаментальной проблемы геохимии радиоактивных элементов, связанной с изучением особенностей (процессов, механизмов и скоростей) накопления и миграции радионуклидов в бореальных верховых торфяниках южноприбалтийского типа. Полученные результаты могут служить научной основой для анализа источников загрязнения, разработки моделей миграции радиоизотопов в окружающую природную среду, оценки степени воздействия ионизирующего излучения на живые организмы, оценки особенностей диагенеза органического вещества и динамики торфонакопления. Результаты исследования физико-химических и радиационных параметров естественного и подверженных осушению участков позволили сформулировать ряд рекомендаций для природосберегающего освоения и использования болотных экосистем арктической зоны РФ.

**Методология и методы исследования.** В данной работе были использованы традиционные и современные методы (гравиметрический

метод, прямая потенциометрия и кондуктометрия, микроскопия в проходящем свете, атомно-абсорбционная спектроскопия, термическое разложение с детектированием продуктов и др.), широко применяемые в области химии и физики торфа, так и современные методы радиоэкологии (гамма-спектрометрия, альфа-спектрометрия с радиохимической подготовкой). Использование этих методов, наряду со статистической обработкой и анализом полученных экспериментальных данных обеспечивают достоверность представленных в работе результатов.

Для выявления связей между физико-химическими параметрами и распределением активностей выбранного ряда радионуклидов в торфяных разрезах исследуемых участков в данной работе использовали парный корреляционный анализ. Для оценки значимых отличий между участками с разным гидрологическим режимом по анализируемым показателям применяли тест Манна-Уитни. Также выполнен факторный анализ, который позволил выявить структуру связей между изученными в диссертационной работе физическими, химическими, физико-химическими и радиационными параметрами торфяных залежей.

Статистическая обработка данных и построение графиков проводились с использованием программного пакета Microsoft Excel и Origin Pro 9.9.0.225, Version 2022 (OriginLab Corporation, USA).

**Материалы исследования.** В основу диссертационной работы положены результаты экспедиционных и экспериментальных работ Лаборатории болотных экосистем Института экологических проблем севера и Лаборатории экологической радиологии Института геодинамики и геологии им. Ф.Н. Юдахина Федерального исследовательского центра комплексного изучения Арктики имени академика Н.П. Лавёрова Уральского отделения Российской академии наук. Работы выполнялись в рамках следующих научных направлений, проектов и грантов:

1. Тема ФНИР «Особенности функционирования болотных экосистем Арктической зоны РФ», рег. № АААА-А18-118012390224-1;

2. Тема ФНИР «Особенности образования и диагенеза органического вещества в условиях водно-болотных экосистем Арктической зоны РФ» рег. № 122011400386-6;

3. Грант РФФИ 22-27-20085 «Исследование роли физико-химических условий в процессах накопления и миграции радионуклидов атмосферных выпадений в торфяных залежах Европейского Севера России (на примере Архангельской области);

4. Грант Президента МК-4298.2022.1.5 «Совершенствование методики датирования торфяных отложений по неравновесному свинцу  $^{210}\text{Pb}$ ».

#### **Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Преобразование торфяной залежи верхового болота южноприбалтийского типа в ходе осушения сопровождается значимыми изменениями физических и физико-химических параметров торфяных отложений, что способствует перераспределению золообразующих элементов в приповерхностном слое мощностью 25-30 см.

2. Трансформация гидрологического режима торфяных залежей ведет к изменению активностей, вертикального распределения техногенных  $^{241}\text{Am}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  и естественных  $^{238}\text{U}$ ,  $^{234}\text{U}$ ,  $^{210}\text{Pb}$  радионуклидов, что выражается в смещении и локализации зоны их концентрирования к поверхности торфяника. Изменение физико-химических условий, как результат трансформации гидрологического режима в ходе осушения залежей, усиливают связывание радионуклидов торфом.

3. Распределение радионуклидов в торфяной залежи в основном контролируется окислительно-восстановительными и кислотно-основными условиями при подчиненном влиянии зольных элементов и водорастворимых солей.

**Степень достоверности и апробация результатов исследования.** Диссертационная работа является результатом проведения ряда натурных исследований, выполненных на реальном объекте – верховых торфяниках

европейского Севера РФ, и модельных исследований, с участием их отдельных элементов – торфа и болотной воды, с использованием классических и современных методов физико-химического и радиоэкологического анализа по аккредитованным методикам. Достоверность полученных результатов обусловлена также использованием математической и статистической обработки экспериментальных данных.

Основные результаты диссертационной работы были представлены на 9 научных конференциях международного и всероссийского уровня: Международная конференция «X Галкинские чтения», г. Санкт-Петербург, 4-6 февраля 2019 г.; Всероссийская конференция с международным участием «Глобальные проблемы Арктики и Антарктики», г. Архангельск, 2-5 ноября 2020 г.; VI Международный полевой симпозиум «Западно-Сибирские торфяники и цикл углерода: Прошлое и настоящее», г. Ханты-Мансийск, 28 июня-7 июля 2021 г.; Конференция Генеральной ассамблеи Европейского союза наук о Земле «General Assembly 2020 of the European Geosciences Union», г. Вена, Австрия, 19-30 апреля 2021 г.; V Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием «Экология и управление природопользованием», г. Томск, 26 ноября 2021 г.; Пятый Международный молодежный научно-практический форум «Нефтяная столица», г. Сургут, 23-24 марта 2022 г.; Международная научная конференция «Радиобиология и экологическая безопасность – 2022», г. Гомель, Белоруссия, 26-27 мая 2022 г.; XI Российская молодёжная научно-практическая Школа «Новое в познании процессов рудообразования», г. Москва, 28 ноября-2 декабря 2022 г.; Международная научная конференция «Радиобиология и экологическая безопасность – 2023», г. Гомель, Белоруссия, 25-26 мая 2023 г.

По теме диссертации опубликована 21 научная работа, в том числе в журналах из списка ВАК – 5 публикаций; в изданиях, рецензируемых в базах данных Web of Science и Scopus – 6 публикации; в других изданиях – 10 публикаций.

**Личный вклад автора.** Автор принимал непосредственное участие в организации и проведении 20 полевых выездов в район проведения исследований, выполнении комплексного описания тестовых площадок, отборе натурального материала – 140 образцов торфа и 95 проб болотной поровой воды, измерении физико-химических параметров (рН, Eh и минерализации) торфяных залежей в полевых условиях. В рамках экспериментальной работы выполнена пробоподготовка торфа для оценки физических, химических, физико-химических и радиационных параметров. Осуществлено моделирование связывания радионуклидов торфом в лабораторных и природных условиях. Проведена оценка влажности, насыпной и истинной плотности, кислотно-основных условий, зольности, потерь прокаливания и группового химического состава органического вещества торфа. Автором выполнен поиск и обобщение литературных источников по тематике исследования, проведена статистическая обработка экспериментальных данных и анализ связей между физико-химическими и радиационными параметрами торфяных залежей, сформулированы выводы и практические рекомендации.

**Соответствие диссертации паспорту специальности.** В работе изучаются основные физические, химические и физико-химические параметры и особенности их изменения по вертикальному профилю торфяных залежей бореального верхового болота в естественном и антропогенно нарушенном состоянии. Выполнена оценка активности ряда радионуклидов ( $^{241}\text{Am}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{234}\text{U}$  и  $^{210}\text{Pb}$ ) и их распределение в профилях исследуемых залежей. С привлечением статистических методов анализа выявлены связи между физико-химическими и радиационными параметрами участков омбротрофного торфяника с естественным и трансформированным в результате осушения гидрологическим режимом. На примере  $^{137}\text{Cs}$  выполнено моделирование миграции техногенных радионуклидов по профилю залежи и оценка особенностей его связывания торфом. Таким образом, работа соответствует паспорту специальности 1.6.4.

– «Минералогия, кристаллография. Геохимия, геохимические методы поисков полезных ископаемых» по направлениям исследований: п. 13, п. 15, п. 16 и п. 22 по геолого-минералогическим наукам.

**Структура и объем работы.** Диссертация изложена на 148 страницах машинописного текста и состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы (209 наименований); содержит 27 таблиц, 45 рисунков и 6 приложений.

**Благодарности.** Аспирант выражает глубокую благодарность научному руководителю, к.г.-м.н. Евгению Юрьевичу Яковлеву за консультации по теме исследования и общее руководство диссертационной работой. Заведующей лабораторией болотных экосистем ФГБУН ФИЦКИА УрО РАН, к.т.н. Светлане Борисовне Селяниной за всестороннюю поддержку и помощь в период выполнения исследований. Сотрудникам лаборатории экологической радиологии: н.с. С.Б. Зыкову за помощь и консультации по вопросам оценки исследования активности изотопов урана в пробах торфяных отложений, м.н.с. А.А. Кудрявцевой за помощь и консультации по вопросам оценки возраста торфяных кернов и скорости торфонакопления по изотопу  $^{210}\text{Pb}$ , м.н.с. А.В. Пучкову за помощь в отборе натурального материала. Сотрудникам лаборатории болотных экосистем к.х.н. И.Н. Зубову, к.с.-х.н. Т.И. Пономаревой и м.н.с. О.Н. Ярыгиной за помощь в сборе и обработке материалов по теме исследования.

## 1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА

**1.1 Распространение и геохимические функции болотных экосистем на Европейском Севере России**

Особые природно-климатические условия (низкие среднегодовые температуры, большое количество осадков и малая испаряемость), наличие многолетних мёрзлых пород и понижений рельефа, избыточное увлажнение, специфичная растительность обуславливают низкую скорость биогетрансформации органического вещества и, как следствие, преобладание заболоченных ландшафтов на территории Европейского Севера России (Штыров, 2018). Считается, что заболоченные земли сосредоточены преимущественно в северном полушарии (Северная Америка, Россия и Скандинавия) и развивались в арктическом регионе после последнего оледенения (Strack, 2008; Yu, 2012). В России болота и заболоченные земли занимают более 20 % территории (Болота и заболоченные леса..., 1999; IPS, 2020), при этом около 70 % всех болот сосредоточены на Севере страны (рисунок 1.1):

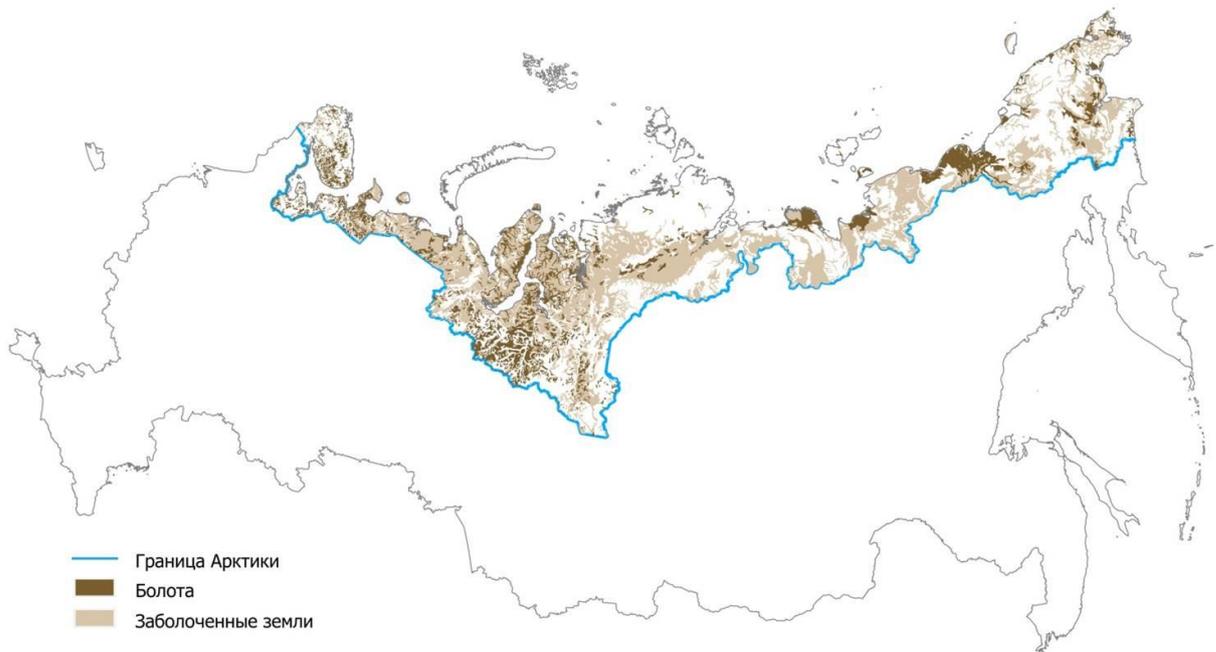


Рисунок 1.1 - Заболоченность территорий РФ в границах Арктической зоны (Сирин и др., 2017)

По оценкам последних лет (Сирин и др., 2017) заболоченность материковой части Арктической зоны РФ превышает 34 % территории. В (Экологическая реставрация..., 2016) болота также отмечаются, как одни из самых распространенных природных комплексов Европейского Севера РФ. При этом Архангельская область с общей площадью водно-болотных угодий в 5,8 млн. га занимает одно из лидирующих мест по заболоченности и запасам торфа в Северо-Западном регионе. Однако из них всего 1,2 млн. га были изучены в той или иной степени в ходе геологоразведочных работ. К преобладающему на данных территориях типу болот относятся верховые (омбротрофные) торфяники, их доля составляет 73%, а вклад болот переходного и низового типа относительно не велик и составляет 8% и 19% соответственно (Косов и др., 2007; Parfenova et al, 2016).

Необходимо отметить, что болотные экосистемы являются сложными природными объектами, изучение которых находится на стыке таких наук как биология, геология, почвоведение, гидрология, химия и т.д. Поэтому, в зависимости от целей и задач исследования болото может рассматриваться и как участок суши с избыточным увлажнением (Берг, 1947; Инишева, Березина, 2013; Цинзерлинг, 1938), и как водный объект (Герасимов, 2010; Дмитриева, 2010; Савичев, Паромов, 2014). Также болотные ландшафты часто рассматриваются как переходные природные комплексы. Контраст между водной средой и сушей на таких территориях минимален, при этом их воздействие на смежные системы (лесные, тундровые, пресноводные, морские и др.) является очень существенным. Основные компоненты болотных экосистем (специфичные флора и фауна, микробиота, водная среда, торфяные отложения и т.д.) тесно взаимосвязаны между собой, при этом изменение любого из них, вызванное природными или техногенными воздействиями, приводит к существенной трансформации всей системы, а иногда даже к смене биоценоза (Zubov et al., 2022).

С позиции системного подхода в геоэкологии болота представляют собой сложную, развивающуюся, саморегулирующуюся на высших стадиях

развития экосистему с положительным балансом органического вещества и энергии (Герасимов, 2010; Мазинг, 1994). Депонирование органического вещества происходит в виде торфа, а наличие торфяной залежи мощностью более 30 см является основным критерием, разграничивающим понятия «торфяное болото» и «заболоченные земли» (Инишева, 2009).

Современные болотные экосистемы – молодые образования с геологической точки зрения, поскольку их формирование протекало после последнего оледенения в голоцене (Инишева, 2009; Елина, Лопатин, 1987; Кац, 1971). Наиболее интенсивное заболачивание лесов и зарастание водоемов характерно для атлантического климатического периода голоцена (2500-7500 лет назад) (Нейштадт, 1957). Согласно данным (Елина и др., 2005; Юрковская и др., 1989) на современном этапе для территории северной тайги средняя скорость заболачивания составляет 300-400 м<sup>2</sup>/год из расчета на 1000 га, а скорость торфонакопления находится в интервале от 0,5 до 2,5 мм (Тюремнов, 1976; Инишева, Березина, 2013).

Функционирование болотных экосистем с одной стороны обусловлено совокупностью внешних (физико-географических и антропогенных) факторов и взаимным влиянием элементов системы, а с другой, обеспечивает многообразные функции в биосфере (Войтехов, 2012; Инишева, 2009) (рисунок 1.2). Таким образом, болота вносят заметный вклад в стабильное существование и устойчивое развитие не только близлежащих природных комплексов, но и целых регионов (Косов и др., 2007; Экологическая реставрация..., 2016). Этому следует уделять особое внимание при разработке научных основ рационального ресурсосберегающего природопользования, экологического мониторинга территории.

Болотные экосистемы играют существенную роль в геохимическом цикле элементов, поскольку наряду с органическим веществом (торфяники Северной Европы являются хранилищем около 30% мировых запасов почвенного углерода) аккумулируют значительные запасы пресной воды, за счет чего регулируют гидрологический и гидрохимический режим

прилежащих территорий (Новиков, 2009). Поэтому правильное понимание функционирования и эволюции экосистем торфяных болот, естественные процессы которых в настоящее время все больше подвержены дестабилизации из-за техногенного влияния и глобального потепления, чрезвычайно важно при оценке перераспределения потоков органического углерода в реках и океанах (Antala et al., 2022; Freeman et al., 2004; Strack, 2008).



Рисунок 1.2 - Основные функции болотных экосистем (ФНИР, 2021)

Учитывая тот факт, что верховые торфяники обладают преимущественно атмосферным питанием, а формирование торфяной залежи представляет собой достаточно медленный растянутый во времени процесс отложения прослоек торфа, они являются уникальными экологическими «архивами». Их изучение служит источником ценной информации для понимания прошлых экологических и климатических событий (Bindler et al., 2006; Linden et al., 2008; Ndiaye et al., 2022; Roux, Marshall, 2011). Последнее особенно важно в связи с растущим интересом к глобальному изменению климата (Li et al., 2019; Sun et al., 2020).

Торфяные залежи выступают в роли геохимических барьеров, принимающих активное участие в связывании токсичных элементов

(Бамбалов, 1984; Baird et al., 2010; Struyk, Garrison, 2001). Поэтому в дополнение к палеоэкологической и палеоклиматической информации, торфяники содержат данные об антропогенных нагрузках, связанных с накоплением широкого спектра атмосферных загрязнителей, таких как тяжелые металлы и различные органические загрязнители (De Vleeschouwer et al., 2007; Magiera et al., 2021; Ulyanovskii et al., 2020). С началом атомной эры на планете торфяники также начали накапливать техногенные радионуклиды и изотопы, оказавшиеся в атмосфере в ходе испытаний ядерного оружия и в результате радиационных аварий (Dowdall et al., 2005; Fialkiewicz-Koziel et al., 2014; Gwynn et al., 2004). Изучение радионуклидов, выпадающих с атмосферными аэрозолями на поверхность торфяников, является не только маркером уровня радиационного воздействия на сопряженные наземные и водные экосистемы, но и одним из наиболее важных инструментов для понимания хронологии торфообразования, изменения продуктивности торфяного месторождения с течением времени, оценки глобальных климатических изменений (Lokas et al., 2014; Mroz et al., 2017; Zhao et al., 2021).

Нарушение естественного состояния болотных экосистем, вызванное хозяйственным освоением этих территорий (например, во время осушения и строительства объектов инфраструктуры) и глобальными климатическими процессами, такими как глобальное потепление, безусловно, будет сопровождаться изменениями гидрологического режима и физико-химических параметров торфяных залежей и может вызвать экологические риски (Couture et al., 1998; Nealy et al., 2023; Jucha et al., 2022; Williamson et al., 2017). Например, торфяные залежи действуют как сложный окислительно-восстановительный, сульфидный и сорбционный геохимический барьер (Юдович, 2005; Savichev et al., 2020). Изменения окислительно-восстановительных и кислотно-основных условий могут оказывать существенное влияние на миграционную способность токсичных элементов, накопленных в торфяной залежи (Rachkova et al., 2006; Schleich et

al. 2000). Это связано как с возможностью их перехода из восстановленной формы в окисленную, так и за счет изменения сорбционных свойств и связывающей способности органоминеральной матрицы торфа (Frohne et al. 2011; Husson, 2013). При этом наибольшую опасность среди загрязняющих веществ с точки зрения химической мобилизации представляют антропогенные радионуклиды, которые обладают высокой токсичностью для биоты и человека и длительными периодами распада (Ikonen et al., 2019; MacKenzie et al., 1997; Salt, 2007). Они вызывают озабоченность как в плане увеличения дозовой нагрузки на флору и фауну болотных экосистем, так и требуют осторожности при использовании торфа в качестве сырья для химической переработки, удобрения или топлива (Helariutta et al., 2000).

Таким образом, высокая распространенность, экологическая и экономическая значимость болотных экосистем делает их одним из первоочередных объектов исследований при анализе состояния и эволюции окружающей среды под воздействием природных и антропогенных факторов. В мире ряд научных центров и институтов занимается научными исследованиями в области изучения болотных экосистем и их компонентов (IPS, 2020). Основные из них сосредоточены в России, Белоруссии, Финляндии, Швеции, Польше, Чехии, Великобритании. В числе российских следует отметить Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики УрО РАН, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Ботанический институт им. В. Л. Комарова РАН, Институт биологии Карельского НЦ РАН, Кольский НЦ РАН, Институт биологии Коми НЦ РАН, Сибирский НИИ сельского хозяйства и торфа РАН, Испытательную лабораторию «Агроэкология» ТГПУ, Восточно-Европейский институт торфяного дела ТвГУ и ряд небольших коллективов (ФНИР, 2021). В Белоруссии это Институт природопользования НАНБ и Институт радиобиологии НАНБ. Исследования радиоэкологического состояния болот Северной Европы представлены научными группами из Великобритании (Scottish Universities Environmental Research Centre),

Швеции (Department of Soil and Environment, Swedish University of Agricultural Sciences), Чехии (National Radiation Protection Institute) и Польши (Department of Nuclear Physical Chemistry, Polish Academy of Sciences).

## **1.2 Источники радиационного загрязнения Европейского Севера России**

Проблема накопления радионуклидов экосистемами Европейского Севера России стоит особенно остро, поскольку данные территории с начала атомной эры подверглись значительному радиационному прессингу (Киселев и др., 2013; Dowdall et al., 2005; Gwynn et al., 2004). Выбросу в атмосферу огромного количества радиоактивных изотопов и загрязнению арктических территорий и акваторий способствовали функционирование атомного полигона на Новой Земле, где начиная с 1955 г. было проведено 214 испытаний ядерного оружия, 87 из которых являются атмосферными и вносят наибольший вклад в загрязнение территорий. Наиболее интенсивные испытания в атмосфере приурочены к периоду 1961-1962 г. (Кубасова, 2016). Также радиационному загрязнению Северо-Западной части России способствовало проведение ядерных испытаний в глобальном масштабе, мирные ядерные взрывы в целях народного хозяйства, авария на Чернобыльской АЭС и деятельность радиохимических заводов в странах Европы (Киселев и др., 2013; MacKenzie et al., 1997). Кроме того источниками радиационного загрязнения в северном полушарии стали аварии спутников с ядерными энергетическими установками «Транзит-5В» в 1964 г. и «Космос-954» в 1978 г., в результате которых в атмосферу поступило 3,1 ТБк  $^{90}\text{Sr}$ , 3,2 ТБк  $^{137}\text{Cs}$  и 0,27 ТБк  $^{239}\text{Pu}$  (Запорожец, 2008). Потенциально опасными с точки зрения радиоэкологической безопасности на Северо-Западе России являются энергоблоки Ленинградской и Кольской АЭС, а также объекты и инфраструктура северного атомного флота (Рылов, 2008). Основные источники техногенного радиационного загрязнения в Северо-Западном сегменте РФ (Яковлев, 2024) представлены на рисунке 1.3:

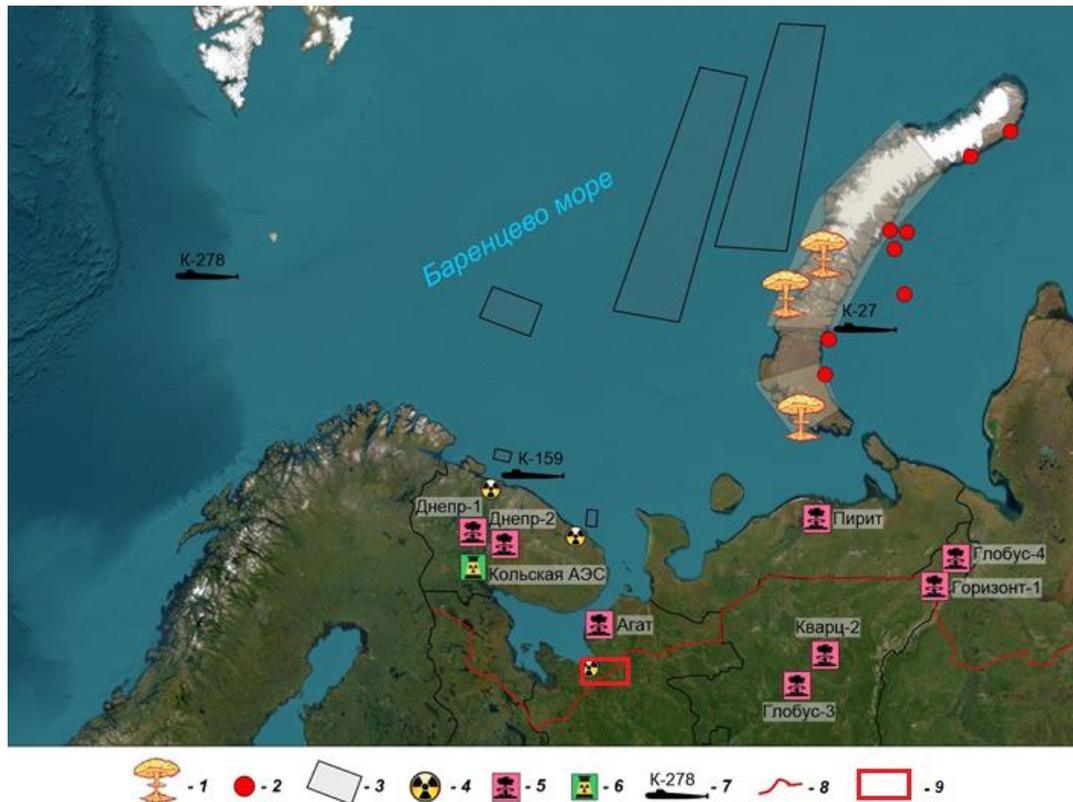


Рисунок 1.3 - Схема радиационно-опасных объектов в Северо-Западном сегменте РФ (Яковлев, 2024 с изменениями):

1 - места испытаний атомного оружия на Новой Земле: губа Черная, южный берег пролива Маточкин Шар, район полуострова Сухой Нос; 2 – места захоронения ТРО: Новоземельская впадина, заливы Новой Земли - Седова, Ога, Цивольки, Степового, Абросимова, Благополучия и Течений; 3 – места слива ЖРО в акватории Баренцева моря; 4 – базы военного и гражданского атомного флота, пункты хранения радиоактивных отходов, объекты атомного судостроения и судоремонта: район г. Мурманска, объекты Кольского залива, губа Андреева, губа Ура, Гремиха, район г. Северодвинска; 5 – ядерные взрывы в мирных целях: Днепр-1, Днепр-2, Агат, Пирит, Горизонт-1, Глобус-4; 6 – Кольская АЭС; 7 – затонувшие АПЛ с ЯЭУ: К-278 «Комсомолец», К-159, К-27 (затоплена); 8 – граница Арктической зоны Российской Федерации (согласно Указа Президента РФ от 27.06.2017 №287); 9 – район проведения исследований

Особая роль в формировании уровня загрязнения экосистем Севера России и Европы принадлежит дальнему атмосферному переносу за счет высокой стабильности и длительного нахождения мелкодисперсных радиоактивных частиц и газоаэрозолей в воздухе северных регионов (Виноградова, Пономарева, 2013; Виноградова, Котова, 2018; Шевченко и др., 2009; Щеглов, 2000). Выпадая на земную поверхность, они способствуют образованию радиоактивных следов различной протяженности и обширных областей низкоуровневого радиоактивного загрязнения. Наибольший вклад в техногенную радиационную составляющую в долгосрочной перспективе вносят, как правило, изотопы  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr}$  и трансурановые элементы. При этом

наибольшей летучестью и дальностью переноса обладает  $^{137}\text{Cs}$ . Отмечается, что его вклад в атмосферные выпадения максимален (Григорьев, 2017). Например, плотность атмосферных выпадений по  $^{137}\text{Cs}$  на территории Мурманской области после инцидента на Чернобыльской АЭС увеличилась очень существенно (на 46 % по сравнению с доаварийным уровнем) (Матишов и др., 2021).

Учитывая высокую степень заболоченности территорий Северо-Запада России и преимущественно атмосферное питание верховых торфяников (Сирин и др. 2017; Joosten et al. 2017), торфяно-болотные экосистемы стали одним из основных концентраторов радиационного загрязнения (Mroz et al., 2017). Информация о вертикальном распределении изотопов в торфяных залежах болот стран Северной Европы достаточно широко представлена в работах зарубежных исследователей. Она указывает на значимую роль омбротрофных торфяников в депонировании природных и техногенных радионуклидов и находит применение для реконструкции региональных климатических условий и загрязняющих нагрузок на торфяно-болотные экосистемы. Для  $^{137}\text{Cs}$  активность, как правило, составляет до 200-350 Бк/кг, а для  $^{241}\text{Am}$  редко превышает 5-7 Бк/кг, для  $^{210}\text{Pb}$  в среднем 250-500 Бк/кг, но иногда может достигать и до 1000-1500 Бк/кг, для  $^{238}\text{U}$  до 20 Бк/кг (Putyrskaya et al., 2020; Roux and Marshall, 2011; Schleich et al., 2000; Thomson et al., 2002). Для Европейского Севера России исследования радиоэкологического состояния экосистем сводятся в основном к оценке латерального распределения и плотности загрязнения радионуклидами. В целом для данных территорий в региональном масштабе отмечаются благоприятные радиоэкологические условия, опасного загрязнения почв техногенными радионуклидами и, в том числе  $^{137}\text{Cs}$  ( $< 0,1 \text{ Ки/км}^2$ ), не зафиксировано, за исключением некоторых локальных участков. Для  $^{137}\text{Cs}$  активность находится в пределах до 120-250 Бк/кг,  $^{241}\text{Am}$  до 4-6 Бк/кг,  $^{238}\text{U}$  до 8 Бк/кг и  $^{234}\text{U}$  до 10 Бк/кг. При этом поверхностное распределение радионуклидов не равномерно и носит мозаичный характер (Григорьев, 2017; Кубасова, 2016;

Матишов и др., 2021; Пучков, Яковлев, 2023). Стоит отметить, что применительно непосредственно к болотным комплексам Архангельской области исследования такого рода, а тем более оценка вертикального распределения с привязкой к физико-химическим условиям, почти не проводились. А радиозэкологическая и радиогеохимическая обстановка в пределах ландшафтов бореальных болот Северо-Запада России остается крайне слабо изученной (Лукошкова и др., 2021; Лукошкова и др., 2022; Yakovlev et al., 2022; Yakovlev et al., 2023).

### **1.3 Современное представление о торфяной залежи, как о геохимическом барьере**

Торфяные залежи, являясь неотъемлемым компонентом болотных экосистем, как уже упоминалось ранее (п. 1.1), могут выполнять роль сложного геохимического барьера, связывая и удерживая экотоксиканты различной природы и, в частности радионуклиды (Межибор, 2009; Юдович, 2005; Savichev et al., 2020). Согласно классификации А.И. Перельмана (Перельман, 1989; Перельман и др., 1999) такие геохимические барьеры относятся к категории физико-химических барьеров. Однако очевидно, что накопление, распределение и миграция радионуклидов в торфяной залежи не будут ограничиваться лишь их химическими взаимодействиями с органической и минеральной составляющей торфа, а во многом определяются и физическими процессами (диффузия болотных вод, криотрубация), и биогеохимической деятельностью болотной растительности и микробиоты (Olid et al., 2016). Например, в работе (Щеглов, 2000) показана существенная роль водной и биогенной миграции в распределении потоков техногенных радионуклидов в лесных экосистемах, где отмечается, что биогенная миграция играет решающую роль, а водная находится в подчиненном положении.

Изучение миграционных процессов и потоков элементов в болотных экосистемах осложняется их двойственной природой. С одной стороны

торфяная залежь (особенно ее верхний аэрируемый слой – акротелм) может рассматриваться как специфическая болотная почва (Инишева, 2009), с другой стороны содержание влаги в торфе, которое в естественном состоянии достигает 95 % (Лиштван, 1989), указывает, что с гидрологической точки зрения болото необходимо считать водным объектом (Дубах, 1944). В целом торфяная залежь может рассматриваться как особая трехфазная биокосная система, где жидкая, газообразная и твердая фазы тесно связаны между собой и взаимообусловлены.

Геохимические особенности болотных поровых вод, как среды миграции, определяются в первую очередь окислительно-восстановительными и кислотно-основными условиями, которые создаются типоморфными элементами воздушной ( $O_2$ ,  $CO_2$ ,  $H_2S$ ,  $CH_4$  и др.) и водной ( $Cl^-$ ,  $SO_4^{2-}$ ,  $HCO_3^-$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Na^+$  и др.) миграции (Геохимические барьеры..., 2002). При этом, рассматривая поведение радионуклидов в торфяной залежи с позиции почвоведения, следует уделять особое внимание сорбционным процессам, роль которых в образовании почвенных миграционных форм радиоактивных элементов и их трансформации, приводящей к потере подвижности и закреплению в твердой фазе торфа, не подлежит сомнению. Сорбционные взаимодействия ионов металлов с торфом, связанные преимущественно наличием в нем карбоксильных и фенольных гидроксильных групп, на сегодняшний день достаточно хорошо изучены. Они представляют собой специфическую адсорбцию, обусловленную внутрисферным комплексообразованием, и неспецифическую адсорбцию, обусловленную в большей степени ионным обменом, межмолекулярными и электростатическими взаимодействиями (Кузнецова, 2015). Некоторые примеры структур образующихся органоминеральных комплексов приведены на рисунке 1.4 (Попов, 2004; Anderson, 1977):

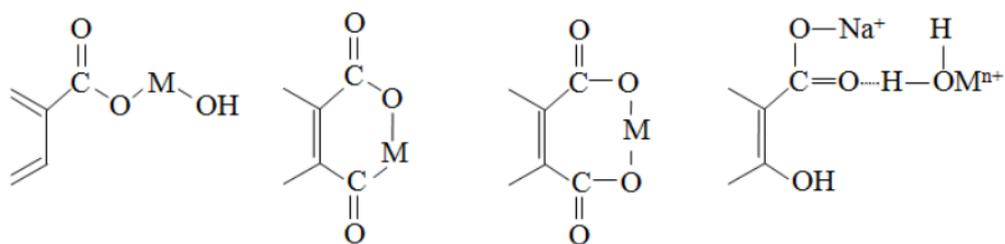


Рисунок 1.4 – Варианты структур органоминеральных комплексов (Попов, 2004; Anderson, 1977)

Результаты таких исследований находят широкое практическое применение в решении экологических проблем, например, при создании сорбционных материалов на основе торфа и его производных для очистки водных сред и почв от тяжелых металлов и нефтепродуктов (Масленников, 1994; Гамаюнов и др., 1999; Syrovetsnik et al., 2007; Кузнецова, 2015).

Миграцию радионуклидов в залежи с физико-химической точки зрения можно рассматривать как совокупность многократно повторяющихся процессов их последовательной сорбции-десорбции органической и минеральной частью торфа, которые контролируются изменением физико-химических и гидрологических условий (Рачкова, 2006). Согласно (Глазовская, 1988) торфяно-болотные почвы представляют собой сочетание нескольких подтипов физико-химических барьеров, например высокеемкого окислительного, умеренноемкого восстановительного и др., отличающихся по проницаемости и избирательности. Сочетание и контрастность геохимических барьеров в генетических горизонтах зависят в основном от окислительно-восстановительной, щелочно-кислотной, биогеохимической и сорбционно-литологической дифференциации почвенного профиля (Геохимические барьеры..., 2002). Наиболее выраженный контраст таких условий, а также подверженность сезонным климатическим флуктуациям и антропогенному воздействию, характерны для приповерхностного деятельного слоя торфяной залежи (Zubov et al. 2022), ограниченного глубиной 30-50 см, наличие которого обусловлено уровнем сезонных колебаний болотных вод (рисунок 1.5):

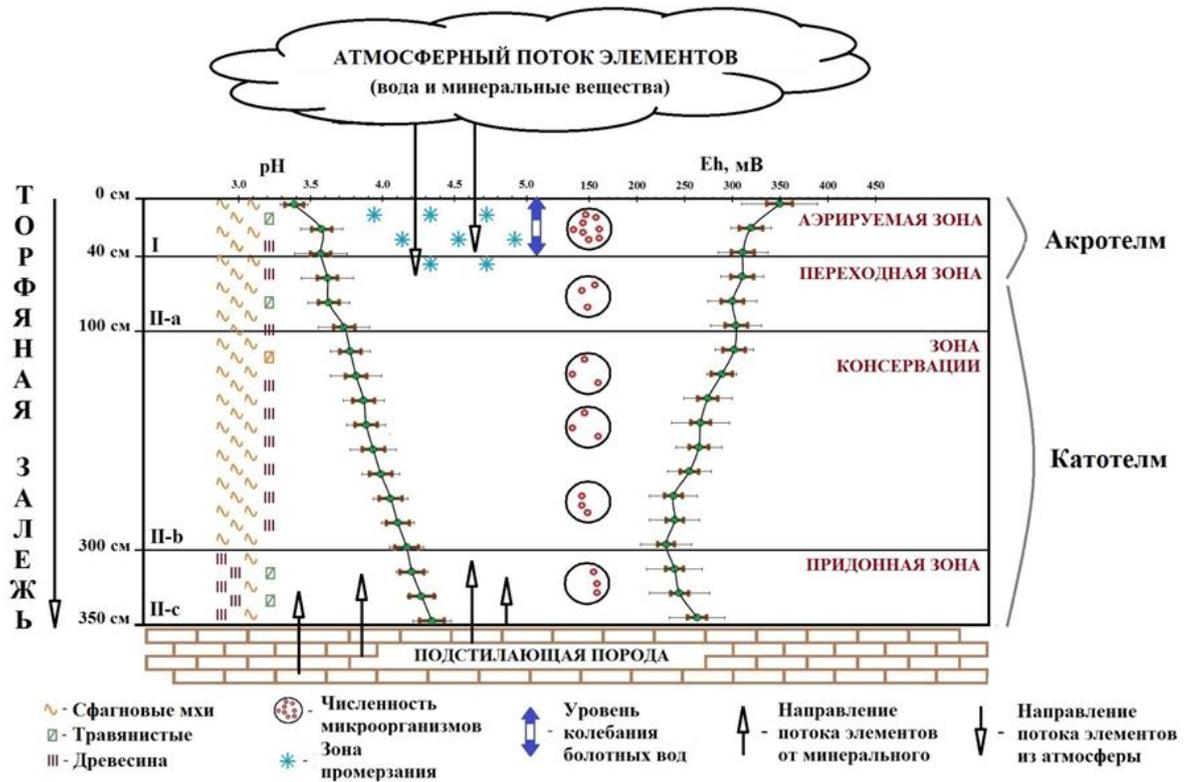


Рисунок 1.5 - Схема строения торфяной залежи верхового типа (Zubov et al. 2022)

Отмечается, что емкость поглотительного комплекса органогенных почв, и в том числе торфяно-болотных, достаточна для полного связывания радионуклидов, поступающих на поверхность болот, как правило, в микроколичествах (Кубасова, 2016; Межибор, 2009). Поэтому распределение техногенных радионуклидов на болотах носит преимущественно поверхностный характер и составляет не более 20-30 см в глубину (Кубасова, 2016). При этом иммобилизация радиоизотопов, например  $^{137}\text{Cs}$ , существенно зависит как от содержания органического вещества, так и от минерального состава (Киселев, Баженов, 2001). Кроме того, показано, что баланс лабильных и малоподвижных форм радионуклидов (например,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{241}\text{Am}$  и  $\text{U}$ ) в торфяных отложениях не постоянен во времени, происходит постепенное увеличение относительной доли более прочно связанных форм (Межибор, 2009).

Резюмируя выше сказанное, можно сказать, что геобарьерная функция болотных экосистем, обусловлена в первую очередь наличием в залежи контрастного окислительно-восстановительного и кислотного-основного режимов. Обилие в составе торфа органических соединений с большим

количеством активных функциональных групп и развитой капиллярно-пористой структурой обуславливает высокую поглотительную емкость торфяных почв к радионуклидам. При этом изучение болотных экосистем, как геохимических барьеров, является актуальной задачей при решении ряда вопросов в области геоэкологии и геохимии при разработке мер безопасности в районах, в той или иной мере подвергшихся радиационному загрязнению.

#### 1.4 Основные физико-химические показатели состояния торфяных залежей

С позиций физики и химии в естественном виде болота представляют собой относительно замкнутые дискретные системы с положительным балансом органического вещества и энергии (Бамбалов, 1984). Формирование и функционирование болотных экосистем и их компонентов обусловлены наличием целого ряда абиотических и биотических факторов (рисунок 1.6):



Рисунок 1.6 – Факторы образования и функционирования болот (Бамбалов, Ракович, 2005) среди которых ключевую роль в торфообразовательном процессе многие исследователи отводят геоклиматическим и геохимическим условиям (Бамбалов, 2005; Лиштван и др, 1989). Компоненты болотных экосистем

(специфичная флора и фауна, микробиота, торфяные отложения, водная среда) определяют существования друг друга и экосистемы в целом (Юрковская, 2018). При такой взаимообусловленности вполне закономерно, что изменение хотя бы одного из компонентов, например под влиянием внешних стрессовых воздействий, ведет к существенной трансформации всей системы.

Для характеристики состояния торфяной залежи, как неотъемлемой важнейшей компоненты болотных экосистем, в настоящее время используется достаточно широкий спектр показателей (физических, химических и физико-химических параметров). Наиболее часто рассматриваются в научной литературе такие показатели как рН, минерализация, окислительно-восстановительный потенциал, степень разложения, зольность, элементный и компонентный состав органической и минеральной части, функциональный состав и структурные особенности торфа на макро-, микро- и наноуровне (Бамбалов, 2005; Лиштван и др., 1989; Лиштван, 2010; Раковский, Пигулевская, 1978).

**Кислотность (рН)** – одна из важнейших характеристик не только торфа, но и залежи в целом. Она играет большую роль при изучении его природных особенностей генезиса, во многом определяет интенсивность микробиологической деятельности торфообразовательного процесса и в последующем при различных направлениях использования торфяных месторождений (Лиштван и др., 1989). рН наряду с другими физическими, физико-химическими и химическими параметрами, такими как зольность, плотность твердой фазы, влагоемкость и содержание азота, предлагается для классификации болот по типу питания (Аветов, 2017; Шишов и др., 2004). Кислотность торфа в первую очередь зависит от его вида и уменьшается при движении от низинных торфов к верховым. Для залежей низинного типа характерна слабокислая или нейтральная реакция среды с рН = 5,5-7,0; для переходного типа рН = 4,5-5,5; для верховых торфяников, наиболее широко представленных в таежной зоне РФ, характерна сильнокислая реакция среды

с рН = 3,0-4,5 (Хорошавин и др., 2013). Повышенная кислотность в залежах верховых болот обусловлена жизнедеятельностью специфической растительности, в особенности сфагновыми мхами (Добровольская, 2013).

**Общая минерализация** наряду с кислотностью, также является одним из критериев, который используют для градации болот по типу питания. Однако, как показали исследования последних лет, данный показатель обладает существенной сезонной изменчивостью, что затрудняет его использование для заданной цели. Для залежей низинного типа минерализация воды составляет  $> 180$  мг/л, поскольку их питание обусловлено преимущественно грунтовыми водами. Переходные комплексы, совмещающие в себе атмосферное и грунтовое питание, характеризуются более низким содержанием минеральных солей в болотных водах, которое составляет 70-180 мг/л. Залежи верховых омбротрофных торфяников отличаются наиболее низкой минерализацией болотных поровых вод  $< 70$  мг/л (Калужный, 2016; 2017; 2018).

Следует отметить, что гидрологический и гидрогеохимический фактор являются определяющим при формировании характера накопления и распределения естественных радионуклидов (U и Th) в торфяных отложениях, что хорошо видно из сравнения их средних содержаний в современных торфяниках верхового и низинного типа. Верховые торфяники, ввиду того что их питание обусловлено преимущественно за счет атмосферных выпадений, существенно беднее естественными радиоактивными элементами, чем низинные. Низинные торфяники получают и накапливают гораздо больше радиоактивных элементов, за счет подпитки минерализованными грунтовыми водами. Поэтому содержание U и Th в торфе некоторых таких месторождений может быть сопоставимо с их содержанием в углях (Арбузов, 2005; Арбузов, 2016; Водяницкий и др., 2019).

Наряду с кислотностью и минерализацией еще одной из ключевых интегральных характеристик торфяной залежи является **окислительно-**

**восстановительный потенциал ( $E_h$ )**, поскольку в формировании торфяных почв и их генетических профилей окислительно-восстановительные процессы занимают одно из ведущих мест (Лиштван и др., 1989; Лиштван, Король, 1975; Орлов и др., 2005). Величина  $E_h$  служит мерой напряженности окислительно-восстановительных процессов в торфе, его уровень отражает преобладание реакций окисления или восстановления и определяется одновременным присутствием и балансом окисленных и восстановленных форм соединений (Лиштван и др., 1989). Связь параметра  $E_h$  с содержанием окисленных и восстановленных форм соединений в торфе может быть выражена через уравнение (Tokarz, Urban, 2015):

$$E_h = E_0 + RT/nF * \ln(Ox/Red) \quad (1.1)$$

где,  $E_0$  – электродный потенциал окислительно-восстановительной системы, при условии  $Ox/Red = 1$ ;

$R$  – газовая постоянная, равная 8,314 Дж/(моль\*К);

$T$  – абсолютная температура, К;

$n$  – число электронов участвующих в реакции;

$F$  – постоянная Фарадея;

$Ox/Red$  – отношение концентрации окисленной и восстановленной форм рассматриваемого соединения в системе.

Необходимо отметить, что торф представляет собой сложную окислительно-восстановительную систему, существование которой обусловлено одновременным присутствием  $Fe^{3+} - Fe^{2+}$ ,  $Mn^{4+} - Mn^{3+} - Mn^{2+}$ ,  $SO_4^{2-} - H_2S$ ,  $CO_2 - CH_4$ ,  $NO_3^- - NO_2^- - NH_3$  и некоторых других пар окисленных и восстановленных компонентов, вследствие чего ее  $E_h$  приобретает некоторое среднее значение.

Для заболоченных почв и торфа  $E_h$  варьируется в достаточно широком диапазоне от -300 до +450/550 мВ в зависимости от глубины залегания и гидрологического режима (Inglett et al., 2005; Pezeshki, 2001; Yu et al., 2007). Изменение численных значений данного показателя может служить источником информации об экологическом состоянии торфяной залежи и ее

отдельных горизонтов, а также о протекающих процессах трансформации органического вещества и функционировании биологических сообществ (Husson, 2013; Mars, Wassen, 1999, Tokarz, Urban, 2015; Urquhart, Gore, 1973).

Согласно исследованиям (Бамбалов, 2005; Лиштван и др, 1989) уровень значений физико-химических параметров торфяных отложений, таких как кислотность, окислительно-восстановительный потенциал и минерализация, во основном определяется их гидротермическим режимом, поэтому они достаточно вариативны во времени (подвержены значительным сезонным колебаниям) и в пространстве (по вертикальному и горизонтальному профилю залежи и элементам микроландшафта – гряда, ковер, мочажина) (Generó, 2017; Zubov et al., 2022). Эти параметры контролируют энергетический и материальный баланс болотных экосистем, регулируют интенсивность трансформационных процессов органического вещества (в том числе и микробиологических), азота, фосфора, серы, макро- и микроэлементов в торфе (Глаголев и др., 2008; Порохина и др., 2015; Cambess, 1978; Kravchenko, Sirin, 2007; Limpens et al., 2008; Schuur et al., 2015). Соотношение Eh-pH в водных системах и почвах может быть наглядно представлено с помощью диаграмм Пурбе (рисунок 1.7), которые в последнее время все чаще используются для характеристики геохимических процессов (Tokarz, Urban, 2015).

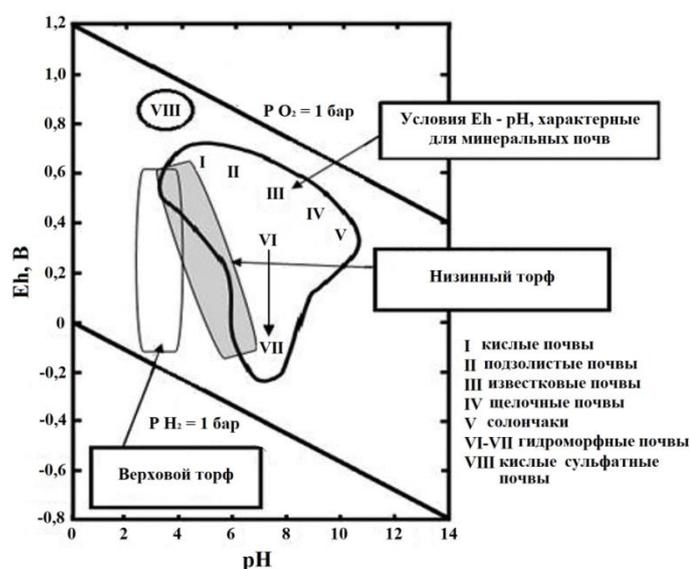


Рисунок 1.7 - Диапазоны pH и Eh в различных типах торфов и почв (Tokarz, Urban, 2015)

Отмечается существенное влияние параметров pH, Eh и минерализации на формы нахождения, аккумуляцию и миграцию химических элементов (и в частности радионуклидов) в торфяных залежах и в болотной растительности, как в естественных условиях, так и в ходе мелиоративных мероприятий (Геохимические барьеры..., 2002; Gambrell, 1994; Husson, 2013). Например, окислительно-восстановительные и кислотно-основные условия в значительной мере обуславливают накопление и распределение U в торфяных и угольных отложениях (Арбузов, 2016; Водяницкий и др., 2019).

Функционирование торфяных залежей болотных экосистем напрямую связано с комплексом взаимообусловленных химических превращений – с одной стороны, биосинтеза, а с другой, биогеотрансформации органического вещества. Поэтому еще одной важной характеристикой является *химический состав торфа*, который представлен широким спектром органических и неорганических соединений, причем доля органической части может составлять от 55 до 99 % (Раковский, Пигулевская, 1978; Томсон, Наумова, 2009; Шинкеева и др., 2009; Maryganova et al., 2013).

Химический состав и функциональная природа торфа и его компонентов, представляет собой один из важных критериев, который позволяет глубже понимать механизмы различных взаимодействий, а в частности склонность к образованию структур ассоциативной природы, сорбционных свойств и миграционной способности (Lishtvan et al., 2017). Несмотря на логичность и кажущуюся простоту, вопрос выделения отдельных групп компонентов в разных исследованиях решается не однозначно. Большинство представленных в работах отечественных и зарубежных авторов методик, направлены на фракционирование органического вещества торфа путем последовательной обработки органическими растворителями, кислотными и щелочными реагентами (Методика № 88-16365-009-2017, 2017; Lowe, 2013; Meyer, Klocking, 2013; Parfenova et al., 2016). Многообразие и лабильность компонентов органического вещества торфа в значительной мере затрудняют обнаружение

и идентификацию индивидуальных веществ. Поэтому чаще всего ограничиваются следующей градацией: битумы (экстрактивные вещества) 1-10 %, водорастворимые вещества до 2 %, гумусовые кислоты 5-35 %, клетчатка (легко- и трудногидролизуемые углеводы) до 70 % и лигнин 5-20 % от органического вещества торфа (Платонов, Горохова, 2016; Parfenova et al., 2016).

Считается, что сорбционные свойства торфа по отношению к тяжелым металлам и радионуклидам обеспечиваются такими компонентами, как гуминовые- и фульвокислоты, легкогидролизуемые вещества и лигнин (Головатый и др., 2010; Межибор, 2009). Их содержание определяется типом торфа, природными климатическими процессами, а также антропогенным влиянием, в том числе связанным с проведением осушительных работ (Татаринцева, 2023; Ronomareva et al., 2021). Связь некоторых элементов-примесей с компонентами органического вещества торфа показана на рисунке 1.8:

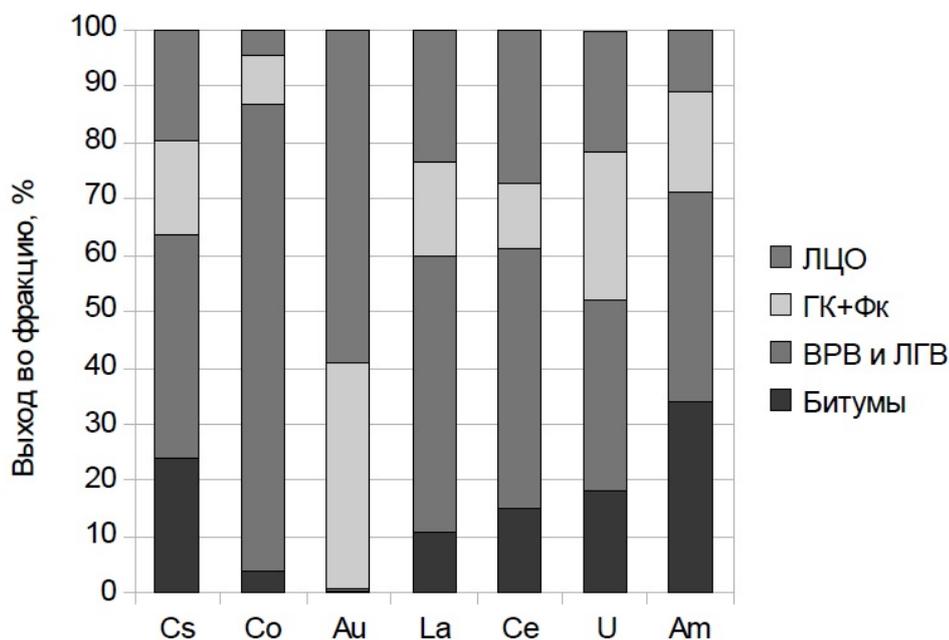


Рисунок 1.8 – Вклад компонентов органической части торфа в связывание элементов-примесей (Межибор, 2009)

исходя из чего, можно сделать вывод о том, что в торфе значительная часть цезия, урана и америция связана с водорастворимыми и легкогидролизуемыми веществами, а также гумусовыми кислотами, при этом

их существенная доля находится в ионообменной форме (Межибор, 2009). Этот факт отчасти обуславливает их потенциальную подвижность в торфяной залежи. Однако такого рода эксперимент дает лишь весьма ориентировочное представление о распределении элементов-примесей в органическом веществе торфа, поскольку выделение отдельных групп компонентов, как уже было сказано ранее, подразумевает обработку торфа растворителями различной природы в достаточно жестких условиях, что приводит к существенной трансформации его исходных свойств.

Наряду с органическим веществом, важную роль в функционировании торфяно-болотных экосистем и их компонентов играет минеральная часть. Содержание и распределение зольных элементов с одной стороны характеризует гео- и гидрохимические условия и режим питания болот (Калюжный, 2017; Юдович, 2005), с другой стороны может служить индикатором техногенной нагрузки территорий (Шевченко и др., 2015) либо природных катаклизмов, например торфяных пожаров (Хорошавин и др., 2013). Так соединения Fe, Mn и Al в заболоченных почвах, как и органические компоненты, могут выступать в качестве коллекторов радиоэлементов, например U (Рачкова, 2006). Присутствие ионов щелочных и щелочноземельных металлов:  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  и  $\text{Ca}^{2+}$  также является важным условием, поскольку они представляют собой геохимические аналоги  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  и способны ограничивать связывание этих радионуклидов твердой фазой за счет конкурентной сорбции (Strelko et al., 2015). Кроме того, присутствие в торфе частиц глинистых минералов, способствует специфическому связыванию однозарядных ионов, путем их включения в межпакетное пространство, что служит одним из механизмов прочной иммобилизации  $^{137}\text{Cs}$  (Геохимические барьеры..., 2002).

Необходимо отметить, что химический состав торфа определяется как ботаническим составом растений торфообразователей, так и степенью их биодеградации, которая обусловлена в первую очередь гидротермическими и гидрохимическими условиями залежи, задающими ход торфообразования

(Бамбалов, 2005; Лиштван, Король, 1975; Ракович, Барановская, 2005). Степень биодegradации торфа характеризуется величиной *степени разложения (R)*, которая является одной из главных и специфических характеристик торфа и которую необходимо учитывать не только при оценке состояния торфяных залежей, но и при разработке научных основ использования торфа в промышленности. Под R понимается процентное содержание в торфе темной, аморфной массы, включающей наряду с гуминовыми веществами мелкие частицы растительных тканей, утративших клеточное строение, но еще не подвергшихся гумификации (Parfenova et al., 2016). Многие физические свойства торфа такие, как водопоглощающая и водоудерживающая способность, теплопроводность, плотность, связность, прочность, пористость и фильтрующая способность напрямую связаны с R (Селянина и др., 2017).

Исследования последних лет показывают, что R – один из ключевых структурно-определяющих параметров и в значительной степени коррелирует с видом торфа (Парфенова и др., 2014; Селянина и др., 2017; Parfenova et al., 2016). Торф с позиций физики и химии представляет собой природный биокompозит и относится к гетеропористым (неоднородно-пористым) системам, включающим в себя макро- и микроструктуры. Макроструктура торфа обусловлена образующимися из растительных остатков структурами переплетения, уровень развития которых определяется глубиной биотрансформации (степенью разложения) и видовым составом торфообразователей (Лиштван и др., 1989; Копаница, Ковалева, 2013). Различают восемь основных видов структур (Лиштван и др., 1985): тонкозернистая пластичная связная структура; грубозернистая зернисто-комковатая слабосвязная структура; ленточная или ленточно-слоистая структура; войлочная структура; волокнистая структура; чешуйчато-слоистая структура; пloidчатая структура; губчатая структура.

Микроструктура торфа связана с образованием аморфных надмолекулярных структур агрегативной природы на основе гуминовых

веществ, ионов металлов и углеводного комплекса торфа, включающих также волокна, фрагменты растительных тканей разной дисперсности, битумы и минеральные включения. Элементы микроструктуры различной степени компактности (в зависимости от природы торфа, энергии и характера межмолекулярных взаимодействий) находятся в подвижном равновесии и заполняют ячейки порового пространства макроструктуры (Архипов, 2011; Лиштван и др., 1985).

Микро- и макроструктура торфа во многом определяют особенности капиллярных и диффузионных процессов, а также скорость фильтрации болотных поровых вод (как среды миграции химических элементов) в залежи.

Учитывая выше сказанное, физические, химические и физико-химические показатели можно отнести к функциональным свойствам, которые имеют временной характер и изменяются в зависимости от интенсивности воздействия множества факторов, (как природных, так и антропогенных), определяющих геохимические процессы и экологическое состояние водно-болотных экосистем (Моторин, Сивков, 2010). В частности, эти параметры могут быть информативны при оценке радиогеохимической обстановки, для понимания особенностей связывания и миграции природных и техногенных радионуклидов торфяными залежами болот.

### **1.5 Краткие сведения о свойствах некоторых природных и техногенных радионуклидов**

Несмотря на то, что процессы иммобилизации и миграции таких поллютантов, как радионуклиды, будут в значительной мере определяться физическими, химическими и физико-химическими условиями в торфяных отложениях, важную роль в этом играют также собственные индивидуальные химические, физико-химические и биогеохимические особенности каждого радиоизотопа. Поэтому далее приводится краткая характеристика исследуемых в работе радионуклидов  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{241}\text{Am}$ ,  $^{234,238}\text{U}$ ,  $^{210}\text{Pb}$ .

**Цезий-137.** Цезий относится к группе щелочных металлов, поэтому обладает высокой реакционной способностью и в виде химических соединений имеет степень окисления +1. Атомный радиус Cs равен 0,267 нм.  $^{137}\text{Cs}$  является одним из основных радионуклидов, используемых в качестве изотопного маркера при изучении торфяников (Begy et al., 2016; Kudelsky et al., 1996; Martinsson et al., 2021; Tositti et al., 2006). Его основные источники - это испытания ядерного оружия и аварийные ситуации на АЭС. Он обладает высокой летучестью, поэтому легко переноситься на большие расстояния и поступает на поверхность болот в виде радиоактивных осадков.  $^{137}\text{Cs}$  имеет относительно длительный период полураспада  $\sim 30,1$  год и самую высокую активность среди техногенных радионуклидов ( $1 \text{ Бк } ^{137}\text{Cs} = 2,3 \cdot 10^{-15} \text{ моль}$ ). Поэтому даже в ультрамалых с химической точки зрения количествах он оказывает высокую дозовую нагрузку на биоту и представляет радиологическую опасность (Hoshino, Komatsuzaki, 2018; Mihalik et al., 2014). Цезий обладает высокой растворимостью в воде, поэтому относительно легко мигрирует в окружающей среде. Вертикальная миграция  $^{137}\text{Cs}$  в торфяных залежах и почвах может быть обусловлена следующими процессами: ионный обмен, диффузия, механическое перемешивание, перенос с токами болотных вод и вынос растениями из корнеобитаемой зоны в наземную часть. Будучи геохимическим аналогом калия, он характеризуется высокой биодоступностью для болотной растительности, вследствие чего непрерывно перемещается к растущим побегам сфагнового мха и сосудистых растений, где и накапливается (Mietelski et al., 2007; Mroz et al., 2017). В связи с этим восстановление точной хронологии торфяных отложений с использованием только  $^{137}\text{Cs}$  может быть затруднено (Rosen et al., 2009). Примеры распределения  $^{137}\text{Cs}$  в залежах верховых торфяников показаны на рисунке 1.9:

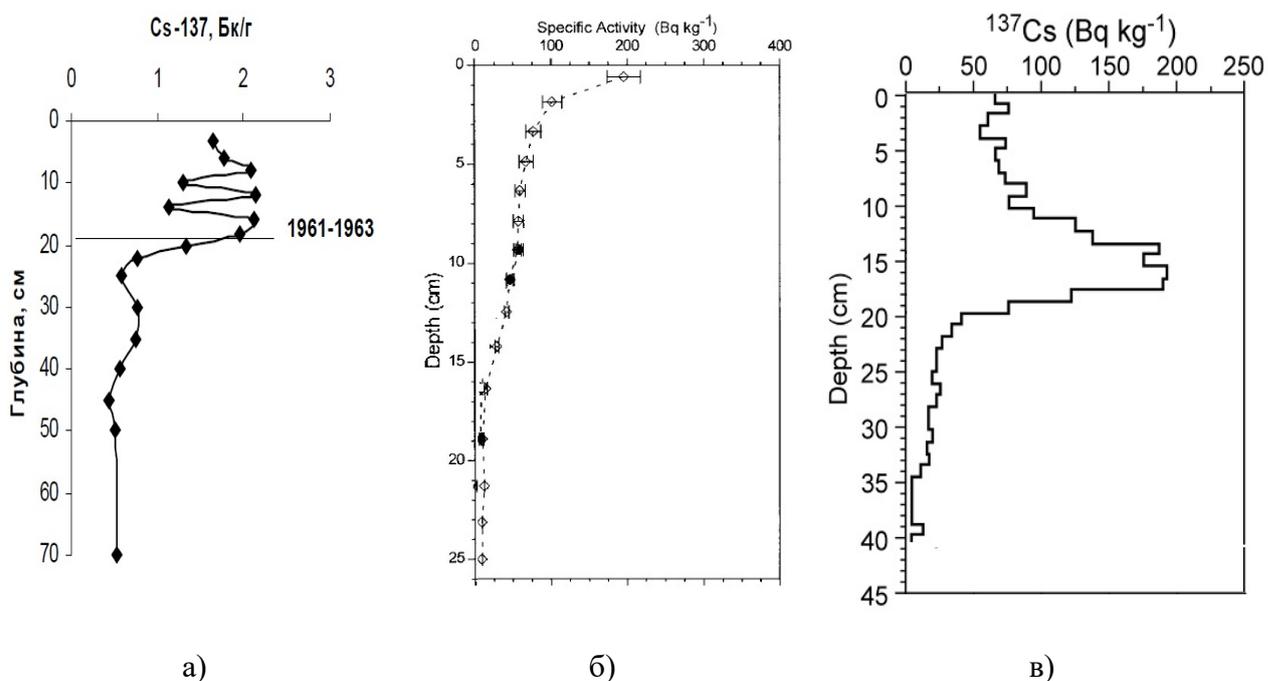


Рисунок 1.9 – Вертикальное распределение  $^{137}\text{Cs}$  в залежах верховых торфяников: а) Петропавловский Рям, Западная Сибирь (Межибор, 2009); б) Kleiner Kranich See, Германия (Schleich et al., 2000); в) Sifton Bog, Канада (Roux and Marshall, 2011)

Применительно к  $^{137}\text{Cs}$  можно выделить несколько видов сорбционных взаимодействий в почвенных системах: обменное поглощение, необменная фиксация на слоистых глинистых минералах смектитовой группы, осаждение и соосаждение, а также комплексообразование и другие взаимодействия с растворимыми и нерастворимыми органическими веществами почвы. Отмечается (Кубасова, 2016), что наиболее прочное избирательное связывание цезия обусловлено минеральной компонентой почв, поэтому можно ожидать увеличение его содержания в торфе с ростом параметра зольности.

**Америций-241.** По химической природе америций близок к металлам редкоземельного ряда. Характерные степени окисления Am +3, +4, +5 и +6, при этом степень окисления +3 является наиболее устойчивой. Радиус атома америция равен 0,173 нм. Соединения америция проявляют токсичные и облучающие свойства по отношению к живым объектам. Основными источниками поступления изотопов Am в окружающую среду, как и для  $^{134}\text{Cs}$ , являются ядерные взрывы и инциденты на энергетических установках АЭС. В качестве маркера радиэкологического состояния природных систем,

включая болота, в исследованиях чаще всего используется радионуклид  $^{241}\text{Am}$ , период полураспада которого составляет 432,2 года (Lokas et al., 2013; Mihalik et al., 2014; Oleksandrenko et al., 2021). Примеры его распределения в залежах верховых бореальных торфяников показаны на рисунке 1.10:

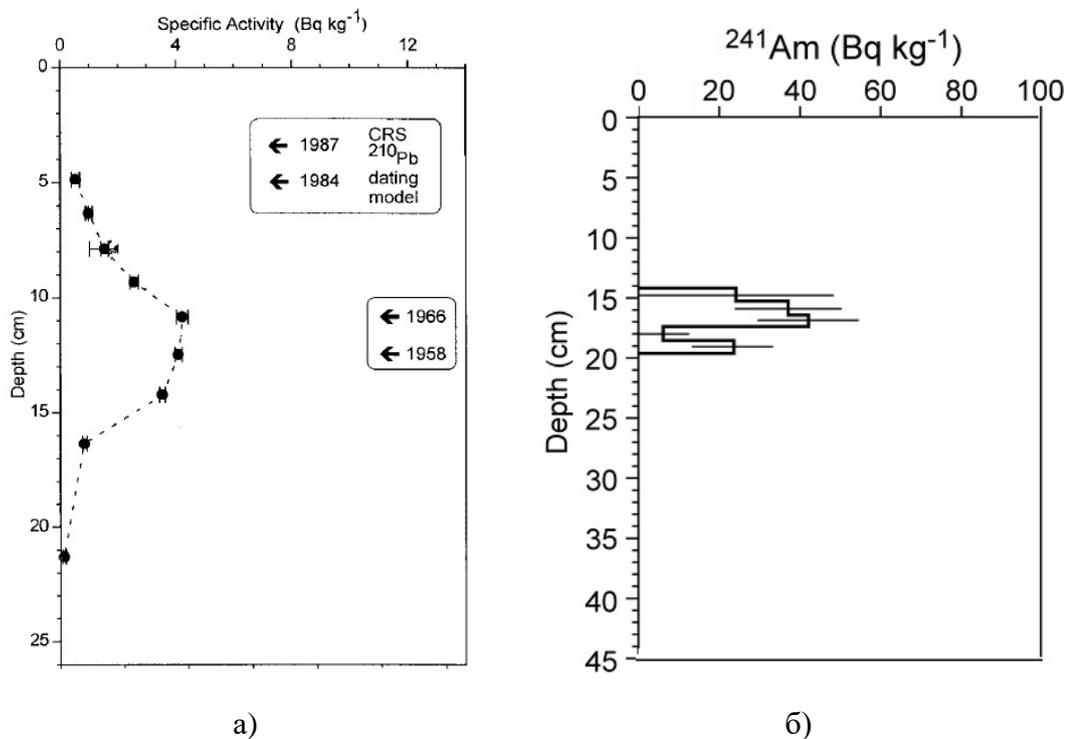


Рисунок 1.10 – Вертикальное распределение  $^{241}\text{Am}$  в залежах верховых торфяников: а) Kleiner Kranich See, Германия (Schleich et al., 2000); б) Sifton Bog, Канада (Roux and Marshall, 2011)

Основным преимуществом использования изотопа  $^{241}\text{Am}$  в качестве независимого геохронометра, является его низкая подвижность вдоль торфяного профиля (Ali et al., 2008; Foucher et al., 2021; Putyrskaya et al., 2020). Таким образом, пики активности  $^{241}\text{Am}$  в торфяных залежах с высокой долей вероятности обусловлены историческими максимумами атмосферных выпадений.

**Уран.** U относится к естественным радионуклидам и вносит существенный вклад в природный радиационный фон. Уран не имеет стабильных изотопов и в природе представлен  $^{238}\text{U}$  с периодом полураспада  $4,47 \cdot 10^9$  лет (природное содержание 99,274 %),  $^{235}\text{U}$  -  $7,13 \cdot 10^8$  лет (0,720 %) и  $^{234}\text{U}$  -  $2,46 \cdot 10^5$  лет (0,005 %). Уран проявляет степени окисления +3, +4, +5 и

+6. U является поливалентным элементом и наибольшей устойчивостью обладают соединения с валентностью 6. Радиус атома урана 0,135 нм.

Среднее содержание U, зафиксированное например, для верховых торфяников Западной Сибири, составляет 0,31 г/т (в сухом веществе), а для низинных 0,46 г/т. Среднее значение для указанного региона равно 0,37 г/т. В целом отмечается неравномерное распределение U в торфяных отложениях (Арбузов, 2005; Арбузов, 2016; Межибор и др., 2016; Прейс и др., 2021; Рихванов и др., 2011). В частности, в исследованиях (Межибор и др., 2016; Прейс и др., 2021) дана характеристика вертикального накопления U для некоторых верховых торфяников Западной-Сибири и показано, что на разных этапах развития залежи пути поступления этого радионуклида не одинаковы. Для изученных верховых болот Архангельской области наблюдаются схожие тенденции, а содержание U в торфе находится в интервале от 0,01 до 0,34 г/т, при неравномерном вертикальном распределении по залежи (Яковлев и др., 2021; Yakovlev et al., 2022; Yakovlev et al., 2023). Примеры распределения U в залежах верховых бореальных торфяников показаны на рисунке 1.11:

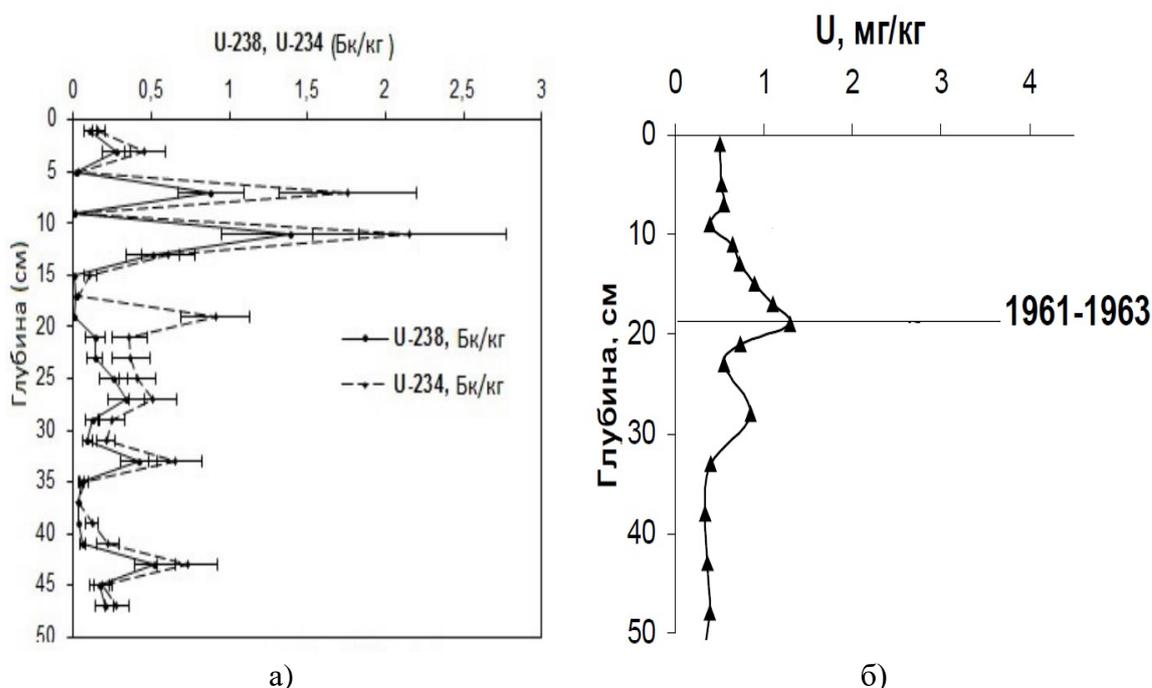


Рисунок 1.11 – Вертикальное распределение U в залежах верховых торфяников:  
 а) Верховое болото у п. Рикасиха, Архангельская область (Яковлев и др., 2021);  
 б) Петропавловский Рям, Западная Сибирь (Межибор, 2009)

Параметрами, управляющими подвижностью и миграцией изотопов U в водных средах, являются: pH, окислительно-восстановительный потенциал, ионная сила раствора, присутствие растворенного органического вещества и комплексообразующих лигандов (Prikryl et al., 2001). Условия, благоприятствующие окислению соединений U, способствуют усилению его водной миграции (Paradis et al., 2022), поскольку в окисленной форме U(VI) обычно растворим в грунтовых водах и поэтому подвижен в окружающей природной среде (Gu et al., 2005, Lloyd, 2001). Для верховых торфяников накопление урана происходит, как правило, в основании залежи на границе с минеральным ложем болота (литогенное поступление) и в приповерхностном слое (атмосферное поступление) (Рачкова, 2006).

**Свинец-210.** Pb является типичным халькофильным элементом, в земной коре он приурочен к гранитному и осадочному слоям. Кларк Pb равен  $1,6 \cdot 10^{-3}\%$ . В соединениях свинец встречается в двух- и четырехвалентном состоянии. Наиболее типичная степень окисления Pb +2, а координационные числа 4 и 6. Атомный радиус свинца равен 0,175 нм (Полянский, 1986; Попков, 2011).

Наряду со стабильными изотопами свинец имеет ряд нестабильных изотопов, среди которых существенный интерес представляет  $^{210}\text{Pb}$  с периодом полураспада 22,2 года. Его соединения обладают достаточно высокой растворимостью и подвижностью, поэтому он является компонентой радиоактивности природных вод. Присутствие  $^{210}\text{Pb}$  в природных водах контролируется как содержанием материнских изотопов ( $^{222}\text{Rn}$  и  $^{226}\text{Ra}$ ), так и химическим составом вод (Perez-Moreno et al., 2020). С другой стороны отмечается крайне низкая подвижность свинца в органогенных отложениях: торфах и донных осадках (Vile et al., 1999), что позволяет широко использовать  $^{210}\text{Pb}$  для датирования и оценки скорости накопления молодых (до 100-150 лет) торфяных отложений (Appleby, 2008; Roux & Marshall, 2011; Mroz et al., 2017; Яковлев и др. 2020). Однако, как показали исследования авторов (Schleich et al., 2000, Husson, 2013; Olid et al.,

2016) данные о распределении и подвижности Pb в органогенных почвах и торфе противоречивы и этот вопрос недостаточно изучен. Примеры его распределения в залежах верховых бореальных торфяников показаны на рисунке 1.12:

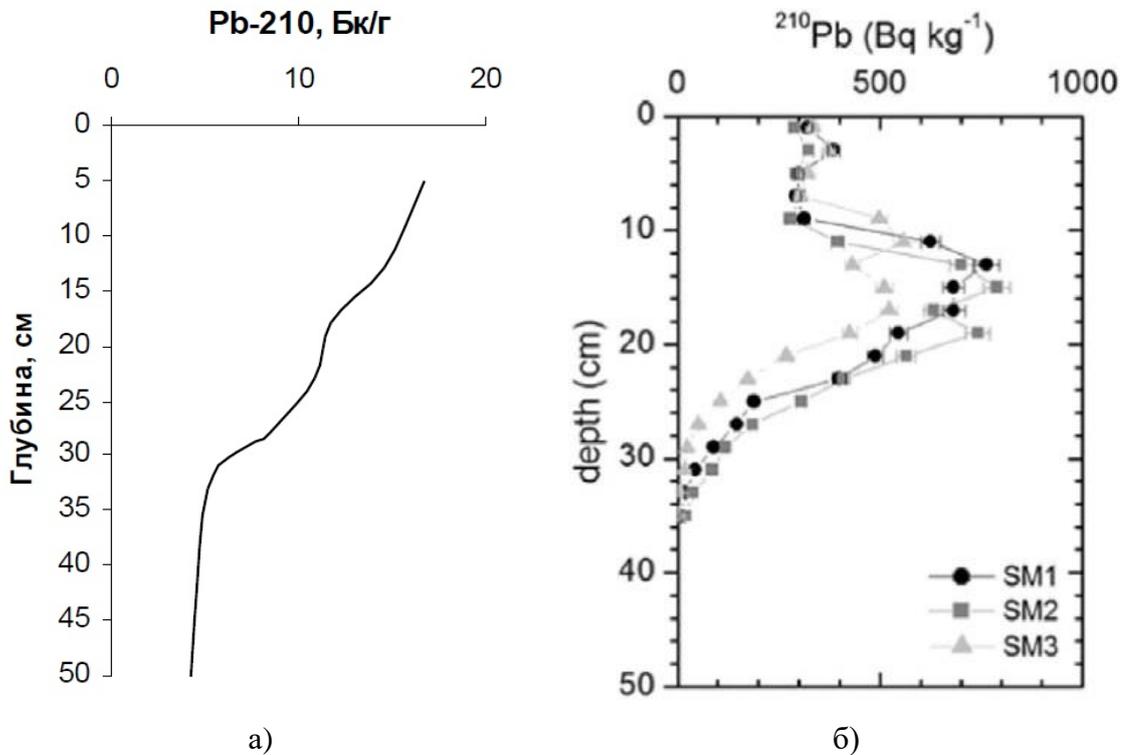


Рисунок 1.12 – Вертикальное распределение  $^{210}\text{Pb}$  в залежах верховых торфяников: а) Водораздельное, Западная Сибирь (Межибор, 2009); б) Store Mosse, Швеция (Olid et al., 2016)

В (Husson, 2013) показано, что связывание Pb усиливается с ростом pH и снижением Eh, что объясняется особенностями его взаимодействия с органическим веществом, а также соединениями Mn и сульфидами. Schleich et al., 2000 отмечает, что результаты датировок по избыточному  $^{210}\text{Pb}$  могут в значительной мере зависеть от уровня грунтовых вод, pH и Eh. Их флуктуации способствуют миграции Pb вниз по профилю залежи, а также от положения модельных площадок относительно экспозиции микрорельефа поверхности болота (гряда, мочажина).

## 1.6 Разработанность темы исследования

С учетом того, что болотные экосистемы занимают значительные площади в Северном полушарии и в том числе до 30 % территории АЗРФ, и

при этом выполняют важные экологические функции, обеспечивая стабильное существование и устойчивое развитие не только близлежащих природных комплексов, но и целых регионов (Косов и др., 2007; Экологическая реставрация..., 2016), изучение особенностей их функционирования является важной задачей. К одному из наиболее важных направлений исследования можно отнести оценку радиоэкологического состояния северных торфяников и геохимических особенностей поведения радиоактивных элементов в них, поскольку за последнее время данные территории, и в их числе Архангельская область, подверглись существенному радиационному прессингу (Киселев и др., 2013; Dowdall et al., 2005; Gwynn et al., 2004; Yakovlev et al., 2021). Кроме того, изменение их естественного состояния в ходе глобальных климатических процессов и возрастающего антропогенного воздействия может способствовать трансформации физико-химических условий, что ожидаемо, приведет к перераспределению и миграции накопленных в залежах радионуклидов, создавая экологические риски.

Несмотря на это данный научный вопрос слабо изучен и в специализированной литературе представлен незначительным количеством разрозненных исследований, не позволяющих в полной мере раскрыть связь между физико-химическими и радиационными параметрами. Так для Европейского Севера России исследования радиогеохимических особенностей и радиоэкологического состояния экосистем сводятся в основном к оценке литерального распределения и плотности загрязнения радионуклидами (Григорьев, 2017; Кубасова, 2016; Матишов и др., 2021; Пучков, Яковлев, 2023). Исследования особенностей физических, химических и физико-химических параметров торфяных залежей бореальных болот так же весьма ограничены (Пономарева, 2022; Чибисова, 2023; ФНИР, 2021; Parfenova et al., 2016). Работы зарубежных исследователей ограничиваются в основном изучением вертикального распределения радионуклидов в залежах болот Западной Европы и Северной Америки в

контексте исторических поступлений, но, как правило, без привязки к физико-химическим параметрам залежи (Fialkiewicz-Koziel et al., 2020; Lokas et al., 2014; Mroz et al., 2017; Roux, Marshall, 2011). Исследования отечественных авторов в данном направлении единичны и приурочены преимущественно к болотам Западной Сибири (Леонова и др., 2021; Межибор, 2009; Рихванов и др., 2011). Для Северо-Запада РФ и в частности Архангельской области, которая занимает одно из лидирующих мест по заболоченности территорий, подобные данные и вовсе практически отсутствуют (Yakovlev et al., 2021).

Учитывая вышесказанное, изучение физических, химических, физико-химических и радиационных параметров торфяных залежей бореальных верховых болот, их связей друг с другом и природно-антропогенным воздействием и, в том числе, влияния физико-химических параметров на накопление и распределение природных и техногенных радионуклидов в торфяных залежах Европейского Севера России на примере верховых торфяников южноприбеломорского типа Архангельской области является актуальной задачей.

## 2 ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

### 2.1 Обоснование и описание района и объектов исследования

Учитывая тот факт, что особенно остро проблема накопления радионуклидов торфяно-болотными экосистемами и их возможной миграции в прилежащие биоценозы стоит для Северо-Запада России, а в частности для Архангельской области, ввиду значительного радиационного воздействия (Киселев и др., 2013; Dowdall et al., 2005; Gwynn et al., 2004) (ядерные испытания на Новой земле, активная добыча полезных ископаемых в Арктике, последствия аварии на Чернобыльской АЭС и др.), высокой заболоченности данных территорий, с преобладанием болот верхового типа, и их высокой чувствительности к влиянию глобальных климатических и антропогенных воздействий, актуальной задачей представляется изучение процессов накопления и распределения ряда радионуклидов в условиях изменения гидрологического и физико-химического режимов торфяных залежей, которые представляют собой сложный геохимический барьер окислительно-восстановительного, кислотного-основного и сорбционного типа (Геохимические барьеры..., 2002; Savichev et al., 2020).

Для решения поставленных целей и задач в рамках данной диссертационной работы были выбраны три тестовых площадки – участки верхового болота, где торфяная залежь находится в принципиально отличающихся гидрологических и, как следствие, физико-химических условиях. Исследования проводились на естественном участке и участках со вторичным (постмелиоративным) заболачиванием и устойчивым осушением, расположенных в пределах одного болотного комплекса – Иласского болотного массива, который является представителем наиболее типичных для Архангельской области верховых болот прибалтийского типа (Вомперский и др., 2011; Сирин, 2017). Такой выбор позволяет минимизировать вклад территориальной составляющей на поступление и распределение радионуклидов и сосредоточить внимание на влиянии

собственно физико-химических факторов на данные процессы. С другой стороны, он обусловлен возможностью дальнейшей экстраполяции полученных экспериментальных данных на другие аналогичные болотные комплексы Европейского Севера России, доля которых составляет до 73 % от суммы заболоченных территорий (Косов и др., 2007; Parfenova et al, 2016).

Район относится к бассейну Белого моря. В геоморфологическом отношении территория представлена водно-ледниковым аккумулятивным типом рельефа с озерно-ледниковыми равнинами. Рельеф территории формировался на протяжении нескольких эпох четвертичного оледенения, последнее из которых окончилось около 11,7 тыс. лет назад (Токарев, 2012). Торфообразование началось сразу после исчезновения льда (Евзеров, 2012). Подстилающие торфяные болота ледниковые отложения имеют пестрый литологический состав - пески, суглинки, галечники, супеси (Зоренко и др., 2000). Болотная система имеет длину 17 км и ширину 3,8 км, расположена в 30 км на юго-юго-западе от г. Архангельска в заболоченной части зоны таежных лесов на водоразделе трех рек: Брусовица, Шухта и Бабья, входящих в бассейн Северной Двины. Иласский болотный массив представляет собой олиготрофный плосковыпуклый мезоландшафт (Попова, Ружникова, 2007). Исследуемая система болотных массивов относится к Прибеломорской болотной провинции. Южноприбеломорские верховые болота – наиболее северные в группе суббореальных болот – занимают всю Прибеломорскую низменность (Юрковская, 1992; Елина, 1974). Они доминируют в зоне северотаежных лесов, а в зоне притундровых лесов встречаются наравне с болотами онежско-печорского типа и аапа-болотами.

Климат представляет собой переходный от умеренно-морского к субарктическому. Среднегодовое количество осадков составляет 600-700 мм в год. Зима длительная, холодная, число дней со снежным покровом от 180 до 190 дней, высота снежного покрова достигает 60 см. Лето прохладное и короткое с продолжительностью безморозного периода от 90 до 100 дней (Бызова, Преминина, 2001).

Схема расположения тестовых площадок исследования представлена на рисунке 2.1:

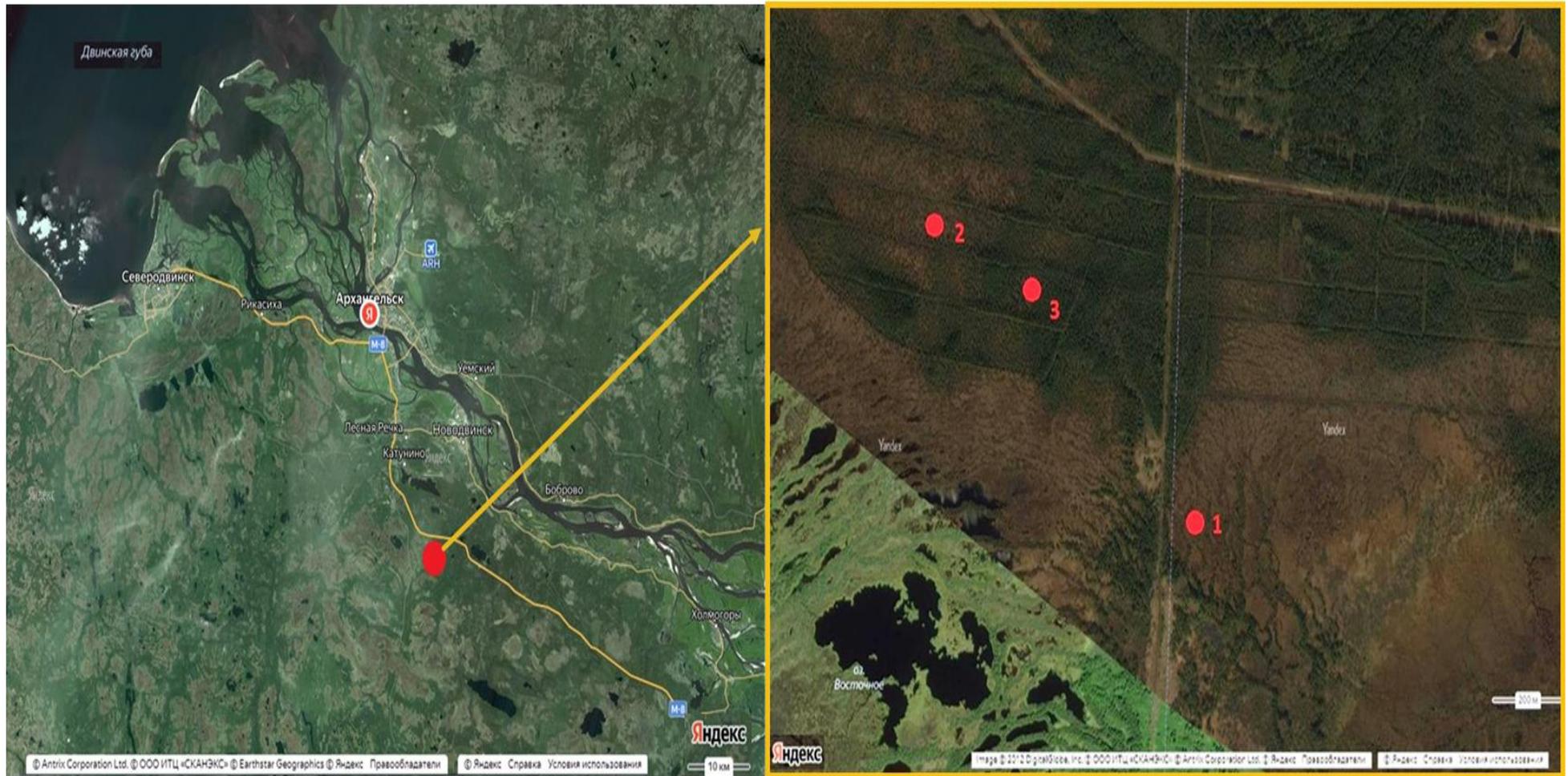


Рисунок 2.1 – Схема расположения тестовых площадок: 1 – естественный участок (ИСНО-1); 2 – участок с постмелиоративным заболачиванием (ИСНДО-1) и 3 – участок с эффективным осушением (ИСО-1)

Краткая характеристика комплексных микроландшафтов в пределах участков исследования представлена далее.

**Участок с ненарушенным гидрологическим режимом ИСНО-1 (64°18'55.3"N 40°41'15.6"E).** Растительный покров участка опробования торфяного профиля ИСНО-1 позволяет идентифицировать данную болотную фацию как ковровую без выраженного микрорельефа. Древесный ярус на исследуемом участке отсутствует. Травяно-кустарничковый ярус сложен, в основном, пушицей влагалищной (*Eriophorum vaginatum*), шейхцерией болотной (*Schzeuchzeria palustris*), подбелом обыкновенным (*Andromeda polifolia*). Мохово-лишайниковый ярус сложен несколькими видами сфагновых мхов (*Sphagnum majus*, *Sphagnum cuspidatum*, *Sphagnum balticum*, *Sphagnum medium*). Внешний вид микроландшафта представлен на рисунке 2.2:



Рисунок 2.2 – Фотографии микроландшафтов болота в пределах расположения тестовой площадки на естественном участке (ИСНО-1): а) общий вид; б) растительный покров

Торфяная залежь в месте отбора колонки ИСНО-1 имеет мощность 2,2 м. Залежь однородна по ботаническому составу – сложена сфагновыми мхами с небольшой примесью пушицы по всему торфяному профилю с увеличением ее доли в придонном слое. Степень разложения (R), оцененная в полевых условиях, варьирует в пределах 0-20% с увеличением по глубине. Подстилающие породы – морена легкого механического состава (песок, супесь). Уровень грунтовых вод в течение всего сезона исследований находился на уровне 0 – -25 см.

**Участок с постмелиоративным заболачиванием ИСНДО-1 (64°19'22"N 40°40'29"E).** Площадка ИСНДО-1 представляет собой участок выпуклого олиготрофного болота в состоянии повторного заболачивания, вызванного частичным разрушением и зарастанием системы осушительных каналов. Внешний вид микроландшафта представлен на рисунке 2.3:

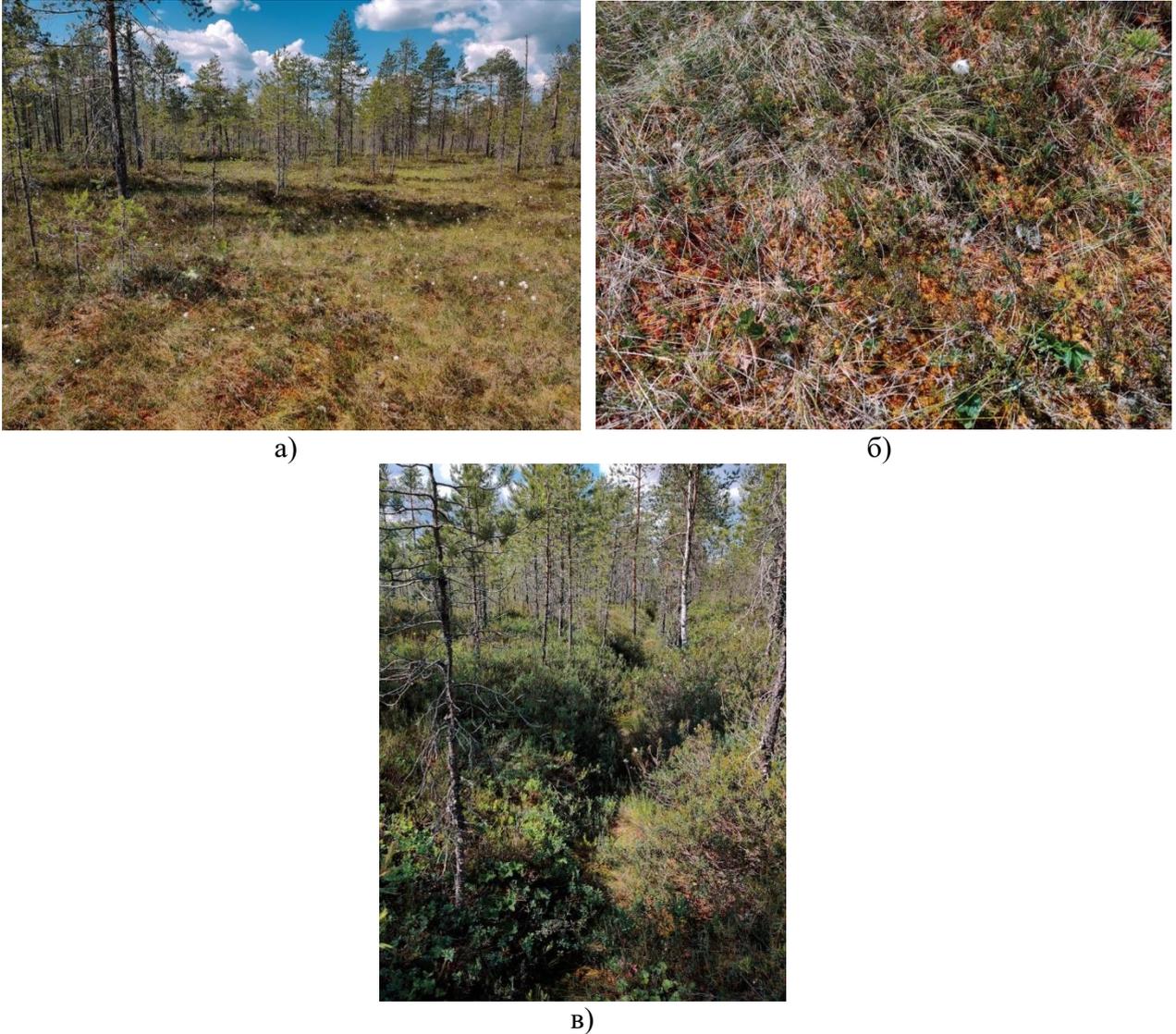


Рисунок 2.3 – Фотографии микроландшафтов болота в пределах расположения тестовой площадки на участке с постмелиоративным заболачиванием (ИСНДО-1): а, в) общий вид; б) растительный покров

Растительный покров участка с повторным заболачиванием может быть охарактеризован следующим образом: мохово-лишайниковый ярус, сложенный преимущественно сфагновыми мхами с незначительной примесью зеленых мхов; травяно-кустарничковый ярус, представленный *Vaccinium uliginosum*, *Ledum palustre*, *Empetrum nigrum*, *Calluna vulgaris*,

*Andromeda polifolia*, *Deschampsia cespitosa* и древесный ярус, состоящий из *Pinus sylvestris* высотой до 4,8 м.

Мощность торфяных отложений в пределах тестовой площадки ИСНДО-1 достигает 1,4 м. Залежь имеет однородный ботанический состав – сложена преимущественно остатками сфагновых мхов с незначительными включениями кустарничков. Степень разложения, оцененная полевым экспресс методом, изменяется не монотонно по вертикальному профилю залежи и находится в интервале 5-30 %. Подстилающие породы – морена среднего механического состава. Уровень грунтовых вод в течение вегетационного периода изменялся в пределах 0 – -41 см.

**Участок с эффективным осушением ИСО-1 (64°19'16"N 40°41'01"E).** В морфологическом плане площадка ИСО-1 представляет собой участок выпуклого олиготрофного болота в состоянии эффективного осушения. Растительный покров включает в себя мохово-лишайниковый ярус, представленный зелеными мхами *Pleurozium schreberi*, *Politrichum commune*, *Dicranum bergeri*, *D. Polysetum*, с незначительной примесью сфагновых мхов и лишайников *Cladonia*; травяно-кустарничковый, сложенный *Vaccinium uliginosum*, *V. myrtillus* и *Ledum palustre* и древесный, состоящий из *Pinus sylvestris* высотой до 7 м.

Мощность торфяной залежи в месте заложения площади ИСО-1 составляет 1,5 м. Залежь однородна по ботаническому составу и сложена сфагновыми мхами с небольшой примесью пушицы, кустарничков и древесины сосны по всему профилю. Степень R, оцененная в полевых условиях, варьирует в пределах 7-35 % и увеличивается по глубине. При этом необходимо отметить незначительное увеличение степени разложения в приповерхностном слое залежи (0-10 см), обусловленное, по-видимому, активизацией микробиологического разложения органического вещества торфа в зоне усиленной аэрации. Подстилающие породы – морена среднего механического состава, поскольку формирование торфяной залежи началось сразу после отступления ледника (Евзеров, 2012). Уровень грунтовых вод в

течение всего сезона исследований находился на уровне -9 – -42 см. Внешний вид микроландшафта представлен на рисунке 2.4:

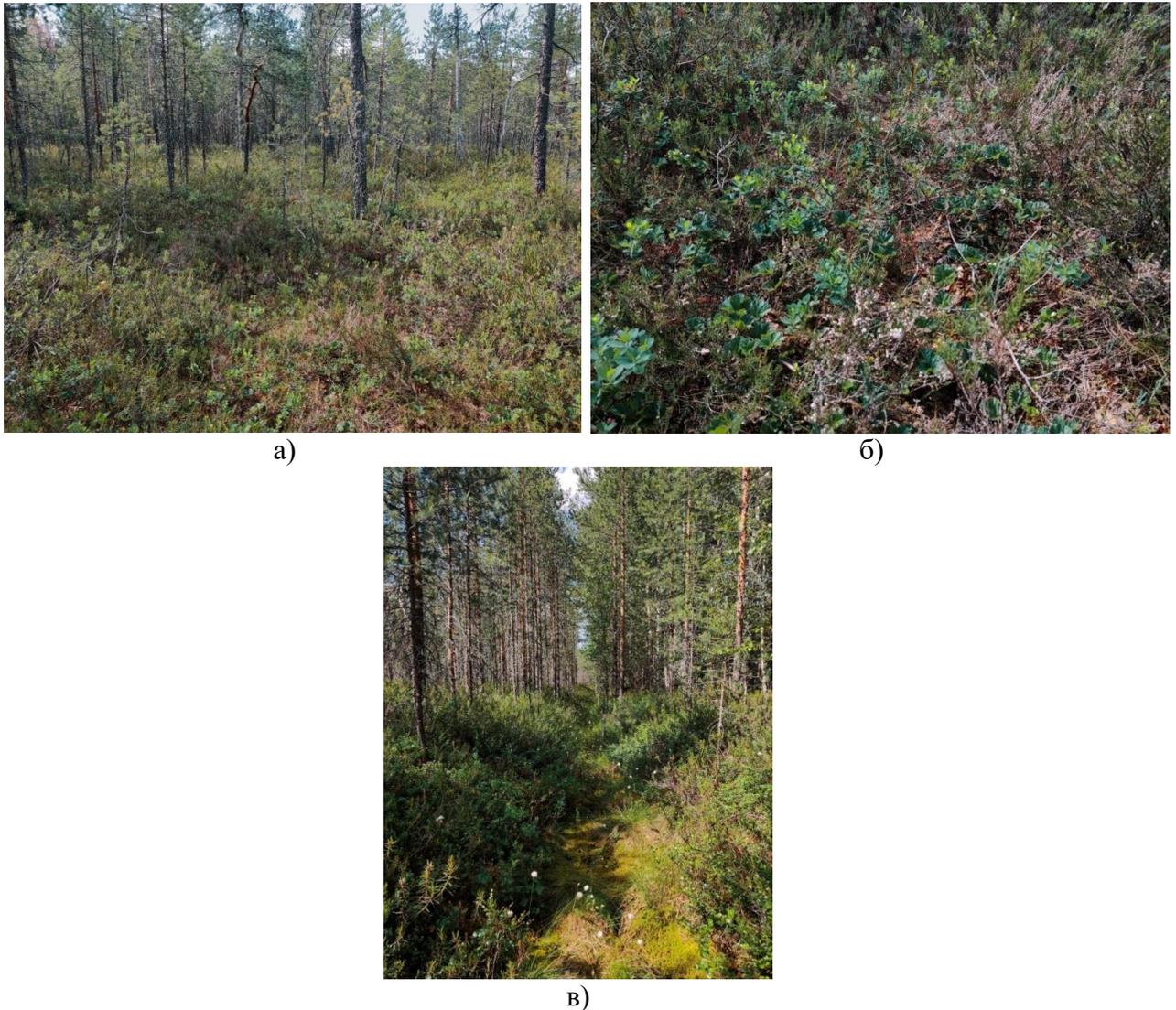


Рисунок 2.4 – Фотографии микроландшафтов болота в пределах расположения тестовой площадки на участке с устойчивым осушением (ИСО-1): а, в) общий вид; б) растительный покров

Детальное описание проективного покрытия растительного покрова и строение залежи по характеристическим горизонтам данной части болотного массива выполнено и представлено в (Пономарева, 2022; Чибисова, 2023).

Исследование основных физико-химических, химических и радиогеохимических параметров в рамках данного проекта проводилось в приповерхностном 50 см слое торфяной залежи, включающем в себя акротелм и верхнюю часть катотелма и наиболее подверженном влиянию колебаний уровня болотных вод. При этом в данной части залежи по результатам большинства исследователей (Roux, Marshall, 2011; Schleich et

al., 2000; Thomson et al., 2002; Yakovlev et al., 2021), как правило, сосредоточена основная доля радиоизотопов.

## **2.2 Описание методик исследования**

В данной работе были использованы как некоторые классические и современные методы (гравиметрический метод, прямая потенциометрия и кондуктометрия, микроскопия в проходящем свете, атомно-абсорбционная спектроскопия, термическое разложение с детектированием продуктов и др.), широко применяемые в области химии и физики торфа, так и классические методы радиозэкологии (гамма-спектрометрия, альфа-спектрометрия с радиохимической подготовкой). Дополнительно для оценки связывания радионуклидов торфом и его компонентами, а также для оценки их миграции в залежи на примере  $^{137}\text{Cs}$  выполнен лабораторный модельный эксперимент в статических условиях и полевой модельный эксперимент в условиях лизиметров. Использование этих методов, наряду со статистической обработкой и анализом полученных экспериментальных данных обеспечивают достоверность представленных в работе результатов. Описание методик, задействованных в выполнении диссертационного исследования, приведено далее в п. 2.2.1-2.2.15.

### **2.2.1 Отбор и подготовка к исследованию проб торфа**

В ходе проведения полевых работ было выполнено 9 полевых выездов в район исследований, в результате которых была осуществлена закладка 3-х тестовых площадок на участках верхового болота, отличающихся по гидрологическому режиму (естественном, осушенном и участке с повторным заболачиванием). Выполнена установка колодцев для наблюдения за уровнем болотных вод и комплексное описание залежи (мощность, степень разложения, виды основных растений-торфообразователей и др.).

На заложенных площадках методом послойного бурения с применением пробоотборника для торфяных отложений из нержавеющей

стали Р 04.09 (EIJKELKAMP, Нидерланды) по ГОСТ 17644-1983 проведен отбор репрезентативных проб торфа для оценки влажности, зольности, степени разложения, структуры, содержания и компонентного состава органического вещества. Параллельно с этим выполнялся отбор свежееотжатой поровой воды для оценки рН и минерализации. В результате на каждой из выбранных тестовых площадок было отобрано по 5 торфяных колонок с разбивкой на 10-см горизонты в интервале 0-50 см по глубине залегания. Для оценки ботанического состава, степени разложения и естественного влагосодержания использовали образцы торфа без предварительной пробоподготовки (с ненарушенной структурой и естественной влажностью), которые до анализа хранились в холодильнике в плотно закрытых пакетах. Для дальнейших лабораторных исследований пробы торфа каждой из 5 отобранных в рамках одной площадки колонок были усреднены по горизонтам (0-10, 10-20 и т.д.). Таким образом, было получено 15 представительных образцов, которые высушивались при комнатной температуре и просеивались через сито с диаметром отверстий 2 мм. Для оценки активностей и распределения выбранного ряда радионуклидов, содержания макроэлементов (Fe, Mn, Al, K, Na, Mg, Ca) и CHN-анализа органического вещества в исследуемых залежах на каждой тестовой площадке с помощью пластиковой трубы большого диаметра был проведен отбор 3 кернов (0-50 см). Полученные торфяные колонки разделялись на 2 см слои, впоследствии соответствующие друг другу по глубине слои из каждого керна усреднялись в пределах каждой из выбранных площадок. Таким образом, было получено 75 представительных проб торфа для элементного и радиологического анализа, которые были высушены при комнатной температуре и подвергнуты помолу на роторной мельнице Вилитек VLM-6 до фракции 0,1 мм. Подготовленные к анализу образцы торфа хранились в герметично закрытой таре.

### 2.2.2 Определение $E_h$ , pH и минерализации в торфяной залежи

Определение  $E_h$  с градацией по глубине торфяной залежи проводилось в полевых условиях методом прямой потенциометрии (Лиштван и др., 1989; Urquhart, Gore, 1973) на универсальном анализаторе жидкостей ЭКСПЕРТ-001 (Эконикс, Россия) с применением разработанных автором оригинальных щупов-измерителей на основе комбинированного платинового редоксметрического электрода ЭРП-105 для измерения окислительно-восстановительного потенциала в жидких и гетерогенных средах. Данный способ позволяет оценивать величину  $E_h$  непосредственно в залежи до глубины 1 м, без извлечения образцов торфа, что исключает влияние кислорода воздуха. Определение pH проводили с использованием комбинированного электрода ЭСК-10603 в торфяной воде, отжатой из торфа, который извлекали с помощью пробоотборника для торфяных отложений из нержавеющей стали Р 04.09 (EIJKELKAMP, Нидерланды) с соответствующих горизонтов залежи. Параллельно с измерением ОВП фиксировали температуру слоя торфяной залежи с использованием термощупа, изготовленного на основе металлического термодатчика ТДС-3. Пересчет полученных результатов ОВП к стандартным условиям ( $t = 25\text{ }^\circ\text{C}$  и  $\text{pH} = 4,0$ ) осуществляли по формулам (2.1, 2.2) (Urquhart, Gore, 1973):

$$E_h = E + 197 - 0,76 * (t - 25) \quad (2.1)$$

где  $E$  – измеренное значение ОВП, мВ;

197 – поправка на хлорсеребряный насыщенный полуэлектрод для приведения отсчета к нормальному водородному электроду при  $t = 25\text{ }^\circ\text{C}$ , мВ;

$t$  – температура торфа в момент измерения,  $^\circ\text{C}$ ;

$$E_{h4} = E_h + 56,2 * (\text{pH} - 4) \quad (2.2)$$

Таким образом, окислительно-восстановительные потенциалы в разделе результатов означают  $E_{h4}$ , если явно не указано иное.

Определение общей минерализации болотных вод проводили кондуктометрическим методом с помощью универсального анализатора жидкостей АНИОН 4100 (Инфраспек-Аналит, Россия) и датчика ДКВ-1.

### **2.2.3 Определение структуры и степени разложения торфа**

Исследование структурной организации торфа на микроуровне проводили в ненарушенном состоянии и при естественной влажности по методике более подробно описанной в (Орлов и др., 2017). Водный препарат торфа рассматривали и фотографировали с помощью лабораторного микроскопа Альтами Био 2 в комплекте с цифровой камерой Usmos 03100КРА и программным обеспечением Altami Studio. Растительные остатки в торфе идентифицировали по (Носкова, 2016).

Степень разложения торфа предварительно определяли визуальным методом в полевых условиях по методике, описанной в (Лиштван, Король, 1975; Тюремнов, 1976), и уточняли микроскопическим методом, который заключается в определении относительной площади, занятой бесструктурной частью при рассмотрении тонкого разжиженного слоя торфа на предметном стекле через микроскоп.

### **2.2.4 Определение влажности, насыпной плотности и плотности сложения торфа**

Влажность проб торфа с естественным влагосодержанием и высушенных до воздушно сухого состояния при комнатной температуре определяли гравиметрическим методом по стандартной методике ГОСТ 11305-2013 путем высушивания образцов торфа до постоянной массы в сушильном шкафу при температуре 105 °С.

Насыпную плотность торфа оценивали гравиметрическим методом для воздушно сухих образцов с фракционным составом 0,5 - 2 мм. Определение проводили путем измерения объема образцов с помощью мерного цилиндра с последующей фиксацией их массы на технических весах в 5 параллельных

для каждой пробы.

Плотность сложения исследуемой части залежи 0 - 50 см оценивали для каждого 2 - 4 см слоя, выделенных в кернах с ненарушенной структурой, отобранных с помощью пластиковой трубы большого диаметра. Для этого фиксировали массу высушенного до воздушно-сухого состояния торфа и объем торфа в слое. Расчет плотности сложения –  $\rho_{\text{сл.}}$ , г/см<sup>3</sup> в пересчете на абсолютно сухой торф проводили по формуле (2.3):

$$\rho_{\text{сл.}} = \frac{m_{\text{пробы}} \cdot (100 - W)}{S \cdot L \cdot 100} \quad (2.3)$$

где,  $m_{\text{пробы}}$  – масса торфа в выделенном слое;

$S$  – площадь слоя (керн), см<sup>2</sup>;

$L$  – мощность слоя, см;

$W$  – влажность торфа по ГОСТ 11305-2013, %

### **2.2.5 Определение содержания водорастворимых солей, активной и обменной кислотности торфа**

Содержание водорастворимых солей в торфе Извлечение водорастворимых солей из торфа проводили дистиллированной водой при гидромодуле 1:25 согласно ГОСТ 26423-85. К пробе торфа массой 3 г приливали 75 мл дистиллированной воды и выдерживали в течение 5 часов с периодическим перемешиванием до полного смачивания. После отстаивания суспензии определение электропроводности и содержания водорастворимых солей водных вытяжек проводили на анализаторе жидкостей АНИОН 4100 (Инфраспак-Аналит, Россия) с использованием кондуктометрического датчика ДКВ-1.

Оценку активной и обменной кислотности торфа осуществляли согласно ГОСТ 11623-89 путем потенциометрического измерения величины рН в водной и хлоркалиевой торфяной суспензии соответственно. Суспензии готовили следующим образом. К навеске торфа массой 3 г приливали 75 мл прокипяченной дистиллированной воды (или раствора хлористого калия с

концентраций 1 моль/л и рН 5,5...6,0) и выдерживали в течение 5 часов с периодическим перемешиванием до полного смачивания. По истечении указанного времени в полученных суспензиях измеряли рН на анализаторе жидкостей Эксперт 001-3 (Эконикс, Россия) с применением комбинированного стеклянного электрода ЭСК-10603.

### 2.2.6 Определение зольности, органического вещества и потерь при прокаливании в торфе

Навеску торфа массой 2-3 г взвешивали на аналитических весах ( $m_{\text{пробы}}$ ) и помещали в кварцевый тигель, предварительно доведенный до постоянной массы прокаливанием в муфельной печи при 900 °С. Далее последовательно прокаливали тигель с пробой торфа при 525 °С и 900 °С до постоянной массы, которую фиксировали на аналитических весах. Расчет потерь при прокаливании ПП, % и  $\omega$  ( $\text{CO}_3^{2-}$ ), % проводили по формулам (2.4, 2.6):

$$\text{ПП} = \frac{(m_{525} - m_{900}) \cdot 100}{m_{\text{а.с.п.}}} \quad (2.4)$$

где,  $m_{525}$  – масса тигля с пробой после прокаливании при 525 °С;

$m_{900}$  – масса тигля с пробой после прокаливании при 900 °С;

$m_{\text{а.с.п.}}$  – масса абсолютно сухой пробы, рассчитанная по формуле (2.5):

$$m_{\text{а.с.п.}} = \frac{m_{\text{пробы}} \cdot (100 - W)}{100} \quad (2.5)$$

где,  $W$  – влажность пробы торфа в %, определенная по ГОСТ 11305–2013.

$$\omega (\text{CO}_3^{2-}) = \text{ПП} \cdot 1,36 \quad (2.6)$$

где, ПП – потери при прокаливании в %;

1,36 – коэффициент пересчета, рассчитанный по формуле (2.7):

$$\text{Коэффициент пересчета} = \frac{M (\text{CO}_3^{2-})}{M (\text{CO}_2)} = \frac{60,01 \text{ г/моль}}{44,01 \text{ г/моль}} = 1,36 \quad (2.7)$$

Определение массовой доли органического вещества в пробах торфа проводили весовым методом согласно ГОСТ 26213-91. Для этого предварительно оценивали в торфе содержание золы согласно ГОСТ 11306-2013. Массовую долю органического (X) вещества в % вычисляли по формуле (2.8):

$$X = (100 - m) \quad (2.8)$$

где,  $m$  – массовая доля зольности, %.

### **2.2.7 Определение группового химического состава торфа**

В настоящем исследовании анализ группового химического состава образцов торфа выполнялся по аттестованной авторской методике (Методика № 88-16365-009-2017, 2017), разработанной с участием автора данной работы.

Оценку группового компонентного состава образцов торфа проводили методом последовательной разборки его полимерной матрицы с использованием растворителей различной природы. Из матрицы исходного образца последовательно выделяли экстрактивные вещества – битумы (Б) обработкой диэтиловым эфиром в аппарате Сокслета, биополимеры гумусовой природы – гуминовые (ГК) и фульвокислоты (ФК) 0,1 н. раствором NaOH, легкогидролизуемые соединения (ЛГВ) 5 % раствором HCl. Далее в полученном остатке определяли содержание лигнина Классона (Л) и трудногидролизуемых веществ (ТГВ) проводя его гидролиз 80 % раствором H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. Количество водорастворимых веществ (ВРВ) в торфе определяли из отдельной навески методом настаивания в горячей 90-95 °С дистиллированной воде. Расчёт содержания групповых компонентов проводили гравиметрическим методом по остатку согласно (Методика № 88-16365-009-2017, 2017).

### 2.2.8 Определение содержания С, Н, N и О в торфе

Содержание С, Н и N определяли методом сжигания проб торфа массой 5 мг в токе кислорода с последующим хроматографическим разделением и детектированием продуктов с использованием анализатора элементного состава EuroEA 3000 CHN (Eurovector, S.p.A.). За результат принимали среднее значение трех параллельных измерений. Содержание кислорода определяли как разницу между общей массой и суммой других элементов. Полученные результаты представляли в виде диаграммы Ван-Кревелина и анализировали согласно (Orlov, 1992). В качестве дополнительной характеристики органического вещества торфа рассчитывали его степень окисленности ( $\omega$ ) согласно (Orlov, 1992) по формуле (2.9):

$$\omega = (2O - H) / C \quad (2.9)$$

где С, Н и О - атомные проценты этих элементов.

### 2.2.9 Определение содержания макроэлементов (Fe, Mn, Al, Na, K, Mg и Ca) в торфе

Определение металлов в торфе проводили в ЦКП НО «Арктика» Северного (Арктического) федерального университета методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой с помощью спектрометра ICPE-9000 (Shimadzu). Измерение осуществляли согласно методике (М-02-902-157-10), которая включает в себя: определение влажности образца, подготовку проб, взятие навесок и получение растворов анализируемой пробы, определение концентрации металлов (Fe, Mn, Al, Na, K, Mg и Ca) на спектрометре ICPE-9000 в аксиальном режиме наблюдения аргоновой плазмы и расчет массовой доли определяемых элементов в пробе с учетом ее влажности.

### 2.2.10 Определение радионуклидов $^{137}\text{Cs}$ и $^{241}\text{Am}$ в торфе

Определение радионуклидов  $^{241}\text{Am}$  и  $^{137}\text{Cs}$  в образцах торфа проводили методом гамма-спектрометрии с применением низкофонового гамма-спектрометра производства CANBERRA Packard (США) с коаксиальным полупроводниковым детектором GX2018 на основе кристалла Ge(Li) и программным обеспечением Genie-2000. Разрешение гамма-спектрометра по линии 1,33 МэВ ( $^{60}\text{Co}$ ) составляет 1,75 кэВ, относительная эффективность – 22,4 %.

Калибровку детектора по энергии, а также расчет эффективности регистрации проводили с применением стандартных образцов с набором радионуклидов  $^{241}\text{Am}$ ,  $^{109}\text{Cd}$ ,  $^{88}\text{Y}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{152}\text{Eu}$ . В качестве геометрии измерения в связи с малой массой образцов торфа был выбран плоский сосуд объемом 0,1 литр. Измерение пробы проводили в течение не менее 18000 с.

Удельную активность радионуклида  $^{137}\text{Cs}$  определили по линии гамма-излучения 661,66 кэВ с квантовым выходом 89,90 %, принадлежащей его дочернему радионуклиду –  $^{137\text{m}}\text{Ba}$ . Удельную активность радионуклида  $^{241}\text{Am}$  определили по линии 59,54 кэВ с выходом гамма-квантов 35,9 % (МВИ МН 3421-2010).

Минимально измеряемые активности при экспозиции  $t = 18000$  с для геометрии плоский сосуд объемом 0,1 л для детектора GX2018 составили для  $^{241}\text{Am}$  – 0,3 Бк,  $^{137}\text{Cs}$  – 0,1 Бк.

### 2.2.11 Определение радионуклида $^{210}\text{Pb}$ в торфе

Удельную активность  $^{210}\text{Pb}$  оценивали альфа-бета-радиометрическим методом с радиохимической подготовкой. Для этого образец торфа массой 5 г помещали в стакан и добавляли  $10\text{ см}^3$  концентрированной  $\text{HNO}_3$  порциями по  $1-2\text{ см}^3$  при перемешивании. Для разложения пробу нагревали на плитке 5-10 мин. Окончание этапа определяли по прекращению вспенивания раствора. После охлаждения пробы к ней приливали медленно  $5\text{ см}^3\text{ H}_2\text{O}_2$ . Затем закрывали часовым стеклом и оставляли до момента, когда

реакция перейдёт в спокойную стадию. После часовое стекло снимали, обмывали дистиллированной водой и выпаривали до влажных солей, не допуская пересушивания осадка.

После охлаждения проводили выщелачивание, влажные соли обрабатывали 25 см<sup>3</sup> HCl (1:2), перемешивали, закрывали часовым стеклом и кипятили в течение 1 ч. После отстаивания выщелат отфильтровывали через фильтр «синяя лента» в стакан. После этого часовое стекло, стакан, и остаток на фильтре промывали 25 см<sup>3</sup> горячей HCl (1:4). Затем остаток вместе с фильтром снова помещали в стакан для выщелачивания и повторяли обработку смесью 25 см<sup>3</sup> HCl (1:2) и 1 см<sup>3</sup> H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> в течение 30 мин. Процесс выщелачивания повторяли еще раз. После охлаждения и отстаивания выщелат снова отфильтровывали через фильтр «синяя лента» в стакан, где находился первый фильтрат. После окончания фильтрования часовое стекло и остаток на фильтре промывали горячей HCl (1:4) 5 раз по 10 см<sup>3</sup>. Далее в объединённый фильтрат прибавляли 10 см<sup>3</sup> HClO<sub>4</sub> и выпаривали в открытом стакане до появления густых белых паров. Следующим шагом стакан закрывали часовым стеклом и продолжали выпаривание до начала выпадения солей. Далее пробу охлаждали, снимали часовое стекло, обмывали его дистиллированной водой и выпаривали раствор до влажных солей. Растворение солей проводили при кипячении после добавления 5 см<sup>3</sup> концентрированной HCl и 25 см<sup>3</sup> дистиллированной воды. После растворения солей раствор разбавляли до 100 см<sup>3</sup> дистиллированной водой и прибавляли аскорбиновую кислоту до обесцвечивания раствора.

Выделение изотопов <sup>210</sup>Po и <sup>210</sup>Pb (находящегося в радиоактивном равновесии с <sup>210</sup>Pb) проводили из полученного раствора путём электрохимического осаждения на диски из нержавеющей стали. Для этого диск помещали в тефлоновую кассету и опускали в стакан с раствором. Закрытый стакан кипятили 2 часа. После осаждения, кроме <sup>210</sup>Po и <sup>210</sup>Pb счётный образец может содержать короткоживущие альфа-излучающие изотопы полония (<sup>218</sup>Po, <sup>214</sup>Po, <sup>216</sup>Po и <sup>212</sup>Po) и короткоживущие бета-

излучающие изотопы висмута ( $^{210}\text{Bi}$  и  $^{210}\text{Bi}$ ). Поэтому измерения счётного образца проводили через 10 ч после его приготовления, когда они распадутся; также замеры проводили не позднее, чем через 36 ч после его приготовления, из-за низкой активности образца. Распад  $^{210}\text{Bi}$  за это время учитывался введением поправочного коэффициента. Счётный образец измеряли на альфа-бета радиометре «Абелия» (Методика измерения..., 2013).

### 2.2.12 Определение изотопов $^{234}\text{U}$ и $^{238}\text{U}$ в торфе

Оценку удельной активности изотопов урана  $^{234}\text{U}$  и  $^{238}\text{U}$  проводили альфа-спектрометрическим методом с радиохимической подготовкой. Для этого навеску торфа массой 5 г озоляли в муфельной печи при температуре  $600^\circ\text{C}$  до выгорания органических веществ. Обоженную пробу переносили в тefлоновую чашу и смачивали дистиллированной водой. В качестве трассера добавляли к пробе  $1\text{ см}^3$  раствора радиоизотопного индикатора РИК-232, содержащего  $^{232}\text{U}$ . Затем приливали к пробе концентрированные кислоты  $20\text{ см}^3\text{ HCl}$  и  $10\text{ см}^3$  и нагревали до прекращения бурной реакции. Для уменьшения скорости реакции в смесь добавляли дистиллированную воду. После установления режима спокойного выпаривания чашку неплотно закрывали тefлоновой крышкой и выпаривали досуха.

После охлаждения чашки к остатку прибавляли концентрированные кислоты  $10\text{ см}^3\text{ HNO}_3$  и  $10\text{ см}^3\text{ HF}$ , закрывали чашку крышкой и выпаривали до влажных солей. После охлаждения пробы края чашки и крышку обмывали водой, прибавляли  $10\text{ см}^3$  концентрированной  $\text{HNO}_3$  и выпаривали раствор до влажных солей в открытой чашке. Эту операцию повторяли 2 раза. Далее раствор выпаривали досуха и соли растворяли при кипячении в  $50\text{ см}^3\text{ 7 M HNO}_3$ .

Радиохимическую очистку урана от соосажденных с ним радиоактивных элементов осуществляли методом экстракции трибутилфосфатом (ТБФ) из азотнокислого раствора. Мешающими радионуклидами с близкими к изотопам урана энергиями альфа-частиц

являются  $^{210}\text{Po}$ ,  $^{226}\text{Ra}$  и  $^{230}\text{Th}$ .  $^{210}\text{Po}$  и  $^{226}\text{Ra}$  имеют низкие коэффициенты распределения в ТБФ и  $\text{HNO}_3$  (0,01 для радия и полония вместо  $>100$  для урана) и практически не экстрагируются трибутилфосфатом. Коэффициенты распределения урана и тория в 100%-ном ТБФ практически одинаковы. При использовании раствора ТБФ низкой концентрации - 30%, создаются условия для их разделения и происходит преимущественное извлечение урана. Окончательное отделение изотопов тория происходит на стадии реэкстракции элементов из органической фазы с помощью слабых растворов кислот с добавлением комплексообразователя (раствор 0,25 М  $\text{HNO}_3$  в 0,4 М  $\text{HF}$ ). После реэкстракции оставшийся раствор выпаривали досуха. Сухой остаток растворяли в 1 мл 2 % раствора  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  и осуществляли электролиз. Электролиз урана осуществляли на диски из нержавеющей стали в течение 30 мин при постоянном токе 2 А. Измерения полученных препаратов проводили с использованием альфа-спектрометров с полупроводниковыми кремниевыми детекторами «Прогресс» и «Мультирад-АС» (НПП Доза, Россия) (Методика измерения..., 2013).

### 2.2.13 Датирование торфяных отложений по изотопу $^{210}\text{Pb}$

Для  $^{210}\text{Pb}$  датирования торфяных разрезов ИСНО-1, ИСНДО-1 и ИСО-1 использовалась модель CF с применением метода моделирования Монте-Карло. Данная модель более известна по своему второму названию - модель постоянного уровня поступления CRS (Appleby, Oldfield, 1978). Для модели CF (CRS) фундаментальная гипотеза состоит в том, что поток  $^{210}\text{Pb}$  на поверхность торфяных залежей постоянен и не зависит от скорости накопления сухой массы торфа (Sanchez-Cabeza, Ruiz-Fernandez, 2012; Sanchez-Cabeza et al., 2014). Датирование производили по избыточному  $^{210}\text{Pb}$ , который находили путем вычитания равновесного  $^{210}\text{Pb}$  из общего  $^{210}\text{Pb}$  для каждого выделенного 2 см слоя керна. В связи со сложным распределением  $^{210}\text{Pb}$  по торфяному разрезу ИСНО-1, связанным с не экспоненциальным снижением активности  $^{210}\text{Pb}$  дополнительно использовался метод

аппроксимации для набора данных согласно (Swanek et al., 2021). Полученные результаты сопоставляли с пиками других техногенных изотопов, которые чаще всего соответствуют датам интенсивных радиоактивных выпадений (Mihalik et al., 2014).

#### **2.2.14 Моделирование вертикальной миграции и оценка связывания $^{137}\text{Cs}$ торфом**

Изучение поглощающей способности различных грунтов, в том числе торфа, в отношении экотоксикантов, например  $^{137}\text{Cs}$ , в зависимости от поставленных задач, может проводиться в статических или динамических условиях. Исследования проводятся с применением жидкой фазы стоков объекта или на растворах, моделирующих их химический состав. Полученные в ходе таких экспериментов результаты в дальнейшем могут быть использованы, например, для оценки предельной связывающей способности и предельного времени работы грунтовой толщи (торфяной залежи), как геохимического барьера (Геохимические барьеры..., 2002).

Оценку связывания  $^{137}\text{Cs}$  торфом в статических условиях проводили по методике, подробно описанной в (Орлов и др., 2023). Аликвоты раствора нитрата  $^{137}\text{Cs}$  объемом 25 мл (с активностью 26,7 Бк) добавляли к суспензии сорбента (0,4 г сорбента в 15 мл дистиллированной воды) в тefлоновых пробирках, при этом концентрация сорбента в полученной смеси составила 10 г/л.

После добавления радионуклида pH измеряли с помощью анализатора Эксперт-001 (Эконикс, Россия) в комплекте с комбинированным стеклянным электродом ЭСК-10603. Эксперимент проводили при трех значениях pH: 2, 4, 6. Значения pH регулировали добавлением небольших количеств разбавленных растворов  $\text{HNO}_3$  или  $\text{NaOH}$ . Образцы выдерживали 72 ч с периодическим перемешиванием с помощью лабораторного шейкера. После этого измеряли pH и разделяли жидкую и твердую фазы путем

центрифугирования при 11000 об/мин (ЦЛн-16, Россия) в течение 10 мин (Орлов и др., 2023).

Удельную активность радионуклида  $^{137}\text{Cs}$  в жидкой и твердой фазе определяли согласно методике указанной в п. 2.2.10 настоящего исследования.

Моделирование вертикальной миграции и оценку связывания  $^{137}\text{Cs}$  торфяной залежью проводили в динамических условиях в лизиметрах. Для этого извлекали из залежи торфяной керн прямоугольной формы с габаритами  $h = 50$  см,  $l = 32$  см и  $b = 30$  см и ненарушенной структурой. Полученный керн помещали в лизиметр – пластиковую емкость с перфорированным дном ( $d = 2$  мм; шаг 2 см) и размерами соответствующими габаритам керна. Лизиметр с керном устанавливали в торфяную залежь, как указано на рисунке 2.5:



а) участок ИСНО и б) участок ИСО  
Рисунок 2.5 – Моделирование вертикальной миграции  $^{137}\text{Cs}$ :

таким образом, чтобы поверхность керна соответствовала поверхности залежи. Далее на поверхность керна вносили точечную изотопную метку (50 мл нитрата  $^{137}\text{Cs}$  с активностью 300 Бк). Лизиметр с торфяным керном выдерживали в течение 1 года, после чего извлекали, делили полученный торфяной профиль на 2 см слои, высушивали и взвешивали. Для каждого слоя определяли удельную активность радионуклида  $^{137}\text{Cs}$ , как указано в п. 2.2.10 настоящего исследования. Эксперимент проводили на естественном (ИСНО) и осушенном (ИСО) участках, для профилей которых

предварительно определяли фоновое содержание  $^{137}\text{Cs}$ , которое учитывали в дальнейших расчетах.

### **2.2.15 Методы статистической обработки данных**

Для выявления связей между физико-химическими параметрами и распределением активностей выбранного ряда радионуклидов в торфяных разрезах исследуемых участков в данной работе использовали парный корреляционный анализ. Для оценки значимых отличий между участками с разным гидрологическим режимом по анализируемым показателям применяли непараметрический U-тест Манна-Уитни. Также выполнен факторный анализ, который позволил выявить структуру связей между изученными в диссертационной работе физическими, химическими, физико-химическими и радиационными параметрами торфяных залежей.

Статистическая обработка данных и построение графиков проводились с использованием программного пакета Microsoft Excel и Origin Pro 9.9.0.225, Version 2022 (OriginLab Corporation, USA) согласно (Бондаренко, Жигунов, 2016).

### 3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

Экосистемы торфяных болот являются основными биоценозами Субарктического региона Европейской России (Сирин, 2017), занимая обширные площади, которые в результате многочисленных испытаний и инцидентов в атомной отрасли подверглись значительному радиационному прессингу. Несмотря на это исследования радионуклидов в торфяниках этих территорий ограничены. Кроме того считается, что арктические биогеоценозы являются наиболее уязвимыми как к глобальным климатическим изменениям, так и к антропогенному воздействию, при этом их естественное восстановление может занимать достаточно длительное время (ФНИР, 2021).

Сезонные колебания геохимических параметров торфяных залежей в условиях субарктических регионов Европы могут быть более значительными, чем в южных регионах (ФНИР, 2021). Более широкий диапазон сезонных колебаний температуры, уровня грунтовых вод (гидрологический режим), окислительно-восстановительного и кислотно-основного режимов, а также проявление криогенных процессов ожидается приведет к существенному изменению вертикального распределения техногенных и природных радионуклидов по торфяному разрезу. Кроме того, осушение водно-болотных угодий для строительства или сельского хозяйства нарушает целостность торфяников, их естественный водный и химический режимы, запуская процессы разрушения органического вещества, которое удерживает радионуклиды (Boroić et al., 2001; Paoli et al., 2022). Поэтому чрезвычайно важно в дополнение к изучению уровней активности и вертикального распределения радионуклидов, также оценивать комплекс физико-химических параметров торфяных отложений, которые предположительно могут повлиять на подвижность и миграцию изотопов. Особенно это актуально ввиду того, что данные вопросы для бореальных

олиготрофных болот РФ на сегодняшний день остаются практически не затронутыми (Yakovlev et al., 2021).

В данной работе на примере Иласского болотного массива (Архангельская область), который является характерным представителем бореальных омбротрофных торфяников Прибеломорского типа, выполнено изучение вариаций и взаимного влияния ряда физических, химических, физико-химических и радиационных параметров для участков с естественным и нарушенным гидрологическим режимом. Гипотеза исследования состоит в следующем. Учитывая единый генетический тип и незначительную удаленность естественного и осушенных участков друг от друга, можно предположить, что начальные концентрации радионуклидов, поступающих на поверхность болота, были одинаковыми, в то время как различия в гидрологии через физико-химические условия залежи (параметры миграции) и свойства органического вещества торфа повлияли на дальнейшее перераспределение изотопов.

Для проверки гипотезы оценивались такие характеристические параметры как степень разложения, зольность, насыпная плотность, содержание влаги, карбонатов, водорастворимых солей, Eh, pH солевых и водных экстрактов, элементный и групповой химический состав органического вещества и содержание макроэлементов в торфе. Среди радионуклидов рассматривались искусственные –  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{241}\text{Am}$  и природные –  $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{234}\text{U}$  и  $^{238}\text{U}$ . Для оценки значимости отличий исследуемых параметров использовали U-тест Манна-Уитни. Структуру связи между физико-химическими и радиационными параметрами исследовали с помощью парного корреляционного и факторного анализа. Результаты представлены далее в п. 3.1 – 3.6.

### **3.1 Физические, химические и физико-химические параметры залежей**

Торфообразование представляет собой совокупность процессов биосинтеза и биогеотрансформации растительного материала, поэтому

многие свойства торфа с одной стороны наследуются от растений торфообразователей, а с другой стороны приобретаются в ходе их неполного разложения. Поэтому ботанический состав торфа является одной из ключевых характеристик, определяющих его другие параметры (Бамбалов, 1984; Бамбалов, 2005).

Согласно полученным экспериментальным данным, исследуемые профили залежей практически однородны по ботаническому составу и сложены преимущественно сфагновым видом торфа. В тоже время для торфа повторно заболоченного и осушенного участков было характерно наличие незначительной примеси пушицы в нижней части торфяного разреза. Тенденции изменения степени разложения ( $R$ ) – основного структурно чувствительного параметра торфа, выражаются в ее постепенном увеличении с глубиной залегания. Установлено, что  $R$  торфа находится в интервалах 0-7 %, 5-10 % и 7-17 % для естественного, повторно заболоченного и осушенного участков, соответственно (рисунок 3.1):



Рисунок 3.1 – Степень разложения, тип торфа и структура исследуемых залежей

Необходимо отметить, что изменение параметра  $R$  по глубине слоя 0-50 см, включающего в себя акротелм и верхнюю часть катотелма, для повторно заболоченного и осушенного участков, происходит не монотонно. Данная часть залежи наиболее подвержена влиянию колебаний уровня болотных вод и чувствительна к природным климатическим воздействиям и осушению. Наиболее значимое увеличение степени разложения отмечается в слое 10-20 см залежи ИСНДО-1 и 0-10 см залежи ИСО-1 (слой залежи, сформировавшийся с начала осушительных работ 1971-1975 г.) и

обусловлено, по-видимому, активизацией микробиологического разложения органического вещества торфа в зоне усиленной аэрации. Снижение степени разложения в слое 0-10 см залежи ИСНДО-1 связано с процессом повторного заболачивания данного участка в связи с частичным зарастанием системы осушительных каналов.

В целом антропогенное изменение гидрологического режима исследуемых участков верхового болота в значительной мере сопровождается вертикальной усадкой большей части торфяной залежи, что уже отмечалось ранее другими исследователями (Романова, 2021). Это происходит, в том числе, и за счет существенного снижения доли влаги в торфе, что приводит к уплотнению его структуры (рисунок 3.2):

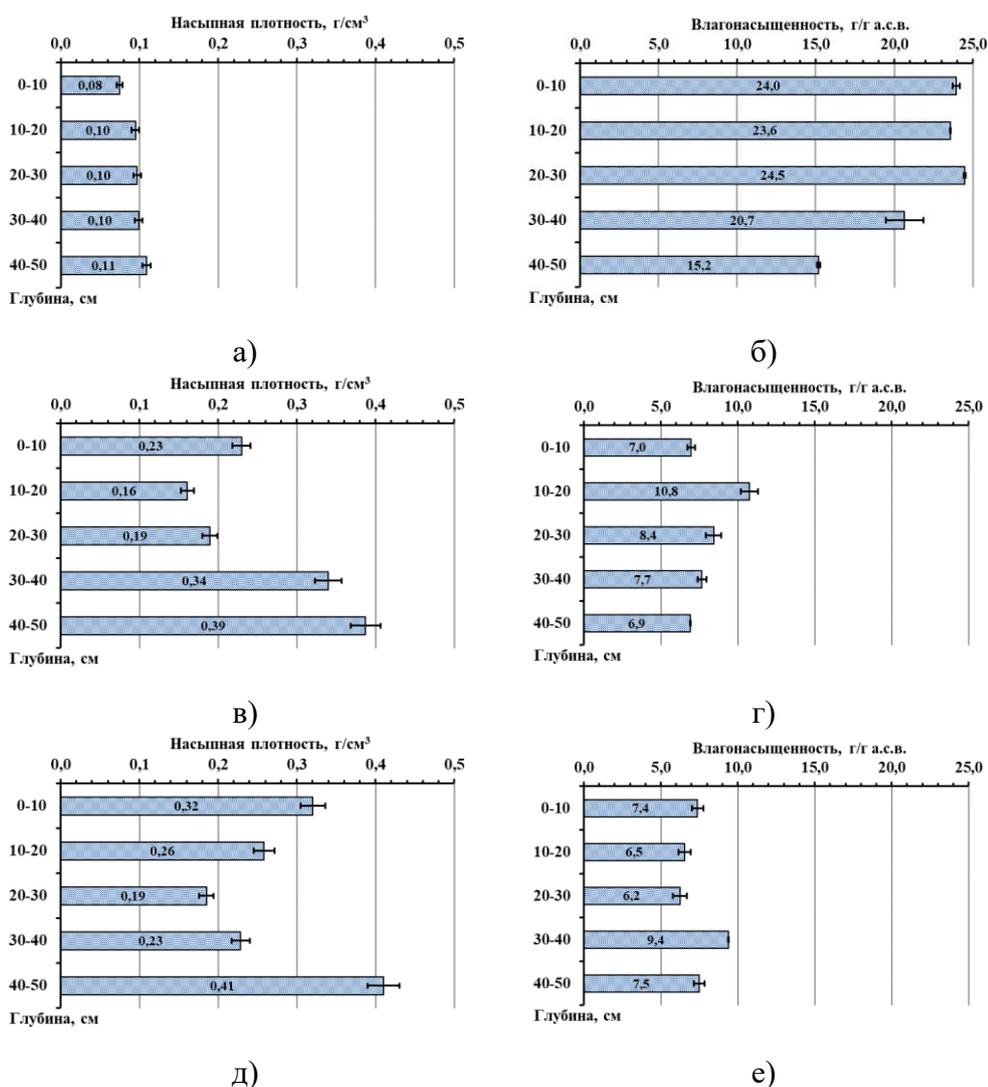


Рисунок 3.2 – Насыпная плотность и естественное влагосодержание торфа залежи: а), б) ИСНО-1; в), г) ИСНДО-1, д), е) ИСО-1

Поэтому для участка с повторным заболачиванием и осушенного участка отмечаются значения насыпной плотности  $0,19-0,39 \text{ г/см}^3$  и  $0,19-0,41 \text{ г/см}^3$  соответственно. Полученные результаты существенно превышают значения данного параметра, зафиксированные для естественного участка этого болота  $0,08-0,11 \text{ г/см}^3$  и других верховых торфяников прибалтийского типа в ненарушенном состоянии (Zubov, 2022; Ponomareva, 2021). Те же закономерности отмечаются и для естественной плотности сложения залежи – одного из показателей, используемых для оценки динамики накопления торфяных отложений.

Как уже отмечалось выше, осушение ожидаемо сопровождается снижением естественного влагосодержания в торфе. Для участка этого болота с естественным гидрологическим режимом (ИСНО-1) влагосодержание находится в интервале  $15-24 \text{ г/г}$  и снижается с глубиной залегания. Содержание влаги в торфе повторно-заболоченного (ИСНДО-1) и осушенного (ИСО-1) участков не имеет явно выраженной динамики по глубине залегания и находится в интервалах  $6,9-10,8 \text{ г/г}$  и  $6,3-9,4 \text{ г/г}$  соответственно, что существенно ниже значений, зафиксированных для естественного участка. Полученные величины сопоставимы с литературными данными, например для болот Белоруссии (Лиштван, 1989). Такое изменение данного параметра в совокупности с сезонными колебаниями уровня болотных вод (УБВ) может приводить к существенным вариациям аэрации и окислительно-восстановительного режима залежи. С одной стороны снижение уровня болотных вод способствует протеканию окислительных процессов, однако длительное осушение может способствовать уплотнению структуры торфа, что, по-видимому, может служить причиной снижения диффузии атмосферного кислорода в более глубокие слои залежи. Кроме того, циклические сезонные колебания УБВ способствуют вертикальному переносу лабильных органических и минеральных компонентов, которые могут находиться в растворенном, коллоидном и тонкодисперсном взвешенном состоянии. Это приводит, в том числе к вертикальной и

литеральной дифференциации таких показателей как активная и обменная кислотность, содержание зольных компонентов и водорастворимых солей. Такие показатели принято относить к общетехническим параметрам торфа (Косов и др., 2007; Лиштван, 1989).

Величина активной кислотности в изученных торфяных профилях варьирует в пределах: 3,7-4,5 рН (ИСНО-1), 3,5-4,3 рН (ИСНДО-1) и 3,5-4,4 рН (ИСО-1), а обменная кислотность составляет 2,7-3,0 рН, 2,6-3,2 рН и 2,6-3,5 рН соответственно. По полученным данным исследуемый торф можно отнести к сильнокислой группе, поскольку значения рН ниже 4,5 единиц. Кислотность торфа обусловлена наличием свободных кислот, в частности уксусной, муравьиной, щавелевой, молочной и другими кислотами (Lishtvan et al., 1989). В вертикальном распределении кислотности наблюдается ее незначительное снижение с глубиной (Рисунок 3.3):

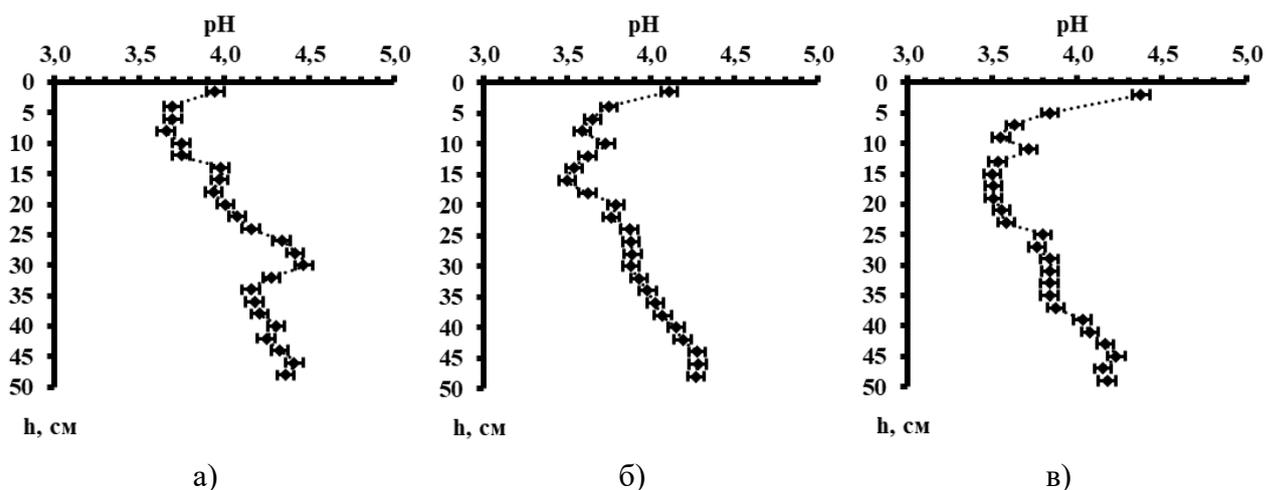
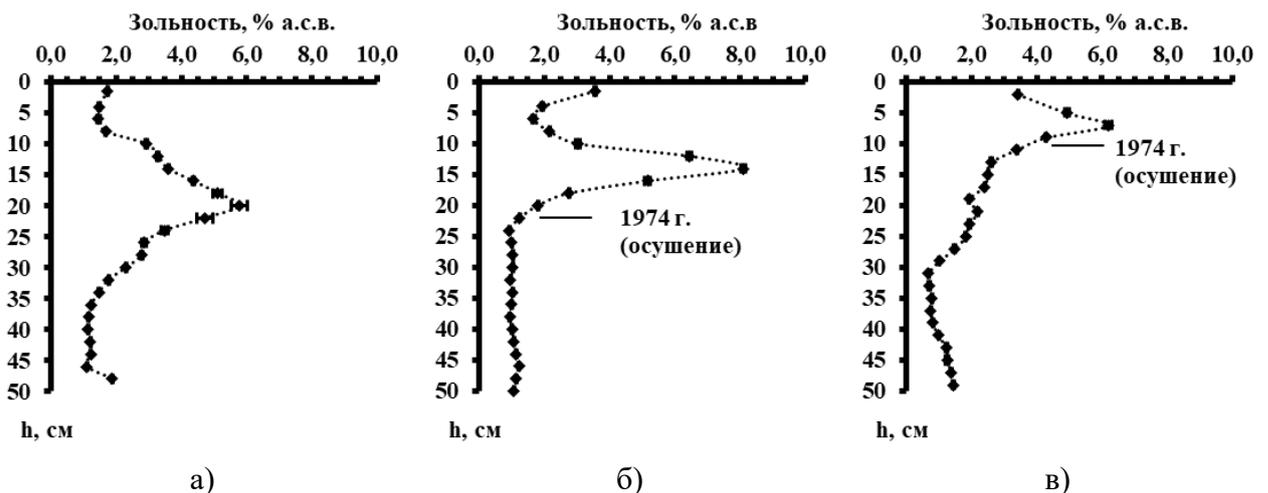


Рисунок 3.3 – рН торфа залежи исследуемых участков:  
а) ИСНО-1; б) ИСНДО-1; в) ИСО-1

При этом отмечаются повышенные значения рН в приповерхностном слое торфа 0-6 см, характерные и для естественного, и для нарушенных участков, что связано с вымыванием низкомолекулярных органических кислот, которые могут влиять на подвижность радионуклидов. С другой стороны, вымывание низкомолекулярных кислот вглубь залежи, где преобладают восстановительные условия, могут способствовать протеканию процессов ацетокластического и автотрофного метаногенеза, при которых активно расходуются  $H^+$ , ацетат и формиат ионы (Garsia et al., 2000; Horn et al., 2003).

Величина зольности для естественного участка (ИСНО-1) изменяется в интервале 1,1-5,8 %, а максимум зольности зафиксирован на глубине 19-21 см. Он обусловлен, вероятно, за счет вымывания зольных компонентов с поверхностных слоев торфа и их концентрированием в данном слое. Антропогенное воздействие, проявляемое в прошлом, так же может являться причиной скачка показателя зольности. Ниже глубины 19-21 см наблюдается тенденция немонотонного снижения зольности при переходе к более глубоким слоям профилей, связанная с атмосферным типом питания болота. Для участков ИСНДО-1 и ИСО-1 величина данного параметра составляет 0,9-8,1 % и 0,7-6,2 %. В вертикальном распределении отмечается максимум содержания зольных компонентов в горизонте 13-15 см и 6-8 см для профиля ИСНДО-1 и ИСО-1 соответственно (рисунок 3.4):



а) б) в)  
Рисунок 3.4 – Зольность торфа залежи исследуемых участков:  
а) ИСНО-1; б) ИСНДО-1; в) ИСО-1

Таким образом, для этих участков происходит значительное смещение обогащенного зольными компонентами горизонта вверх по разрезу по сравнению с естественным участком, что связано, вероятно, с уплотнением структуры торфа и с разложением его органической части вследствие осушения. Антропогенное воздействие, проявляемое в прошлом, так же может являться причиной скачка показателя зольности (Vaasma et al., 2017). Зафиксированные значения позволяют отнести торф данных залежей к малозольному типу с низкой степенью разложения (Parfenova et al., 2016).

Содержание водорастворимых солей для апробированных в настоящем исследовании торфяных разрезов находится в интервалах 0,8-1,8 мг/г (ИСНО-1), 0,7-2,5 мг/г (ИСНДО-1) и 0,5-2,7 мг/г (ИСО-1). В целом для них были зафиксированы единые тенденции изменения данного параметра по глубине (рисунок 3.5):

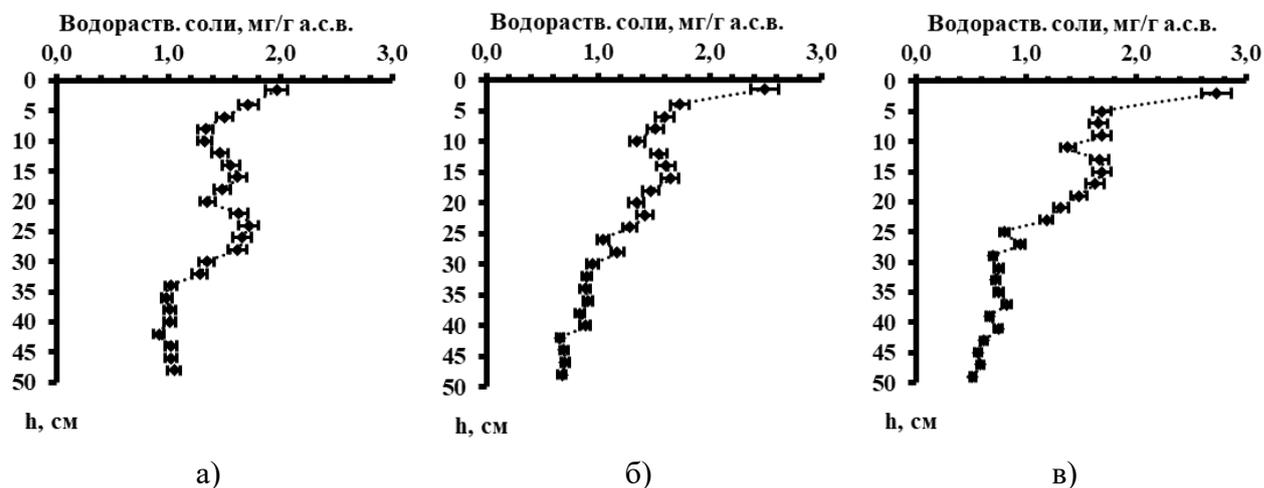


Рисунок 3.5 – Содержание водорастворимых солей (электролитов) в торфе залежи исследуемых участков:  
а) ИСНО-1; б) ИСНДО-1; в) ИСО-1

Максимальная концентрация солей наблюдается в самом верхнем слое торфа. Ниже по разрезу отмечается практически монотонное снижение данного показателя, что, по-видимому, обусловлено атмосферным механизмом питания залежи, а также деятельностью ризосферы торфообразователей. Полученные значения физико-химических параметров позволяют отнести исследуемый торф к кислой фации олиготрофных торфяных почв (Шишов и др, 2004).

Динамика изменения показателя  $Eh_4$  по глубине исследуемой части торфяных профилей свидетельствует о наличии контрастного окислительно-восстановительного режима, при котором умеренно-окислительные условия при движении от поверхности в глубь залежи постепенно сменяются восстановительными. Наиболее выраженное снижение  $Eh_4$  характерно для слоя 0-50 см для всех рассматриваемых в настоящей работе торфяных разрезов (рисунок 3.6):

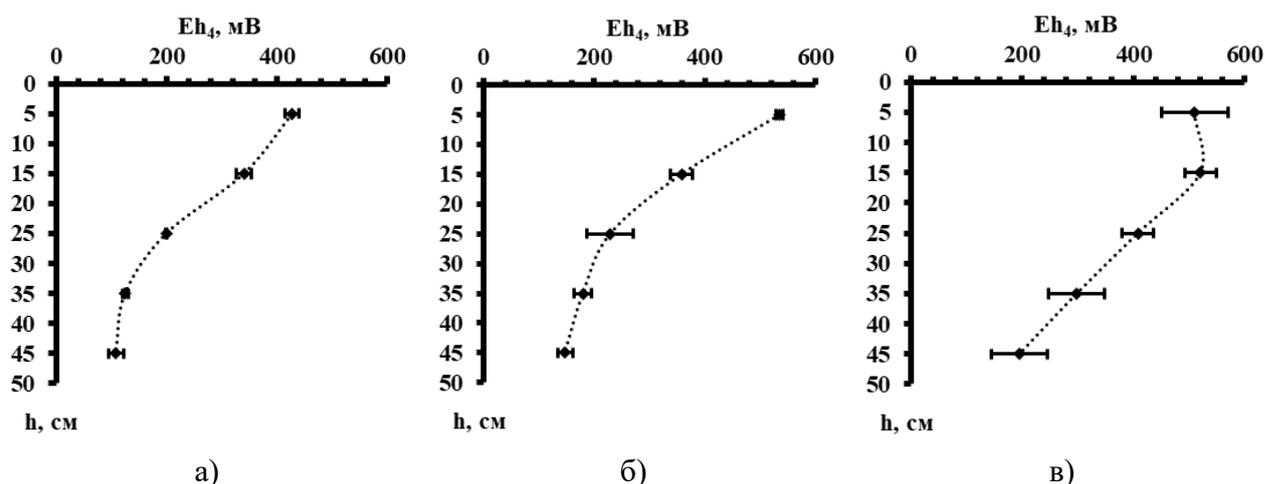


Рисунок 3.6 – Динамика окислительно-восстановительного режима по вертикальному профилю исследуемых залежей (средние значения за май-октябрь 2021-2022 гг.):  
а) ИСНО-1; б) ИСНДО-1; в) ИСО-1

Средние значения (за весенне-осенний период 2021-2022 гг.) окислительно-восстановительного потенциала, зафиксированные для слоя 0-50 см, в пределах естественного участка составляет 109-428 мВ. Для повторнозаболоченного участка и площадки с устойчивым осушением величина  $Eh_4$  находятся в пределах 147-535 мВ и 195-521 мВ соответственно, что несколько выше, чем для площадки с естественным гидрологическим режимом. Также необходимо отметить большую сезонную вариативность параметра  $Eh_4$  для профилей ИСНДО-1 и ИСО-1 по сравнению с ИСНО-1, что связано с большей временной нестабильностью и более широким интервалом колебания уровня болотных вод (см. п. 2.1; таблица А1; таблица А2, таблица А3 и таблица А4 Приложения А).

Параметры рН и минерализация болотных вод не монотонно изменяются по глубине и находятся в интервалах 3,1-4,3 рН, 18-52 мг/л; 3,7-4,7 рН, 30-80 мг/л и 3,5-3,9 рН, 30-75 мг/л для ИСНО-1, ИСНДО-1 и ИСО-1 соответственно, что в целом характерно для верховых болот таежных ландшафтов.

Продолжительное изменение гидрологического режима в ходе глобальных климатических флуктуаций или осушения оказывает влияние на состояние органической части торфа, доля которой достигает 99 % от сухого вещества торфа (Бамбалов, 1984; ФНИР, 2021; Lishtvan et al., 1989) и предположительно оказывает определенную роль в связывании и миграции

радионуклидов. В процессе торфонакопления происходит биогетотрансформация растительных остатков – разрушение структуры, распад синтезированных растениями органических веществ и образование новых соединений. Это закономерно проявляется в изменении соотношения основных компонентов органического вещества торфа (рисунок 3.7):

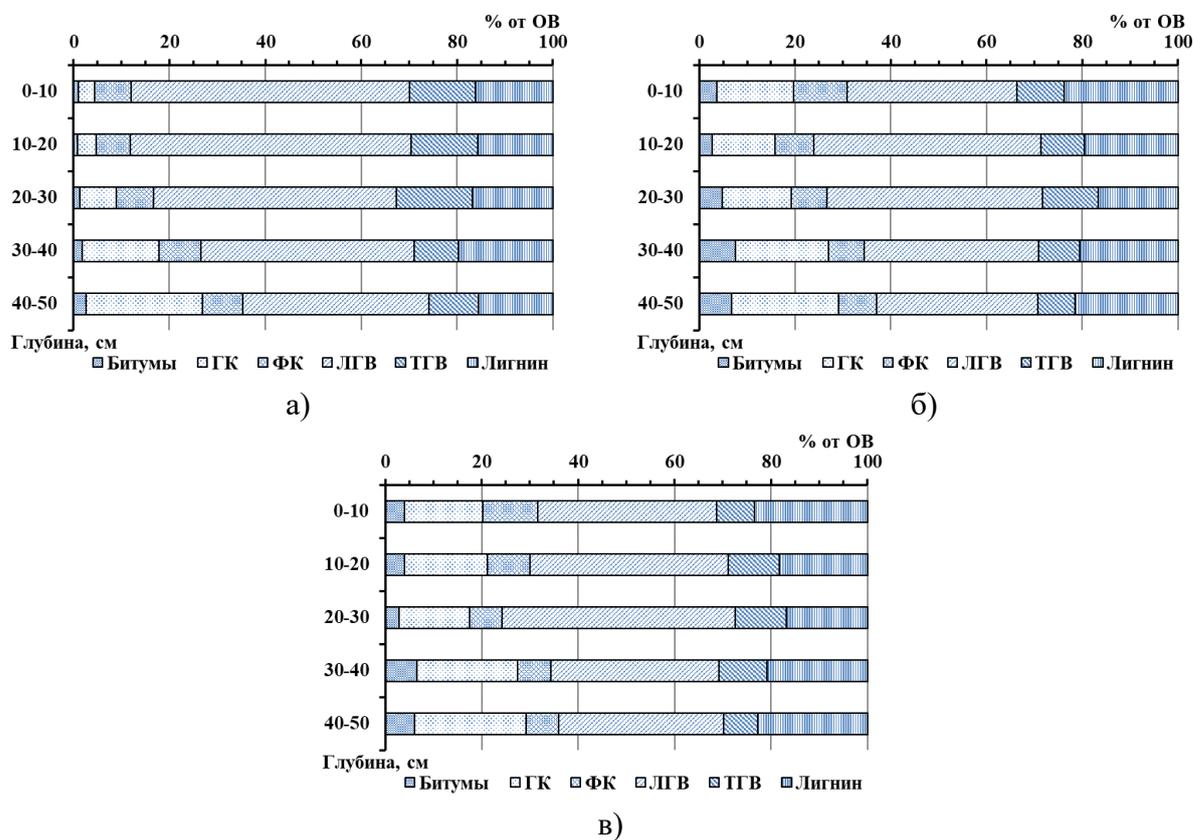


Рисунок 3.7 – Групповой компонентный состав органического вещества торфа исследуемых залежей: а) ИСНО-1; б) ИСНДО-1; в) ИСО-1

Оценка изменения группового состава ОВ торфа по вертикальному профилю исследуемых залежей показала, что для залежи с естественным гидрологическим режимом с глубиной залегания монотонно увеличивается доля термодинамически устойчивой составляющей – битумной части и ГК преимущественно за счет трансформации углеводной составляющей, а фульватный (ГК/ФК=0,45) тип гумусообразования сменяется на фульватно-гуматный (ГК/ФК=0,56-1,00) и гуматный (ГК/ФК=1,81-2,89). Для участка с постмелиоративным заболачиванием и осушенного участка характерно не монотонное изменение содержания компонентов ОВ по глубине, в частности верхний слой (0-20 см), подверженный аэрации, характеризуется повышенным содержанием биополимеров гумусовой природы и битумов,

для залежи характерен гуматно-фульватный (ГК/ФК=1,41-1,45) и гуматный (ГК/ФК=1,60-3,40) типы гумусообразования. Полученные результаты хорошо согласуются с данными по элементному составу, степени разложения,  $Eh_4$  и другим физико-химическим показателям.

Относительное содержание основных элементов в органической части торфа составило: 0,9-1,6 (N); 27,3-34,4 (C); 46,3-53,9 (H); 16,8-19,3 (O) атомных % для разреза ИСНО-1; 0,9-1,6 (N); 27,3-34,4 (C); 46,3-53,9 (H); 16,8-19,3 (O) атомных % для разреза ИСНДО-1 и 0,3-1,0 (N); 31,0-35,0 (C); 43,4-47,3 (H); 16,6-23,6 (O) атомных % в профиле ИСО-1. Полученные значения в целом являются характерными для биомассы болотной растительности и торфов низкой степени разложения. Для изученных участков наблюдается немонотонное изменение содержания углерода, азота, водорода и кислорода по глубине разреза (рисунок 3.8, рисунок 3.9, рисунок 3.10), обусловленное протеканием множества химических и биохимических процессов в залежи. Необходимо отметить некоторое науглероживание ОВ торфа при движении от поверхности вглубь залежи, а содержание кислорода, напротив снижается с глубиной залегания. Кроме того, отчетливо наблюдается снижение содержания N в торфе профилей ИСНДО-1 и ИСО-1 по сравнению с профилем естественного участка ИСНО-1, что вероятно связано с интенсификацией микробных процессов деструкции ОВ, при которых часть запасенного в торфе азота расходуется почвенной биотой (рисунок 3.8 а, рисунок 3.9 а, рисунок 3.10 а).

Величина Н/С находится в интервалах 1,3-2,0 для ИСНО-1, 1,2-1,4 для ИСНДО-1 и 1,3-1,5 для ИСО-1, что указывает на явное преобладание алифатических структур в органической части торфа ( $H/C > 1$ ) (Orlov, 1992). Динамика данного параметра, представленная на рисунках 3.8 д, 3.9 д, 3.10 д свидетельствует о некотором увеличении доли ароматических фрагментов в ОВ торфа с ростом глубины залегания и в результате осушения.

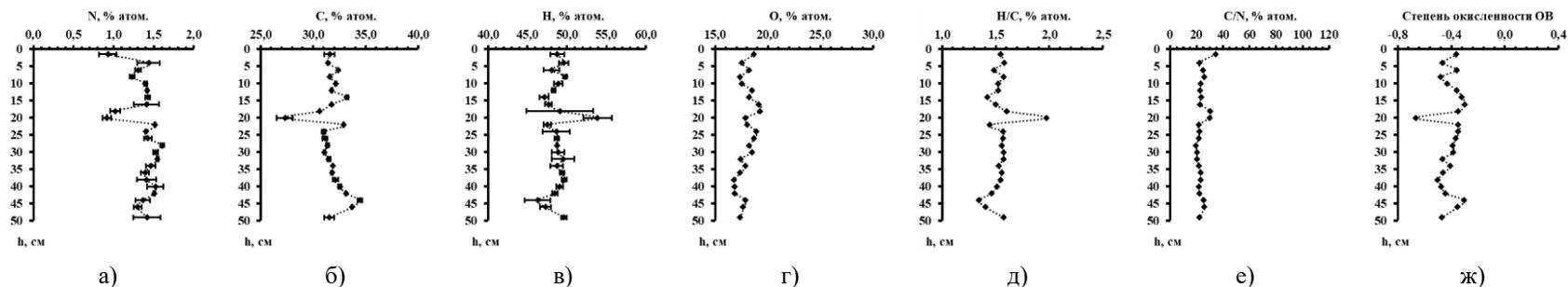


Рисунок 3.8 – Элементный состав торфа залежи участка ИСНО-1:

а) азот (N); б) углерод (C); в) водород (H); г) кислород (O); д) Н/С; е) С/Н; ж) степень окисленности ОВ

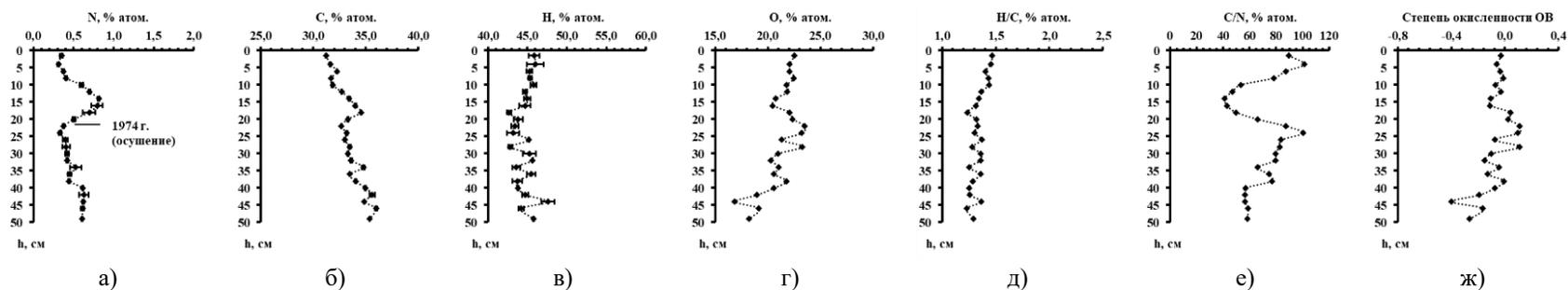


Рисунок 3.9 – Элементный состав торфа залежи участка ИСНДО-1:

а) азот (N); б) углерод (C); в) водород (H); г) кислород (O); д) Н/С; е) С/Н; ж) степень окисленности ОВ

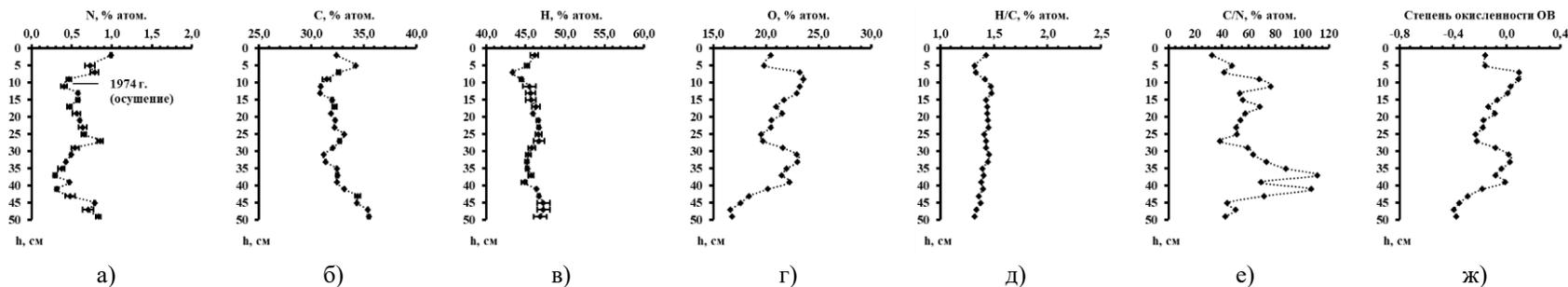
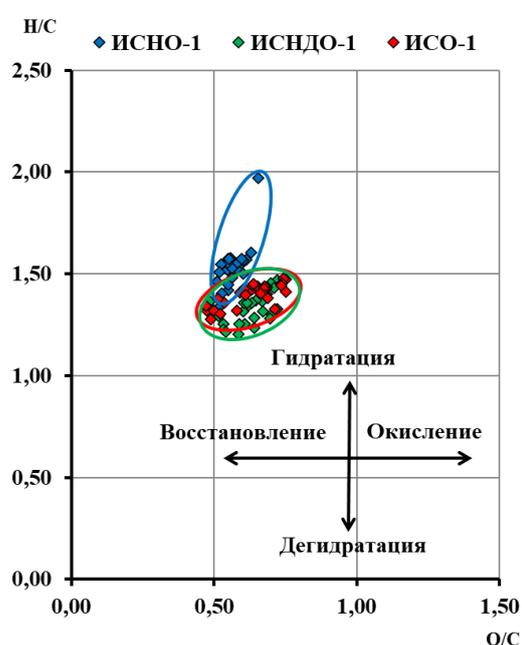


Рисунок 3.10 – Элементный состав торфа залежи участка ИСО-1:

а) азот (N); б) углерод (C); в) водород (H); г) кислород (O); д) Н/С; е) С/Н; ж) степень окисленности ОВ

Средняя степень окисленности органического вещества торфа для исследуемых участков составляет от -0,66 до -0,08 и увеличивается в ряду ИСНО-1, ИСНДО-1, ИСО-1. Отношение C/N составляет для естественного участка составляет 20-34, что является типичным для торфа мохового типа. Для повторно заболоченного и осушенного участка данный параметр варьирует в интервалах 41-102 и 33-114 соответственно, что свидетельствует о сильной обеденности азотом в ходе осушительных процессов (Schulz, 2019).



Графостатический анализ данных (по Ван-Кревелину) по элементному составу колонок торфа с ненарушенного, осушенного и участка со вторичным заболачиванием (рисунок 3.11):

Рисунок 3.11 – Диаграмма отношений N/C – O/C торфа профилей исследуемых залежей (по Ван-Кревелину)

показал, что осушение в значительной степени усиливает процессы окислительной трансформации

органического вещества торфа в основном в приповерхностном слое залежи, при этом значительной интенсификации этих процессов в нижележащих слоях может и не наблюдаться. По-видимому, это связано с тем, что доступ кислорода вглубь залежи может ограничиваться (что отчасти подтверждается изменением показателей  $Eh_4$ ) в первую очередь за счет уплотнения залежи.

Результаты по разделу 3.1 апробированы и представлены в виде публикаций (Yakovlev et al., 2022; Yakovlev et al., 2023).

### 3.2 Распределение Fe, Mn, Al, Na, K, Mg и Ca в залежах

Содержание и распределение макроэлементов Fe, Mn, Al, Na, K, Mg и Ca в торфе является важной геохимической особенностью торфяной залежи,

поскольку с одной стороны характеризует гео- и гидрохимические условия и режим питания болот (Калюжный, 2017), с другой стороны может служить индикатором техногенной нагрузки территорий (Шевченко и др., 2015) либо природных катаклизмов, например торфяных пожаров (Хорошавин и др., 2013). Так соединения Fe, Mn и Al в заболоченных почвах, как и органические компоненты, могут выступать в качестве коллекторов радиоэлементов, например U (Рачкова, 2006). Присутствие ионов щелочных и щелочноземельных металлов:  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  и  $\text{Ca}^{2+}$  также является важным условием, поскольку они представляют собой геохимические аналоги  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  и способны ограничивать связывание этих радионуклидов твердой фазой за счет конкурентной сорбции (Strelko et al., 2015).

Результаты по вертикальному распределению макроэлементов в профилях исследуемых залежей представлены в таблицах Б.1-Б.3. Приложения Б и на рисунках 3.12-3.14. В целом для определяемого в исследовании спектра металлов, кроме Fe и Al характерны тенденции снижения их содержания с глубиной залегания торфа, что указывает на атмосферный источник их поступления и согласуется с представлением о функционировании верховых торфяниках.

Концентрации элементов в торфе керна ИСНО-1 составили: К 16-826 мг/кг, Na 45-226 мг/кг, Mg 227-602 мг/кг, Ca 496-1697 мг/кг, Fe 370-788 мг/кг, Mn 5,8-74,9 мг/кг и Al 152-1004 мг/кг. Для торфа разреза ИСНДО-1 находятся в интервале: К 13-1589 мг/кг, Na 17-139 мг/кг, Mg 242-488 мг/кг, Ca 727-1583 мг/кг, Fe 526-2037 мг/кг, Mn 4,1-49,9 мг/кг и Al 132-704 мг/кг. В торфе профиля ИСО-1 содержание металлов составило: К 22-1903 мг/кг, Na 6-138 мг/кг, Mg 156-857 мг/кг, Ca 483-3431 мг/кг, Fe 144-2957 мг/кг, Mn 3,5-342,3 мг/кг и Al 110-1142 мг/кг.

Необходимо отметить, что осушение залежи способствует концентрированию в приповерхностном слое залежи таких биогенных элементов как К, Са, Mg и Mn.

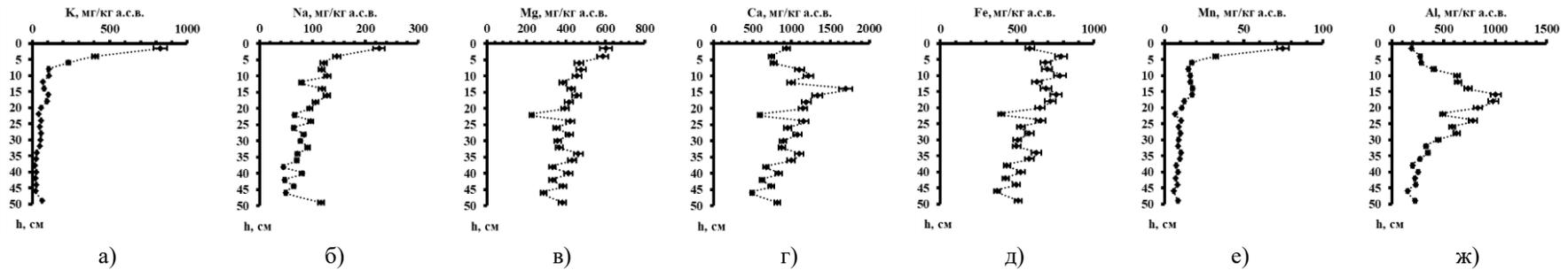


Рисунок 3.12 – Распределение (валовое) макроэлементов в торфе залежи участка ИСНО-1:

а) калий (K); б) натрий (Na); в) магний (Mg); г) кальций (Ca); д) железо (Fe); е) марганец (Mn); ж) алюминий (Al)

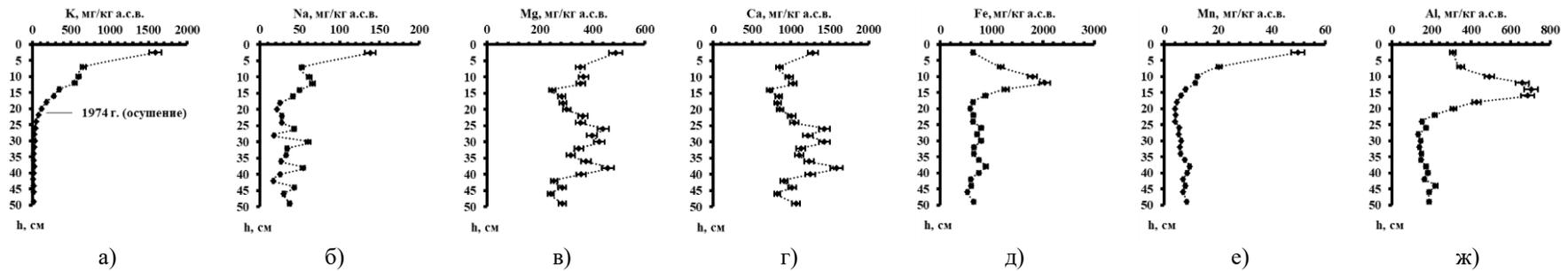


Рисунок 3.13 – Распределение (валовое) макроэлементов в торфе залежи участка ИСНДО-1:

а) калий (K); б) натрий (Na); в) магний (Mg); г) кальций (Ca); д) железо (Fe); е) марганец (Mn); ж) алюминий (Al)

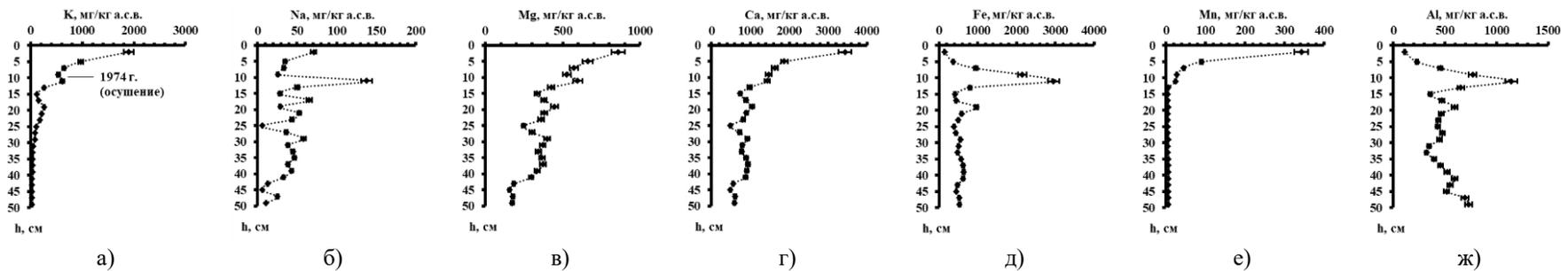


Рисунок 3.14 – Распределение (валовое) макроэлементов в торфе залежи участка ИСО-1:

а) калий (K); б) натрий (Na); в) магний (Mg); г) кальций (Ca); д) железо (Fe); е) марганец (Mn); ж) алюминий (Al)

Для железа и алюминия отмечаются пики концентрирования на глубине 21 см в керне участка ИСНО-1, 14 см в керне участка ИСНДО-1 и 11 см в профиле участка ИСО-1. Они практически совпадают с пиками зольности на этих площадках и приходятся на 1971-1975 гг., то есть на период проведения осушительных работ на этой части болотного массива. Концентрации элементов Fe, Mn, Al, Na, K, Mg и Ca зафиксированные в торфе исследуемых участков сопоставимы с данными, полученными ранее для другой части Иласского болотного массива и других болот Архангельской области (Parfenova et al., 2016). Они находятся гораздо ниже, чем содержание данных металлов в земной коре, что указывает на отсутствие техногенного загрязнения данного болотного массива (Lide, 2004).

Таким образом, учитывая выше сказанное можно сказать, что физико-химические параметры и условия являются важными показателями функционирования и развития торфяников южноприбалтийского типа.

### **3.3 Активности и распределение искусственных ( $^{137}\text{Cs}$ , $^{241}\text{Am}$ ) и естественных ( $^{210}\text{Pb}$ , $^{238}\text{U}$ и $^{234}\text{U}$ ) радионуклидов в залежах**

В данном разделе работы рассматриваются особенности вертикального распределения активностей техногенных радионуклидов –  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{241}\text{Am}$ , также природных радионуклидов –  $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{238}\text{U}$  и  $^{234}\text{U}$  для ненарушенного, осушенного и участка со вторичным заболачиванием. Первичные данные представлены в таблицах В.1 - В.3, Приложения В.

Активность  $^{241}\text{Am}$  в профиле ненарушенного участка находится ниже предела обнаружения метода исследования. На осушенном участке основная активность  $^{241}\text{Am}$  сосредоточена в слое 8-20 см и варьирует от 1,0 до 2,1 Бк/кг, а на повторно заболоченном в 7-19 см и составляет от 0,6 до 2,1 Бк/кг (рисунок 3.15 а, б, в). Максимумы америция на осушенном и повторнозаболоченном участках, вероятно, обусловлены его концентрированием в основном в ходе физического уплотнения залежи в

результате осушения. А в меньшей мере за счет снижения доли ОВ при более активном разложении торфа в залежи нарушенных участков.

Накопление  $^{137}\text{Cs}$  происходит в верхней части торфяного профиля 0-27 см естественного участка ИСНО-1, активность варьирует в пределах от 3,2 до 45,6 Бк/кг с максимумами на 4 и 20 см (45,6 Бк/кг и 45,5 Бк/кг). Для осушенного участка и площадки со вторичным заболачиванием основная иммобилизация  $^{137}\text{Cs}$  характерна для 0-25 см, где активность находится в интервале от 2,6 до 142,6 Бк/кг с максимумом на 2 см (142,6 Бк/кг) и 0-27 см с активностью от 1,6 до 103,8 Бк/кг с максимумами на 2,5 и 12 см (103,8 и 51,4 Бк/кг) соответственно (рисунок 3.15 г, д, е):

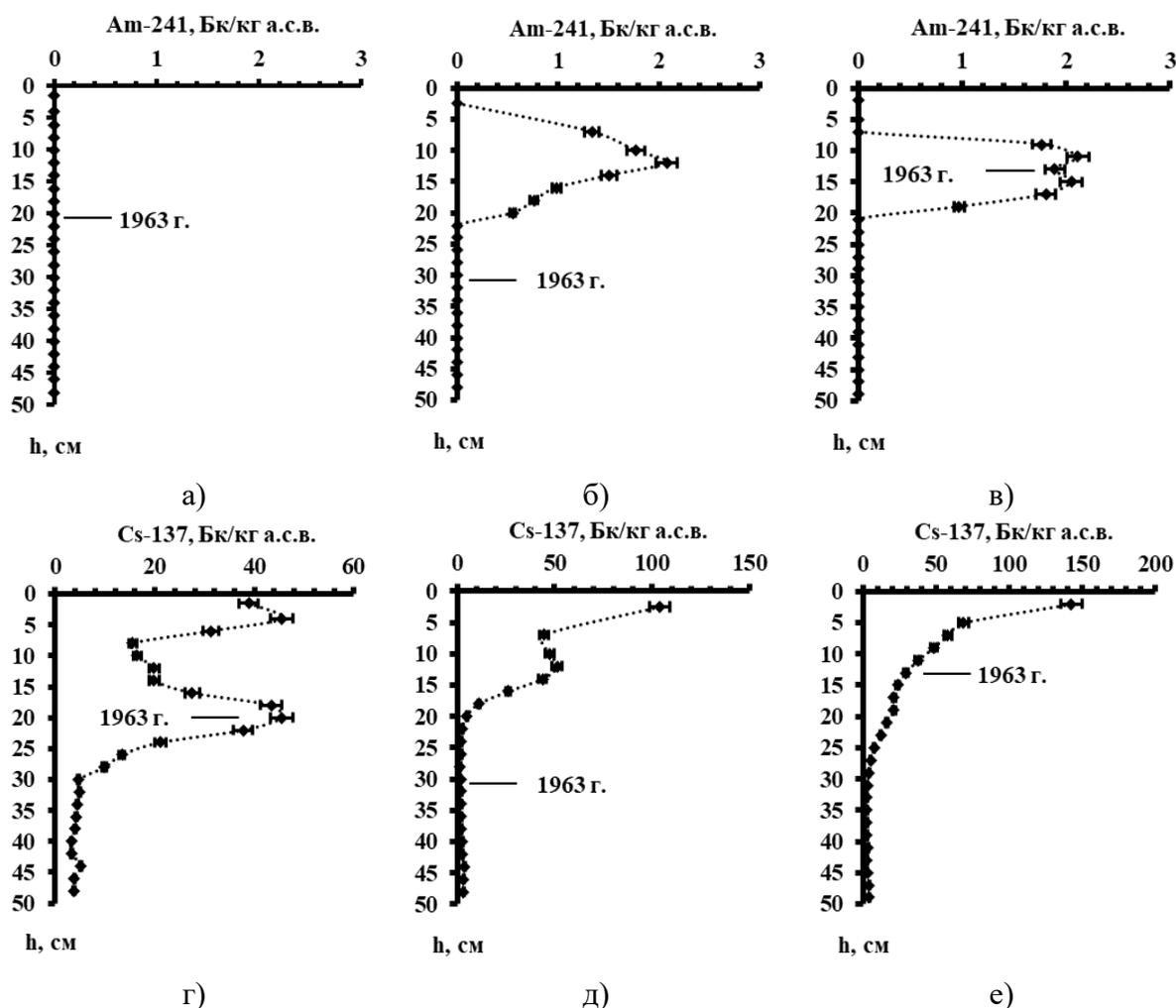


Рисунок 3.15 – Распределение активностей  $^{241}\text{Am}$  и  $^{137}\text{Cs}$  по вертикальным профилям исследуемых залежей:

а), г) ИСНО-1; б), д) ИСНДО-1; в), е) ИСО-1

Распределение  $^{137}\text{Cs}$  в профилях ИСНДО-1 и ИСО-1 практически отвечает типичной модели его распределения в верховых торфяниках,

которая объясняется высокой подвижностью радиоцезия в торфяных водах и его поглощением как не требовательными к минеральному питанию сфагновыми мхами, так и более требовательными сосудистыми растениями (Łokas et al., 2013; Mihalík et al., 2014; Mroz et al., 2017). Максимум активности  $^{137}\text{Cs}$  на 20 см в профиле ИСНО-1 соответствует пику зольности в данном керне и объясняется, по-видимому, его прочной избирательной сорбцией минеральной составляющей торфа. При близких суммарных запасах  $^{137}\text{Cs}$  в исследуемых торфяных залежах изменения гидрологического режима приводят к существенным различиям в вертикальном распределении  $^{137}\text{Cs}$ . Из этого можно сделать вывод, что осушение болотного массива в условиях Архангельской области приводит к усилению биогенной миграции  $^{137}\text{Cs}$  и ускоряет его миграцию вверх по разрезу в зоне досягаемости ризосферы.

Запасы  $^{137}\text{Cs}$  для исследуемого приповерхностного слоя мощностью 0,5 м составили 385 Бк/м<sup>2</sup> для естественного участка, 404 Бк/м<sup>2</sup> для участка с постмелиоративным заболачиванием и 717 Бк/м<sup>2</sup> для осушенного участка. Полученные результаты соответствуют низкому уровню загрязнения и согласуются с ранее полученными данными для Европейской субарктики РФ (Яковлев и др., 2021).

Для более глубокого понимания процессов вертикальной миграции  $^{137}\text{Cs}$  выполнена оценка его распределения в системе твердая фаза-взвесь-поровая вода на примере участка с естественным гидрологическим режимом Исно-1. Данный техногенный радионуклид обладает относительно высокой подвижностью в залежи ввиду крайне незначительного содержания минеральной компоненты, способной селективно и прочно его удерживать. Поэтому предполагается, что  $^{137}\text{Cs}$  связывается органической частью торфа по ионообменному механизму и находится в динамическом равновесии между твердой матрицей торфа и болотными поровыми водами.

Показано, что межфазное распределение  $^{137}\text{Cs}$  характеризуется увеличением миграционно-способных форм (растворенных и связанных с

взвешенными частицами) с глубиной залежи. Так, для горизонта 0-10 см распределение между фазами торфа, взвеси, растворенных компонентов составляет 98,1, 0,9 и 0,9 %, соответственно. При этом, на глубине 20-30 см, распределение имеет следующее соотношение 85,4 % для твердой торфа, 10,9 % для взвешенных частиц и 3,6 % для растворенных компонентов (рисунок 3.16):

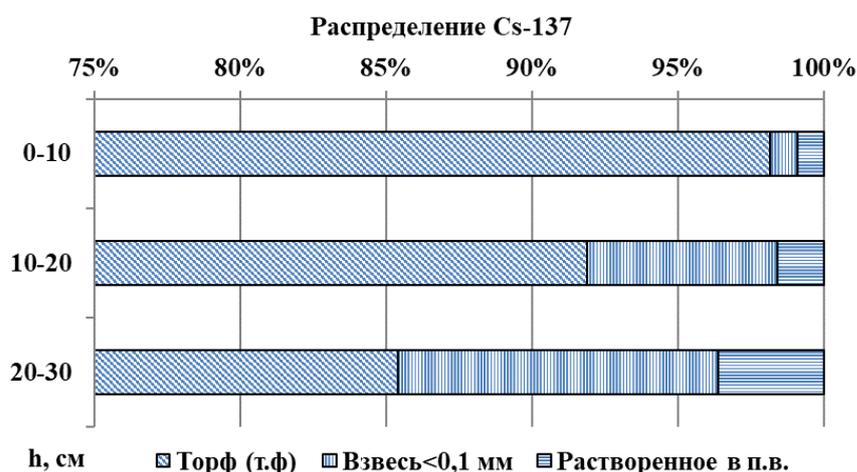


Рисунок 3.16 – Распределение  $^{137}\text{Cs}$  в системе «твердая фаза-взвесь-поровая вода» естественного участка Исно-1

Исходя из предварительно оцененной динамики изменения группового химического состава органической части торфа по вертикальному профилю залежи, и в частности фульвокислот, массовая доля которых максимальна в слое 0-10 см и снижается с глубиной, а также с распределением валовой активности  $^{137}\text{Cs}$ , предполагалось, что максимальное содержание подвижных форм цезия (растворенного) будет наблюдаться для верхних горизонтов исследуемой залежи. Однако мы видим противоположную картину. Вероятной причиной такого распределения является нахождение  $^{137}\text{Cs}$  в составе растворенных в поровой воде комплексов с низкомолекулярными и олигомерными органическими соединениями, а также коллоидными и взвешенными частицами с размерами менее 0,1 мм. В частности, на это указывают результаты определения растворенных в поровой воде органических и неорганических веществ, концентрация которых увеличивается по глубине залежи от 95 мг/л для горизонта 0-10 см до 258 мг/л для горизонта 40-50 см, что коррелирует с результатами по валовой

активности цезия в жидкой фазе торфа. Аналогичная тенденция наблюдается и для  $^{137}\text{Cs}$ , связанного со взвешенными частицами.

Природный радионуклид  $^{210}\text{Pb}$ , который непрерывно образуется в атмосфере при радиоактивном распаде  $^{222}\text{Rn}$ , входящий в состав  $^{238}\text{U}$  часто используется в качестве независимого параллельного геохронометра при изучении накопления торфяных залежей для проверки данных об искусственных радионуклидах (Appleby, 2008; Roux, Marshall 2011; Mroz et al., 2017). Предполагается, что скорость поступления  $^{210}\text{Pb}$  на поверхность торфяника относительно постоянна, а способность к миграции  $^{210}\text{Pb}$  вдоль торфяного профиля очень ограничена из-за его химических характеристик (Vile et al., 1999). В связи с этим в торфяной залежи, как правило, наблюдается экспоненциальное или близкое к экспоненциальному снижение активности  $^{210}\text{Pb}$  вниз по профилю, что позволяет, несмотря на временные колебания скорости осаждения, получить достаточно точную и непрерывную хронологическую последовательность торфа.

Для площадок ИСНО-1, ИСНДО-1 и ИСО-1 наблюдается постепенное снижение активности  $^{210}\text{Pb}$  по глубине залегания, при этом для профиля естественного участка зафиксирован дополнительный пик на глубине 20 см, совпадающий с максимумом параметра зольности для этого торфяного разреза (рисунок 3.17):

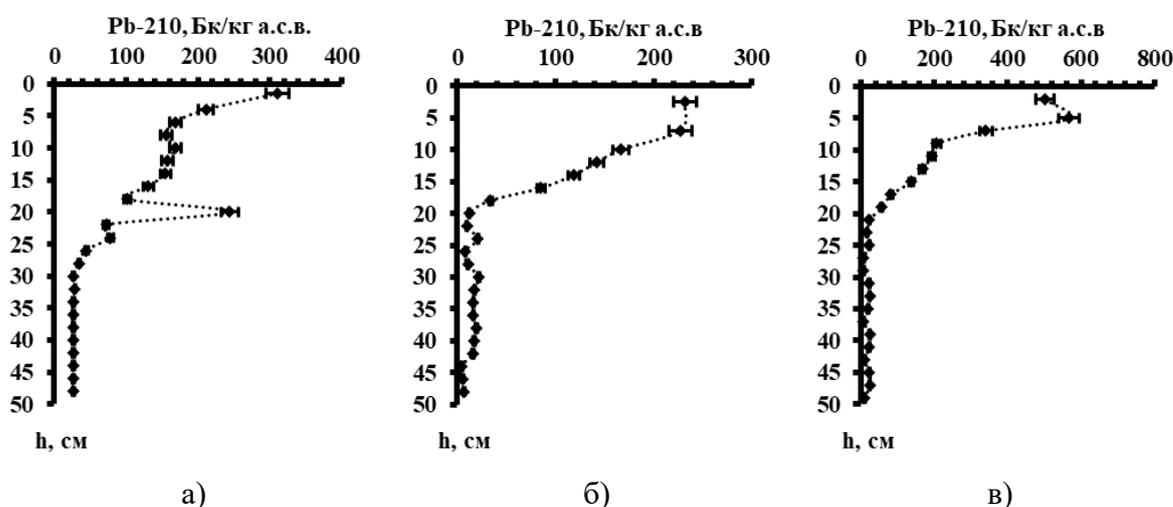


Рисунок 3.17 – Распределение активностей  $^{210}\text{Pb}$  по вертикальным профилям исследуемых залежей:

а) ИСНО-1; б) ИСНДО-1; в) ИСО-1

Активность  $^{210}\text{Pb}$  в керне естественного участка ИСНО-1 варьирует в пределах от 26,2 до 310,8 Бк/кг с максимумами на 1,5 и 20 см (310,8 Бк/кг и 243,9 Бк/кг). Для осушенного участка и площадки со вторичным заболачиванием активность  $^{210}\text{Pb}$  находится в интервале от 6,3 до 567,9 Бк/кг с максимумом на 5 см (567,9 Бк/кг) и от 4,3 до 231,1 Бк/кг с максимумом на 1,5 см (231,1 Бк/кг) соответственно. Не совсем типичное распределение  $^{210}\text{Pb}$  в профиле естественного участка связано, вероятно, с его вымыванием из вышележащих горизонтов в связанном с тонкодисперсными гумусными частицами виде.

Анализ вертикального распределения  $^{210}\text{Pb}$  позволил определить относительный возраст и линейную скорость накопления торфа (рисунок 3.18):

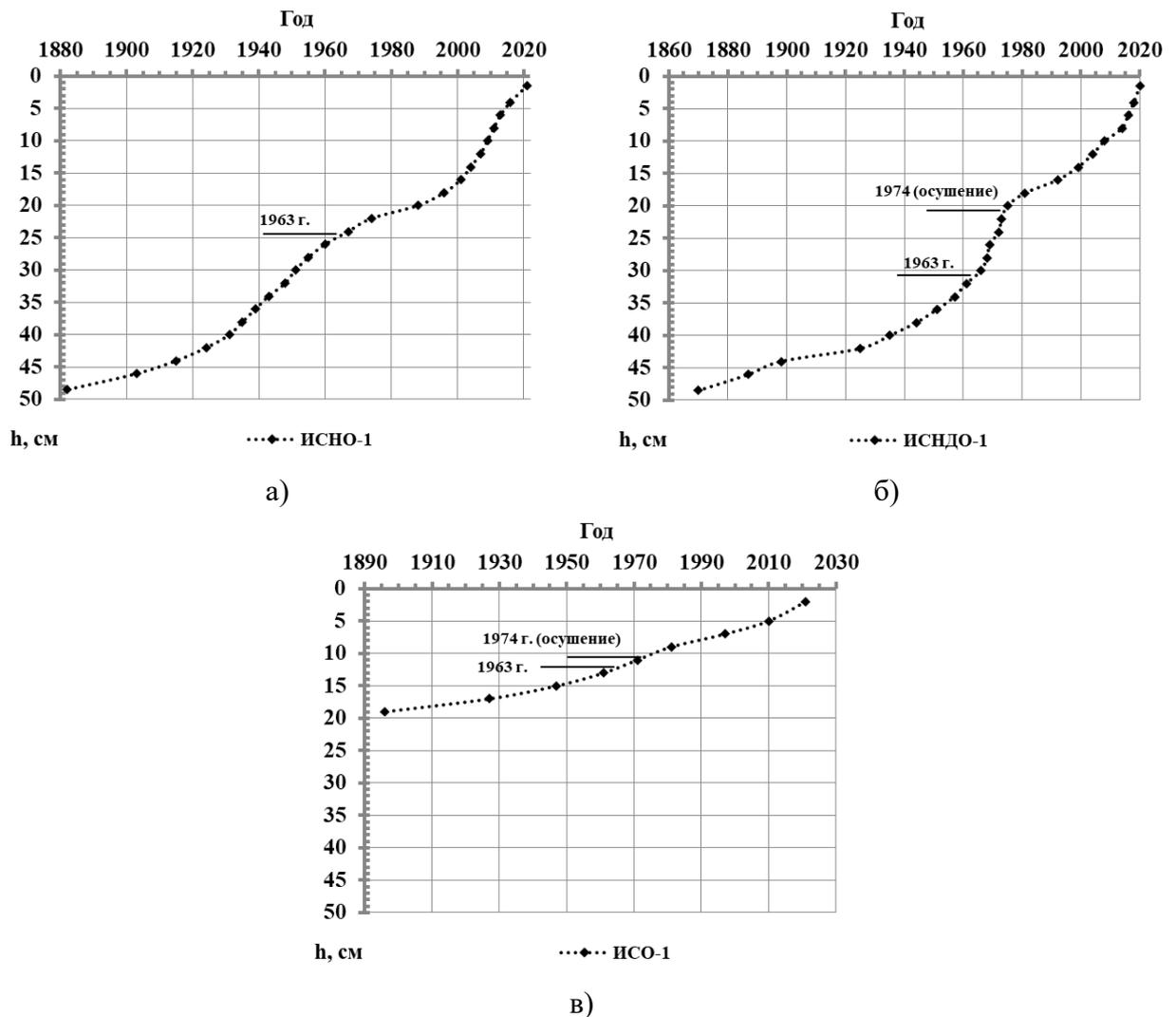


Рисунок 3.18 - Результаты  $^{210}\text{Pb}$  датирования исследуемых торфяных кернов: а) ИСНО-1; б) ИСНО-1; в) ИСО-1

Возраст торфяных кернов ИСНО-1 и ИСНДО-1 составил 1882-2021 гг. и 1870-2021 гг. соответственно. Для осушенного участка удалось оценить лишь возраст слоя 0-20 см (1896-2021 гг.) ввиду отсутствия в нижележащих горизонтах профиля ИСО-1 достоверно определяемых активностей неравновесного  $^{210}\text{Pb}$ . Полученные результаты хронологии исследуемых торфяных разрезов были использованы нами в данной работе для привязки пиков активности техногенных радионуклидов  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{241}\text{Am}$ , а также колебаний некоторых физико-химических параметров торфа и содержания макроэлементов к периоду максимума глобальных радиоактивных выпадений – 1963 г. и периоду проведению осушительных работ – 1974 г.

Темп торфонакопления для естественного участка ИСНО-1 находится в интервале от  $0,09 \pm 0,02$  до  $1,30 \pm 0,05$  см/год при средней скорости накопления  $0,48 \pm 0,08$  см/год. На площадке повторнозаболоченного участка величина данного параметра изменяется от  $0,08 \pm 0,02$  до  $2,1 \pm 0,05$  см/год при среднем значении  $0,57 \pm 0,06$  см/год. Для осушенного участка ИСО-1 линейная скорость накопления торфа варьирует в пределах от  $0,05 \pm 0,03$  до  $0,24 \pm 0,02$  см/год, а среднее значение составляет  $0,15 \pm 0,02$  см/год. Это более чем в 3 раза меньше, чем для естественного и связано с изменением гидрологического режима на участке отбора профиля ИСО-1 обусловленного осушением, при котором наблюдается существенно меньшее накопление биомассы торфа и происходит уплотнение залежи. Данные по линейной скорости накопления торфа соответствуют полученным ранее данным для Европейской субарктики России (Yakovlev et al., 2021). Рассчитанное значение атмосферного потока  $^{210}\text{Pb}$  на поверхность торфяника составило  $69 \pm 10$  Бк/м<sup>2</sup>·год,  $55 \pm 10$  Бк/м<sup>2</sup>·год, и  $77 \pm 4$  Бк/м<sup>2</sup>·год для естественного, повторнозаболоченного и осушенного участков соответственно.

Наряду со  $^{210}\text{Pb}$  особый интерес представляет вертикальное распределение изотопов урана по вертикальному профилю исследуемых залежей (рисунок 3.19), которое также может служить индикатором запыленности атмосферы. Активность изотопов U не равномерна по глубине

разреза, варьирует в интервалах от 0,2 до 4,2 Бк/кг  $^{238}\text{U}$ , от 0,2 до 7,1 Бк/кг  $^{234}\text{U}$  и характеризуется наличием максимумов в слое 16 см ( $^{238}\text{U}$  4,2 Бк/кг,  $^{234}\text{U}$  7,1 Бк/кг) и 26 см ( $^{238}\text{U}$  1,3 Бк/кг,  $^{234}\text{U}$  4,1 Бк/кг), при этом для естественного участка основная доля изотопов урана сконцентрирована на глубине от 10 до 32 см.

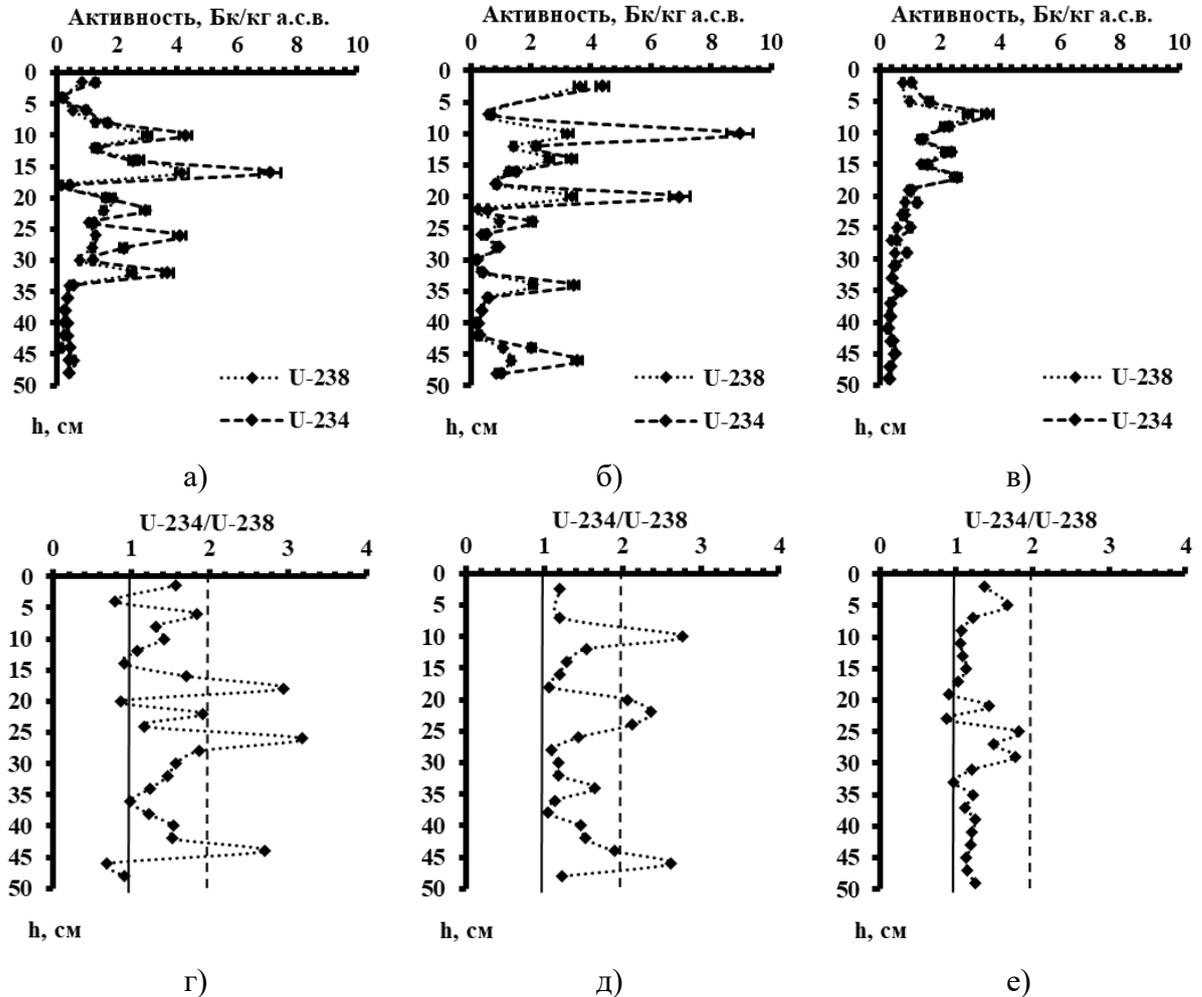


Рисунок 3.19 – Распределение активностей  $^{238}\text{U}$ ,  $^{234}\text{U}$  и  $^{234}\text{U} / ^{238}\text{U}$  по вертикальным профилям исследуемых залежей: а, г) ИСНО-1; б, д) ИСНДО-1; в, е) ИСО-1

Для осушенного участка активность изотопов урана составляет от 0,3 до 2,9 Бк/кг  $^{238}\text{U}$ , от 0,3 до 3,6 Бк/кг  $^{234}\text{U}$  и приходится на горизонт 7-17 см с максимумом активности  $^{238}\text{U}$  2,9 Бк/кг и  $^{234}\text{U}$  3,6 Бк/кг. В торфе участка с повторным заболачиванием активность изотопов урана изменяется в пределах от 0,2 до 3,7 Бк/кг  $^{238}\text{U}$ , от 0,2 до 9,0 Бк/кг  $^{234}\text{U}$ . Наиболее существенные максимумы активности приходится на горизонты 0-5 см с  $^{238}\text{U}$  3,7 Бк/кг и  $^{234}\text{U}$  4,4 Бк/кг; 9-11 см с  $^{238}\text{U}$  3,2 Бк/кг и  $^{234}\text{U}$  9,0 Бк/кг и 19-21 см с  $^{238}\text{U}$  3,4 Бк/кг и  $^{234}\text{U}$  6,9 Бк/кг. Такое неравномерное распределение урана в

профиле ИСНДО-1 может быть обусловлено его перераспределением из-за нестабильности гидрологического режима в результате осушения с последующим повторным заболачиванием.

Расчет отношения активности  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$  (рисунок 3.19 г, д, е) выявил резкое нарушение равновесия, превышающего величину  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U} > 3$  для естественного участка, при этом изотопное отношение  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$  на осушенной площадке находится в пределах характерного для верхних почвенных горизонтов диапазона 1-2 Бк/Бк. Как правило, обогащение верхних почвенных горизонтов мобильным изотопом  $^{234}\text{U}$  связано с поступлением (разгрузкой) подземных вод глубоких горизонтов, однако в случае изучаемого нами верхового болота такой механизм представляется маловероятным. Гипотетическим объяснением высоких содержаний  $^{234}\text{U}$  может служить поступление в профиль техногенного  $^{238}\text{Pu}$  ( $T_{1/2}=86$  лет) с последующим его распадом до  $^{234}\text{U}$ .

Запасы U для исследуемого приповерхностного слоя мощностью 0,5 м составили  $17,9 \cdot 10^{-4}$  г/м<sup>2</sup> для естественного участка,  $32,4 \cdot 10^{-4}$  г/м<sup>2</sup> для участка с постмелиоративным заболачиванием и  $25,5 \cdot 10^{-4}$  г/м<sup>2</sup> для осушенного участка.

Таким образом, трансформация гидрологического режима, как результат осушения, оказывает влияние на поведение естественных и техногенных радионуклидов в торфяных залежах южноприбеломорского типа, а физико-химические условия участков, подвергшихся осушению, способствует закреплению, а не вымыванию радионуклидов из залежи.

### 3.4 Моделирование вертикальной миграции $^{137}\text{Cs}$ в залежи

Изучение поглощающей способности различных грунтов, в том числе торфа, в отношении экотоксикантов, например  $^{137}\text{Cs}$ , в зависимости от поставленных задач, может проводиться в статических или динамических условиях. Исследования проводятся с применением жидкой фазы стоков объекта или на растворах, моделирующих их химический состав.

Полученные в ходе таких экспериментов результаты, в дальнейшем могут быть использованы, например, для оценки предельной связывающей способности и предельного времени работы грунтовой толщи (торфяной залежи), как геохимического барьера (Геохимические барьеры..., 2002). Следует сказать, что результаты модельных экспериментов хотя и носят ориентировочный характер, поскольку состав и соотношение фаз, моделирующих природные среды миграции, лишь приблизительно соответствуют их естественным значениям, но зачастую позволяют ограничить спектр изучаемых показателей, выделив для исследования наиболее важные параметры.

Моделирование вертикальной миграции  $^{137}\text{Cs}$  за 1-летний период в деятельном слое торфяных залежей проводилось в лизиметрах, позволяющих исключить вклад латеральной (горизонтальной) миграции за пределы изучаемых кернов, но проводить эксперимент в условиях в значительной мере приближенных к естественному и осушенному участку рассматриваемого верхового болота. Оно позволило выявить следующие отличия (рисунок 3.20):

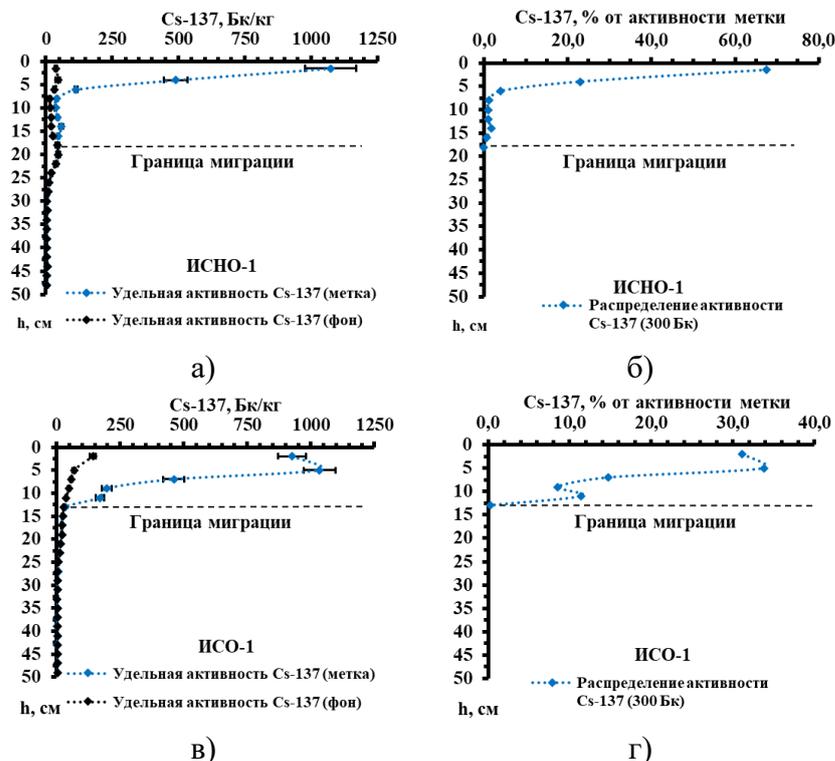


Рисунок 3.20 – Результаты моделирования вертикальной миграции  $^{137}\text{Cs}$  в условиях: а), б) естественного участка ИСНО-1; в), г) осушенного участка ИСО-1

Максимальная глубина вертикальной миграции  $^{137}\text{Cs}$  в керне, моделирующем условия естественного участка, составила 17 см, при этом наблюдается неравномерное распределение по глубине: 90,5 % активности изотопной метки зафиксировано в слое 0-5 см и лишь 9,5 % в слое 5-17 см. Для керна, моделирующего условия осушенного участка, вертикальная миграция  $^{137}\text{Cs}$  составила 14 см, а распределение более равномерное: в слое 0-5 см зафиксировано 65 %, а в 5-14 см связано 35 % от вносимого количества (300 Бк)  $^{137}\text{Cs}$  (таблица В.4 и таблица В.5 , приложение В).

В целом полученное распределение изотопной метки  $^{137}\text{Cs}$  в модельных кернах повторяет его естественное распределение, сформировавшееся в ходе глобальных выпадений и зафиксированное на естественном и осушенном участках болота. Отличия в распределении, по-видимому, связаны в первую очередь с разницей режима сезонных колебаний УБВ, деятельностью растительного покрова участков, характеристика которых представлена в п. 2.1 настоящего исследования, а также разницей в физико-химических условиях миграции.

### **3.5 Связывание $^{137}\text{Cs}$ торфом в статических условиях**

Оценку связывания  $^{137}\text{Cs}$  верховым торфом с учетом влияния рН проводили в статических условиях. Такой эксперимент важен с точки зрения геоэкологии, поскольку позволяет дать ориентировочную оценку связывающей способности торфа, как компонента геохимического барьера – торфяной залежи, а с другой определить потенциал его использования, как сырья в производстве сорбентов для очистки окружающей среды от радионуклидов. Первичные данные эксперимента представлены в таблице В.6, приложение В.

Согласно полученным данным при рН = 2 (в сильноокислой области), сорбция  $^{137}\text{Cs}$  исследуемыми материалами из раствора минимальна и варьируется в диапазоне от 1,31 до 23,27 %. Исходным торфом из раствора извлекается менее 1,5 %. Последовательное извлечение отдельных групп

компонентов торфа приводит к постепенному увеличению степени извлечения  $^{137}\text{Cs}$  из раствора. Максимум приходится на негидролизуемый остаток – лигнин. При  $\text{pH} = 4$  (в условиях, максимально приближенным к естественным) наблюдается резкий скачок связывания  $^{137}\text{Cs}$  из раствора. Твердой фазой связывается от 44,02 до 79,12%  $^{137}\text{Cs}$ . Минимум связывания также характерен для исходного торфа, максимум для образца Лиг. Промежуточный минимум наблюдается для образца ТГВ+Лиг и составляет 49,38 %. В нейтральных условиях ( $\text{pH} = 6$ ) процент связываемого из раствора  $^{137}\text{Cs}$  максимален, и варьируется в диапазоне от 72,33 до 87,77 %. Минимальные значения 72,33 и 73,09 % характерны для образцов исходного торфа и фракции ТГВ+Лиг соответственно (рисунок 3.21 а):

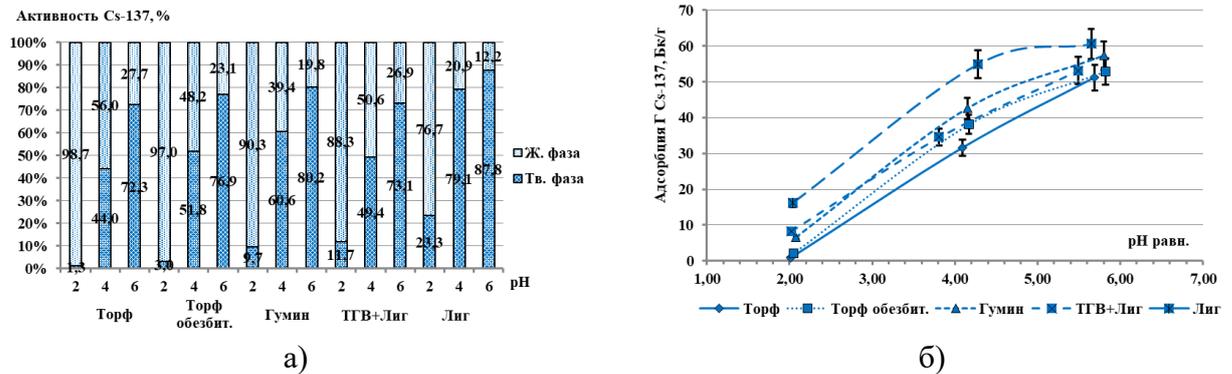


Рисунок 3.21 – Связывание  $^{137}\text{Cs}$  верховым торфом и остатком после последовательного удаления компонентов его органической части:

а) распределение между твердой и жидкой фазой; б) предельная адсорбция

Зависимость предельной сорбции  $^{137}\text{Cs}$  торфом от  $\text{pH}$  среды имеет классический вид S-образной кривой (рисунок 3.21 б). Величина предельной адсорбции  $^{137}\text{Cs}$  для исследуемого верхового торфа варьируется в диапазоне от 1 до 51 Бк/г, что существенно превышает фоновые значения, определяемые в торфяной залежи (Yakovlev et al., 2022), и указывает на высокую сорбционную емкость верховых торфяников по отношению к техногенным радионуклидам. Для производных торфа, полученных методом последовательной разборки, величины предельной сорбции составляют от 2 до 61 Бк/г в области исследуемого диапазона  $\text{pH}$ , что позволяет сделать вывод о перспективности использования верхового торфа и продуктов на его

основе в качестве эффективных сорбентов для связывания  $^{137}\text{Cs}$  при проведении природоохранных мероприятий.

Результаты раздела 3.5 апробированы в виде публикации (Орлов и др., 2023).

### **3.6 Связь активностей радионуклидов в торфе с физико-химическими условиями**

Как уже упоминалось ранее, болотные экосистемы являются сложными саморегулирующимися природными системами с положительным балансом вещества и энергии, в которых состояние и функционирование всех компонентов обусловлено (Герасимов, 2010; Мазинг, 1994). Поэтому они обладают крайне сложной структурой связей, в том числе и между физико-химическими и радиационными параметрами. В данной работе выполнен анализ физико-химических условий и активности радионуклидов с использованием комплекса статистических методов: парного корреляционного и факторного анализа, что позволяет выявить структуру связей между исследуемыми параметрами. Корреляционные матрицы и таблицы факторов представлены в приложении Д. Визуализация результатов факторного анализа в графическом виде представлена на рисунке 3.22.

Необходимо отметить, что наличие и сила связи между отдельными радиоэкологическими параметрами и условиями миграции для естественного и осушенных участков могут несколько отличаться, поскольку особенности поведения каждого конкретного радионуклида обусловлены не одним, а совокупностью ряда параметров. Их взаимный баланс в пределах каждой изученной площадки уникален, и обусловлен ее индивидуальными особенностями. Поэтому поиск закономерностей следует проводить в два этапа: сначала в пределах отдельных площадок, а затем выявление общих тенденций и отличий для всего района исследований. Следует сказать, что в настоящей работе практически не учитывается влияние биогенной миграции, которой также отводится существенная роль в перераспределении

радионуклидов в экосистемах (Щеглов, 2000; Mietelski et al., 2007; Mroz et al., 2017).

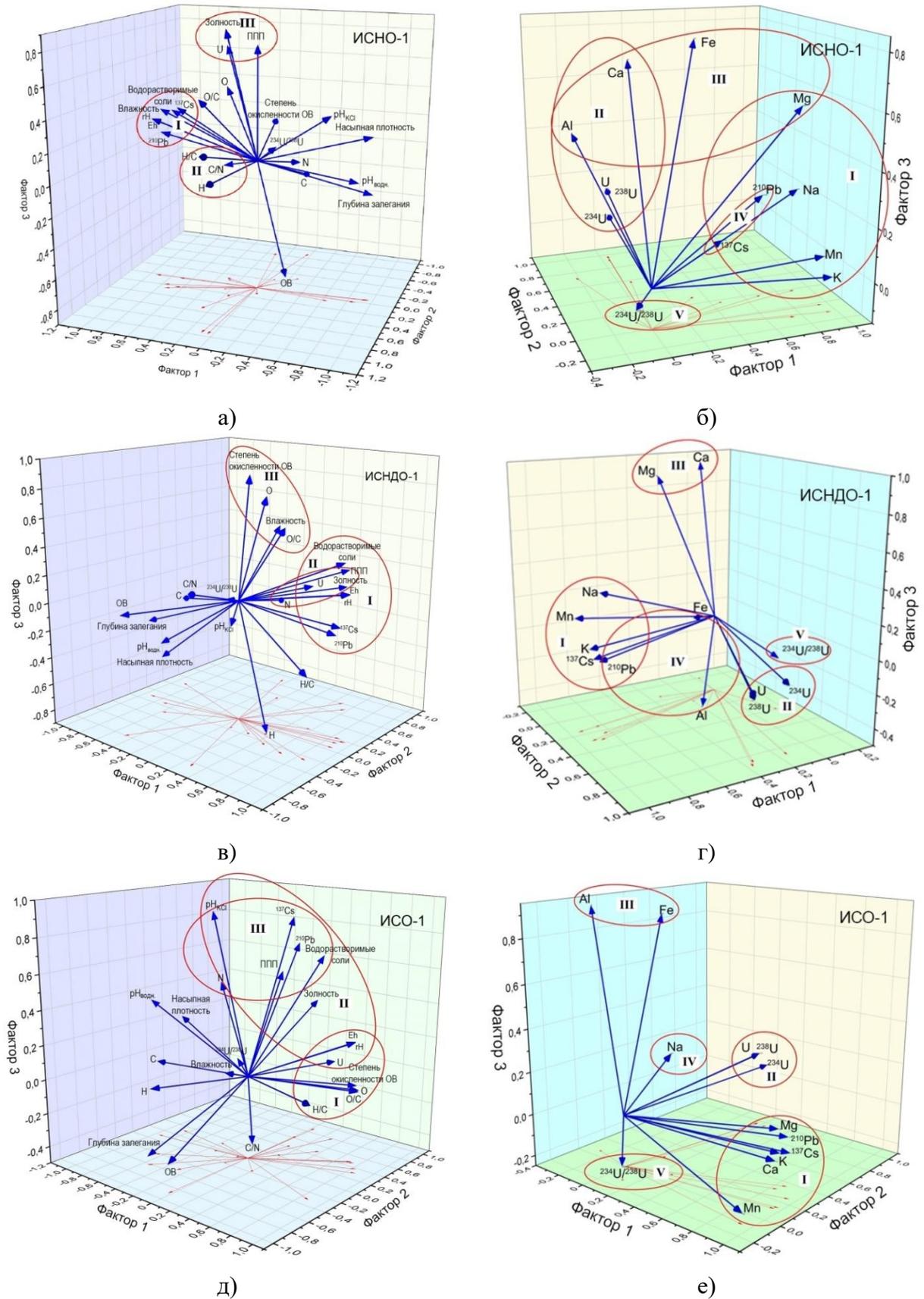


Рисунок 3.22 - Результаты факторного анализа данных по профилям: а), б) ИСНО-1; в), г) ИСНДО-1; д), е) ИСО-1

Согласно полученным экспериментальным данным для площадки с естественным гидрологическим режимом ИСНО-1 показано наличие сильных положительных связей активности  $^{137}\text{Cs}$  с параметрами Eh ( $r=0,79$ ) и содержанием водорастворимых солей ( $r=0,71$ ), а также умеренных положительных связей с зольностью ( $r=0,64$ ), влагосодержанием ( $r=0,63$ ), C/N ( $r=0,55$ ), O/C ( $r=0,61$ ) и макроэлементами K ( $r=0,58$ ), Na ( $r=0,60$ ), Mg ( $r=0,41$ ), Fe ( $r=0,50$ ) и Mn ( $r=0,55$ ). Умеренные отрицательные связи активности  $^{137}\text{Cs}$  обнаруживаются с активной рН ( $r=-0,65$ ) и насыпной плотностью ( $r=-0,62$ ) торфа.

Активность  $^{210}\text{Pb}$  в профиле ИСНО-1 имеет сильные положительные связи с параметрами C/N ( $r=0,72$ ) и Eh ( $r=0,89$ ), а также макроэлементами K ( $r=0,74$ ), Na ( $r=0,80$ ) и Mn ( $r=0,76$ ). Обнаруживаются умеренные положительные связи активности  $^{210}\text{Pb}$  с зольностью ( $r=0,44$ ), водорастворимыми солями ( $r=0,64$ ), O/C ( $r=0,52$ ) и металлами Mg ( $r=0,66$ ) и Fe ( $r=0,64$ ). Также  $^{210}\text{Pb}$  имеет сильные отрицательные связи с активной рН ( $r=-0,78$ ) и насыпной плотностью ( $r=-0,78$ ).

Содержание U в разрезе ИСНО-1 связано умеренными положительными связями с зольностью ( $r=0,52$ ), Eh ( $r=0,41$ ), параметром ППП (потери при прокаливании) ( $r=0,41$ ) и металлами Ca ( $r=0,64$ ) и Fe ( $r=0,45$ ). Кроме того, обнаруживается сильная положительная связь U с Al ( $r=0,77$ ). Отношение  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$  имеет умеренную положительную связь лишь со степенью окисленности органического вещества торфа ( $r=0,43$ ) (рисунок Д1 и Д2, Приложение Д).

Результаты парного корреляционного анализа хорошо согласуются с факторным анализом (рисунок 3.22 а, б). Его результаты указывают на взаимосвязь  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{210}\text{Pb}$  с параметрами: Eh, водорастворимые соли и влагосодержание (фактор 1 с дисперсией 43,35 %). Концентрация U в торфе ИСНО-1 связана с содержанием золы и параметром ППП (фактор 3 с дисперсией 18,50 %). Отношение  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$  связано с обменной рН, содержанием водорастворимых солей и O/C (фактор 4 с дисперсией 16,87 %)

(Таблица Д1, Приложение Д). Кроме того, подтверждается связь  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{210}\text{Pb}$  с металлами К, Na, Mg и Mn (фактор 1 с дисперсией 44,65 %) и связь U с Ca и Al (фактор 2 с дисперсией 29,16 %) (Таблица Д2, Приложение Д).

Для площадки с повторным заболачиванием ИСНДО-1 показано наличие сильных положительных связей активности  $^{137}\text{Cs}$  с параметром Eh ( $r=0,84$ ), содержанием водорастворимых солей ( $r=0,81$ ) и Н/С ( $r=0,75$ ) и макроэлементами К ( $r=0,98$ ), Na ( $r=0,86$ ), Mn ( $r=0,86$ ). Также выявлены умеренные положительные связи  $^{137}\text{Cs}$  с зольностью ( $r=0,50$ ), ППП ( $r=0,62$ ), О/С ( $r=0,48$ ) и макроэлементами Fe ( $r=0,50$ ) и Al ( $r=0,59$ ). Умеренная отрицательная связь активности  $^{137}\text{Cs}$  обнаруживается с насыпной плотностью торфа ( $r=-0,62$ ).

Активность  $^{210}\text{Pb}$  в профиле ИСНДО-1 имеет сильные положительные связи с параметрами Н/С ( $r=0,77$ ), Eh ( $r=0,91$ ) и водорастворимыми солями ( $r=0,77$ ), а также макроэлементами К ( $r=0,91$ ), Na ( $r=0,74$ ) и Mn ( $r=0,76$ ). Обнаруживаются умеренные положительные связи активности  $^{210}\text{Pb}$  с зольностью ( $r=0,45$ ), О/С ( $r=0,54$ ) и металлами Fe ( $r=0,61$ ) и Al ( $r=0,59$ ). Также  $^{210}\text{Pb}$  имеет умеренные отрицательные связи с активной рН ( $r=-0,49$ ) и насыпной плотностью ( $r=-0,51$ ).

Содержание U в разрезе ИСДНО-1 связано умеренными положительными связями с зольностью ( $r=0,40$ ), Eh ( $r=0,57$ ), ППП ( $r=0,48$ ), водорастворимыми солями ( $r=0,61$ ) и металлами К ( $r=0,58$ ), Na ( $r=0,44$ ), Mn ( $r=0,42$ ) и Al ( $r=0,42$ ). Отношение  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$  имеет умеренную отрицательную связь лишь с насыпной плотностью торфа ( $r=-0,53$ ) (рисунок Д3 и Д4, Приложение Д).

Результаты парного корреляционного анализа подтверждаются факторным анализом (рисунок 3.22 в, г). Его результаты указывают на взаимосвязь  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{210}\text{Pb}$  и U с параметрами: Eh, водорастворимые соли, ППП, зольность, Н/С и О/С (фактор 1 с дисперсией 46,83 %). Отношение  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$  не связано ни с одним из определяемых параметров, по-видимому, оно обусловлено внешними факторами, например составом аэрозоля

атмосферных выпадений (Таблица Д3, Приложение Д). Кроме того, подтверждается связь  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{210}\text{Pb}$  с металлами К, Na, Mn (фактор 1 с дисперсией 48,22 %) (Таблица Д4, Приложение Д).

Анализ данных осушенного участка ИСО-1 позволил зафиксировать наличие сильных положительных связей активности  $^{137}\text{Cs}$  с содержанием водорастворимых солей ( $r=0,89$ ), зольностью ( $r=0,72$ ), параметром ППП ( $r=0,71$ ), обменной рН ( $r=0,77$ ) и макроэлементами К ( $r=0,99$ ), Са ( $r=0,96$ ), Mg ( $r=0,88$ ), Mn ( $r=0,91$ ). Также выявлена умеренная положительная связь  $^{137}\text{Cs}$  с параметром Eh ( $r=0,53$ ).

Активность  $^{210}\text{Pb}$  в профиле ИСО-1 имеет сильные положительные связи с зольностью ( $r=0,83$ ) и водорастворимыми солями ( $r=0,79$ ), а также макроэлементами К ( $r=0,90$ ), Mg ( $r=0,85$ ), Са ( $r=0,86$ ) и Mn ( $r=0,73$ ). Обнаруживаются умеренные положительные связи активности  $^{210}\text{Pb}$  с параметром Eh ( $r=0,51$ ), ППП ( $r=0,58$ ) и обменной рН ( $r=0,61$ ).

Содержание U в разрезе ИСО-1 связано сильной положительной связью с зольностью ( $r=0,75$ ) и умеренными положительными связями с Eh ( $r=0,68$ ), параметром ППП ( $r=0,40$ ), водорастворимыми солями ( $r=0,64$ ) и степенью окисленности ОВ торфа ( $r=0,52$ ), а также Mg ( $r=0,44$ ). Кроме того, обнаруживается умеренная отрицательная связь U с активной рН ( $r=-0,64$ ). Отношение  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$  не имеет связей с параметрами, определяемыми в работе (рисунок Д5 и Д6, Приложение Д).

Результаты парного корреляционного анализа подтверждаются факторным анализом (рисунок 3.22 д, е). Его результаты указывают на взаимосвязь  $^{210}\text{Pb}$  и U с зольностью и содержанием водорастворимых солей в торфе (фактор 2 с дисперсией 27,49 %), а также  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{210}\text{Pb}$  с показателем ППП, содержанием водорастворимых солей и обменной рН (фактор 3 с дисперсией 11,58 %). Отношение  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$  не связано ни с одним из определяемых параметров, по-видимому, оно обусловлено внешними факторами, например составом аэрозоля атмосферных выпадений (Таблица Д5, Приложение Д). Кроме того, подтверждается связь  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{210}\text{Pb}$  с

металлами К, Са, Mg и Mn (фактор 1 с дисперсией 49,51 %) (Таблица Д6, Приложение Д).

Результаты непараметрического U-теста Манна-Уитни (Таблица Е1, Приложение Е) позволяют сказать, что статистически значимые отличия (при уровне значимости  $p = 0,05$ ) по наибольшему числу параметров, среди которых активность  $^{210}\text{Pb}$ ,  $\text{pH}_{\text{водн.}}$ ,  $\text{pH}_{\text{солев.}}$ , водорастворимые соли, N, С, Н, О, Н/С, С/Н, О/С, степень окисленности ОВ, влагосодержание, насыпная плотность и содержание битумов, характерны для площадок ИСНО-1 и ИСНДО-1, а также для ИСНО-1 и ИСО-1. При этом отличия участков ИСНО-1 и ИСО-1 по большинству исследуемых параметров статистически не значимы. Таким образом, полученные данные в значительной мере согласуются с результатами исследований других авторов (Пономарева, 2022; Ponomareva et al., 2023) и отчасти подтверждают их выводы о необратимости изменения физико-химических и структурных особенностей торфяных залежей верховых бореальных торфяников в ходе длительного осушения.

Материалы, представленные в текущем разделе работы, обладают большой значимостью для понимания процессов и закономерностей накопления и миграции радионуклидов в бореальных верховых болотах РФ и апробированы в виде представления на международных конференциях и путем публикации в высокорейтинговых журналах (Yakovlev et al., 2022; Yakovlev et al., 2023).

Анализ экспериментального материала п. 3.1-3.6 позволяет говорить о наличии в торфяной залежи сложного геохимического барьера окислительно-восстановительного и сорбционного типа. Его мощность варьируется в зависимости от гидрологических и как следствие физико-химических условий в залежи и снижается от естественного к осушенному участку. При этом его связывающая способность к выбранному в работе перечню искусственных и естественных радионуклидов напротив усиливается, в ряду ИСНО-1, ИСНДО-1 и ИСО-1, что подтверждается данными о запасах этих

изотопов в исследуемом слое залежи. Это может быть связано не только с изменением химической природы торфа, но и с трансформацией растительного покрова и ризосферы в результате осушения.

Функционирование такого геохимического барьера способствует удержанию техногенного  $^{137}\text{Cs}$  и накоплению  $^{210}\text{Pb}$ , вымываемого из вышележащих горизонтов. Распределение урана с глубиной скорее всего преимущественно обусловлено динамикой исторических поступлений с атмосферными выпадениями на поверхность залежи и с крайне низкой подвижностью урана по профилю. Показано наличие сильных положительных связей в распределении изотопов  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{210}\text{Pb}$  с окислительно-восстановительными и кислотно-основными условиям, которые существенно изменяются в ходе осушения, а также обнаружена положительная связь с содержанием зольных элементов, водорастворимых солей и металлами K, Na, Mg и Mn. Для изотопов U распределение связано преимущественно с такими параметрами как Eh, зольностью, параметром ППП и макроэлементами Ca и Al, а также в некоторой степени с Fe, при этом связь с фактором Eh усиливается в ряду ИСНО-1, ИСО-1 и ИСНДО-1.

Таким образом, распределение радионуклидов в торфяниках южноприбеломорского типа в значительной мере контролируется комплексом физико-химических условий, взаимный баланс которых в пределах каждой изученной площадки уникален, и обусловлен ее индивидуальными особенностями.

#### 4 ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ И РЕКОМЕНДАЦИИ

На основании полученных результатов можно дать следующие практические рекомендации:

1. При проведении комплексных исследований болотных экосистем в перечень определяемых показателей необходимо включать как искусственные, так и естественные радионуклиды, а также физико-химические параметры и условия, что будет способствовать всестороннему описанию радиогеохимических особенностей и радиоэкологической обстановки и позволит более точно оценивать негативное воздействие на человека и биоту за счет дозовых нагрузок и их возможные изменения в ходе естественных и антропогенных процессов.

2. При использовании осушенных торфяников в качестве сельхозугодий нужно учитывать, что осушение торфяных залежей верховых болот оказывает неоднозначное влияние на их радиогеохимические особенности и радиоэкологическую обстановку. С одной стороны, зафиксированное в ходе осушения изменение физико-химических условий способствует иммобилизации радионуклидов в залежи, препятствуя их вымыванию в водотоки и сопряженные экосистемы, что является положительным результатом. С другой стороны, сработка торфяной залежи, которая происходит как за счет более интенсивного разложения органического вещества, так и за счет уплотнения структуры торфа в результате снижения доли влаги, способствует концентрированию уже накопленных залежью радионуклидов в ее приповерхностном слое, усиливая их влияние на биоту.

3. При использовании запасов торфа в качестве химического сырья, для производства почвогрунтов и в виде топлива не рекомендуется использовать торф из верхнего слоя залежи, где содержание радионуклидов максимально, поскольку в результате может происходить дополнительное обогащение

продуктов переработки торфа или отходов радионуклидами, что создает дополнительные экологические риски.

4. Учитывая тот факт, что процессы накопления и распределения техногенных и природных радионуклидов в торфяных залежах не ограничиваются лишь их физико-химическим взаимодействием с веществом торфа, а еще зависят от особенностей живого напочвенного покрова, при оценке радиоэкологической обстановки в пределах естественных и осушенных торфяников наряду с физическими, химическими и физико-химическими параметрами необходимо учитывать вклад биогенной составляющей в миграцию радиоизотопов.

5. Верховой торф мохового типа низкой степени разложения, характерный для бореальных болот РФ, обладает достаточно высокой сорбционной емкостью к радионуклидам, например к  $^{137}\text{Cs}$ , поэтому может быть рекомендован в качестве сырья для получения сорбционных материалов для решения радиоэкологических проблем.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе изучены основные физические, химические и физико-химические параметры и особенности их изменения по вертикальному профилю торфяных залежей бореального верхового болота в естественном и антропогенно нарушенном состоянии. Выполнена оценка активности ряда техногенных ( $^{241}\text{Am}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ) и природных радионуклидов ( $^{238}\text{U}$ ,  $^{234}\text{U}$  и  $^{210}\text{Pb}$ ) и их распределение в профилях исследуемых залежей. С привлечением статистических методов анализа выявлены связи между физико-химическими и радиационными параметрами участков омбротрофного торфяника с естественным и трансформированным в результате осушения гидрологическим режимом. На примере  $^{137}\text{Cs}$  выполнено моделирование миграции техногенных радионуклидов по профилю залежи и оценка особенностей его связывания торфом. По результатам исследований можно сделать следующие выводы:

1. Для исследуемых залежей характерно наличие контрастного окислительно-восстановительного режима: при движении от поверхности в глубь залежи умеренно-окислительные условия постепенно сменяются интенсивно восстановительными. Установлено, что осушение приводит к существенным изменениям практически всех исследуемых параметров: сопровождается снижением влагосодержания в торфе, что способствует более интенсивной аэрации и выражается в росте окислительно-восстановительного потенциала и увеличении интервала его сезонных колебаний, увеличении плотности залежи, степени разложения, содержания в торфе доли термодинамически устойчивых соединений – битумов и гуминовых кислот, а также изменениях в элементном составе, которые указывают на увеличение степени окисленности органического вещества и увеличении доли ароматических фрагментов в нем.

2. Процессы физической и химической трансформации залежи в ходе осушения приводят к изменению темпа торфонакопления (от естественного к

осушенному участку снижается в 3 раза), а также способствует смещению обогащенного зольными элементами и радионуклидами слоя ближе к поверхности залежи.

3. Охарактеризованы вертикальные профили распределения радионуклидов  $^{241}\text{Am}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{234}\text{U}$  и  $^{210}\text{Pb}$  в залежах естественного и нарушенных участков верхового болота. Выявлено неравномерное распределение исследуемого ряда радионуклидов, при этом для апробированных торфяных залежей в целом наблюдается снижение их активностей при движении от поверхности вглубь залежи. Установлено, что запасы  $^{137}\text{Cs}$  и  $\text{U}$  для исследуемого приповерхностного слоя мощностью 0,5 м увеличиваются от естественного участка к площадкам, подверженным действию осушения. Таким образом, можно сказать, что геохимические процессы, вызванные осушением, усиливают связывание радионуклидов торфом бореальных верховых торфяников.

4. На примере участка с естественным гидрологическим режимом показано, что межфазное распределение  $^{137}\text{Cs}$  характеризуется увеличением миграционно-способных форм (растворенных и связанных с взвешенными частицами) с глубиной залежи.

5. Показано наличие сильных положительных связей в распределении изотопов  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{210}\text{Pb}$  с окислительно-восстановительными и кислотно-основными условиям, которые существенно изменяются в ходе осушения, а также обнаружена их положительная связь с содержанием зольных элементов, водорастворимых солей и металлами  $\text{K}$ ,  $\text{Na}$ ,  $\text{Mg}$  и  $\text{Mn}$ . Для изотопов  $\text{U}$  распределение связано преимущественно с такими параметрами как  $E_h$ , зольностью и макроэлементами  $\text{Ca}$  и  $\text{Al}$ , при этом связь с фактором  $E_h$  усиливается в ряду: естественный участок, осушенный участок, участок с постмелиоративным заболачиванием.

6. В условиях модельного эксперимента показано, что максимальная глубина вертикальной миграции  $^{137}\text{Cs}$  в условиях естественного участка составила 17 см, при этом наблюдается неравномерное распределение по

глубине активности вносимой изотопной метки. Для осушенного участка вертикальная миграция  $^{137}\text{Cs}$  составила 14 см, а распределение его активности более равномерное. Увеличение параметра рН (в интервале рН от 2 до 6) сопровождается ростом степени связывания  $^{137}\text{Cs}$  верховым торфом с 1,3 до 72,3 %.

## СОКРАЩЕНИЯ

ИСНО – естественный участок Илас

ИСНДО – участок Илас с повторным заболачиванием

ИСО – осушенный участок Илас

ОВП – окислительно-восстановительный потенциал

ППП – потери при прокаливании

СВ – сухое вещество

ОВ – органическое вещество

ВРВ – водорастворимые вещества

Б – битумы

ГК – гуминовые кислоты

ФК – фульвовые кислоты

ЛГВ – легкогидролизуемые вещества

ТГВ – трудногидролизуемые вещества

Л – лигнин

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Аветов, Н. А.** Некоторые аспекты систематики и диагностики торфяных почв бореальных болот / Н. А. Аветов, Е. А. Шишконокова // Мат. Конф. «VIII Галкинские Чтения». – Санкт-Петербург : Издательство СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – 2017. – С. 6–8.
2. **Арбузов, С. И.** Геохимия редких элементов в углях Центральной Сибири : специальность 25.00.09 - геохимия, геохимические методы поисков полезных ископаемых : диссертация на соискание ученой степени доктора геолого-минералогических наук / С. И. Арбузов. – Томск, 2005. – 499 с.
3. **Арбузов, С. И.** Радиоактивные элементы в каустобиолитах Северной Азии / С. И. Арбузов, В. С. Машенькин // Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека : сборник материалов V Международной конференции. – Томск, 2016. – С. 67-74.
4. **Архипов, В. С.** Определение адсорбционной способности торфа по метиленовому голубому / В. С. Архипов. – Томск : Издательство Томского политехнического университета, 2011. – 28 с.
5. **Бамбалов, Н. Н.** Роль болот в биосфере / Н. Н. Бамбалов, В. А. Ракович. // Минск : Беларус. навука, 2005. – 285 с.
6. **Бамбалов, Н. Н.** Роль гидротермических факторов в разложении органического вещества растений-торфообразователей / Н. Н. Бамбалов // Природные ресурсы. – 2005. – № 1. – С. 44-52.
7. **Бамбалов, Н. Н.** Баланс органического вещества торфяных почв и методы его изучения / Н. Н. Бамбалов. – Минск : Наука и техника, 1984. – 175 с.
8. **Берг, Л. С.** Климат и жизнь. 2-е изд., перераб. и доп. / Л. С. Берг. – Москва : Географгиз, 1947. – 356 с.
9. Болота и заболоченные леса в свете задач устойчивого природопользования. Материалы совещания / под ред. С. Э. Вомперского, А. А. Сирина. – Москва : ГЕОС, 1999. – 392 с.

10. **Бондаренко, А. С.** Статистическая обработка материалов лесоводственных исследований: учебное пособие / А. С. Бондаренко, А. В. Жигунов. – Санкт-Петербург : Издательство Политехнического университета, 2016. – 125 с.

11. **Бызова Н. М.** География Архангельской области / Н. М. Бызова, Я. К. Преминина. – Москва : СпортАкадемПресс, 2001. – 184 с.

12. **Виноградова, А. А.** Атмосферный перенос антропогенных примесей в Арктические районы России (1986 – 2010 гг.) / А. А. Виноградова, Т. Я. Пономарева // Оптика атмосферы и океана. – 2013. – № 6. – С. 475–483.

13. **Виноградова, А. А.** Вклады источников Европы в загрязнение свинцом и кадмием северных районов Европейской России / А. А. Виноградова, Е. И. Котова // Живые и биокосные системы: [сайт]. – 2018. – № 23. – URL: <http://www.jbks.ru/archive/issue-23/article-2> (дата обращения: 20.08.2020).

14. **Водяницкий, Ю. Н.** Положительные аномалии содержания урана в торфяниках гумидной зоны (обзор) / Ю. Н. Водяницкий, Н. А. Гребенкин, Д. В. Манахов [и др.] // Почвоведение. – 2019. – № 12. – С. 1492-1501.

15. **Войтехов, М. Я.** Некоторые факторы устойчивости сфагновых сообществ борových террас рек лесостепи в европейской части России / М. Я. Войтехов // Болота и биосфера: Мат. VIII Всероссийской с междунар. участием научной школы. – Томск : Изд-во Томского государственного педагогического университета, 2012. – С. 20-25.

16. **Вомперский, С. Э.** Оценка площади болотных и заболоченных лесов России / С. Э. Вомперский, А. А. Сиринов, А. А. Сальников [и др.] // Лесоведение. – 2011. – № 4. – С. 3-11.

17. **Гамаюнов Н. И.** Ионнообменные процессы и электрокинетические явления в набухающих природных и синтетических

ионитах: монография / Н. И. Гамаюнов, В. И. Косов, Б. И. Масленников. – Тверь : ТГУ, 1999. – 156 с.

18. Геохимические барьеры в зоне гипергенеза / Под ред. Н. С. Касимова, А. Е. Воробьева. – Москва : Издательство Московского университета, 2002. – 395 с.

19. Герасимов, Д. А. О принципах классификации торфяных отложений / Д. А. Герасимов // Труды Инсторфа. – 2010. – № 1 (54). – С. 6-13.

20. Глаголев, М. В. Летне-осенняя эмиссия диоксида углерода и метана осушенными торфяниками, измененными при хозяйственном использовании, и естественными болотами (на примере участка Томской области) / М. В. Глаголев, М. В. Чистотин, Н. А. Шнырев [и др.] // Агрохимия. – 2008. – №5. – С. 46-58.

21. Глазовская, М. А. Геохимия природных и техногенных ландшафтов СССР / М. А. Глазовская. – Москва : Высшая школа, 1988. – 324 с.

22. Головатый, С. Е. Содержание миграционно активных форм свинца в дерново-подзолистых и торфяных почвах / С. Е. Головатый, Н. К. Лукашенко, З. С. Ковалевич // Экологический вестник. – 2010. – №3(13). – С. 15-22.

23. ГОСТ 17644–83. Торф. Методы отбора проб из залежи и обработки их для лабораторных испытаний. Введен 01.07.1984. – Москва : Изд-во стандартов, 1983. – 9 с.

24. ГОСТ 11305-2013 Торф и продукты его переработки. Методы определения влаги. – Москва : Стандартиформ, 2014. – 10 с.

25. ГОСТ 11306-2013. Торф и продукты его переработки Методы определения зольности. – Москва : Стандартиформ, 2013. – 11 с.

26. ГОСТ 11623-89. Торф и продукты его переработки для сельского хозяйства. Метод определения обменной и активной кислотности. – Москва : Издательство стандартов, 1991. – 6 с.

27. **ГОСТ 26213-91.** Почвы. Методы определения органического вещества. – Москва : Издательство стандартов, 1992. – 8 с.
28. **ГОСТ 26423-85.** Почвы. Методы определения удельной электропроводности, рН и твердого остатка водного экстракта. – Москва : Стандартиформ, 1985. – 6 с.
29. **Дмитриева, В. А.** Гидрологическая роль озер и болот Воронежской области / В. А. Дмитриева // Вестник ВГУ, серия : География. Геоэкология. –2010. – № 1. – С. 98-102.
30. **Добровольская, Т. Г.** Функционирование микробных комплексов в верховых торфяниках – анализ причин медленной деструкции торфа: монография / Т. Г. Добровольская, А. В. Головченко, Д. Г. Звягинцев [и др.] // Москва : Товарищество научных изданий КМК, 2013. – 128 с.
31. **Дубах, А. Д.** Гидрология болот / А. Д. Дубах. – Москва : Гидрометеоиздат, 1944. – 228 с.
32. **Евзеров, В. Я.** Торфяные месторождения Мурманской области // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология. – 2012. – № 2. – С. 153-157.
33. **Елина, Г. А.** Болота Кольского полуострова / Г. А. Елина, Л. В. Филимонова, С. И. Грабовик, В. А. Костина // Труды Карельского научного центра Российской академии наук. – 2005. – № 8. – С. 94-111.
34. **Елина, Г. А.** Многоликие болота / Г. А. Елина, В. Д. Лопатин – Ленинград : Наука, 1987. – 192 с.
35. **Елина, Г. А.** Типы болотных массивов Северной Карелии // В книге: Типы болот СССР и принципы их классификации. – Ленинград, 1974. – С. 69-77.
36. **Запорожец С. А.** Анализ риска возникновения чрезвычайных ситуаций при эксплуатации космических аппаратов с ядерными энергетическими источниками на борту / С. А. Запорожец, О. В. Яковлев // Проблемы анализа риска. – 2008. – Т. 5. – №1. – С. 54-61.

37. **Зоренко, Т. Н.** Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1:200000, Онежская серия, листы Q-37-XXXIII, XXXIV. (Северодвинский район) / Т. Н. Зоренко, Г. М. Черемхина, В. С. Корепанов [и др.] – Санкт-Петербург : Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации, 2000.

38. **Инишева, Л. И.** Болотоведение: учебник для вузов. / Л. И. Инишева. – Томск : Издательство Томского государственного педагогического университета. – 2009. – 210 с.

39. **Инишева, Л. И.** Возникновение и развитие процесса заболачивания на Западно-Сибирской равнине / Л. И. Инишева, Н. А. Березина // Вестник Томского государственного университета. – 2013. – № 366. – С. 172-179.

40. **Инишева, Л. И.** Гидротермический режим лесных болот в условиях воздействия природных и антропогенных факторов / Л. И. Инишева, Н. Г. Инишев // Вестник АГАУ. – 2019. – №6 (176). – С. 71-78.

41. **Калюжный, И. Л.** Гидрохимический режим и химический состав вод мезоолиготрофных болотных массивов кольского полуострова / И. Л. Калюжный // Вестник Кольского научного центра РАН. – 2016. – № 3. – С. 114-125.

42. **Калюжный, И. Л.** Общие черты формирования гидрохимического режима болотных вод / И. Л. Калюжный // Мат. Конф. «IX Галкинские Чтения». – Санкт-Петербург : Издательство СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2017. – С. 42-45.

43. **Калюжный, И. Л.** Формирование гидрохимического режима болотных вод / И. Л. Калюжный // Мат. Конф. «IX Галкинские Чтения». – Санкт-Петербург : Издательство СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2018. – С. 85-88.

44. **Кац, Н. Я.** Болота земного шара / Н. Я. Кац. – Москва : Наука, 1971. – 295 с.

45. **Киселев, Г. П.**  $^{137}\text{Cs}$  в почвах Европейского Севера России / Г. П. Киселев, А. В. Баженов // Матер. сессии Научн. совета РАН по

проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии «Сергеевские чтения». – Москва : ГЕОС, 2001. – Вып. 3. – С. 281-284.

46. **Киселев, Г. П.** Радиоактивные изотопы в почвах Архангельской промышленной агломерации / Г. П. Киселев, А. В. Баженов, И. М. Киселева // Вестник Северного (Арктического) федерального университета. Серия: Естественные науки. – 2013. – № 4. – С. 12-20.

47. **Копаница, Н. О.** Особенности структур торфа как сырья для производства строительных материалов / Н. О. Копаница, М. А. Ковалева // Вестник ТГАСУ. – 2013. – № 1. – С. 119-124.

48. **Косов, В. И.** Торф. Ресурсы, технология, геоэкология / В. И. Косов, А. С. Беляков, О. В. Белозеров, Д. Ю. Гогин. – Санкт-Петербург : Наука, 2007. – 452 с.

49. **Кубасова, М. С.** Экологическая оценка накопления  $^{137}\text{Cs}$  лесными объектами Архангельской области: почвой, мхами, лишайниками, грибами и ягодами : специальность 03.02.08 «Экология» : диссертация на соискание ученой степени кандидата биологических наук / М. С. Кубасова. – Москва, 2016. – 125 с.

50. **Кузнецова, И. А.** Характеристика физико-химических свойств углеродсодержащего сорбента на основе гуминовой составляющей верхового торфа : специальность 05.21.03 «Технология и оборудование химической переработки биомассы дерева; химия древесины» : диссертация на соискание ученой степени кандидата химических наук / И. А. Кузнецова. – Архангельск, 2015. – 119 с.

51. **Леонова, Г. А.** Естественные радиоизотопы и техногенный  $^{137}\text{Cs}$  в вертикальном профиле Шерстобитовского верхового торфяника лесостепной зоны Западной Сибири / Г. А. Леонова, М. С. Мельгунов, К. А. Мезина [и др.] // Торфяные болота Сибири: функционирование, ресурсы, восстановление. – Томск : Издательство Ипполитова, 2021. – С. 39-41.

52. **Лиштван, И. И.** Основные свойства торфа и методы их определения / И. И. Лиштван, Н. Т. Король. – Минск : Наука и техника, 1975. – 318 с.

53. **Лиштван, И. И.** Физика и химия торфа / И. И. Лиштван, Е. Т. Базин, Н. И. Гамаюнов [и др.] – Москва : Недра, 1989. – 304 с.

54. **Лиштван, И. И.** Физико-химические свойства торфа и их трансформация при использовании торфяных месторождений / И. И. Лиштван // Химия твердого топлива. – 2010. – № 6. – С. 3-10.

55. **Лиштван, И. И.** Физические свойства торфа и торфяных залежей / И. И. Лиштван, Е. Т. Базин, В. И. Косов. – Минск : Наука и техника, 1985. – 240 с.

56. **Лукошкова, А. А.** Удельная активность и особенности вертикальной миграции стронция-90 в торфянике Мурманской области / А. А. Лукошкова, Е. Ю. Яковлев, А. С. Орлов // Вестник геонаук. – 2022. – № 5 (329). – С. 21-25.

57. **Лукошкова, А. А.** Вертикальное распределение радионуклидов и физико-химических параметров в торфянике Ненецкого автономного округа / А. А. Лукошкова, Е. Ю. Яковлев, А. С. Орлов [и др.] // Успехи современного естествознания. – 2021. – № 11. – С. 83-88.

58. **М-02-902-157-10.** Методика измерений массовой доли (валового содержания) элементов в почвах методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой с помощью спектрометра ІСРЕ-9000 : № 20/242- (01.00250-2008)-2010. – Санкт-Петербург : Аналит, 2010.

59. **Мазинг, В. В.** Структурная организация болот / В. В. Мазинг // Чтения памяти В.Н. Сукачева: XI: Биогеоценологические особенности болот и их рациональное использование. – Москва : Наука, 1994. – С.38-60.

60. **Масленников, Б. И.** Физико-химические основы ионного обмена и сорбции катионов на торфе и гуминовых кислотах : Автореферат

диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук / Б. И. Масленников. – Тверь, 1994. – 40 с.

61. **Матишов, Г. Г.** Радионуклиды в морских и наземных экосистемах Северо-Европейского региона / Г. Г. Матишов, Г. В. Ильин, Д. А. Валуйская [и др.] // Радиоэкологические последствия радиационных аварий: к 35-ой годовщине аварии на ЧАЭС. – Обнинск : ФГБНУ ВНИИРАЭ, 2021. – С. 202-206.

62. **МВИ МН 3421-2010.** Методика выполнения измерений на гамма-спектрометре : рекомендация / разработчик Белорусский государственный институт метрологии. – Минск : БелГИМ, 2010.

63. **Межибор, А. М.** Реконструкция поступления радиоактивных элементов (U, Th) в окружающую среду Западной Сибири на основе изучения верхового торфяника / А. М. Межибор, С. И. Арбузов, Л. П. Рихванов [и др.] // Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека : материалы V Международной конференции. – Томск : Изд-во ТПУ, 2016. – С. 413-418.

64. **Межибор, А. М.** Экогеохимия элементов-примесей в верховых торфах Томской области : специальность 25.00.36 - Геоэкология : диссертация на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук / А. М. Межибор. – Томск, 2009. – 153 с.

65. Методика измерений группового химического состава торфа гравиметрическим методом № 88-16365-009-2017. Свид-во об аттестации выдано 06.12.2017. Номер госрегистрации "ФР.1.31.2018.29621" / С. Б. Селянина, Т. И. Пономарева, А. С. Орлов [и др.] – Архангельск, 2017. – 20 с.

66. Методика измерений удельной активности полония-210 ( $^{210}\text{Po}$ ) и свинца-210 ( $^{210}\text{Pb}$ ) в пробах почв, грунтов, донных отложений, горных пород и строительных материалов на их основе альфа-бета-радиометрическим методом с радиохимической подготовкой: Методика: ФР.1.40.2013.15381 /

А. Е. Бахур, Л. И. Мануилова, Д. М. Зуев [и др.]; разработчик ФГУП «ВИМС». – Москва : ВИМС, 2013. – 17 с.

67. Методика измерения удельной активности изотопов урана ( $^{238}\text{U}$ ,  $^{234}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$ ) в образцах почв, грунтов, донных отложений, горных пород и строительных материалов на их основе альфа-спектрометрическим методом с радиохимической подготовкой : ФР.1.40.2013.15390 / А. Е. Бахур, Л. И. Мануилова, Д. М. Зуев [и др.]; разработчик ФГУП «ВИМС». – Москва : ВИМС, 2013. – 15 с.

68. **Моторин, А С.** Изменение физико-химических свойств торфяных почв Западной Сибири при сельскохозяйственном использовании / А. С. Моторин, Ю. В. Сивков // Мат. VII Всерос. с междунар. уч. науч. шк. «Болота и биосфера». – Томск : Издательство ТГПУ, 2010. – С. 70-75.

69. **Нейштадт, М. И.** История лесов и палеогеография СССР в голоцене / М. И. Нейштадт – Москва : Изд-во АН СССР, 1957. – 404 с.

70. **Носкова, М. Г.** Полевой атлас-определитель сфагновых мхов / М. Г. Носкова. – Тула: Аквариус, 2016. – 112 с.

71. **Орлов, А. С.** Оценка связывания Cs-137 верховым торфом Европейского Севера России / А. С. Орлов, И. Н. Зубов, Е. Ю. Яковлев, Н. И. Богданович // Химия твердого топлива. – 2023. – № 5. – С. 50-54.

72. **Орлов, А. С.** Структура и сорбционные свойства верхового торфа приарктических территорий / А. С. Орлов, Т. И. Пономарева, С. Б. Селянина [и др.] // Успехи современного естествознания. – 2017. – № 1 – С. 18-22.

73. **Орлов, Д. С.** Химия почв / Д. С. Орлов, Л. К. Садовникова, Н. И. Суханова. – Москва : Высш. шк., 2005. – 558 с.

74. **Парфенова, Л. Н.** Компонентный состав и структурная организация торфа болотных массивов европейского Севера России / Л. Н. Парфенова, К. Г. Боголицын, С. Б. Селянина [и др.] // Вестник Северного (Арктического) федерального университета. Серия: Естественные науки. – 2014. – № 4. – С. 143-154.

75. **Перельман, А. И.** Геохимия / А. И. Перельман. – Москва : Высшая школа, 1989. – 528 с.
76. **Перельман, А. И.** Геохимия ландшафта / А. И. Перельман, Н. С. Касимов. – Москва : Астрей, 1999. – 768 с.
77. **Платонов, В. В.** Особенности химического состава органической массы торфов и биологическая активность препаратов на их основе / В. В. Платонов, М. Н. Горохова // Вестник новых медицинских технологий. – 2016. – Т. 10, № 2. – С. 21-49.
78. **Полянский, Н. Г.** Аналитическая химия элементов. Свинец / Н. Г. Полянский. – Москва : Наука, 1986. – 357 с.
79. **Пономарева, Т. И.** Влияние лесосошения на лесорастительные условия сосняков кустарничково-сфагновых северотаежного района Архангельской области : специальность 06.03.02 «Лесоведение, лесоводство, лесоустройство и лесная таксация» : диссертация на соискание ученой степени кандидата сельскохозяйственных наук / Т. И. Пономарева ; ФГБУН ФИЦКИА УрО РАН. – Архангельск, 2022. – 187 с.
80. **Попков, В. А.** Общая химия. Биофизическая химия. Химия биогенных элементов / В. А. Попков, Ю. А. Ершов. – Москва : Издательство Юрайт, 2011. – 560 с.
81. **Попова, Л. Н.** О работе труднодоступной болотной станции Брусовица / Л. Н. Попова, С. М. Ружникова // Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды: письмо № 2 (184) – 2007. – URL: <http://www.sevmeteo.ru/company/i/letter-184.pdf> (дата обращения: 05.10.2019).
82. **Порохина, Е. В.** Биологическая активность и сезонные изменения CO<sub>2</sub> и CH<sub>4</sub> в торфяных залежах эвтрофного болота / Е. В. Порохина, Л. И. Инишева, В. А. Дырин // Вестник Томского государственного университета. Биология. – 2015. – № 3 (31). – С. 157-176.
83. **Прейс, Ю. И.** Накопление радиоактивных элементов (U, Th) в многослойной залежи олиготрофного болота (южная тайга Западной Сибири)

/ Ю.И. Прейс, Л.П. Рихванов, А.Е. Мальцев // Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека : сборник материалов VI Международной конференции. – Томск, 2021. – С. 491-495.

84. **Пучков, А. В.** Особенности накопления и миграции техногенных радионуклидов Cs-137 и Sr-90 в тундровых ландшафтах Российской Арктики (на примере бассейна реки Несь, Канинская тундра) / А. В. Пучков, Е. Ю. Яковлев // Вестник геонаук. – 2023. – №1. – С. 42-51.

85. **Ракович, В. А.** Сравнительная оценка методов определения степени разложения торфа / В. А. Ракович, О. Н. Барановская // Природопользование. – 2005. – № 11. – С.158-160.

86. **Раковский, В. Е.** Химия и генезис торфа / В. Е. Раковский, Л. В. Пигулевская – Москва : Недра, 1978. – 231 с.

87. **Рачкова, Н. Г.** Роль сорбентов в процессах трансформации соединений урана, радия и тория в подзолистой почве / Н. Г. Рачкова, И. И. Шуктомова. – Санкт-Петербург : Наука, 2006. – 146 с.

88. **Рихванов, Л. П.** Реконструкция радиационной обстановки на территории Томской области по стратифицированным природным образованиям / Л. П. Рихванов, Ю. П. Замятина, А. М. Межибор [и др.] / Известия Томского политехнического университета. – 2011. – Т. 319. – №1. – С. 199-203.

89. **Рылов, М. И.** Современное состояние радиозэкологической безопасности на Северо-Западе России / М. И. Рылов // Бюллетень по атомной энергии. – 2008. – №10. – С. 16-21.

90. **Савичев, О. Г.** Гидрологические аспекты образования болот в Таежной зоне Западной Сибири / О. Г. Савичев, С. В. Паромов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2014. – Т. 324. – № 1. – С. 154-159.

91. **Селянина, С. Б.** Особенности биотрансформации органических веществ в условиях болотных экосистем Севера (на примере Иласского болотного массива) / С. Б. Селянина, М. В. Труфанова, О. Н. Ярыгина [и др.]

// Труды Института биологии внутренних вод РАН. – 2017. – № 79(82). – С. 200-206.

92. **Сирин, А. А.** Заболоченность Арктической зоны России / А. А. Сирин, А. В. Маркина, Т. Ю. Минаева // Болотные экосистемы Северо-Востока Европы и проблемы экологической реставрации в зоне многолетней мерзлоты : Междунар. полевой симпозиум. – Сыктывкар, 2017. – С. 16-22.

93. **Токарев, И. В.** Реконструкция условий формирования Северодвинского месторождения йодистых вод по изотопным данным / И. В. Токарев // Вестник Санкт-Петербургского университета. – 2012. – № 4. – С. 191-195.

94. **Томсон, А. Э.** Торф и продукты его переработки / А. Э. Томсон, Г. В. Наумова. – Минск : Бел. наука, 2009. – 280 с.

95. **Тюремнов, С. Н.** Торфяные месторождения / С. Н. Тюремнов. – Москва : Недра, 1976. – 488 с.

96. Указ Президента Российской Федерации от 26 октября 2020 г. № 645 «О Стратегии развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2035 года» – URL: <http://kremlin.ru/acts/bank/45972/page/1> (дата обращения: 27.10.2020).

97. **ФНИР 122011900162-1.** Отчет о научно-исследовательской работе «Особенности функционирования болотных экосистем Арктической зоны РФ» (заключительный). – Архангельск : ФИЦКИА УрО РАН, 2021. – 215 с.

98. **Хорошавин, Л. Б.** Торф: возгорание торфа, тушение торфяников и торфокомпозиты / Л. Б. Хорошавин, О. А. Медведев, В. А. Беляков // МЧС России. – Москва : ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ), 2013. – 256 с.

99. **Цинзерлинг, Ю. Д.** Растительность болот / Ю. Д. Цинзерлинг // Растительность СССР. Т. 1. – Москва - Ленинград : Изд-во АН СССР, 1938. – С. 355-428.

100. **Чибисова, В. Г.** Влияние природных условий, атмосферного переноса и осушения на свойства торфа Юго-Восточного Прибеломорья : специальность 1.6.21 «Геоэкология» : диссертация на соискание ученой

степени кандидата географических наук / В. Г. Чибисова ; ФГБУН ФИЦКИА УрО РАН. – Архангельск, 2023. – 122 с.

101. **Шевченко, В. П.** Атмосферный перенос вещества (включая экотоксиканты) в Белое море и на его водосбор / В. П. Шевченко, А. П. Лисицын, Р. А. Алиев [и др.] // Биологические ресурсы белого моря и внутренних водоемов Европейского Севера. – Петрозаводск : КарНЦ РАН, 2009. – С. 633–637.

102. **Шевченко, В. П.** Поступление микроэлементов из атмосферы, зарегистрированное в природном архиве (на примере Иласского верхового болота, водосбор Белого моря) / В. П. Шевченко, О. Л. Кузнецов, Н. В. Политова [и др.] // Доклады академии наук: Геохимия. – 2015. – Т. 465. – № 5. – С. 587-592.

103. **Шинкеева, Н. А.** Характеристика группового состава органического вещества репрезентативных торфов таежной зоны Западной Сибири / Н. А. Шинкеева, С. Г. Маслов, В. С. Архипов // Вестник ТГПУ. – 2009. – № 3. – С. 116-119.

104. **Шишов, Л. Л.** Классификация и диагностика почв России / Л. Л. Шишов, В. Д. Тонконогов, И. И. Лебедева, М. И. Герасимова. – Смоленск : Ойкумена, 2004. – 342 с.

105. **Штыров, В. А.** Арктика. Величие проекта / В. А. Штыров // Изборский клуб: сайт. – 2018. – URL: <https://izborsk-club.ru/14751> (дата обращения: 09.11.2020).

106. **Щеглов, А. И.** Биогеохимия техногенных радионуклидов в лесных экосистемах: По материалам 10-летних исследований в зоне влияния аварии на ЧАЭС / А. И. Щеглов. – Москва : Наука, 2000. – 268 с.

107. Экологическая реставрация в Арктике: обзор международного и российского опыта / под ред. Т. Ю. Минаевой. – Сыктывкар - Нарьян-Мар, 2016. – 288 с.

108. **Юдович, Я. Э.** Геохимия угля / Я. Э. Юдович // Вестник геонаук. – 2005. – № 3. – С. 49-53.

109. **Юрковская, Т. К.** Болота Архангельской области: ботанико-географические особенности и динамическое состояние / Т. К. Юрковская // Мат. Конф. «IX Галкинские Чтения». – Санкт-Петербург : Издательство СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2018 – С. 243-246.

110. **Юрковская, Т. К.** География и картография растительности болот европейской России и сопредельных территорий / Т. К. Юрковская. – Санкт-Петербург, 1992. – 256 с.

111. **Юрковская, Т. К.** Растительность и палеогеография лесных и болотных экосистем правобережья р. Пинеги (Архангельская обл.) / Т. К. Юрковская, Г. А. Елина, В. А. Климанов // Бот. журн. – 1989. – Т. 74. – № 12. – С. 1711-1723.

112. **Яковлев, Е. Ю.** Изотопно-радиогеохимические методы оценки геоэкологической обстановки Западного сектора Российской Арктики : специальность 1.6.21. -Геоэкология : диссертация на соискание ученой степени доктора геолого-минералогических наук / Е. Ю. Яковлев. – Архангельск, 2024. – 311 с.

113. **Яковлев, Е. Ю.** Применение метода моделирования по типу Монте-Карло для оценки погрешностей  $^{210}\text{Pb}$ -датирования торфяных отложений Европейской Субарктики России (на примере Архангельской области) / Е. Ю. Яковлев, А. А. Очеретенко, Р. К. Спиров [и др.] // Вестник геонаук. – 2020. – № 7 (307). – С. 18-28.

114. **Яковлев, Е. Ю.** Радионуклиды атмосферных выпадений в торфяно-болотных экосистемах Европейской Субарктики России / Е.Ю. Яковлев, А.С. Орлов, А.А. Очеретенко [и др.] // Западно-Сибирские торфяники и цикл углерода: прошлое и настоящее : сборник материалов Шестого Международного полевого симпозиума. – Томск, 2021. – С. 214-216.

115. **Ali, A. A.** Recent peat accumulation rates in minerotrophic peatlands of the Bay James region, Eastern Canada, inferred by  $^{210}\text{Pb}$  and  $^{137}\text{Cs}$  radiometric techniques. / A. A. Ali, B. Ghaleb, M. Garneau, H. Asnong // Appl. Radiat. Isot. – 2008. – Vol. 66. – P. 1350-1358.

116. **Anderson, A.** The distribution of heavy metals in soils and soil material as influenced by ionic radius / A. Anderson // Swedish J. Agric. Res. – 1977. – №7. – P. 141-147.

117. **Antala, M.** Impact of climate change-induced alterations in peatland vegetation phenology and composition on carbon balance / M. Antala, R. Juszczak, C. Tol [et al.] // Sci. Total Environ. – 2022. – Vol. 827. – Art. 154294.

118. **Appleby, P.** The calculation of lead-210 dates assuming a constant rate of supply of unsupported  $^{210}\text{Pb}$  to the sediment / P. Appleby, F. Oldfield // Catena. – 1978. – № 5. – P. 1-8.

119. **Appleby, P. G.** Three decades of dating recent sediments by fallout radionuclides: a review / P. G. Appleby // The Holocene. – 2008. – № 18(1). – P. 83-93.

120. **Baird, A. J.**  $\text{CH}_4$  flux from peatlands: a new measurement method / A. J. Baird, I. Stamp., C. M. Heppell, S. M. Green // Ecohydrology. – 2010. – Vol. 3. – Issue 3. – P. 360-367.

121. **Begy, R.** Atmospheric flux, transport and mass balance of  $^{210}\text{Pb}$  and  $^{137}\text{Cs}$  radiotracers in different regions of Romania / R. Begy, T. Kovacs, D. Veres, H. Simon // Appl. Radiat. Isot. – 2016. – Vol. 111. – P. 31-39.

122. **Bindler, R.** Reply to comment by William Shotyk on “Does within-bog spatial variability of mercury and lead constrain reconstructions of absolute deposition rates from single peat records? The example of Store Mosse, Sweden” / R. Bindler, J. Klaminder // Glob. Biogeochem. Cycles. – 2006. – Vol. 20. – Art. GB2005.

123. **Boroń, K. J.** Radionuclides in raised bogs: A case study of Borza Lasem / K. J. Boroń, J. W. Mietelski, K. Lipka [et al.] // J. Environ. Monit. – 2001. – Vol. 3. – P. 324-329.

124. **Cambess, C. W.** Soil Organic Carbon, Nitrogen and Fertility / C. W. Cambess // Soil Organic Matter. – N.Y., 1978. – P.173-271.

125. **Couture, C.** The genesis and transformation of organo-mineral colloids in a drained peatland area / C. Couture, D. Mavrocordatos, O. Atteia, D. Perret // *Phys. Chem. Earth.* – 1998. – Vol. 23. – P. 153-157.

126. **Cwanek, A.** Temporal variability of Pu signatures in a  $^{210}\text{Pb}$ -dated Sphagnum peat profile from the Northern Ural, Russian Federation / A. Cwanek, E. Lokas, A. D. M. Edward [et al.] // *Chemosphere.* – 2021. – Vol. 281. – Art. 130962.

127. **De Vleeschouwer, F.** Atmospheric lead and heavy metal pollution records from a Belgian peat bog spanning the last two millenia: Human impact on a regional to global scale / F. De Vleeschouwer, L. Gérard, C. Goormaghtigh [et al.] // *Sci. Total Environ.* – 2007. – Vol. 377. – P. 282-295.

128. **Dowdall, M.** Organic soil as a radionuclide sink in a High Arctic environment / M. Dowdall, J. P. Gwynn, C. Moran [et al.] // *J. Radioanal. Nucl. Chem.* – 2005. – Vol. 266. – P. 217-223.

129. **Fialkiewicz-Koziel, B.** High Resolution Age-Depth Model of a Peat Bog in Poland as an Important Basis for Paleoenvironmental Studies/ B. Fialkiewicz-Koziel, P. Kolaczek, N. Piotrowska [et al.] // *Radiocarbon.* – 2014. – Vol. 56. – P. 109-125.

130. **Fialkiewicz-Koziel, B.** Influence of transboundary transport of trace elements on mountain peat geochemistry (Sudetes, Central Europe). B. Fialkiewicz-Koziel, E. Lokas, M. Galka [et al.] // *Quatern. Sci. Rev.* – 2020. Vol. 230. – Art. 106162.

131. **Foucher, A.** A worldwide meta-analysis (1977–2020) of sediment core dating using fallout radionuclides including  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$  / A. Foucher, P.-A. Chaboche, P. Sabatier [et al.] // *Earth Syst. Sci. Data.* – 2021. – Vol. 13. – P. 4951-4966.

132. **Freeman, C.** Export of dissolved organic carbon from peatlands under elevated carbon dioxide levels / C. Freeman, N. Fenner, N. Ostle [et al.] // *Nature.* – 2004. – Vol. 430. – P. 195-198.

133. **Frohne, T.** Controlled variation of redox conditions in a floodplain soil: Impact on metal mobilization and biomethylation of arsenic and antimony / T. Frohne, J. Rinklebe, R. A. Diaz-Bone, G. Du Laing // *Geoderma*. – 2011. – Vol. 160. – P. 414-424.

134. **Gambrell, R. P.** Trace and Toxic Metals in Wetlands-A Review / R. P. Gambrell // *J. Environ. Qual.* – 1994. – Vol. 23. – P. 883-891.

135. **Garsia, J L.** Taxonomic, phylogenic and ecological diversity of methanogenic Archaea / J. L. Garsia, B. K. C. Patel, B. Ollivier // *Anaerobe*. – 2000. – Vol. 6. – P. 205-226.

136. **Generó, M. M.** Microbial Communities in Boreal Peatlands: Responses to Climate Change and Nitrogen and Sulfur Depositions / M. M. Generó ; Linköping Studies in Arts and Science. Department of Thematic Studies – Environmental Change. Linköping : Linköping University Faculty of Arts and Sciences, 2017. – № 715. – 73 p.

137. **Gu, B. H.** Natural humics impact uranium bioreduction and oxidation / B. H. Gu, J. Istok, M. Park [et al.] // *Environ. Sci. Technol.* – 2005. – Vol. 39. – №13. – P. 5268–5275.

138. **Gwynn, J. P.** The Radiological Environment of Svalbard; Strålevern Rapport 2004:2 / J. P. Gwynn, M. Dowdall, B. Lind. – Norway, Østerås: Norwegian Radiation Protection Authority, 2004. – 55 p.

139. **Healy, M.** The impact of alternating drainage and inundation cycles on geochemistry and microbiology of intact peat cores / M. Healy, A. Siggins, K. Molloy [et al.] // *Sci. Total Environ.* – 2023. – Vol. 858. – Art. 159664.

140. **Helariutta, K.** Radionuclides in Peat Bogs and Energy Peat (STUK-A-143) / K. Helariutta, A. Rantavaara, J. Lehtovaara. – Finland, Helsinki : Radiation and Nuclear Safety Authority, 2000. – 61 p.

141. **Horn, M. A.** Hydrogenotrophic methanogenesis by moderately acidtolerant methanogens of a methane-emitting acidic peat / M. A. Horn, C. Matthies, K. Kusel [et al.] // *Appl. Environ. Microbiol.* – 2003. – Vol. 69. – P. 74–83.

142. **Hoshino, Y.** Vertical distribution of radiocesium affects soil-to-crop transfer coefficient in various tillage systems after the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident / Y. Hoshino, M. Komatsuzaki // *Soil Tillage Res.* – 2018. – Vol. 178. – P. 179-188.

143. **Husson, O.** Redox potential (Eh) and pH as drivers of soil/plant/microorganism systems: a transdisciplinary overview pointing to integrative opportunities for agronomy / O. Husson // *Plant Soil.* – 2013. – Vol. 362. – P. 389-417.

144. **Ikonen, A.** Radioactivity on peatlands: Ecosystem approach on late-phase fallout situations. / A. Ikonen, L. Aro, V. Kangasniemi // *Proceedings of the Next Level in Radiation Protection.* – Finland, Espoo, 2019.

145. **Inglett, P W.** Anaerobic soils / P. W. Inglett, K. R. Reddy, R. Corstanje // *Encyclopedia of soils in the environment.* – London : Academic Press, 2005. – P. 72-78.

146. **IPS.** International Peatland Society: Peatlands International magazine. – URL: <http://www.peatsociety.org/> (дата обращения 05.11.2020).

147. **Jucha, W.** Assessment of Peat Extraction Range and Vegetation Succession on the Baligówka Degraded Peat Bog (Central Europe) Using the ALS Data and Orthophotomap / W. Jucha, P. Mareczka, D. Okupny // *Remote Sens.* – 2022. – Vol. 14. – Art. 2817.

148. **Kravchenko, I. K.** Activity and metabolic regulation of methane production in deep peat profiles of boreal bogs / I. K. Kravchenko, A. A. Sirin // *Microbiology (Mikrobiologiya).* – 2007. – T. 76. – № 6. – P. 791-798.

149. **Kudelsky, A.** Mobility of Chernobyl-derived  $^{137}\text{Cs}$  in a peatbog system within the catchment of the Pripyat River, Belarus / A. Kudelsky, J. Smith, S. Ovsianikova [et al.] // *Sci. Total Environ.* – 1996 – Vol. 188. – P. 101-113.

150. **Li, H.-C.** Study of Jinchuan Mire in NE China I: AMS  $^{14}\text{C}$ ,  $^{210}\text{Pb}$  and  $^{137}\text{Cs}$  dating on peat cores / H.-C. Li, J. Wang, J.-J. Sun [et al.] // *Quat. Int.* – 2019. – Vol. 528. – P. 9-17.

151. **Lide, D. R.** CRC Handbook of Chemistry and Physics, 84th. National Institute of Standards and Technology / D. R Lide. – Boca Raton : CRC Press. Taylor & Francis Group, 2004. – 2475 p.

152. **Limpens, J.** Peatlands and the carbon cycle: from local processes to global implications – a synthesis / J. Limpens, F. Berendse, C. Blodau [et al] // Biogeosciences. – 2008. – № 5. – P. 1475-1491.

153. **Linden, M.** Late Holocene human impact and climate change recorded in a North Swedish peat deposit. / M. Linden, J. Barke, E. Vickery [et al.] // Palaeogeogr. Palaeoclim. Palaeoecol. – 2008. – Vol. 258. – P. 1-27.

154. **Lishtvan, I. I.** Interaction between the bituminous and humic components of peat / I. I. Lishtvan, A. R. Tsyganov, A. E. Tomson [et al.] // Solid Fuel Chemistry. – 2017. – Vol. 51. – № 5. – P. 296-300.

155. **Lloyd, J. R.** Microbial detoxification of metals and radionuclides / J. R. Lloyd, D. R. Lovley // Current Opinion in Biotechnology. – 2001. – Vol. 12. – №3. – P. 248–253.

156. **Lokas, E.** Sources and pathways of artificial radionuclides to soils at a High Arctic site. / E. Lokas, P. Bartminski, P. Wachniew [et al.] // Environ. Sci. Pollut. Res. –2014. – Vol. 21. – P. 12479-12493.

157. **Lokas, E.** Sources and vertical distribution of  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{238}\text{Pu}$ ,  $^{239+240}\text{Pu}$  and  $^{241}\text{Am}$  in peat profiles from southwestern Spitsbergen / E. Lokas, J. W. Mietelski, M. E. Ketterer [et al.] // Appl. Geochem. – 2013. – Vol. 28. – P. 100-108.

158. **Lowe, L. E.** Studies on the nature of sulfur in peat humic acid from the Fraser river, British Columbia / L. E. Lowe // Sci. Total. Environ. – 2013. – Vol. 113. – P. 133-145.

159. **MacKenzie, A. B.** Isotopic evidence of the relative retention and mobility of lead and radiocaesium in Scottish ombrotrophic peats / A. B. MacKenzie, J. G. Farmer, C. L. Sugden // Sci. Total Environ. – 1997. – Vol. 203. – P. 115-127.

160. **Magiera, T.** Peat bogs as archives of local ore mining and smelting activities over the centuries: A case study of Miasteczko Slaskie (Upper Silesia,

Poland) / T. Magiera, M. M. Szuszkiewicz, A. Michczyński [et al.] // *Catena*. – 2021. – Vol. 198. – Art. 105063.

161. **Mars, H.** Redox potentials in relation to water levels in different mire types in the Netherlands and Poland / H. Mars, M. J. Wassen // *Plant Ecology*. – 1999. – Vol. 140. – P 41-51.

162. **Martinsson, J.** Experimental wildfire induced mobility of radiocesium in a boreal forest environment / J. Martinsson, G. Pédehontaa-Hiaa, V. Malmberg [et al.] // *Sci. Total Environ.* – 2021. – Vol. 792. – Art. 148310.

163. **Maryganova, V. V.** Changes in the composition of humic substances depending on the depth of peat occurrence / V. V. Maryganova, N. N. Bambalov, V. P. Strigutskii // *Solid Fuel Chemistry*. – 2013. – Vol. 47. – № 3. – P.153-164.

164. **Meyer, G.** Humic acid quality: using oxalic acid as precipitating agent / G. Meyer, R. Klocking // *Functions of natural organic matter in changing environment*. –2013. – P. 1055-1059.

165. **Mietelski, J. W.**  $^{238}\text{Pu}$ ,  $^{239+240}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Am}$ ,  $^{90}\text{Sr}$  and  $^{137}\text{Cs}$  in mountains soil samples from the Tatra National Park (Poland) / J. W. Mietelski, B. Kubica, P. Gaca, [et al.] // *J. Radioanal. Nucl. Chem.* – 2007. – Vol. 275. – P. 523-533.

166. **Mihalik, J.** Fractionation of  $^{137}\text{Cs}$  and Pu in natural peatland / J Mihalik, M. Bartuskova, Z. Holgye [et al.] // *J. Environ. Radioact.* – 2014. – Vol. 134. – P. 14-20.

167. **Mroz, T.** Atmospheric fallout radionuclides in peatland from Southern Poland / T. Mroz, E. Lokas, J. Kocurek [et al.] // *J. Environ. Radioact.* – 2017. – № 176. –P. 25-33.

168. **Ndiaye, A.** Reconstruction of the holocene climate and environmental changes of Niayes peat bog in northern coast of Senegal (NW Africa) based on stable isotopes and charcoals analysis / A. Ndiaye, I. Bentaleb, C. Favier [et al.] // *Quat. Sci. Rev.* – 2022. – Vol. 289. – Art. 107609.

169. **Oleksandrenko, A.** Americium-241 in peat bogs as a marker of the beginning of the Anthropocene: Examples from Europe and North America /

A. Oleksandrenko, P. Appleby, T. Noernberg, W. Shotyk // Proceedings of the EGU General Assembly. – 2021. – Art. EGU21-3744.

170. **Olid, C.** Modeling the downward transport of  $^{210}\text{Pb}$  in Peatlands: Initial Penetration-Constant Rate of Supply (IP-CRS) model / C. Olid, D. Diego, J. Garcia-Orellana [et al.] // *Sci. Total Environ.* – 2016. – Vol. 541 – P. 1222-1231.

171. **Orlov, D. S.** *Soil Chemistry* / D. S. Orlov. – Oxford & IBH Publishing Co. Pvt. Ltd., 1992. – 390 p.

172. **Paoli, R.** Peat production for horticultural use in the Latvian context: Sustainability assessment through LCA modeling / R. Paoli, M. Feofilovs, A. Kamenders, F. Romagnoli // *J. Clean. Prod.* – 2022. – Vol. 378. – Art. 134559.

173. **Paradis, C. J.** Elucidating mobilization mechanisms of uranium during recharge of river water to contaminated groundwater / C. J. Paradis, K. N. Hoss, C. E. Meurer [et al.] // *J. Contam. Hydrol.* – 2022. – Vol. 251. – Art. 104076.

174. **Parfenova, L. N.** Influence of climatic and hydrological factors on structure and composition of peat from northern wetland territories with low anthropogenic impact / L. N. Parfenova, S. B. Selyanina, M. V. Trufanova [et al.] // *Sci. Total. Environ.* – 2016. – Vol. 551-552. – P. 108–115.

175. **Perez-Moreno, S. M.** Hydrochemical behaviour of long-lived natural radionuclides in Spanish groundwaters / S. M. Perez-Moreno, J. L. Guerrero, F. Mosqueda [et al.] // *Catena.* – 2020. – Vol. 191. – Art. 104558.

176. **Pezeshki, S. R.** Wetland plant responses to soil flooding / S. R. Pezeshki // *Environ. Exp. Bot.* – 2001. – Vol. 46. – P. 299-312.

177. **Ponomareva, T.** Transformation of an oligotrophic sphagnum bog during the process of rewetting / T. Ponomareva, S. Selyanina, A. Shtang [at al.] // *Land.* – 2021. – Vol. 10(7). – Art. 670.

178. **Prikryl, J. D.** Uranium (VI) sorption behavior on silicate mineral mixtures / J. D. Prikryl, A. Jain, D. R. Turner, R. T. Pabalan // *J. of Contaminant Hydrology.* – 2001. – Vol. 47. – № 2-4. – P. 241–253.

179. **Putyrskaya, V.** Dating of recent sediments from Lago Maggiore and Lago di Lugano (Switzerland/Italy) using  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{210}\text{Pb}$  / V. Putyrskaya,

E. Klemt, S. Röllin [et al.] // *J. Environ. Radioact.* – 2020. – Vol. 212. – Art. 106135.

180. **Rachkova, N. G.** Sorption of uranium, radium, and thorium from saline solutions on hydrolyzed wood lignin / N. G. Rachkova, I. I. Shuktomova, A. I. Taskaev // *Russ. J. Appl. Chem.* – 2006. – Vol. 79. – P. 715-721.

181. **Rosen, K.**  $^{137}\text{Cs}$  in a raised bog in central Sweden. / K. Rosen, M. Vinichuk, K. Johanson // *J. Environ. Radioact.* – 2009. – Vol. 100. – P. 534-539.

182. **Roux, G. L.** Constructing recent peat accumulation chronologies using atmospheric fall-out radionuclides / G. L. Roux, W. A. Marshall // *Mires and Peat.* – 2011. – Vol. 7. – Art. 08. – P. 1-14.

183. **Salt, C. A.** Radionuclides in Grassland, Heath, Mire and Mountain Ecosystems / C. A. Salt // *Radioactivity in the Environment*; Shaw, G., Ed. – Amsterdam, Netherlands : Elsevier, 2007. – Vol. 10. – P. 97-125.

184. **Sanchez-Cabeza, J.**  $^{210}\text{Pb}$  sediment radiochronology: An integrated formulation and classification of dating models / J. Sanchez-Cabeza, A. Ruiz-Fernández // *Geochim. Cosmochim. Acta.* – 2012. – Vol. 82. – P. 183-200.

185. **Sanchez-Cabeza, J.** Monte Carlo uncertainty calculation of  $^{210}\text{Pb}$  chronologies and accumulation rates of sediments and peat bogs / J. Sanchez-Cabeza, A. Ruiz-Fernández, J. F. Ontiveros-Cuadras [et al.] // *Quat. Geochronol.* – 2014. – Vol. 23. – P. 80-93.

186. **Savichev, O.** Geochemical barriers in oligotrophic peat bog (Western Siberia) / O. Savichev, E. Soldatova, M. Rudmin [et al.] // *Appl. Geochem.* – 2020. – Vol. 113. – Art. 104519.

187. **Schleich, B. N.** Natural and artificial radionuclides in forest and bog soils: Tracers for migration processes and soil development / B. N. Schleich, D. Degering, S. Unterricker // *Radiochim. Acta.* – 2000. – Vol. 88. – P. 803-808.

188. **Schulz, C.** Portraits of peatland deposits Germany / C. Schulz, R. Meier-Uhlherr, V. Luthardt [et al.] // *Mires Peat.* – 2019. – Vol. 24. – Art. 20.

189. **Schuur, E. A. G.** Climate change and the permafrost carbon feedback / E. A. G. Schuur, A. D. McGuire, C. Schädel [et al.] // *Nature*. – 2015. – Vol. 520. – P. 171-179.
190. **Strack, M.** Peatlands and climate change / M. Strack // *International peat society*. – Finland, 2008. – 227 p.
191. **Strelko, V. V.** Sorption of cesium radionuclides onto semicrystalline alkali metal silicotitanates / V. V. Strelko, T. S. Psareva, I. Z. Zhuravlev [et al.] // *Radiochemistry*. – 2015. – Vol. 57. – № 1. – P. 73-78.
192. **Struyk, Z.** Redox properties of standard humic acids / Z. Struyk, S. Garrison // *Geoderma*. – 2001. – Vol. 102. Issues 3 – 4. – P. 329-346.
193. **Sun, A.** Climate change on the northeastern Tibetan Plateau during the past~600 years inferred from peat pollen records / A. Sun, Y. Yang, H. Wu, M. Ran // *Rev. Palaeobot. Palynol.* – 2020. – Vol. 276. – Art. 104194.
194. **Syrovetnik, K.** Accumulation of heavy metals in the Oostriku peat bog, Estonia: Determination of binding processes by means of sequential leaching / K. Syrovetnik, M. E. Malmström, I. Neretnieks // *Environ. Pollut.* – 2007. – Vol. 147. – P. 291-300.
195. **Thomson, J.** Records of radionuclide deposition in two salt marshes in the United Kingdom with contrasting redox and accumulation conditions / J. Thomson, F. M. Dyer, I. W. Croudace // *Geochim. Cosmochim. Acta.* – 2002. – Vol. 66. – №. 6. – P. 1011-1023.
196. **Tokarz, E.** Soil redox potential and its impact on microorganisms and plants of wetlands / E. Tokarz, D. Urban // *Journal of Ecological Engineering*. – 2015. – Vol. 16. – № 3. – P. 20–30.
197. **Tositti, L.** A multitracer study of peat profiles from Tunguska, Siberia / L. Tositti, M. Mingozzi, S. Sandrini [et al.] // *Glob. Planet. Chang.* – 2006. – Vol. 53. – P. 278-289.
198. **Ulyanovskii, N. V.** Migration and transformation of 1,1-dimethylhydrazine in peat bog soil of rocket stage fall site in Russian North /

N. V. Ulyanovskii, D. E. Lakhmanov, I. I. Pikovskoi [et al.] // *Sci. Total Environ.* – 2020. – Vol. 726. – Art. 138483.

199. **Urquhart, C.** The redox characteristics of four peat profiles / C. Urquhart, A. J. P. Gore // *Soil Biol. Biochem.* – 1973. – Vol. 5. – P. 659-672.

200. **Vaasma, T.** Pb-210 and fly ash particles in ombrotrophic peat bogs as indicators of industrial emissions / T. Vaasma, H. Karu, M. Kiisk [et al.] // *J. Environ. Radioact.* – 2017. – Vol. 174. – P. 78-86.

201. **Vile, M. A.** Mobility of Pb in Sphagnum-derived peat / M. A. Vile, K. R. Wieder, M. Novak // *Biogeochemistry.* – 1999. – № 45. – P. 35-52.

202. **Williamson, J.** Historical peat loss explains limited short-term response of drained blanket bogs to rewetting. / J. Williamson, E. Rowe, D. Reed [et al.] // *J. Environ. Manag.* – 2017. – Vol. 188. – P. 278-286.

203. **Yakovlev, E.** Assessment of the Impact of Anthropogenic Drainage of Raised Peat-Bog on Changing the Physicochemical Parameters and Migration of Atmospheric Fallout Radioisotopes in Russia's Subarctic Zone (Subarctic Zone of Russia) / E. Yakovlev, A. S. Orlov, A. A. Kudryavtseva [et al.] // *Appl. Sci.* – 2023. – №. 13(9). – Art. 5778. – P. 1-19. <https://doi.org/10.3390/app13095778>

204. **Yakovlev, E.** Atmospheric fallout of radionuclides in peat bogs in the Western segment of the Russian arctic / E. Yakovlev, R. Spirov, S. Druzhinin [et al.] // *Environ. Sci. Pollut. Res.* – 2021. – Vol. 28. – P. 25460–25478.

205. **Yakovlev, E.** Estimation of physicochemical parameters and vertical migration of atmospheric radionuclides in a raised peat bog in the Arctic zone of Russia / E. Yakovlev, A. S. Orlov, A. A. Kudryavtseva [et al.] // *Appl. Sci.* – 2022. – №. 12. – Art. 10870. – P. 1-21. <https://doi.org/10.3390/app122110870>

206. **Yu, K.** Major biogeochemical processes in soils – a microcosm incubation from reducing to oxidizing conditions / K. Yu, F. Bohme, J. Rinklebe [et al.] // *Soil Sci. Soc Am. J.* – 2007. – Vol. 71. – P. 1406-1417.

207. **Yu, Z. C.** Northern peatland carbon stocks and dynamics: a review / Z. C. Yu // *Biogeosciences.* – 2012. – Vol. 9. – P. 4071-4085.

208. **Zhao, X.** Records of iodine isotopes ( $^{129}\text{I}$ ,  $^{127}\text{I}$ ) in the Barkol peat bog from northwest China and their sources, transport and preservation / X. Zhao, X. Hou, D. Zhang [et al.] // *Chemosphere.* – 2021. – Vol. 279. – Art. 130531.

209. **Zubov, I.** Redox potential and acidity of peat are key diagnostic physicochemical properties for the stratigraphic zones of a boreal raised bog / I. Zubov, A. Orlov, S. Selyanina [et al.] // *Mires and Peat.* – 2022. – Vol. 28. – Art. 5. – P. 1-16.

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

Таблица А.1 – Физические и физико-химические параметры залежи естественного, осушенного и участка с постмелиоративным заболачиванием

Глубина, см	Степень разложения R, %	Естественное влагосодержание, г/г а.с.в.	Насыпная плотность, г/см <sup>3</sup>	Eh <sub>4</sub> , mV	rH
ИСНО-1 (естественный участок)					
0–10	0	23,96±0,23	0,075±0,002	428±6	22,5±0,4
10–20	5	23,57±0,04	0,095±0,001	340±7	19,5±0,5
20–30	5	24,49±0,07	0,097±0,002	200±1	14,8±0,1
30–40	7	20,66±1,20	0,099±0,003	125±3	12,2±0,2
40–50	7	15,19±0,11	0,109±0,004	109±7	11,7±0,5
50–60	7	н/о*	н/о	91±10	11,0±0,7
60–70	н/о	н/о	н/о	88±11	10,9±0,8
70–80	н/о	н/о	н/о	88±8	11,0±0,6
80–90	н/о	н/о	н/о	95±13	11,2±0,9
90–100	н/о	н/о	н/о	98±14	11,3±0,9
ИСНДО-1 (участок с постмелиоративным заболачиванием)					
0–10	5	6,97±0,25	0,230±0,001	535,3±7	26,2±0,2
10–20	10	10,76±0,56	0,161±0,002	358±20	20,1±0,7
20–30	7	8,44±0,49	0,189±0,004	229±42	15,8±1,4
30–40	10	7,68±0,29	0,340±0,004	180±15	14,1±0,5
40–50	10	6,93±0,20	0,387±0,003	147±13	13,0±0,4
50–60	10	н/о	н/о	122±21	12,2±0,7
60–70	н/о	н/о	н/о	114±9	11,9±0,3
70–80	н/о	н/о	н/о	102±5	11,5±0,2
80–90	н/о	н/о	н/о	95±5	11,2±0,2
90–100	н/о	н/о	н/о	96±7	11,3±0,2
ИСО-1 (осушенный участок)					
0–10	10	7,39±0,37	0,320±0,006	510±60	25,3±2,0
10–20	7	6,55±0,40	0,259±0,005	521±28	25,7±0,9
20–30	7	6,25±0,44	0,185±0,003	409±29	21,8±1,0
30–40	7	9,39±0,03	0,229±0,005	298±50	18,1±1,7
40–50	15	7,49±0,35	0,410±0,001	195±51	14,6±1,7
50–60	17	н/о	н/о	133±70	12,5±2,4
60–70	н/о	н/о	н/о	126±69	12,3±2,3
70–80	н/о	н/о	н/о	138±45	12,7±1,5
80–90	н/о	н/о	н/о	156±35	13,3±1,2
90–100	н/о	н/о	н/о	147±31	13,0±1,0

\* Примечание: н/о – параметры не определялись.

Таблица А.2 –Общетехнические параметры торфа естественного участка ИСНО-1

Глубина, см	Зольность, %	ОВ, %	ППП, %	pH <sub>водн.</sub>	pH <sub>солев.</sub>	Водораств. соли, мг/г	m, г/срез керна*
0–3	1,75±0,01	98,25±0,01	0,12±0,02	3,95±0,05	2,78±0,05	1,97±0,10	141,2
3–5	1,47±0,03	98,53±0,03	0,09±0,01	3,70±0,05	2,67±0,05	1,71±0,09	72,4
5–7	1,47±0,07	98,53±0,07	0,15±0,07	3,70±0,05	2,68±0,05	1,50±0,08	106,0
7–9	1,68±0,01	98,32±0,01	0,12±0,04	3,66±0,05	2,68±0,05	1,33±0,07	81,2
9–11	2,94±0,03	97,06±0,03	0,15±0,06	3,75±0,05	2,72±0,05	1,32±0,07	124,7
11–13	3,29±0,04	96,71±0,04	0,21±0,01	3,75±0,05	2,74±0,05	1,46±0,07	83,9
13–15	3,59±0,01	96,41±0,01	0,22±0,03	3,98±0,05	2,86±0,05	1,56±0,08	99,8
15–17	4,36±0,03	95,64±0,03	0,24±0,02	3,97±0,05	2,84±0,05	1,62±0,08	108,9
17–19	5,12±0,14	94,88±0,14	0,27±0,01	3,94±0,05	2,83±0,05	1,48±0,07	99,3
19–21	5,77±0,25	94,23±0,25	0,26±0,01	4,01±0,05	2,83±0,05	1,35±0,07	96,3
21–23	4,72±0,25	95,28±0,25	0,24±0,01	4,08±0,05	2,86±0,05	1,63±0,08	90,3
23–25	3,49±0,11	96,51±0,11	0,29±0,02	4,16±0,05	2,89±0,05	1,72±0,09	78,4
25–27	2,86±0,06	97,14±0,06	0,21±0,04	4,34±0,05	2,94±0,05	1,66±0,08	68,7
27–29	2,78±0,02	97,22±0,02	0,30±0,06	4,42±0,05	2,97±0,05	1,62±0,08	72,2
29–31	2,31±0,01	97,69±0,01	0,17±0,02	4,47±0,05	2,92±0,05	1,34±0,07	96,6
31–33	1,77±0,01	98,23±0,01	0,21±0,01	4,28±0,05	2,85±0,05	1,28±0,06	86,0
33–35	1,48±0,02	98,52±0,02	0,06±0,03	4,16±0,05	2,80±0,05	1,02±0,05	82,9
35–37	1,24±0,01	98,76±0,01	0,09±0,04	4,18±0,05	2,81±0,05	0,99±0,05	78,6
37–39	1,16±0,02	98,84±0,02	0,14±0,03	4,21±0,05	2,81±0,05	1,01±0,05	76,0
39–41	1,13±0,01	98,87±0,01	0,13±0,02	4,31±0,05	2,83±0,05	1,01±0,05	92,2
41–43	1,22±0,02	98,78±0,02	0,17±0,03	4,25±0,05	2,82±0,05	0,91±0,05	72,8
43–45	1,24±0,02	98,76±0,02	0,16±0,01	4,33±0,05	2,83±0,05	1,03±0,05	50,4
45–47	1,10±0,01	98,90±0,01	0,11±0,02	4,41±0,05	2,85±0,05	1,02±0,05	55,7
47–50	1,88±0,01	98,12±0,01	0,14±0,02	4,36±0,05	2,86±0,05	1,05±0,05	40,4

\*Примечание: масса абсолютно сухого торфа в срезе керна с ненарушенной структурой.

Таблица А.3 – Общетехнические параметры торфа участка с повторным заболачиванием ИСНО-1

Глубина, см	Зольность, %	ОВ, %	ППП, %	pH <sub>водн.</sub>	pH <sub>солев.</sub>	Водораств. соли, мг/г	m, г/срез керна*
0–3	3,55±0,04	96,45±0,04	0,26±0,01	4,11±0,05	3,22±0,05	2,49±0,12	39,3
3–5	1,94±0,03	98,06±0,03	0,17±0,12	3,75±0,05	2,78±0,05	1,73±0,09	28,0
5–7	1,68±0,04	98,32±0,04	0,12±0,07	3,65±0,05	2,70±0,05	1,60±0,08	35,0
7–9	2,16±0,01	97,84±0,01	0,11±0,02	3,59±0,05	2,65±0,05	1,51±0,08	64,9
9–11	3,03±0,06	96,97±0,06	0,16±0,01	3,73±0,05	2,71±0,05	1,35±0,07	69,3
11–13	6,45±0,07	93,55±0,07	0,23±0,04	3,62±0,05	2,70±0,05	1,54±0,08	73,2
13–15	8,10±0,07	91,90±0,07	0,22±0,02	3,54±0,05	2,63±0,05	1,61±0,08	109,4
15–17	5,17±0,09	94,83±0,09	0,34±0,02	3,50±0,05	2,61±0,05	1,64±0,08	169,7
17–19	2,75±0,02	97,25±0,02	0,22±0,01	3,62±0,05	2,66±0,05	1,47±0,07	168,4
19–21	1,80±0,01	98,20±0,01	0,12±0,01	3,79±0,05	2,75±0,05	1,34±0,07	148,2
21–23	1,25±0,01	98,75±0,01	0,08±0,01	3,76±0,05	2,71±0,05	1,42±0,07	129,1
23–25	0,92±0,02	99,08±0,02	0,04±0,01	3,87±0,05	2,73±0,05	1,28±0,06	108,3
25–27	1,00±0,02	99,00±0,02	0,08±0,02	3,88±0,05	2,74±0,05	1,05±0,05	154,4
27–29	1,04±0,01	98,96±0,01	0,09±0,02	3,89±0,05	2,72±0,05	1,17±0,06	113,3
29–31	1,04±0,02	98,96±0,02	0,05±0,01	3,88±0,05	2,71±0,05	0,95±0,05	149,7
31–33	0,98±0,02	99,02±0,02	0,10±0,01	3,93±0,05	2,73±0,05	0,90±0,04	131,8
33–35	1,04±0,01	98,96±0,01	0,11±0,03	3,98±0,05	2,75±0,05	0,88±0,04	167,6
35–37	0,99±0,01	99,01±0,01	0,06±0,03	4,03±0,05	2,77±0,05	0,91±0,05	162,7
37–39	0,94±0,01	99,06±0,01	0,08±0,01	4,07±0,05	2,78±0,05	0,84±0,04	141,1
39–41	1,02±0,01	98,98±0,01	0,06±0,01	4,15±0,05	2,80±0,05	0,88±0,04	140,5
41–43	1,06±0,01	98,94±0,01	0,05±0,02	4,19±0,05	2,83±0,05	0,66±0,03	218,0
43–45	1,15±0,01	98,85±0,01	0,05±0,03	4,28±0,05	2,86±0,05	0,69±0,03	187,0
45–47	1,24±0,02	98,76±0,02	0,08±0,03	4,28±0,05	2,87±0,05	0,70±0,04	145,8
47–50	1,14±0,02	98,86±0,02	0,05±0,01	4,27±0,05	2,82±0,05	0,68±0,03	174,5

\*Примечание: масса абсолютно сухого торфа в срезе керна с ненарушенной структурой.

Таблица А.4 – Общетехнические параметры торфа осушенного участка ИСО-1

Глубина, см	Зольность, %	ОВ, %	ППП, %	pH <sub>водн.</sub>	pH <sub>солев.</sub>	Водораств. соли, мг/г	m, г/срез керна*
0–4	3,43±0,01	96,57±0,01	0,32±0,04	4,38±0,05	3,48±0,05	2,73±0,14	110,2
4–6	4,93±0,06	95,07±0,06	0,20±0,01	3,84±0,05	2,87±0,05	1,69±0,08	81,6
6–8	6,21±0,11	93,79±0,11	0,17±0,02	3,63±0,05	2,68±0,05	1,66±0,08	106,1
8–10	4,29±0,02	95,71±0,02	0,17±0,02	3,55±0,05	2,61±0,05	1,69±0,08	75,7
10–12	3,39±0,02	96,61±0,02	0,20±0,02	3,72±0,05	2,60±0,05	1,38±0,07	62,3
12–14	2,60±0,04	97,40±0,04	0,18±0,01	3,53±0,05	2,61±0,05	1,67±0,08	73,8
14–16	2,51±0,01	97,49±0,01	0,22±0,01	3,50±0,05	2,62±0,05	1,69±0,08	97,1
16–18	2,39±0,01	97,61±0,01	0,20±0,02	3,51±0,05	2,62±0,05	1,62±0,08	100,4
18–20	1,93±0,02	98,07±0,02	0,21±0,03	3,51±0,05	2,60±0,05	1,48±0,07	107,0
20–22	2,19±0,02	97,81±0,02	0,22±0,02	3,56±0,05	2,63±0,05	1,32±0,07	142,1
22–24	1,94±0,02	98,06±0,02	0,17±0,00	3,58±0,05	2,63±0,05	1,19±0,06	158,6
24–26	1,83±0,01	98,17±0,01	0,17±0,03	3,80±0,05	2,66±0,05	0,80±0,04	192,0
26–28	1,49±0,03	98,51±0,03	0,18±0,06	3,76±0,05	2,66±0,05	0,95±0,05	190,5
28–30	1,01±0,01	98,99±0,01	0,15±0,04	3,84±0,05	2,62±0,05	0,70±0,04	154,5
30–32	0,69±0,02	99,31±0,02	0,13±0,01	3,84±0,05	2,59±0,05	0,75±0,04	143,6
32–34	0,71±0,04	99,29±0,04	0,11±0,01	3,84±0,05	2,58±0,05	0,72±0,04	121,9
34–36	0,78±0,01	99,22±0,01	0,06±0,01	3,84±0,05	2,56±0,05	0,75±0,04	105,6
36–38	0,76±0,02	99,24±0,02	0,06±0,01	3,88±0,05	2,57±0,05	0,82±0,04	106,8
38–40	0,82±0,01	99,18±0,01	0,05±0,04	4,03±0,05	2,63±0,05	0,67±0,03	133,4
40–42	1,00±0,01	99,00±0,01	0,10±0,02	4,08±0,05	2,68±0,05	0,75±0,04	135,1
42–44	1,23±0,04	98,77±0,04	0,08±0,01	4,17±0,05	2,75±0,05	0,62±0,03	129,6
44–46	1,27±0,05	98,73±0,05	0,14±0,01	4,23±0,05	2,77±0,05	0,56±0,03	121,3
46–48	1,39±0,02	98,61±0,02	0,18±0,04	4,15±0,05	2,79±0,05	0,59±0,03	120,0
48–50	1,46±0,04	98,54±0,04	0,15±0,01	4,18±0,05	2,79±0,05	0,52±0,03	131,7

\*Примечание: масса абсолютно сухого торфа в срезе керна с ненарушенной структурой.

Таблица А.5 – Элементный состав торфа естественного участка ИСНО-1

Глубина, см	Элементный состав органической части торфа, % атомных				Н/С	С/Н	О/С	Степень окисленности, (ω)
	N	C	H	O				
0–3	0,93±0,11	31,57±0,48	48,79±0,89	18,72	1,55	34,1	0,59	-0,36
3–5	1,44±0,14	31,41±0,03	49,60±0,60	17,55	1,58	21,9	0,56	-0,46
5–7	1,30±0,04	32,41±0,01	48,06±0,97	18,23	1,48	24,9	0,56	-0,36
7–9	1,23±0,03	31,61±0,06	49,78±0,30	17,39	1,57	25,8	0,55	-0,47
9–11	1,40±0,02	32,16±0,05	48,90±0,50	17,55	1,52	23,0	0,55	-0,43
11–13	1,42±0,01	31,76±0,06	48,30±0,21	18,52	1,52	22,4	0,58	-0,35
13–15	1,43±0,03	33,22±0,14	47,12±0,59	18,23	1,42	23,3	0,55	-0,32
15–17	1,41±0,16	31,77±0,02	47,67±0,42	19,16	1,50	22,5	0,60	-0,29
17–19	1,02±0,06	30,62±0,01	49,10±4,21	19,27	1,60	30,2	0,63	-0,34
19–21	0,91±0,05	27,32±0,79	53,87±1,79	17,90	1,97	29,9	0,66	-0,66
21–23	1,51±0,01	32,88±0,05	47,53±0,43	18,08	1,45	21,7	0,55	-0,35
23–25	1,40±0,01	30,99±0,18	48,64±1,72	18,96	1,57	22,1	0,61	-0,35
25–27	1,43±0,05	31,13±0,25	48,72±0,28	18,72	1,56	21,8	0,60	-0,36
27–29	1,60±0,02	31,38±0,13	48,75±0,06	18,27	1,55	19,6	0,58	-0,39
29–31	1,52±0,03	31,08±0,06	48,88±0,80	18,52	1,57	20,4	0,60	-0,38
31–33	1,55±0,01	31,50±0,12	49,50±1,43	17,45	1,57	20,4	0,55	-0,46
33–35	1,46±0,06	31,88±0,02	48,72±0,78	17,94	1,53	21,8	0,56	-0,40
35–37	1,39±0,05	31,80±0,08	49,39±0,28	17,42	1,55	22,9	0,55	-0,46
37–39	1,41±0,12	32,11±0,26	49,65±0,29	16,83	1,55	22,8	0,52	-0,50
39–41	1,52±0,10	32,54±0,15	49,07±0,41	16,88	1,51	21,4	0,52	-0,47
41–43	1,50±0,01	33,13±0,03	48,47±0,36	16,90	1,46	22,0	0,51	-0,44
43–45	1,36±0,09	34,43±0,23	46,28±1,64	17,92	1,34	25,3	0,52	-0,30
45–47	1,30±0,05	33,69±0,03	47,30±0,68	17,71	1,40	25,9	0,53	-0,35
47–50	1,41±0,17	31,55±0,46	49,62±0,36	17,41	1,57	22,3	0,55	-0,47

Таблица А.6 – Элементный состав торфа участка с повторным заболачиванием ИСНДО-1

Глубина, см	Элементный состав органической части торфа, % атомных				Н/С	С/Н	О/С	Степень окисленности, (ω)
	Н	С	Н	О				
0–3	0,35±0,02	31,24±0,03	45,87±0,67	22,54	1,47	89,7	0,72	-0,03
3–5	0,31±0,01	31,63±0,07	45,98±1,08	22,07	1,45	101,5	0,70	-0,06
5–7	0,37±0,01	32,29±0,01	45,25±0,40	22,09	1,40	87,1	0,68	-0,03
7–9	0,41±0,01	31,72±0,01	45,35±0,24	22,53	1,43	78,3	0,71	-0,01
9–11	0,60±0,02	31,85±0,08	45,74±0,38	21,81	1,44	53,2	0,68	-0,07
11–13	0,70±0,01	32,73±0,03	44,67±0,23	21,90	1,36	46,8	0,67	-0,03
13–15	0,81±0,01	33,44±0,07	44,97±0,45	20,77	1,34	41,1	0,62	-0,10
15–17	0,79±0,07	34,00±0,08	44,69±0,72	20,51	1,31	43,0	0,60	-0,11
17–19	0,69±0,08	34,54±0,01	42,67±0,27	22,09	1,24	49,9	0,64	0,04
19–21	0,50±0,02	33,29±0,05	43,83±0,55	22,38	1,32	66,2	0,67	0,03
21–23	0,37±0,01	32,67±0,01	43,40±0,47	23,55	1,33	87,2	0,72	0,11
23–25	0,33±0,02	33,21±0,09	43,19±0,75	23,27	1,30	100,3	0,70	0,10
25–27	0,39±0,03	33,02±0,04	45,20±0,05	21,38	1,37	83,8	0,65	-0,07
27–29	0,41±0,05	33,46±0,11	42,84±0,27	23,30	1,28	82,5	0,70	0,11
29–31	0,42±0,02	33,30±0,04	45,26±0,82	21,02	1,36	79,4	0,63	-0,10
31–33	0,42±0,01	33,61±0,09	45,63±0,01	20,34	1,36	79,6	0,61	-0,15
33–35	0,53±0,07	34,79±0,14	43,59±0,50	21,09	1,25	66,0	0,61	-0,04
35–37	0,45±0,02	33,46±0,01	45,47±0,54	20,62	1,36	74,4	0,62	-0,13
37–39	0,44±0,01	34,04±0,05	43,72±0,58	21,80	1,28	76,7	0,64	0,00
39–41	0,61±0,01	34,97±0,04	43,81±0,10	20,61	1,25	56,9	0,59	-0,07
41–43	0,63±0,06	35,62±0,26	44,73±0,36	19,02	1,26	56,7	0,53	-0,19
43–45	0,62±0,01	34,86±0,01	47,62±0,83	16,90	1,37	56,3	0,48	-0,40
45–47	0,61±0,02	36,01±0,09	44,21±0,34	19,17	1,23	58,9	0,53	-0,16
47–50	0,61±0,01	35,38±0,01	45,76±0,06	18,25	1,29	58,5	0,52	-0,26

Таблица А.7 – Элементный состав торфа осушенного участка ИСО-1

Глубина, см	Элементный состав органической части торфа, % атомных				Н/С	С/Н	О/С	Степень окисленности, (ω)
	Н	С	Н	О				
0–4	0,99±0,01	32,38±0,01	46,14±0,48	20,49	1,42	32,7	0,63	-0,16
4–6	0,72±0,06	34,21±0,01	45,18±0,28	19,88	1,32	47,3	0,58	-0,16
6–8	0,78±0,05	32,63±0,16	43,36±0,04	23,22	1,33	41,7	0,71	0,09
8–10	0,46±0,03	31,46±0,37	44,45±0,21	23,62	1,41	67,8	0,75	0,09
10–12	0,40±0,04	30,89±0,02	45,47±0,85	23,24	1,47	76,5	0,75	0,03
12–14	0,58±0,01	30,85±0,03	45,62±0,61	22,96	1,48	53,4	0,74	0,01
14–16	0,58±0,02	31,98±0,11	45,66±0,67	21,78	1,43	55,6	0,68	-0,07
16–18	0,47±0,03	32,21±0,25	46,32±0,52	21,00	1,44	68,4	0,65	-0,13
18–20	0,56±0,05	31,90±0,02	45,95±0,08	21,60	1,44	57,2	0,68	-0,09
20–22	0,60±0,01	32,29±0,05	46,58±0,19	20,53	1,44	53,8	0,64	-0,17
22–24	0,64±0,05	32,19±0,05	46,66±0,18	20,52	1,45	50,5	0,64	-0,17
24–26	0,65±0,03	33,15±0,01	46,65±0,45	19,55	1,41	51,1	0,59	-0,23
26–28	0,85±0,04	32,70±0,16	46,71±0,67	19,74	1,43	38,3	0,60	-0,22
28–30	0,54±0,05	32,05±0,06	45,79±0,46	21,62	1,43	59,4	0,67	-0,08
30–32	0,49±0,01	31,18±0,02	45,35±0,35	22,98	1,45	63,4	0,74	0,02
32–34	0,43±0,01	31,36±0,08	45,19±0,24	23,03	1,44	73,4	0,73	0,03
34–36	0,37±0,04	32,42±0,04	45,21±0,19	22,00	1,39	87,6	0,68	-0,04
36–38	0,29±0,02	32,49±0,15	45,67±0,32	21,55	1,41	111,4	0,66	-0,08
38–40	0,47±0,01	32,43±0,01	44,83±0,33	22,27	1,38	69,0	0,69	-0,01
40–42	0,31±0,02	33,15±0,04	46,35±0,01	20,19	1,40	106,6	0,61	-0,18
42–44	0,48±0,06	34,41±0,26	46,70±0,13	18,41	1,36	71,7	0,53	-0,29
44–46	0,79±0,01	34,32±0,03	47,26±0,80	17,63	1,38	43,7	0,51	-0,35
46–48	0,70±0,07	35,40±0,03	47,24±0,81	16,66	1,33	50,2	0,47	-0,39
48–50	0,83±0,03	35,48±0,11	46,85±0,84	16,83	1,32	42,7	0,47	-0,37

Таблица А.8 – Групповой компонентный состав торфа естественного участка ИСНО-1

Глубина, см	ВРВ, %	Б, %	ГК, %	ФК, %	ЛГВ, %	ТГВ, %	Л, %	ГК/ФК	Тип*
0-10	1,8±0,1	1,0±0,1	3,4±0,1	7,6±0,1	58,1±0,1	13,8±0,3	16,1±0,3	0,45	<0,5 (Ф)
10-20	1,2±0,1	0,8±0,1	4,0±0,2	7,1±0,2	58,6±0,1	13,8±0,1	15,7±0,1	0,56	0,5-1,5 (Г-Ф)
20-30	1,4±0,1	1,3±0,1	7,7±0,2	7,7±0,2	50,7±0,1	15,8±0,9	16,8±0,9	1,00	0,5-1,5 (Г-Ф)
30-40	1,7±0,1	1,9±0,2	15,9±0,9	8,8±0,9	44,4±0,1	9,2±0,2	19,7±0,2	1,81	>1,5 (Г)
40-50	2,0±0,1	2,6±0,1	24,4±0,1	8,4±0,1	38,8±0,1	10,4±0,1	15,4±0,1	2,89	>1,5 (Г)

\* Примечание: Тип гумусообразования: Ф – фульватный, Г-Ф – гуматно-фульватный, Г – гуматный.

Таблица А.9 – Групповой компонентный состав торфа участка с повторным заболачиванием ИСНДО-1

Глубина, см	ВРВ, %	Б, %	ГК, %	ФК, %	ЛГВ, %	ТГВ, %	Л, %	ГК/ФК	Тип*
0-10	1,9±0,1	3,6±0,1	16,1±0,1	11,1±0,1	35,4±0,2	9,9±0,2	23,9±0,2	1,45	0,5-1,5 (Г-Ф)
10-20	0,9±0,1	2,7±0,1	13,0±0,1	8,1±0,1	47,5±0,2	9,0±1,1	19,6±1,1	1,60	>1,5 (Г)
20-30	1,3±0,1	4,8±0,1	14,4±0,3	7,5±0,3	44,9±0,1	11,7±0,3	16,7±0,3	1,92	>1,5 (Г)
30-40	1,2±0,1	7,5±0,2	19,6±0,2	7,4±0,2	36,4±0,1	8,6±0,1	20,5±0,1	2,66	>1,5 (Г)
40-50	0,7±0,1	6,7±0,2	22,3±0,3	7,9±0,3	33,7±0,2	7,9±0,2	21,5±0,2	2,82	>1,5 (Г)

\* Примечание: Тип гумусообразования: Ф – фульватный, Г-Ф – гуматно-фульватный, Г – гуматный.

Таблица А.10 – Групповой компонентный состав торфа осушенного участка ИСО-1

Глубина, см	ВРВ, %	Б, %	ГК, %	ФК, %	ЛГВ, %	ТГВ, %	Л, %	ГК/ФК	Тип*
0-10	2,0±0,1	4,0±0,1	16,2±0,2	11,4±0,2	37,1±0,1	7,8±0,1	23,4±0,1	1,41	0,5-1,5 (Г-Ф)
10-20	1,5±0,1	4,1±0,1	17,2±0,2	8,7±0,2	41,1±0,2	10,7±0,2	18,2±0,2	1,97	>1,5 (Г)
20-30	1,5±0,1	2,9±0,1	14,6±0,5	6,8±0,5	48,3±0,2	10,7±0,5	16,7±0,5	2,14	>1,5 (Г)
30-40	1,5±0,1	6,5±0,2	20,9±0,3	7,0±0,3	34,9±0,1	9,9±0,2	20,8±0,2	2,99	>1,5 (Г)
40-50	1,4±0,1	6,1±0,2	23,1±0,1	6,8±0,1	34,1±0,1	7,1±0,1	22,7±0,1	3,40	>1,5 (Г)

\* Примечание: Тип гумусообразования: Ф – фульватный, Г-Ф – гуматно-фульватный, Г – гуматный.

## Приложение Б

Таблица Б.1 – Содержание макроэлементов в торфе естественного участка ИСНО-1

Глубина, см	K, мг/кг	Na, мг/кг	Mg, мг/кг	Ca, мг/кг	Fe, мг/кг	Mn, мг/кг	Al, мг/кг
0–3	826,8±41,3	226,1±11,3	601,7±30,1	933,0±46,6	582,0±29,1	74,9±3,7	190,6±9,5
3–5	405,1±20,3	146,0±7,3	586,4±29,3	742,8±37,1	788,0±39,4	32,4±1,6	274,2±13,7
5–7	234,9±11,7	121,7±6,1	466,6±23,3	769,5±38,5	685,1±34,3	17,2±0,9	283,6±14,2
7–9	106,4±5,3	117,4±5,9	476,2±23,8	1103,9±55,2	693,8±34,7	15,0±0,8	406,3±20,3
9–11	107,6±5,4	128,1±6,4	456,1±22,8	1217,7±60,9	778,1±38,9	16,3±0,8	631,3±31,6
11–13	70,2±3,5	79,0±3,9	385,1±19,3	995,7±49,8	629,9±31,5	16,3±0,8	639,3±32,0
13–15	77,5±3,9	118,0±5,9	426,0±21,3	1697,3±84,9	687,4±34,4	17,6±0,9	736,9±36,8
15–17	103,8±5,2	127,2±6,4	454,4±22,7	1335,1±66,8	754,3±37,7	17,3±0,9	1004,4±50,2
17–19	94,4±4,7	105,9±5,3	415,7±20,8	1190,4±59,5	716,2±35,8	12,5±0,6	980,1±49,0
19–21	56,5±2,8	94,8±4,7	395,1±19,8	1147,8±57,4	648,4±32,4	11,0±0,5	833,6±41,7
21–23	41,4±2,1	66,2±3,3	226,9±11,3	594,4±29,7	398,0±19,9	6,5±0,3	491,9±24,6
23–25	57,9±2,9	96,7±4,8	421,2±21,1	1157,6±57,9	651,6±32,6	10,4±0,5	784,0±39,2
25–27	47,5±2,4	64,0±3,2	351,5±17,6	953,6±47,7	524,0±26,2	8,9±0,4	586,3±29,3
27–29	57,5±2,9	83,9±4,2	416,4±20,8	1074,2±53,7	579,3±29,0	9,9±0,5	627,1±31,4
29–31	54,4±2,7	77,1±3,9	357,9±17,9	892,1±44,6	500,9±25,0	8,7±0,4	448,5±22,4
31–33	48,3±2,4	90,6±4,5	366,8±18,3	876,0±43,8	496,1±24,8	8,5±0,4	329,0±16,4
33–35	27,8±1,4	71,9±3,6	461,9±23,1	1099,4±55,0	625,2±31,3	10,3±0,5	349,2±17,5
35–37	23,4±1,2	70,1±3,5	432,0±21,6	994,3±49,7	579,5±29,0	9,6±0,5	270,5±13,5
37–39	15,6±0,8	45,2±2,3	331,0±16,5	672,0±33,6	433,7±21,7	7,4±0,4	198,3±9,9
39–41	26,5±1,3	80,2±4,0	412,7±20,6	835,7±41,8	523,5±26,2	8,3±0,4	254,2±12,7
41–43	19,6±1,0	47,0±2,4	331,8±16,6	618,9±30,9	425,1±21,3	6,9±0,3	221,4±11,1
43–45	26,6±1,3	64,6±3,2	385,1±19,3	740,0±37,0	495,6±24,8	8,0±0,4	232,6±11,6
45–47	22,0±1,1	49,4±2,5	286,5±14,3	496,2±24,8	369,5±18,5	5,8±0,3	151,9±7,6
47–50	63,0±3,2	115,8±5,8	381,9±19,1	817,3±40,9	506,7±25,3	8,3±0,4	224,1±11,2

Таблица Б.2 – Содержание макроэлементов в торфе участка с повторным заболачиванием ИСНО-1

Глубина, см	K, мг/кг	Na, мг/кг	Mg, мг/кг	Ca, мг/кг	Fe, мг/кг	Mn, мг/кг	Al, мг/кг
0–5	1588,6±79,4	138,6±6,9	488,3±24,4	1282,5±64,1	636,1±31,8	49,9±2,5	308,6±15,4
5–9	657,5±32,9	52,4±2,6	353,9±17,7	854,0±42,7	1172,2±58,6	20,4±1,0	348,0±17,4
9–11	596,5±29,8	62,2±3,1	367,1±18,4	975,6±48,8	1795,1±89,8	12,3±0,6	493,5±24,7
11–13	547,6±27,4	65,9±3,3	355,5±17,8	1026,0±51,3	2035,9±101,8	11,6±0,6	658,2±32,9
13–15	348,9±17,4	49,6±2,5	247,3±12,4	727,4±36,4	1274,0±63,7	8,0±0,4	704,1±35,2
15–17	279,5±14,0	41,3±2,1	283,2±14,2	844,2±42,2	874,6±43,7	6,2±0,3	686,1±34,3
17–19	179,8±9,0	25,0±1,3	288,0±14,4	827,1±41,4	636,2±31,8	4,7±0,2	427,4±21,4
19–21	119,6±6,0	21,4±1,1	301,9±15,1	856,1±42,8	581,2±29,1	4,1±0,2	309,9±15,5
21–23	78,9±3,9	27,7±1,4	364,2±18,2	1005,0±50,3	644,2±32,2	4,2±0,2	215,5±10,8
23–25	46,9±2,3	27,2±1,4	355,1±17,8	1042,7±52,1	637,3±31,9	4,1±0,2	151,8±7,6
25–27	38,5±1,9	42,7±2,1	441,1±22,1	1429,3±71,5	792,9±39,6	5,5±0,3	172,4±8,6
27–29	28,9±1,4	17,6±0,9	397,7±19,9	1217,6±60,9	713,6±35,7	5,4±0,3	132,8±6,6
29–31	34,9±1,7	60,4±3,0	425,9±21,3	1430,4±71,5	792,3±39,6	6,4±0,3	145,3±7,3
31–33	23,7±1,2	34,1±1,7	348,0±17,4	1127,1±56,4	658,1±32,9	5,8±0,3	137,8±6,9
33–35	21,2±1,1	32,7±1,6	317,4±15,9	1104,2±55,2	649,6±32,5	6,1±0,3	147,9±7,4
35–37	18,5±0,9	26,5±1,3	375,4±18,8	1234,0±61,7	746,0±37,3	7,7±0,4	146,3±7,3
37–39	24,6±1,2	54,0±2,7	457,5±22,9	1583,8±79,2	885,2±44,3	9,5±0,5	172,0±8,6
39–41	16,7±0,8	25,5±1,3	357,3±17,9	1245,4±62,3	750,4±37,5	8,6±0,4	180,7±9,0
41–43	13,2±0,7	16,8±0,8	254,2±12,7	909,2±45,5	592,9±29,6	7,0±0,4	163,5±8,2
43–45	19,9±1,0	43,2±2,2	284,7±14,2	1014,0±50,7	598,5±29,9	7,8±0,4	219,6±11,0
45–47	16,4±0,8	29,6±1,5	242,0±12,1	824,2±41,2	526,8±26,3	7,0±0,3	187,3±9,4
47–50	16,8±0,8	37,4±1,9	286,0±14,3	1063,7±53,2	648,5±32,4	8,4±0,4	187,6±9,4

Таблица Б.3 – Содержание макроэлементов в торфе осушенного участка ИСО-1

Глубина, см	K, мг/кг	Na, мг/кг	Mg, мг/кг	Ca, мг/кг	Fe, мг/кг	Mn, мг/кг	Al, мг/кг
0–4	1902,7±95,1	71,0±3,6	857,0±42,8	3430,9±171,5	144,3±7,2	342,3±17,1	109,8±5,5
4–6	970,3±48,5	34,7±1,7	661,1±33,1	1873,0±93,6	366,3±18,3	89,7±4,5	227,0±11,4
6–8	646,2±32,3	33,3±1,7	571,4±28,6	1628,4±81,4	944,5±47,2	44,6±2,2	455,7±22,8
8–10	536,3±26,8	25,7±1,3	526,3±26,3	1471,7±73,6	2150,4±107,5	27,3±1,4	768,8±38,4
10–12	615,0±30,7	137,9±6,9	595,9±29,8	1439,1±72,0	2956,6±147,8	24,4±1,2	1141,9±57,1
12–14	261,4±13,1	50,2±2,5	425,2±21,3	979,0±49,0	796,3±39,8	6,0±0,3	655,5±32,8
14–16	124,2±6,2	28,0±1,4	334,3±16,7	737,9±36,9	408,8±20,4	3,8±0,2	360,6±18,0
16–18	149,2±7,5	65,2±3,3	378,2±18,9	885,2±44,3	444,9±22,2	4,5±0,2	471,7±23,6
18–20	265,1±13,3	28,6±1,4	446,2±22,3	1043,0±52,1	962,7±48,1	5,1±0,3	592,6±29,6
20–22	218,1±10,9	52,8±2,6	378,5±18,9	897,2±44,9	583,4±29,2	4,3±0,2	466,6±23,3
22–24	180,4±9,0	43,6±2,2	360,4±18,0	815,3±40,8	500,4±25,0	4,0±0,2	436,8±21,8
24–26	109,4±5,5	5,9±0,3	247,4±12,4	485,5±24,3	391,2±19,6	3,5±0,2	430,2±21,5
26–28	89,7±4,5	36,3±1,8	302,6±15,1	724,0±36,2	438,6±21,9	4,3±0,2	477,3±23,9
28–30	82,3±4,1	58,0±2,9	398,1±19,9	921,8±46,1	552,8±27,6	5,1±0,3	448,2±22,4
30–32	49,2±2,5	38,3±1,9	370,7±18,5	791,5±39,6	504,2±25,2	4,9±0,2	348,717,4
32–34	41,7±2,1	44,7±2,2	341,4±17,1	778,5±38,9	486,0±24,3	4,9±0,2	320,1±16,0
34–36	40,7±2,0	46,4±2,3	365,6±18,3	890,5±44,5	567,0±28,3	5,6±0,3	395,5±19,8
36–38	34,3±1,7	38,4±1,9	371,8±18,6	945,8±47,3	627,6±31,4	6,1±0,3	459,6±23,0
38–40	40,8±2,0	43,0±2,2	334,4±16,7	901,9±45,1	636,6±31,8	6,2±0,3	521,5±26,1
40–42	30,5±1,5	32,7±1,6	295,4±14,8	872,7±43,6	626,3±31,3	6,3±0,3	593,3±29,7
42–44	23,0±1,2	13,1±0,7	184,1±9,2	556,6±27,8	478,9±23,9	5,1±0,3	549,1±27,5
44–46	21,7±1,1	5,9±0,3	155,5±7,8	483,3±24,2	447,6±22,4	5,1±0,3	516,3±25,8
46–48	30,6±1,5	25,4±1,3	177,6±8,9	609,8±30,5	523,7±26,2	6,0±0,3	694,9±34,7
48–50	31,1±1,6	10,9±0,5	173,6±8,7	587,1±29,4	531,3±26,6	6,1±0,3	729,4±36,5

## Приложение В

Таблица В.1 – Активности радионуклидов в торфе естественного участка ИСНО-1

Глубина, см	Cs-137, Бк/кг	Am-241, Бк/кг	Pb-210, Бк/кг	U-238, Бк/кг	U-234, Бк/кг	U-234/U-238	U n*10 <sup>-4</sup> , г/кг
0–3	38,8±1,9	н/о*	310,8±15,5	0,82±0,04	1,29±0,06	1,57	0,60±0,03
3–5	45,6±2,3	н/о	211,2±10,6	0,21±0,01	0,17±0,01	0,79	0,15±0,01
5–7	31,2±1,6	н/о	168,4±8,4	0,54±0,03	0,98±0,05	1,83	0,39±0,02
7–9	15,5±0,8	н/о	155,4±7,8	1,28±0,06	1,69±0,08	1,32	0,93±0,05
9–11	16,4±0,8	н/о	168,5±8,4	3,03±0,15	4,29±0,21	1,42	2,22±0,11
11–13	19,8±1,0	н/о	158,0±7,9	1,26±0,06	1,34±0,07	1,07	0,92±0,05
13–15	19,8±1,0	н/о	155,0±7,8	2,76±0,14	2,52±0,13	0,91	2,03±0,10
15–17	27,5±1,4	н/о	131,1±6,6	4,17±0,21	7,12±0,36	1,71	3,06±0,15
17–19	43,4±2,2	н/о	101,6±5,1	0,14±0,01	0,42±0,02	2,95	0,10±0,01
19–21	45,5±2,3	н/о	243,9±12,2	1,85±0,09	1,62±0,08	0,87	1,39±0,07
21–23	37,8±1,9	н/о	72,2±3,6	1,55±0,08	2,95±0,15	1,91	1,12±0,06
23–25	21,1±1,1	н/о	77,9±3,9	1,08±0,05	1,25±0,06	1,16	0,78±0,04
25–27	13,3±0,7	н/о	44,4±2,2	1,29±0,06	4,10±0,21	3,19	0,94±0,05
27–29	9,9±0,5	н/о	34,3±1,7	1,19±0,06	2,22±0,11	1,87	0,86±0,04
29–31	4,6±0,2	н/о	26,5±1,3	0,76±0,04	1,19±0,06	1,57	0,55±0,03
31–33	4,9±0,2	н/о	28,8±1,4	2,50±0,13	3,69±0,18	1,47	1,83±0,09
33–35	4,3±0,2	н/о	26,5±1,3	0,44±0,02	0,54±0,03	1,24	0,32±0,02
35–37	4,3±0,2	н/о	26,3±1,3	0,36±0,02	0,35±0,02	0,99	0,26±0,01
37–39	4,0±0,2	н/о	26,4±1,3	0,23±0,01	0,28±0,01	1,22	0,17±0,01
39–41	3,2±0,2	н/о	26,5±1,3	0,23±0,01	0,35±0,02	1,54	0,17±0,01
41–43	3,3±0,2	н/о	26,3±1,3	0,24±0,01	0,36±0,02	1,53	0,17±0,01
43–45	5,1±0,3	н/о	26,2±1,3	0,16±0,01	0,44±0,02	2,71	0,12±0,01
45–47	3,8±0,2	н/о	26,2±1,3	0,58±0,03	0,41±0,02	0,69	0,43±0,02
47–50	3,7±0,2	н/о	26,3±1,3	0,42±0,02	0,38±0,02	0,91	0,31±0,02

\* Примечание: н/о – ниже предела обнаружения метода.

Таблица В.2 – Активности радионуклидов в торфе участка с повторным заболачиванием ИСНДО-1

Глубина, см	Cs-137, Бк/кг	Am-241, Бк/кг	Pb-210, Бк/кг	U-238, Бк/кг	U-234, Бк/кг	U-234/U-238	U n*10 <sup>-4</sup> , г/кг
0–5	103,8±5,2	н/о*	232,1±11,6	3,65±0,18	4,38±0,22	1,20	2,95±0,15
5–9	44,5±2,2	1,3±0,1	227,0±11,3	0,58±0,03	0,70±0,03	1,20	0,47±0,02
9–11	47,5±2,4	1,8±0,1	166,8±8,3	3,24±0,16	8,96±0,45	2,77	2,62±0,13
11–13	51,4±2,6	2,1±0,1	142,2±7,1	1,42±0,07	2,18±0,11	1,54	1,15±0,06
13–15	43,7±2,2	1,5±0,1	118,5±5,9	2,62±0,13	3,36±0,17	1,28	2,11±0,11
15–17	26,1±1,3	1,0±0,1	85,4±4,3	1,27±0,06	1,51±0,08	1,19	1,02±0,05
17–19	11,0±0,5	0,8±0,1	33,7±1,7	0,82±0,04	0,88±0,04	1,07	0,66±0,03
19–21	4,9±0,2	0,6±0,1	12,1±0,6	3,36±0,17	6,94±0,35	2,07	2,71±0,14
21–23	2,6±0,1	н/о	10,0±0,5	0,24±0,01	0,57±0,03	2,37	1,95±0,10
23–25	2,1±0,1	н/о	21,3±1,1	0,96±0,05	2,04±0,10	2,12	0,77±0,04
25–27	2,1±0,1	н/о	7,7±0,4	0,36±0,02	0,52±0,03	1,44	0,29±0,01
27–29	1,6±0,1	н/о	11,1±0,6	0,86±0,04	0,94±0,05	1,09	0,70±0,04
29–31	1,7±0,1	н/о	22,2±1,1	0,19±0,01	0,22±0,01	1,18	0,16±0,01
31–33	2,0±0,1	н/о	17,7±0,9	0,36±0,02	0,42±0,02	1,17	0,29±0,01
33–35	1,8±0,1	н/о	16,5±0,8	2,08±0,10	3,43±0,17	1,65	1,68±0,08
35–37	2,1±0,1	н/о	16,4±0,8	0,53±0,03	0,61±0,03	1,14	0,43±0,02
37–39	1,9±0,1	н/о	19,8±1,0	0,37±0,02	0,39±0,02	1,04	0,30±0,01
39–41	2,4±0,1	н/о	17,5±0,9	0,18±0,01	0,27±0,01	1,46	0,14±0,01
41–43	2,4±0,1	н/о	16,3±0,8	0,21±0,01	0,32±0,02	1,52	0,17±0,01
43–45	3,8±0,2	н/о	4,3±0,2	1,07±0,05	2,03±0,10	1,90	0,86±0,04
45–47	3,4±0,2	н/о	5,4±0,3	1,36±0,07	3,55±0,18	2,61	1,09±0,05
47–50	3,1±0,2	н/о	6,5±0,3	0,85±0,04	1,04±0,05	1,23	0,68±0,03

\* Примечание: н/о – ниже предела обнаружения метода.

Таблица В.3 – Активности радионуклидов в торфе осушенного участка ИСО-1

Глубина, см	Cs-137, Бк/кг	Am-241, Бк/кг	Pb-210, Бк/кг	U-238, Бк/кг	U-234, Бк/кг	U-234/U-238	U п*10-4, г/кг
0–4	142,6±7,1	н/о*	500,8±25,0	0,76±0,04	1,04±0,05	1,37	0,61±0,03
4–6	68,8±3,4	н/о	567,9±28,4	1,00±0,05	1,67±0,08	1,67	0,81±0,04
6–8	58,2±2,9	н/о	340,3±17,0	2,94±0,15	3,59±0,18	1,22	2,37±0,12
8–10	48,6±2,4	1,8±0,1	207,6±10,4	2,15±0,11	2,31±0,12	1,07	1,73±0,09
10–12	37,8±1,9	2,1±0,1	193,5±9,7	1,35±0,07	1,42±0,07	1,05	1,09±0,05
12–14	29,4±1,5	1,9±0,1	167,6±8,4	2,18±0,11	2,38±0,12	1,09	1,77±0,09
14–16	23,7±1,2	2,1±0,1	137,0±6,9	1,39±0,07	1,58±0,08	1,13	1,12±0,06
16–18	21,2±1,1	1,8±0,1	82,8±4,1	2,50±0,12	2,57±0,13	1,03	2,08±0,10
18–20	21,2±1,1	1,0±0,1	57,1±2,9	1,06±0,05	0,96±0,05	0,91	0,85±0,04
20–22	16,4±0,8	н/о	23,9±1,2	0,86±0,04	1,23±0,06	1,43	0,70±0,03
22–24	12,3±0,6	н/о	17,6±0,9	0,84±0,04	0,74±0,04	0,88	0,68±0,03
24–26	7,7±0,4	н/о	23,8±1,2	0,57±0,03	1,03±0,05	1,82	0,45±0,02
26–28	5,5±0,3	н/о	6,3±0,3	0,37±0,02	0,56±0,03	1,50	0,31±0,02
28–30	4,1±0,2	н/о	6,5±0,3	0,51±0,03	0,91±0,05	1,77	0,41±0,02
30–32	3,0±0,2	н/о	23,8±1,2	0,45±0,02	0,54±0,03	1,21	0,36±0,02
32–34	2,6±0,1	н/о	25,1±1,3	0,41±0,02	0,40±0,02	0,97	0,33±0,02
34–36	2,7±0,1	н/о	20,9±1,0	0,58±0,03	0,71±0,04	1,22	0,47±0,02
36–38	2,8±0,1	н/о	8,6±0,4	0,34±0,02	0,38±0,02	1,12	0,28±0,01
38–40	3,0±0,1	н/о	25,3±1,3	0,30±0,02	0,38±0,02	1,25	0,24±0,01
40–42	3,2±0,2	н/о	22,4±1,1	0,25±0,01	0,30±0,02	1,20	0,20±0,01
42–44	3,0±0,1	н/о	10,6±0,5	0,36±0,02	0,43±0,02	1,20	0,30±0,01
44–46	3,0±0,2	н/о	23,1±1,2	0,45±0,02	0,51±0,03	1,13	0,37±0,02
46–48	4,2±0,2	н/о	25,1±1,3	0,33±0,02	0,37±0,02	1,15	0,26±0,01
48–50	4,0±0,2	н/о	9,4±0,5	0,28±0,01	0,35±0,02	1,24	0,23±0,01

\* Примечание: н/о – ниже предела обнаружения метода.

Таблица В.4 – Результаты моделирования вертикальной миграции Cs-137 в торфяном профиле естественного участка ИСНО-1 в динамических условиях в лизиметре

Глубина, см	Фон Cs-137, Бк/кг	Метка* Cs-137, Бк/кг	ΔCs-137, Бк/кг	Распределение Cs-137, Бк/слой	Распределение Cs-137, % от акт. метки
0–3	38,8±1,9	1074,4±53,7	1035,6	202,3	67,4
3–5	45,6±2,3	490,7±24,5	445,1	69,2	23,1
5–7	31,2±1,6	114,2±5,7	82,9	11,6	3,9
7–9	15,5±0,8	41,2±2,1	25,6	3,4	1,1
9–11	16,4±0,8	37,6±1,9	21,1	3,2	1,1
11–13	19,8±1,0	44,2±2,2	24,4	3,2	1,1
13–15	19,8±1,0	58,1±2,9	38,3	5,0	1,7
15–17	27,5±1,4	47,1±2,4	19,6	2,2	0,7
17–19	43,4±2,2	43,7±2,2	-	-	-
19–21	45,5±2,3	46,0±2,3	-	-	-
21–23	37,8±1,9	37,1±1,9	-	-	-
23–25	21,1±1,1	21,2±1,1	-	-	-
25–27	13,3±0,7	13,0±0,7	-	-	-
27–29	9,9±0,5	10,0±0,5	-	-	-
29–31	4,6±0,2	4,6±0,2	-	-	-
31–33	4,9±0,2	4,9±0,2	-	-	-
33–35	4,3±0,2	4,4±0,2	-	-	-
35–37	4,3±0,2	4,6±0,2	-	-	-
37–39	4,0±0,2	4,0±0,2	-	-	-
39–41	3,2±0,2	3,2±0,2	-	-	-
41–43	3,3±0,2	3,2±0,2	-	-	-
43–45	5,1±0,3	5,2±0,3	-	-	-
45–47	3,8±0,2	3,9±0,2	-	-	-
47–50	3,7±0,2	3,5±0,2	-	-	-

\* Примечание: метка 50 мл нитрата цезия-137 с акт. 300 Бк, S зерна 30\*32 см время эксперимента 1 год.

Таблица В.5 – Результаты моделирования вертикальной миграции Cs-137 в торфяном профиле осушенного участка ИСО-1 в динамических условиях в лизиметре

Глубина, см	Фон Cs-137, Бк/кг	Метка* Cs-137, Бк/кг	$\Delta$ Cs-137, Бк/кг	Распределение Cs-137, Бк/слой	Распределение Cs-137, % от акт. метки
0–4	142,6±7,1	926,9±46,3	784,3	93,5	31,2
4–6	68,8±3,4	1033,7±51,7	964,9	101,5	33,8
6–8	58,2±2,9	462,1±23,1	404,0	44,2	14,7
8–10	48,6±2,4	197,6±9,9	149,0	25,7	8,6
10–12	37,8±1,9	171,0±8,6	133,2	34,3	11,4
12–14	29,4±1,5	32,5±1,6	3,0	0,8	0,3
14–16	23,7±1,2	24,1±1,2	-	-	-
16–18	21,2±1,1	21,0±1,1	-	-	-
18–20	21,2±1,1	21,8±1,1	-	-	-
20–22	16,4±0,8	15,1±0,8	-	-	-
22–24	12,3±0,6	13,5±0,7	-	-	-
24–26	7,7±0,4	6,6±0,3	-	-	-
26–28	5,5±0,3	6,0±0,3	-	-	-
28–30	4,1±0,2	4,0±0,2	-	-	-
30–32	3,0±0,2	3,2±0,2	-	-	-
32–34	2,6±0,1	2,3±0,1	-	-	-
34–36	2,7±0,1	3,1±0,2	-	-	-
36–38	2,8±0,1	2,4±0,1	-	-	-
38–40	3,0±0,1	2,6±0,1	-	-	-
40–42	3,2±0,2	3,8±0,2	-	-	-
42–44	3,0±0,1	2,6±0,1	-	-	-
44–46	3,0±0,2	3,1±0,2	-	-	-
46–48	4,2±0,2	3,9±0,2	-	-	-
48–50	4,0±0,2	4,1±0,2	-	-	-

\* Примечание: метка 50 мл нитрата цезия-137 с акт. 300 Бк, S зерна 30\*32 см время эксперимента 1 год.

Таблица В.6 – Оценка связывания Cs-137 верховым торфом и продуктами его последовательной разборки

Образец	pH нач.	pH равн.	Ж.ф. Cs-137, Бк	Т.ф. Cs-137, Бк	Степень извлечения, %	Величина адсорбции Г, Бк/г
1. Торф	2,00±0,05	2,01±0,05	28,6±2,3	0,4±0,1	1,3	1,0
	4,00±0,05	4,09±0,05	16,1±1,3	12,6±0,9	44,0	31,6
	6,00±0,05	5,69±0,05	7,8±0,7	20,5±1,4	72,3	51,2
2. Торф обезбиг.	2,00±0,05	2,05±0,05	27,9±2,2	0,9±0,1	3,0	2,1
	4,00±0,05	4,17±0,05	14,2±1,3	15,2±1,2	51,8	38,1
	6,00±0,05	5,82±0,05	6,3±0,6	21,2±1,5	76,9	52,9
3. Гумин	2,00±0,05	2,08±0,05	24,8±2,0	2,7±0,2	9,7	6,7
	4,00±0,05	4,15±0,05	11,1±1,0	17,0±1,2	60,6	42,6
	6,00±0,05	5,80±0,05	5,7±0,6	22,9±1,6	80,2	57,3
4. ТГВ+Лигнин	2,00±0,05	2,02±0,05	25,0±2,0	3,3±0,2	11,8	8,3
	4,00±0,05	3,81±0,05	14,2±1,1	13,81,0	49,4	34,6
	6,00±0,05	5,49±0,05	7,8±0,6	21,31,5	73,1	53,2
5. Лигнин	2,00±0,05	2,04±0,05	21,3±1,7	6,5±0,5	23,3	16,2
	4,00±0,05	4,28±0,05	5,8±0,5	22,0±1,5	79,1	55,0
	6,00±0,05	5,65±0,05	3,4±0,3	24,2±1,7	87,8	60,6

## Приложение Г

Таблица Г.1 – Результаты Рb-210 датирования торфяных профилей ИСНО-1, ИСНДО-1 и ИСО-1

ИСНО-1*				ИСНДО-1**				ИСО-1**			
Глубина, см	Год	Скорость торфонакопления, см/год	Накопление массы торфа, г/см <sup>2</sup> ·год	Глубина, см	Год	Скорость торфонакопления, см/год	Накопление массы торфа, г/см <sup>2</sup> ·год	Глубина, см	Год	Скорость торфонакопления, см/год	Накопление массы торфа, г/см <sup>2</sup> ·год
0–3	2021	0,22±0,05	0,53±0,05	0–3	2021	0,41±0,05	0,018±0,003	0–4	2021	0,21±0,01	0,011±0,001
3–5	2016	0,72±0,05	0,44±0,05	3–5	2018	1,07±0,05	0,017±0,003	4–6	2010	0,24±0,02	0,011±0,001
5–7	2013	0,85±0,05	0,84±0,05	5–7	2016	0,82±0,05	0,016±0,003	6–8	1997	0,13±0,02	0,008±0,001
7–9	2011	1,31±0,05	0,74±0,05	7–9	2014	0,39±0,05	0,014±0,003	8–10	1981	0,15±0,02	0,009±0,001
9–11	2009	0,92±0,05	1,36±0,05	9–11	2008	0,43±0,05	0,017±0,004	10–12	1971	0,20±0,03	0,009±0,001
11–13	2007	0,60±0,05	1,15±0,05	11–13	2004	0,41±0,05	0,017±0,004	12–14	1961	0,17±0,03	0,006±0,001
13–15	2004	0,62±0,05	1,63±0,05	13–15	1999	0,28±0,05	0,017±0,005	14–16	1947	0,10±0,02	0,005±0,001
15–17	2001	0,43±0,05	2,19±0,05	15–17	1992	0,19±0,05	0,018±0,007	16–18	1927	0,05±0,02	0,003±0,001
17–19	1996	0,25±0,05	2,66±0,05	17–19	1981	0,37±0,05	0,035±0,008	18–20	1896	-	-
19–21	1988	0,30±0,05	3,63±0,05	19–21	1975	2,06±0,05	0,087±0,003	20–22	-	-	-
21–23	1974	0,28±0,05	3,93±0,05	21–23	1973	1,35±0,05	0,010±0,004	22–24	-	-	-
23–25	1967	0,27±0,05	3,89±0,05	23–25	1972	0,71±0,05	0,044±0,002	24–26	-	-	-
25–27	1960	0,44±0,05	3,66±0,05	25–27	1969	1,28±0,05	0,113±0,005	26–28	-	-	-
27–29	1955	0,45±0,05	4,12±0,05	27–29	1968	1,15±0,05	0,075±0,003	28–30	-	-	-
29–31	1951	0,70±0,05	5,72±0,05	29–31	1966	0,39±0,05	0,034±0,001	30–32	-	-	-
31–33	1948	0,40±0,05	5,45±0,05	31–33	1961	0,49±0,05	0,036±0,001	32–34	-	-	-
33–35	1943	0,56±0,05	5,49±0,05	33–35	1957	0,35±0,05	0,034±0,001	34–36	-	-	-
35–37	1939	0,49±0,05	5,48±0,05	35–37	1951	0,30±0,05	0,028±0,001	36–38	-	-	-
37–39	1935	0,41±0,05	5,59±0,05	37–39	1944	0,23±0,05	0,018±0,007	38–40	-	-	-
39–41	1931	0,31±0,05	7,27±0,05	39–41	1935	0,19±0,05	0,015±0,006	40–42	-	-	-
41–43	1924	0,23±0,05	6,24±0,05	41–43	1925	0,08±0,05	0,001±0,003	42–44	-	-	-
43–45	1915	0,17±0,05	4,83±0,05	43–45	1898	0,18±0,05	0,019±0,008	44–46	-	-	-
45–47	1903	0,098±0,05	6,31±0,05	45–47	1887	0,12±0,05	0,010±0,004	46–48	-	-	-
47–50	1882	-	-	47–50	1870	-	-	48–50	-	-	-

Примечание:

\* модель CF (CRS) с применением метода моделирования Монте-Карло, в связи с не экспоненциальным снижением активности <sup>210</sup>Rb дополнительно использовался метод аппроксимации для набора данных

\*\* модель CF (CRS) с применением метода моделирования Монте-Карло







Таблица Д.1 – Таблица факторов физико-химические параметры / радионуклиды площадки ИСНО-1

Параметр	Фактор				
	1	2	3	4	5
Глубина залегания	-0,97	-0,06	-0,17	-0,09	-0,10
<sup>137</sup> Cs	0,67	0,21	0,34	0,17	0,43
<sup>210</sup> Pb	0,78	0,19	0,18	0,00	0,53
<sup>234</sup> U/ <sup>238</sup> U	-0,08	-0,23	0,06	0,70	0,12
U	0,30	-0,08	0,74	-0,19	-0,24
ППП	-0,04	0,12	0,78	0,43	-0,08
Зольность	0,17	0,24	0,88	0,22	0,20
pH <sub>водн.</sub>	-0,87	0,01	-0,08	0,30	-0,22
pH <sub>KCl</sub>	-0,65	0,06	0,35	0,54	-0,24
Водорастворимые соли (электролиты)	0,71	0,02	0,32	0,52	-0,02
Органическое вещество (ОВ)	-0,17	-0,24	-0,88	-0,22	-0,20
N	-0,27	-0,31	-0,05	-0,07	-0,89
C	-0,17	-0,91	-0,28	-0,16	-0,12
H	0,04	0,96	0,04	-0,20	0,14
O	0,32	-0,12	0,47	0,72	0,17
H/C	0,10	0,95	0,21	-0,01	0,18
C/N	0,25	0,12	-0,02	0,10	0,92
O/C	0,28	0,54	0,48	0,53	0,21
Степень окисленности ОВ	0,12	-0,82	0,14	0,49	-0,05
Естественное влагосодержание	0,75	0,26	0,35	0,36	-0,20
Насыпная плотность	-0,96	-0,06	0,21	-0,05	-0,09
Eh	0,95	0,02	0,23	0,04	0,18
rH <sub>ср</sub>	0,95	0,02	0,23	0,04	0,19
Вклад (%)	43,35	18,50	16,87	8,00	4,55
Суммарный вклад (%)	43,35	61,84	78,72	86,72	91,26

Таблица Д.2 – Таблица факторов макроэлементы / радионуклиды площадки ИСНО-1

Параметр	Фактор				
	1	2	3	4	5
K	0,968	-0,114	-0,017	0,187	0,032
Na	0,908	0,185	0,252	0,135	-0,083
Mg	0,758	-0,106	0,615	0,013	-0,042
Ca	0,071	0,586	0,716	-0,042	-0,126
Fe	0,334	0,281	0,813	0,252	-0,094
Mn	0,966	-0,023	0,037	0,132	-0,005
Al	-0,216	0,727	0,433	0,384	0,039
<sup>137</sup> Cs	0,461	0,175	0,092	0,851	-0,031
<sup>210</sup> Pb	0,697	0,182	0,245	0,574	-0,163
<sup>238</sup> U	0,047	0,979	0,145	0,078	-0,049
<sup>234</sup> U	0,041	0,932	0,043	0,042	0,295
<sup>234</sup> U/ <sup>238</sup> U	-0,055	0,092	-0,105	-0,051	0,983
U	0,045	0,978	0,146	0,081	-0,052
Вклад (%)	44,653	29,156	9,945	6,642	5,067
Суммарный вклад (%)	44,653	73,809	83,754	90,395	95,463

Таблица Д.3 – Таблица факторов физико-химические параметры / радионуклиды площадки ИСНДО-1

Параметр	Фактор				
	1	2	3	4	5
Глубина залегания	-0,93	-0,11	-0,29	0,13	0,01
<sup>137</sup> Cs	0,90	0,13	-0,07	0,33	-0,05
<sup>210</sup> Pb	0,92	0,05	-0,10	0,08	-0,12
<sup>234</sup> U/ <sup>238</sup> U	-0,12	-0,03	0,00	-0,02	0,96
U	0,58	0,21	0,16	0,33	0,57
ППШ	0,58	0,71	0,18	0,07	-0,12
Зольность	0,48	0,81	0,02	-0,12	-0,03
pH <sub>водн.</sub>	-0,59	-0,30	-0,36	0,64	0,08
pH <sub>KCl</sub>	0,07	-0,17	-0,15	0,93	0,07
Водорастворимые соли (электролиты)	0,87	0,21	0,36	0,16	-0,05
Органическое вещество (ОВ)	-0,48	-0,81	-0,02	0,12	0,03
N	-0,27	0,91	-0,22	-0,13	0,05
C	-0,91	0,28	-0,18	0,12	-0,04
H	0,38	-0,09	-0,89	0,10	0,01
O	0,48	-0,24	0,82	-0,16	0,02
H/C	0,89	-0,26	-0,32	-0,01	0,03
C/N	0,29	-0,86	0,26	0,14	-0,09
O/C	0,68	-0,28	0,64	-0,14	0,04
Степень окисленности ОВ	0,26	-0,17	0,93	-0,15	0,02
Естественное влагосодержание	-0,03	0,56	0,46	-0,60	0,14
Насыпная плотность	-0,73	-0,16	-0,53	0,18	-0,09
Eh	0,94	0,18	0,16	-0,10	0,03
гНср	0,94	0,18	0,16	-0,10	0,03
<b>Вклад (%)</b>	46,83	19,38	16,19	6,46	4,86
<b>Суммарный вклад (%)</b>	46,83	66,21	82,39	88,86	93,72

Таблица Д.4 – Таблица факторов макроэлементы / радионуклиды площадки ИСНДО-1

Параметр	Фактор				
	1	2	3	4	5
K	0,934	0,291	0,043	0,171	-0,038
Na	0,845	0,236	0,336	0,143	-0,087
Mg	0,341	-0,055	0,905	0,015	-0,045
Ca	-0,024	-0,202	0,949	-0,139	-0,140
Fe	0,200	0,088	0,046	0,951	0,130
Mn	0,952	0,162	0,184	-0,115	-0,059
Al	0,258	0,279	-0,446	0,730	-0,238
<sup>137</sup> Cs	0,889	0,301	-0,035	0,325	-0,071
<sup>210</sup> Pb	0,848	0,145	-0,084	0,450	0,012
<sup>238</sup> U	0,373	0,903	-0,122	0,110	0,010
<sup>234</sup> U	0,149	0,877	-0,098	0,191	0,330
<sup>234</sup> U/ <sup>238</sup> U	-0,155	0,403	-0,169	0,018	0,872
U	0,348	0,869	-0,127	0,067	0,159
<b>Вклад (%)</b>	48,220	23,760	12,483	7,562	3,953
<b>Суммарный вклад (%)</b>	48,220	71,979	84,462	92,024	95,977

Таблица Д.5 – Таблица факторов физико-химические параметры / радионуклиды площадки ИСО-1

Параметр	Фактор				
	1	2	3	4	5
Глубина залегания	-0,55	-0,62	-0,45	-0,29	-0,06
$^{137}\text{Cs}$	0,10	0,44	0,88	0,10	0,03
$^{210}\text{Pb}$	0,01	0,64	0,71	0,02	0,14
$^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$	-0,09	-0,03	0,11	0,11	0,94
U	0,30	0,80	0,00	0,25	-0,29
ППП	0,17	0,22	0,60	0,71	-0,01
Зольность	0,03	0,90	0,34	0,23	0,04
pH <sub>водн.</sub>	-0,67	-0,43	0,43	-0,35	0,12
pH <sub>KCl</sub>	-0,33	-0,05	0,92	0,10	0,10
Водорастворимые соли (электролиты)	0,38	0,50	0,68	0,29	-0,15
Органическое вещество (ОВ)	-0,03	-0,90	-0,34	-0,23	-0,04
N	-0,39	0,11	0,50	0,56	0,28
C	-0,96	-0,10	-0,02	0,11	0,16
H	-0,39	-0,72	0,00	0,51	-0,09
O	0,83	0,39	-0,03	-0,35	-0,08
H/C	0,88	-0,31	0,02	0,19	-0,25
C/N	0,21	-0,18	-0,34	-0,68	-0,27
O/C	0,88	0,31	-0,02	-0,29	-0,12
Степень окисленности ОВ	0,75	0,48	-0,03	-0,41	-0,06
Естественное влагосодержание	-0,08	-0,20	0,04	-0,95	0,03
Насыпная плотность	-0,87	0,11	0,24	-0,09	-0,30
Eh	0,72	0,49	0,22	0,42	0,04
гНср	0,71	0,49	0,22	0,42	0,04
<b>Вклад (%)</b>	42,46	27,49	11,58	7,19	5,26
<b>Суммарный вклад (%)</b>	42,46	69,95	81,53	88,71	93,98

Таблица Д.6 – Таблица факторов макроэлементы / радионуклиды площадки ИСО-1

Параметр	Фактор				
	1	2	3	4	5
K	0,978	0,143	-0,006	0,098	0,065
Na	0,286	0,089	0,321	0,886	-0,060
Mg	0,842	0,306	0,030	0,370	0,052
Ca	0,966	0,124	-0,038	0,183	0,007
Fe	0,080	0,235	0,896	0,268	-0,103
Mn	0,947	-0,101	-0,202	0,053	0,008
Al	-0,281	0,059	0,923	0,057	-0,130
$^{137}\text{Cs}$	0,960	0,254	-0,040	0,042	0,021
$^{210}\text{Pb}$	0,863	0,362	-0,018	-0,021	0,155
$^{238}\text{U}$	0,168	0,965	0,130	0,062	-0,126
$^{234}\text{U}$	0,231	0,965	0,078	0,036	0,069
$^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$	0,121	-0,128	-0,185	-0,046	0,963
U	0,161	0,966	0,124	0,067	-0,128
<b>Вклад (%)</b>	49,511	24,241	12,889	6,384	4,070
<b>Суммарный вклад (%)</b>	49,511	73,751	86,640	93,024	97,093

## Приложение Е

Таблица Е.1 – Результаты непараметрического U-теста Манна-Уитни для участков ИСНО-1, ИСНДО-1 и ИСО-1

Параметр	Уэмпир.			Укрит. p≤0,05
	ИСНО-1/ИСНДО-1	ИСНО-1/ИСО-1	ИСНДО-1/ИСО-1	
<sup>137</sup> Cs	204	244	212,5	207
<sup>210</sup> Pb	<b>162</b>	<b>175</b>	232,5	207
<sup>234</sup> U/ <sup>238</sup> U	280	215	188	207
U	236,5	282,5	229	207
ППП	<b>149</b>	253,5	187,5	207
Зольность	183,5	226	274	207
pH <sub>водн.</sub>	<b>155,5</b>	<b>137</b>	240	207
pH <sub>солев.</sub>	<b>147,5</b>	<b>70</b>	<b>135,5</b>	207
Водораств. соли	209,5	192,5	250	207
N	<b>0</b>	<b>2</b>	225	207
C	<b>93</b>	<b>191</b>	<b>168,5</b>	207
H	<b>4</b>	<b>12</b>	<b>126</b>	207
O	<b>32,5</b>	<b>69,5</b>	255	207
H/C	<b>22,5</b>	<b>52,5</b>	<b>120,5</b>	207
C/N	<b>0</b>	<b>1</b>	204	207
O/C	<b>109</b>	<b>117,5</b>	263,5	207
Ст. окисленности	<b>13,5</b>	<b>30</b>	217	207
Ест. влагосодерж.	<b>0</b>	<b>0</b>	8	4
Насып. плотн.	<b>0</b>	<b>0</b>	11	4
Eh	34	<b>21</b>	32	27
K	241	211*	188	188(207*)
Na	<b>42</b>	<b>44*</b>	262	188(207*)
Mg	<b>140</b>	215*	223	188(207*)
Ca	190	252*	175,5	188(207*)
Fe	<b>117</b>	251*	<b>115</b>	188(207*)
Mn	<b>122</b>	<b>121*</b>	192	188(207*)
Al	<b>128</b>	239*	<b>102</b>	188(207*)
ВРВ	5,5	12	4	4
Б	<b>0</b>	<b>0</b>	11	4
ГК	7	6	8	4
ФК	12	9	9	4
ЛГВ	4	3	12	4
ТГВ	3	5	11,5	4
Л	3	3	12,5	4

Примечание: Уэмпир. ≥ Укрит. – отличия не значимые; Уэмпир. < Укрит. – отличия значимые.