

*На правах рукописи*



Пучков Андрей Викторович

РАДИОНУКЛИДЫ В ЭКОСИСТЕМАХ ТУНДРЫ: ИСТОЧНИКИ, УРОВНИ  
ЗАГРЯЗНЕНИЯ, АНТРОПОГЕННЫЕ МЕХАНИЗМЫ ТРАНСФОРМАЦИИ  
РАДИАЦИОННОГО ФОНА (НА ПРИМЕРЕ КЛЮЧЕВЫХ УЧАСТКОВ  
НЕНЕЦКОГО АВТОНОМНОГО ОКРУГА)

**Специальность 1.6.21 – Геоэкология**

**Автореферат**

диссертации на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических  
наук

Архангельск - 2023

Работа выполнена на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Федеральный исследовательский Центр комплексного изучения Арктики» Уральского отделения Российской Академии Наук.

**Научный руководитель:**

**Яковлев Евгений Юрьевич**

кандидат геолого-минералогических наук,  
ведущий научный сотрудник, заведующий  
лабораторией экологической радиологии  
ФГБУН ФИЦКИА УрО РАН

**Официальные оппоненты:**

**Язык Егор Григорьевич**

доктор геолого-минералогических наук,  
профессор отделения геологии инженерной  
школы природных ресурсов ФГБОУ ВО  
«Национальный исследовательский Томский  
политехнический университет»

**Микляев Петр Сергеевич**

доктор геолого-минералогических наук,  
профессор, заместитель директора по научной  
работе ФГБУН «Института геоэкологии им. Е.М.  
Сергеева РАН»

**Ведущая организация:** Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии Российской академии наук» (ИГЕМ РАН)

Защита диссертации состоится «18» января 2024 г. в 17.00 на заседании диссертационного совета 24.2.364.02 при ФГБОУ ВО «Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе» (МГРИ) по адресу: 117997, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д.23, зал заседаний диссертационных советов (каб. 4-73).

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке МГРИ и на сайте ФГБОУ ВО «Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе (МГРИ)» по адресу: 117997, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д.23, <https://mgri.ru/>

Автореферат разослан «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2023 г.

Ученый секретарь диссертационного совета

доктор геолого-минералогических наук



Ганова С. Д.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Актуальность темы исследования.**

Ненецкий автономный округ обладает выраженным и стратегически важным с точки зрения геополитики географическим расположением. Указанный факт вызывает особый интерес к данным территориям, связанный в первую очередь с ресурсно-экономическим потенциалом. Одной из важнейших составляющих данного потенциала является наличие большого количества углеводородных месторождений в восточной части Ненецкого автономного округа. С другой стороны, вокруг региона и в его пределах расположено значительное количество радиационных объектов, которые потенциально могут оказывать негативное влияние на окружающую среду. Среди таких объектов выделяются действующие предприятия по строительству, ремонту, модернизации и утилизации кораблей с ядерно-энергетической установкой, обращению с радиоактивными отходами, пункты захоронения радиоактивных отходов, а также "объекты ядерного наследия" - мирные ядерные взрывы, проведенные в Архангельской области и Ненецком автономном округе. Непосредственно близкое расположение к региону архипелага Новая Земля, на территории которого проводились ядерные испытания, также не могло не оказать влияния на объекты окружающей среды с точки зрения радиационного воздействия. Неизученной остается возможная трансформация естественного радиационного фона за счет интенсивного освоения углеводородных месторождений и деградациии многолетнемерзлых пород. Суровые природно-климатические условия, а также тот факт, что большая часть Ненецкого автономного округа до сих пор остается труднодоступной в условиях отсутствия комплексного транспортного сообщения, стали причинами слабой радиоэкологической изученности региона. В условиях возможного воздействия потенциально опасных радиационных факторов крайне важным и актуальным становится проведение комплексного радиоэкологического мониторинга с выявлением возможных зон повышенного содержания радионуклидов и их источников.

**Цель исследования:** оценка радиационно-экологических параметров тундровых территорий Ненецкого автономного округа для выявления повышенных уровней радиоактивного загрязнения в результате техногенного вмешательства и определения степени воздействия ионизирующего излучения на человека.

### **Задачи исследования:**

1. Оценка содержания техногенного Cs-137 в донных отложениях рек Канинской и Большеземельской тундр Ненецкого автономного округа.

2. Выявление закономерностей накопления и миграции техногенных радионуклидов Cs-137, Sr-90, Am-241, Pu-238, Pu-239+240, их уровней запаса и

источников поступления в ландшафтах Канинской тундры, в том числе на основе методов расчета изотопных отношений радионуклидов.

3. Оценка содержания природных и техногенных радионуклидов в биоте Канинской тундры и расчет дозовых нагрузок на человека.

4. Оценка формирования радиационных параметров почвенно-растительного покрова в зависимости от изменения мерзлотных условий на тундровых территориях. Экспериментальные исследования распределения Rn-222 в условиях имитации участка криолитозоны и ее деградации.

5. Исследование качественных и количественных характеристик природных радионуклидов в донных отложениях рек Печора, Колва и Уса, а также в грунтах, загрязненных нефтепродуктами, и нефтешламах на территории Большеземельской тундры. Категорирование загрязненных грунтов и нефтешламов в соответствии с требованиями действующих в Российской Федерации нормативно-правовых актов в области радиационной безопасности.

6. Оценка потенциальных источников повышенного содержания природных радионуклидов в донных отложениях рек Колва, Уса и Печора.

**Объект исследования:** Объектами исследования являются компоненты окружающей среды тундровых территорий Ненецкого автономного округа: донные осадки, почвы, гидробионты, отдельные биологические системы северного оленя.

**Предмет исследования:** Радиационные (суммарная удельная активность по альфа-, бета-излучению, удельная активность отдельных радионуклидов, мощность дозы гамма-излучения и др.) и физико-химические (гранулометрический состав донных отложений, зольность, содержание органического вещества и карбонатов в донных отложениях, почвах) параметры компонентов тундровых экосистем.

**Материалы исследования:** В основу диссертационной работы положены результаты экспедиционных работ 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 научных направлений, проектов и грантов за период с 2019 по 2023 гг.

**Фактический материал:** Автором приняты участия в экспедиционных работах в устьевой части реки Печора (июль-август 2020 г.), рек Малоземельской и Канинской тундр (февраль 2019 г., июнь 2021 г., июнь 2022 г.), на территории Приполярного Урала (август 2021 г.), бассейна реки Колва (август 2022 г.). В общей сложности было отобрано более 50 проб почвы, 199 проб донных осадков, 11 проб нефтешлама, 91 кг биологических проб (рыба, олень).

**Обоснованность результатов:** Обоснованность результатов обеспечивается применением высокоточной аппаратуры радиационного контроля (радиометры, дозиметры, спектрометрические системы), ежегодно проходящей метрологическую поверку. Измерения радиационных характеристик выполнялись в лаборатории экологической радиологии Института геодинамики и геологии им. Ф.Н. Юдахина Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики имени академика Н.П. Лаверова УрО РАН, аккредитованной в области радиационного контроля, аттестат аккредитации № RA.RU.21HA54. Часть измерений выполнялась на базе радиометрической лаборатории отдела ядерной и радиационной безопасности Акционерного общества «Центр судоремонта «Звездочка», аккредитованной в области проведения радиационных измерений, аттестат аккредитации RA.RU.21AD95.

Обоснованность и достоверность результатов дополнительно обеспечивается использованием обширных фактических и картографических материалов, значительной представительностью полевых исследований.

Расчет данных для построения карт выполнялся с применением современных ГИС-технологий QGis и Surfer. Статистический анализ проводился с применением лицензионных программных пакетов OriginPro и MS Excel.

#### **Научная новизна исследования.**

Научная новизна заключается в получении новых данных о характере распределения естественных и техногенных радионуклидов в компонентах природной среды тундровых территорий Ненецкого автономного округа.

Впервые определены изотопные отношения естественных и техногенных радионуклидов в пробах окружающей среды данных территорий, позволившие оценить источники загрязнения.

Установлены новые закономерности вертикальной миграции естественных радионуклидов, обусловленные изменением мерзлотных условий.

Установлено, что интенсивная деятельность нефтегазовых предприятий на территории Ненецкого автономного округа приводит к изменению естественного радиационного фона тундровых территорий за счет дополнительного поступления изотопов радия, тория и калия в объекты окружающей среды вместе с попутными водами и нефтью.

#### **Практическая значимость.**

Проведена оценка соответствия отдельных компонентов природной среды (донные отложения, пробы с песчаных карьеров, почва) требованиям основных санитарных правил, регламентирующих безопасность применения строительных материалов.

Проведены исследования радиационных характеристик основных продуктов питания (рыба, мясо оленя) на соответствие требованиям законодательства Российской Федерации в области продовольственной безопасности.

Результаты исследований распределения техногенных радионуклидов позволят скорректировать данные по плотностям загрязнения радионуклидами Cs-137 и Sr-90 на территории Ненецкого автономного округа.

Результаты исследования донных осадков реки Колва и выявление зон повышенного содержания естественных радионуклидов могут быть использованы в подготовке и корректировке нормативно-правовой базы по обращению с отходами нефтегазодобывающей отрасли, содержащими радионуклиды естественного происхождения с повышенными значениями удельных активностей.

**Апробация результатов:** Основные результаты исследований докладывались и обсуждались на следующих конференциях: Международная конференция «Радиобиология: современные проблемы 2020», Республика Беларусь, г. Гомель, 24-25 сентября 2020 года, Международная конференция «Арктические исследования: от экстенсивного освоения к комплексному развитию», г. Архангельск, 11-14 ноября 2020 года, Всероссийская конференция «Науки о Земле: от теории к практике», г. Чебоксары, 5-8 ноября 2020 года, Российская конференция «Новое в познании процессов рудообразования», Москва, 23-27 ноября 2020 года, Всероссийский форум с международным участием «Актуальные проблемы и перспективы развития геоэкологии», г. Якутск, 28 июня – 2 июля 2021 года, Международная конференция «Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека», г. Томск, 20-24 сентября 2021 года, Международная научно-практическая конференция молодых ученых и специалистов «Технологии будущего нефтегазодобывающих регионов», г. Сургут, 23-24 марта 2022 года, X Международная научная конференция молодых ученых «Молодые – Наука о Земле», Москва, 31 марта – 1 апреля 2022 года, Международная научная конференция «Радиобиология и экологическая безопасность-2022», Республика Беларусь, г. Гомель, 26–27 мая 2022 года, Международная конференция «Биомониторинг в Арктике», г. Архангельск, 11-12 октября 2022 года, Международная научная конференция «Радиобиология и экологическая безопасность-2022», Республика Беларусь, г. Гомель, 26–27 мая 2023 года. Все материалы конференций опубликованы в качестве тезисов докладов.

#### **Публикации.**

По теме диссертационной работы опубликовано 24 научные работы, 5 из которых входят в список рецензируемых изданий, рекомендованный ВАК, 5 научных работ индексируются в международных базах данных Web of Science и Scopus.

## **Структура, объем и содержание работы**

Диссертация изложена на 118 страницах машинописного текста и состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы (244 источника) и трех приложений; содержит 17 таблиц и 52 рисунка.

Во **введении** представлена актуальность темы, сформулирована цель и задачи диссертационной работы, научная новизна и основные положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** приведены общие сведения о радиоактивности окружающей среды, характеристика района исследований и степень его изученности в радиоэкологическом плане (физико-географические условия, экологическое состояние региона, наличие потенциальных источников радионуклидного загрязнения).

**Вторая глава** посвящена материалам и методам исследований. Приведена информация о лабораториях, на базе которых выполнялись измерения, их аккредитациях в национальной систем аккредитации в области радиационного контроля. Показан объем и тип отобранного материала, а также карта-схема ключевых участков. Подробно описаны методы проведения исследований, используемые средства измерений и вспомогательное оборудование.

**Третья глава** посвящена результатам исследований техногенной радиоактивности в объектах окружающей среды Ненецкого автономного округа. Приведен обзор результатов аэрогаммасъемки, проведенной в период с 1990 по 1992 гг. Выполнена оценка содержания Cs-137 в донных отложениях рек Канинской и Большеземельской тундр. Выявлена зона повышенного содержания техногенных радионуклидов в бассейне реки Несь и оценены источники загрязнения. Приведены результаты оценки содержания техногенных радионуклидов в биоте (на примере рыбы и северного оленя), а также рассчитаны дозовые нагрузки для человека.

В **четвертой главе** приведены результаты исследований трансформации радиационного фона при изменении мерзлотных условий на основе полевых и экспериментальных работ.

**Пятая глава** приводит результаты оценки содержания естественных радионуклидов в донных осадках и нефтешламах в бассейнах рек Колва, Уса и Печора Большеземельской тундры. Выявлены участки повышенного содержания Ra-226 в донных осадках. Выполнена оценка параметров радиационной безопасности для донных осадков и нефтешламов.

## **Благодарности**

Автор выражает глубокую признательность за руководство, всестороннюю помощь и поддержку при написании работы научному руководителю кандидату

геолого-минералогических наук Яковлеву Евгению Юрьевичу, за ценные советы и консультации, предложения и замечания – коллективу лаборатории экологической радиологии ФГБУН ФИЦКИА УрО РАН (г. Архангельск) в лице Дружинина С.В., Дружининой А.С., Зыкова С.Б., Зыковой Е.Н., Игловского С.А., Баженова А.В., Кудрявцевой А.А., за помощь в проведении первичного анализа материала – Быкову В. М. Автор искренне благодарен за помощь и поддержку специалистам АО «ЦС «Звездочка» (г. Северодвинск) Олюкову А.В., Жданову М.Э., Соловьеву В.О., Фроловой Т.Н., Корельской С.Н., Пестовой Е.Ю., в том числе за формирование базового ядра знаний в области методологии проведения радиационных измерений, которые явились одной из основ для написания диссертационной работы.

## ЗАЩИЩАЕМЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ И ИХ ОБОСНОВАНИЯ

**1. На территории Канинской тундры Ненецкого автономного округа выделяется зона повышенного содержания Cs-137 в объектах окружающей среды (торф, донные осадки, рыба). Удельная активность Cs-137 в донных осадках реки Несь значительно превышает удельную активность Cs-137 в донных осадках других рек округа. Плотность загрязнения Cs-137 в почвах бассейна реки Несь составляет до 0,13 Ки/км<sup>2</sup>, что выше в 2-3 раза имеемых данных о содержании данного радионуклида на территории округа. Латеральное распределение Cs-137, Sr-90, Am-241, Pu-238, Pu-239+240 в почвах бассейна реки Несь имеет зональную структуру, обусловленную рельефом территории. Основными источниками радиоактивного загрязнения являются глобальные атмосферные выпадения и авария на Чернобыльской АЭС.**

Доказательство первого защищаемого положения основано на результатах изучения содержания Cs-137 в донных осадках рек Ненецкого автономного округа, Cs-137 и Sr-90 в рыбных ресурсах и ряда техногенных радионуклидов в торфе, отобранных на территории Канинской тундры, и сравнении полученных результатов с имеющимися архивными материалами по данному региону. Исследование удельной активности Cs-137 в донных отложениях проводилось в реках Чижа, Несь, Вижас, Ома, Печора (в пределах устьевой части), Колва и Уса (Рисунки 1-3).

Результаты исследований показали, что из всех изученных рек наибольшим содержанием Cs-137 в донных отложениях характеризуется река Несь. Удельная активность Cs-137 в донных отложениях бассейна реки Несь изменяется в диапазоне от 0,6 до 36 Бк/кг (в среднем 8,9 Бк/кг). Удельная активность радионуклида в донных отложениях остальных рек не превышает 5,4 Бк/кг, за исключением одной аномальной точки в реке Колва (т. КД-61, 12,3±1,1 Бк/кг).



Значимость и достоверность различий в содержании Cs-137 в донных осадках реки Несь по сравнению с остальными реками подтверждается результатами расчета U-критерия Манна-Уитни.

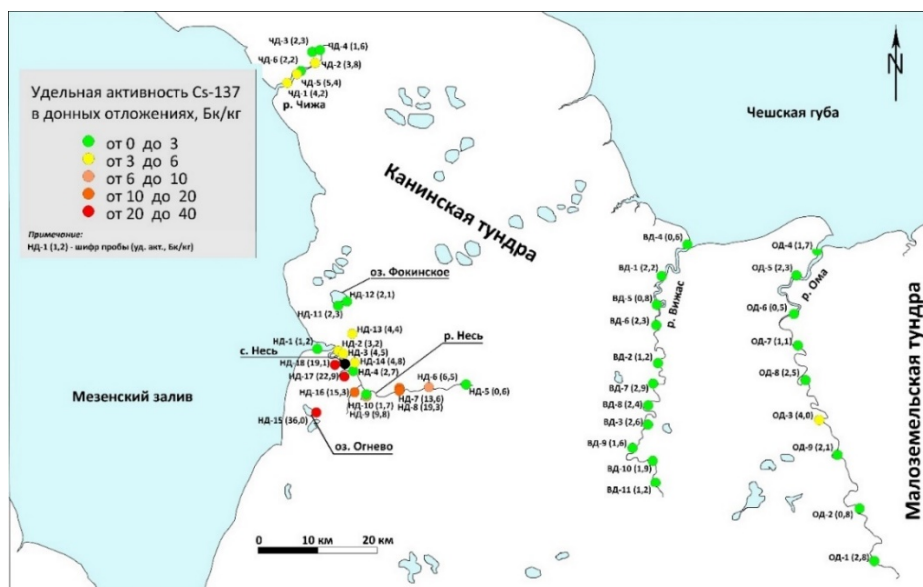


Рисунок 1 – Удельная активность Cs-137 в донных отложениях рек Канинской тундры

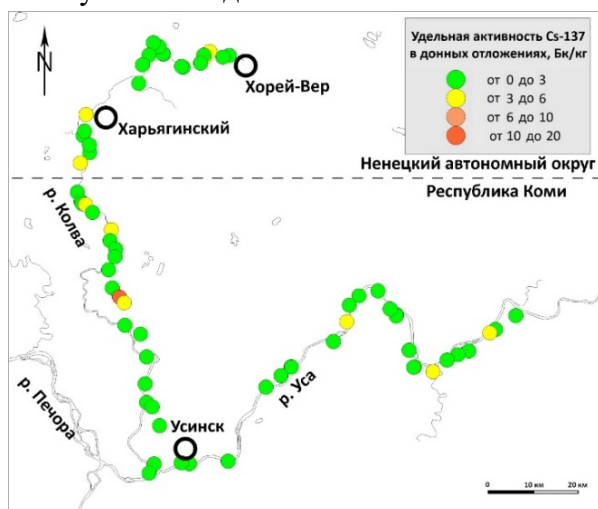


Рисунок 2 – Удельная активность Cs-137 в донных отложениях рек Колва и Уса



Рисунок 3 – Удельная активность Cs-137 в донных отложениях устьевой части реки Печора

Для выявления причин повышенного содержания Cs-137 проведены работы по исследованию физико-химических параметров в донных отложениях. Известно, что сорбция радионуклидов на переносимых рекой взвешях и ранее отложившихся частицах в верхних слоях осадков является доминирующим фактором миграции и накопления радиоизотопов в донных отложениях (Балыкин, 2019). Сорбционные свойства донных отложений определяются, главным образом, их вещественным и гранулометрическим составом (Балыкин, 2019). В гранулометрическом составе донных отложений изученных рек преобладают мелкозернистые фракции размерностью 0,25 мм, 0,1 мм и 0,045 мм за исключением реки Печора, в которой

содержание мелкодисперсных фракций размерностью менее 45 мкм ничтожно мало (0,68 %). Содержание органического вещества варьирует от 0,44 % до 5,98 %. Содержание карбонатов не превышает 4,59 %.

В реках Канинской тундры несмотря на незначительное содержание фракций с размером <0,045 мм (от 1,07 до 1,82 %), отмечается средняя положительная корреляционная зависимость между содержанием Cs-137 и мелкой пелитовой фракцией <45 мкм ( $R=0,63$ ), а также фракцией 45 мкм ( $R=0,55$ ). Это указывает на связь Cs-137 с мелкодисперсными фракциями донных осадков, характеризующимися наличием органического вещества и водорастворимых солей (Yakovlev et al., 2020). Корреляционный анализ содержания Cs-137 и основных физико-химических характеристик донных отложений реки Колвы показал, что вариативность удельной активности Cs-137 на 50% обеспечивается изменением содержания органического вещества, на 27% и 20% зависит от изменения содержания гранулометрических фракций размерностью <45 мкм и 45 мкм, соответственно. Несколько иная картина наблюдается для донных отложений реки Уса. В 60% случаев вариативность удельной активности Cs-137 обеспечивается изменением содержания гранулометрической фракции размерностью 45 мкм.

Представленные результаты показывают, что мелкодисперсные фракции и органическое вещество в донных отложениях изученных рек играют решающую роль в накоплении Cs-137. Но учитывая схожесть донных отложений изученных рек по физико-химическим параметрам, повышенное содержание Cs-137 в донных отложениях реки Несь может иметь иную генетическую природу, предположительно связанную с наличием повышенного содержания Cs-137 в почвах бассейна реки и стоком водосборной площади реки. Для более подробного описания выявленной радиационной аномалии проведена оценка особенностей накопления и миграции техногенных радионуклидов в почвах бассейна реки Несь.

Для оценки особенностей накопления и миграции техногенных радионуклидов в бассейне реки Несь было отобрано 46 проб торфа по профилю общей длиной около 20 км, располагающемуся перпендикулярно руслу реки Несь и простирающемуся от равнинных торфяных болот на юго-западе до локального водораздела на северо-востоке (Рисунок 4).

По маршруту профиля северо-восточнее от с. Несь (правобережье реки Несь) встречались мелкобугристые торфяные болота с низким уровнем влажности. В зоне плакора и на большей части склона наблюдалось растрескивание поверхности бугров, что является характерным признаком снижения увлажненности данных элементарных ландшафтов. Увеличение уровня увлажнения отмечалось при приближении к пойме реки. Иная картина отмечается к юго-западу от с. Несь (левобережье реки Несь). Ландшафт также представлял из себя мелкобугристые болота, но степень увлажнения их была значительно выше. Для всех точек отбора

была характерна высокая обводненность. Одной из причин таких отличий бассейна реки являются разные типы элементарных ландшафтов, которые в свою очередь влияют на миграцию элементов, в том числе и радиоактивных.

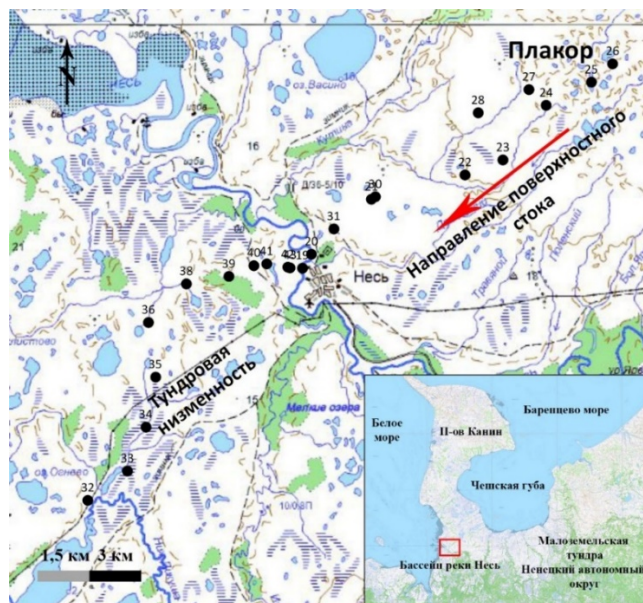


Рисунок 4 – Схема района исследования в бассейне реки Несь

Для понимания закономерностей распределения радионуклидов на разных типах элементарных ландшафтов результаты расчета плотностей загрязнения по каждому изученному радионуклиду были нанесены на высотный профиль по маршруту отбора проб.

На Рисунках 5-6 приведены графики изменения плотности загрязнения Cs-137 и Sr-90 по профилю отбора проб почв. Плотность загрязнения Cs-137 составляет от  $9,22 \cdot 10^{-3}$  Ки/км<sup>2</sup> до  $1,31 \cdot 10^{-1}$  Ки/км<sup>2</sup> со средним значением  $4,43 \cdot 10^{-2}$  Ки/км<sup>2</sup>. Плотность загрязнения Sr-90 составляет от  $2,29 \cdot 10^{-3}$  Ки/км<sup>2</sup> до  $5,07 \cdot 10^{-2}$  со средним значением  $1,74 \cdot 10^{-2}$  Ки/км<sup>2</sup>. Характеры распределения содержания Cs-137 и Sr-90 в пробах по профилю отбора во многом схожи. Схожесть поведения Cs-137 и Sr-90 может быть связана мерзлотными особенностями территории. Известно, что постседиментационная подвижность радионуклидов в органогенных почвах снижается в условиях Арктики, характеризующейся продолжительными морозными периодами, медленным разложением органического вещества и минимальной биотурбацией (Lokas, 2013). Важным фактором, препятствующим глубокому просачиванию воды в торфяной залежи, является многолетняя мерзлота, что приводит часто к заболачиванию деятельного торфяного слоя (сезонно-талого слоя), лежащего над минеральными почвами. Согласно (Игловский, 2010) бассейн реки Несь относится к криолитозоне с островным распространением многолетнемерзлых пород. Средняя глубина сезонно-талого слоя в 20 км от устья реки Несь составляет до 0,4 м.

Согласно Рисункам 5-6 отмечается значительное различие между плотностью загрязнения Cs-137 и Sr-90 на склоне, в зоне плакора и в пределах тундровой низменности. Вероятно, это обусловлено более интенсивной латеральной миграцией и плоскостным смывом (поверхностным стоком) радионуклидов по склону из зоны плакора, тогда как в зоне тундровой низменности радионуклиды аккумулируются в почвах, где подвержены в основном вертикальной миграции.

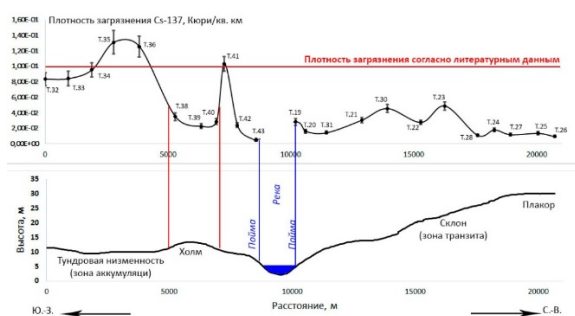


Рисунок 5 – Плотность загрязнения Cs-137 по профилю отбора

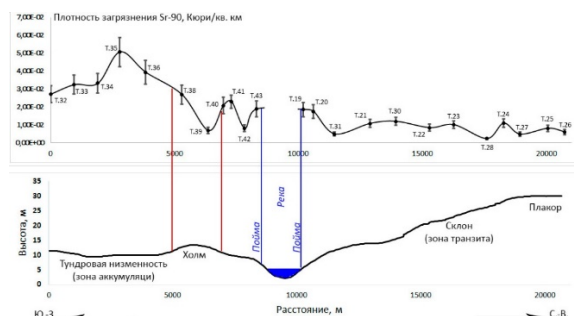


Рисунок 6 – Плотность загрязнения Sr-90 по профилю отбора

Результаты аэрогаммасъемки территории Ненецкого автономного округа, проведенной в период с 1990 по 1992 гг показали, что в западной части региона на изучаемой территории плотность загрязнения Cs-137 на момент проведения съемки составляет около 0,1 Кюри/кв. км (в пересчете на сегодняшний день – не более 0,05 Кюри/кв. км (далее – опорное значение)). Результаты исследований в рамках настоящей работы показывают, что плотность загрязнения Cs-137 в торфе превышает в 2-3 раза опорное значение, что является еще одним подтверждением наличие зоны повышенного содержания Cs-137 на территории бассейна реки Несь.

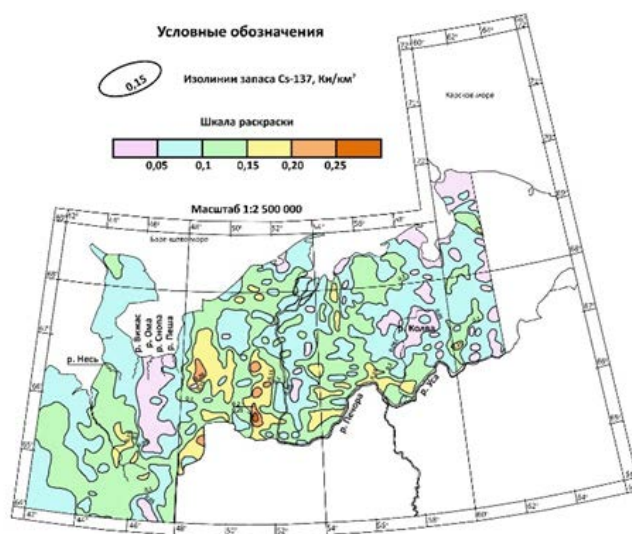


Рисунок 7 – Карта запаса цезия-137

Полученные данные о плотностях загрязнения Cs-137 позволяют уточнить уже имеемые данные пространственного распределения данного радионуклида. Сравнивая полученные результаты с другими редкими данными по радионуклиду Cs-137 в Ненецком автономном округе, наблюдается снижение активности Cs-137 по сравнению с результатами исследований, полученными ранее. Согласно работе (Баженов, 2001) в период с 1994 по 2000 в отдельных пробах южной части полуострова Канин наблюдались уровни содержания Cs-137 до 2000 Бк/кг. В силу сложностей методического (инструментального) плана сведения о плотностях загрязнения Sr-90 в целом на территории РФ отсутствуют. Поэтому полученные данные о содержании Sr-90 в торфах и почвах западной части Ненецкого автономного округа являются новыми данными и позволяют оценить запас данного радионуклида в объектах окружающей среды.

Тенденция аккумуляции других техногенных радионуклидов (Am-241, Pu-238, Pu-239+240) хоть и менее выражена для разных типов ландшафтных единиц, но в целом схожа с распределением Cs-137 и Sr-90. В нескольких точках данные радионуклиды не обнаружены (измеренные значения ниже минимально-детектируемых уровней).

Для того, чтобы оценить вероятные источники радионуклидного загрязнения, проведен расчет изотопных отношений Sr-90/Cs-137, Pu-238/Pu-239+240, Pu-239+240/Cs-137, Am-241/Pu-239+240 и построены графики линейной регрессии взаимосвязей между данными радионуклидами (Рисунок 8).

Расчеты изотопных отношений показали, что ни в одном случае результаты, полученные для бассейна реки Несь, не сходятся со значениями, характерными для глобальных выпадений. Наиболее близкими к глобальным выпадениям являются отношения Sr-90/Cs-137 и Am-241/Pu-239+240 по их средним значениям.

Отмечается схожесть полученных результатов как по параметру среднего значения, так и по наклону регрессии, с работами (Lokas et al., 2013, 2016, 2017, 2022). Согласно данным работам, основными источниками радионуклидного загрязнения на о. Шпицберген являются глобальные атмосферные выпадения и авария на Чернобыльской АЭС. Поэтому для бассейна реки Несь можно предположить те же источники и, вероятно, локальные тропосферные выпадения по результатам ядерных испытаний на архипелаге Новая Земля. Однако результаты расчета траекторий загрязнений на основе модели HYSPLIT показали отсутствие влияния локальных (тропосферных) выпадений на радионуклидное загрязнение бассейна реки Несь. Вычленив компоненту стратосферных выпадений от испытаний на архипелаге Новая Земля другим способом не представляется возможным, поскольку они характеризуются комплексом радионуклидов, источником которых являются испытания, проведенные по всему земному шару.

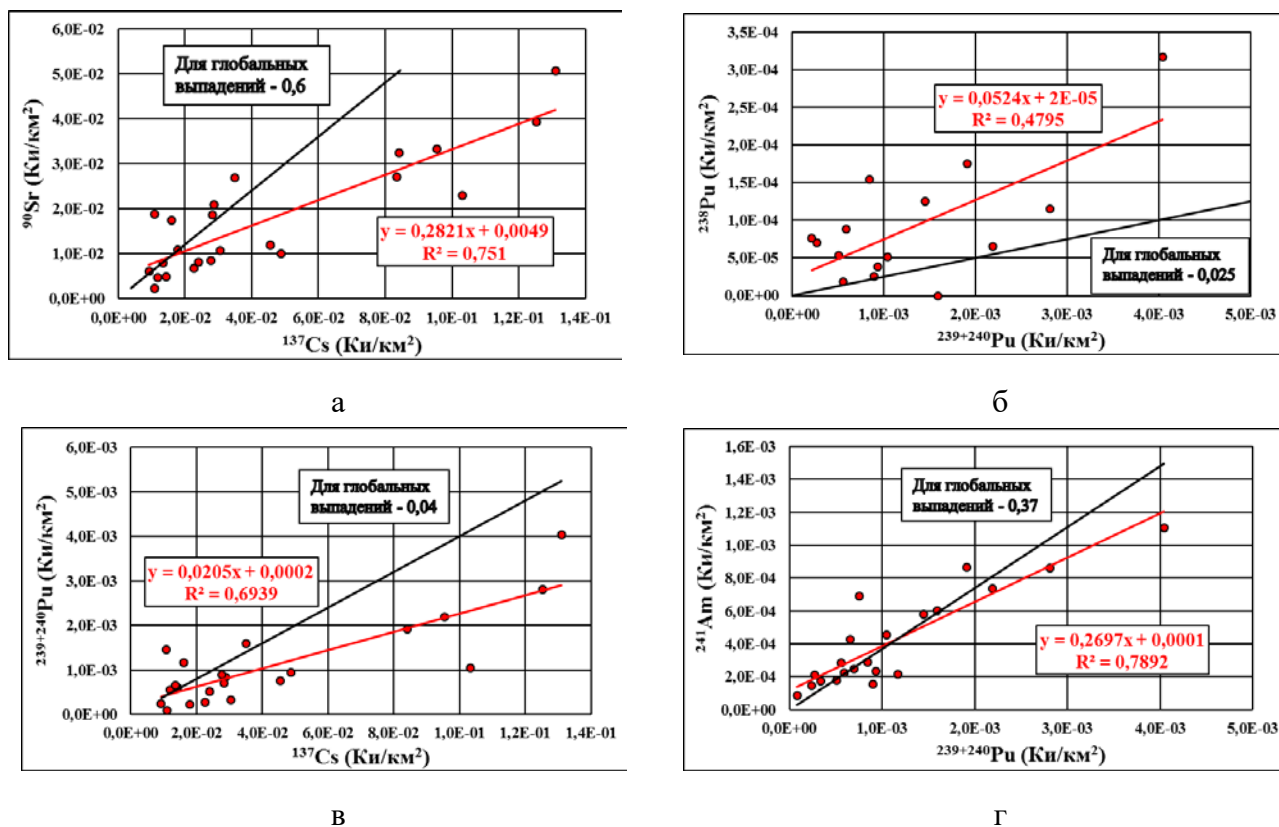


Рисунок 8 – Графики линейной регрессии для оценки взаимосвязей между: а – Cs-137 и Sr-90, б – Pu-238 и Pu-239+240, в – Pu-239+240 и Cs-137, г – Am-241 и Pu-239+240

Учитывая наличие зоны повышенного содержания Cs-137 и Sr-90 в объектах окружающей среды Канинской тундры (бассейн реки Несь) проведена оценка содержания радионуклидов в биоте (на примере рыбы и северного оленя) и дозовых нагрузок на человека. Проведенные исследования рыбы из рек Ненецкого автономного округа показали, что техногенные радионуклиды обнаруживаются только в рыбе из реки Несь. Удельные активности изотопов Cs-137 и Sr-90 в смешанных пробах рыбы достигают 11,2 Бк/кг и 19,1 Бк/кг, соответственно (Пучков и др., 2020; 2023).

В соответствии с гигиеническими требованиями (СанПиН 2.3.2.1078-01) вся изученная речная рыба пригодна для ее потребления населением.

Полученные данные по активности Cs-137 в мышечной ткани северных оленей выявили схожие максимальные значения для каждой изучаемой особи (в диапазоне от 43,6 – 63,6 Бк/кг). Мышцы характеризуются наиболее высоким содержанием Cs-137. Значительное накопление выявлены также для позвонков и костей. Sr-90 накапливается преимущественно в позвонках северных оленей с удельной активностью до 161,6 Бк/кг. Накопление Sr-90 в мышечной ткани и почках не обнаружено. В соответствии с требованиями СанПиН 2.3.2.1078-01) в съедобной части оленя – мышечной ткани, регламентируется содержание только Cs-137. Уровень удельной активности Cs-137 для оленины и мяса диких животных

должен быть не более 300 Бк/кг. Таким образом, исследуемые образцы по Cs-137 в мясе не превышают допустимых значений и пригодны для употребления.

Расчет дозовой нагрузки при потреблении исследуемых образцов рыбы и мяса оленя показал, что пероральная доза ниже установленных уровней в 1 мЗв/год, ниже средней дозы облучения в 0,29 мЗв/год, полученной на душу населения в мире при попадании естественных радионуклидов в пищу, а также ниже предела дозы в 0,25–0,40 мЗв/год, рекомендованный ВОЗ.

**2. Многолетнемерзлые породы характеризуются существенной барьерной функцией для потока радиоактивного газа Rn-222. Их деградация приводит к изменению естественного радиационного фона на тундровых территориях за счет увеличения потока Rn-222 и перераспределения продуктов его распада, а также увеличения уровня гамма-излучения. Увеличение плотности потока Rn-222 в приповерхностном почвенном воздухе после оттаивания почвы может достигать 10-20 раз в зависимости от радиационных характеристик источника Rn-222.**

Второе защищаемое положение сформулировано по результатам проведения полевых и экспериментальных работ на территориях распространения многолетнемерзлых пород, а также в условиях их имитации. Известно, что изменение структуры вечной мерзлоты приводит к перераспределению макро- и микроэлементов в геологической среде (Shirokova et al., 2021, Pokrovsky et al., 2021), в том числе может оказывать влияние и на циркуляцию радиоактивных газов (Puchkov et al., 2021). Для подтверждения гипотезы влияния деградации вечной мерзлоты на трансформацию радиационного фона, были проведены полевые исследования на двух ключевых участках (мелкобугристое торфяное болото в устьевой части бассейна реки Ома Ненецкого автономного округа и болотистый участок на территории Приполярного Урала (Интинский район Республики Коми), отличающихся разными мерзлотными условиями. На данных участках были проведены оценки плотности потока радона (ППР), уровня гамма-излучения, глубины сезонного-талого слоя (СТС), а также содержания естественных радионуклидов в почвенно-растительном покрове.

Результаты исследований мелкобугристого болота в бассейне реки Ома показали несколько повышенный уровень мощности дозы гамма-излучения в местах максимального уровня оттаивания СТС в торфяном горизонте. Коэффициент корреляции между уровнем гамма-излучения и глубиной оттаивания СТС составил 0,70 (Рисунок 9). Повышение дозы гамма-излучения вероятно обусловлено потоком естественных радиоактивных газов, в том числе радона и его продуктами распада за счет отсутствия мерзлого барьера. С другой стороны,

повышение уровня гамма-излучения может быть связано с характеристиками самого гамма-излучения.

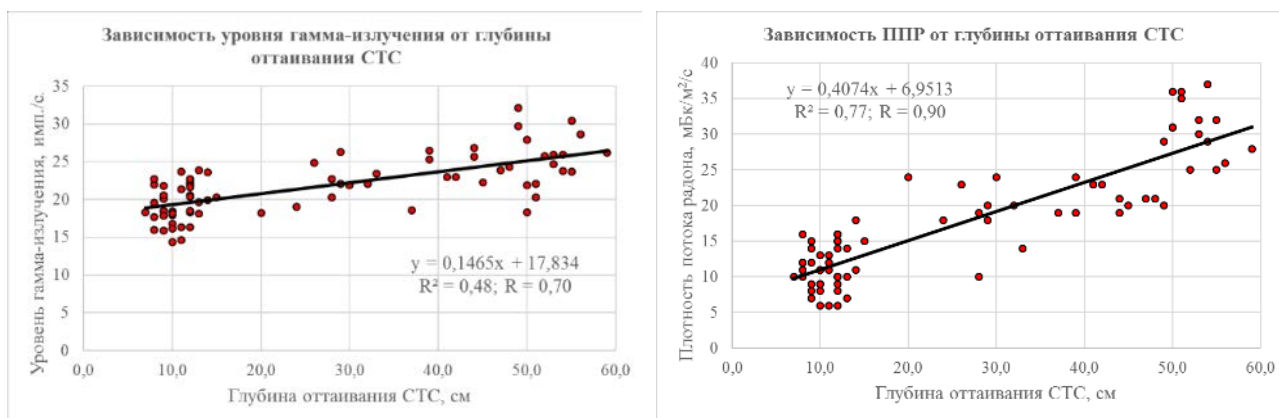


Рисунок 9 – Графики линейной регрессии для оценки взаимосвязей между глубиной оттаивания СТС, уровнем гамма-излучения и плотностью потока радона

Схожая картина распределения наблюдается и по ППР на изученной территории. Данный параметр изменяется в пределах от 6,0 до 44,0 мБк/м<sup>2</sup>/с со средним значением 16,4 мБк/м<sup>2</sup>/с. Также, как и с уровнем гамма-излучения, наиболее высокие значения ППР наблюдаются по краю торфяного болота в пределах полосы шириной не более 1-2 м. Но в отличие от гамма-излучения, наблюдается очень сильная корреляционная связь с уровнем оттаивания СТС – 0,90 (Рисунок 10). Это указывает на то, что в 77 % случаев варьирование потока радона зависит от уровня оттаивания СТС.

На территории болота выполнены два торфяных разреза (у края болота – профиль 1, и на расстоянии 100 м от края болота – профиль 2) с отбором проб с шагом 5 см. Результаты оценки содержания естественных радионуклидов в пробах торфяных разрезов приведены в Таблицах 1 и 2.

Согласно Таблицам 1 и 2 отмечается схожесть распределения радионуклидов Ra-226, Pb-210, Th-232 и K-40 по глубине торфяных профилей. Содержание Pb-210 на глубине 15-20 см в профиле 1 и 10-15 см в профиле 2 ниже минимально-измеряемых активностей. Вероятно, это связано с отсутствием вертикальной миграции Pb-210, который поступил с атмосферными выпадениями, по причине небольшой глубины СТС и малого периода его талого состояния. При этом в горизонтах глубже 15-20 см в обоих профилях наблюдается увеличение содержания Pb-210, как и его материнского изотопа Ra-226. Результаты расчета изотопных отношений Ra-226/Pb-210 для глубин от 20 до 40 см показали, что в профиле 1 данный параметр изменяется в пределах от 0,13 до 0,38, в профиле 2 – от 0,40 до 0,73. Низкое значение изотопного отношения в профиле 1 может указывать на избыточность Pb-210 (по сравнению с содержанием Ra-226), вероятно обусловленную потоком радона из нижележащих горизонтов.



Таблица 1 – Изменение содержания естественных радионуклидов с глубиной в торфяном профиле 1

Горизонт, см	Удельная активность, Бк/кг				Изотопное отношение Ra-226/Pb-210
	Ra-226	Pb-210	Th-232	K-40	
0-5	<1,3	330,0±60,0	3,1±1,0	60,0±18,0	-
5-10	<1,1	65,0±18,2	2,5±1,0	51,0±19,0	-
10-15	<1,1	10,0±2,5	2,0±0,8	45,0±18,0	-
15-20	<1,0	<2,2	<1,8	35,0±14,0	-
20-25	0,3±0,2	2,3±1,1	1,3±0,8	23,0±9,2	0,13
25-30	1,1±0,4	8,1±3,2	4,8±0,6	78,0±12,5	0,14
30-35	2,8±0,8	7,3±2,9	4,5±0,6	62,0±11,8	0,38
35-40	2,3±0,7	12,0±5,0	5,1±0,7	155,0±21,7	0,19
40-45	10,5±1,6	16,0±6,4	20,1±1,8	330,0±29,7	0,66
45-50	14,2±2,6	21,0±8,4	25,0±2,3	370,0±33,3	0,68
50-55	16,3±2,5	17,0±6,8	25,9±2,2	530,0±47,7	0,96

Таблица 2 – Изменение содержания естественных радионуклидов с глубиной в торфяном профиле 2

Горизонт, см	Удельная активность, Бк/кг				Изотопное отношение Ra-226/Pb-210
	Ra-226	Pb-210	Th-232	K-40	
0-5	<1,7	270,0±60,0	<1,4	51,0±18,0	-
5-10	<2,8	22,0±18,2	<1,8	45,0±19,0	-
10-15	<2,4	<2,9	<3,0	35,0±18,0	-
15-20	<2,3	<4,1	<4,8	78,0±14,0	-
20-25	3,6±0,2	9,0±1,1	8,6±0,8	155,0±9,2	0,40
25-30	3,3±0,4	6,5±3,2	8,4±0,6	183,0±12,5	0,51
30-35	4,5±0,8	11,0±2,9	9,6±0,6	167,0±11,8	0,41
35-40	5,8±0,7	8,0±5,0	9,7±0,7	190,0±21,7	0,73

Таким образом, на территории изученного болота наблюдаются несколько повышенные уровни мощности дозы гамма-излучения и ППР в местах максимального уровня оттаивания СТС. Исследование торфяных профилей в разных мерзлотных условиях показали, что на участке с более глубоким оттаиванием СТС наблюдается избыточность Pb-210 по сравнению с содержанием его материнского радионуклида Ra-226, обусловленная потоком радона из более глубоких горизонтов, в том числе материнской породы.

С целью количественного описания процесса эманации радона при изменения мерзлотных условий был поставлен эксперимент на примере тестовой площадки с заданными радиационными и физическими характеристиками в условиях имитации типичного строения криолитозоны.

Экспериментальная площадка располагается на территории Архангельской области (северо-запад России) в 30 км от города Северодвинск и представляет из себя контейнер, помещенный в яму на глубину 1,6 м. Высота контейнера – 86 см. На дно контейнера было помещено 40 кг красной глины, характеризующейся повышенным содержанием Ra-226 – 103,8 Бк/кг, коэффициентом эманации – 25,7 %. Далее по тексту этот слой будет именоваться источником радона. Источник радона был засыпан почвой до верха контейнера. У дна контейнера были сделаны отверстия для дренажа талых вод. Подробная схема экспериментальной площадки, место ее расположения и геометрические характеристики представлены на Рисунке

10. Ежедневно в течение недели контейнер проливался водой. В условиях крайне низких температур контейнер был быстро заморожен. Таким образом был имитирован слой вечной мерзлоты, в который был помещен источник радона. После этого яма была засыпана почвой в мерзлом состоянии, что стало имитацией слоя сезонного промерзания. Измерения ППР проводились в контрольной и фоновых точках.

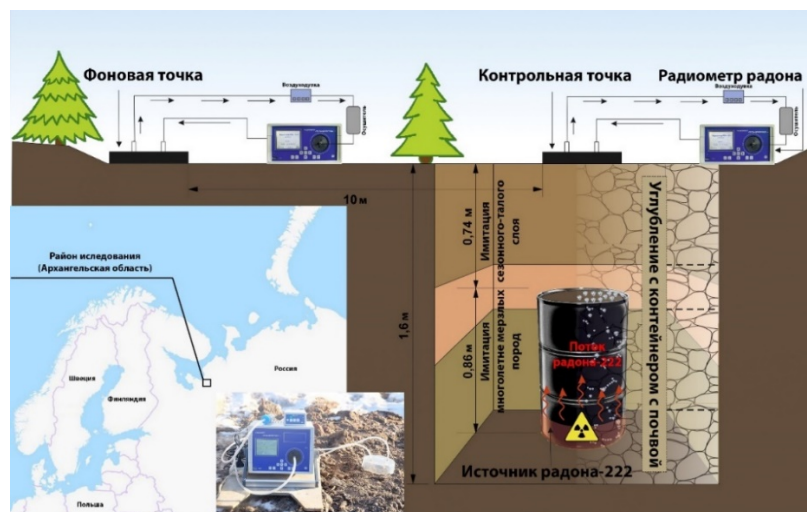


Рисунок 10 – План-схема проведения эксперимента по мониторингу за плотностью потока радона

Изменения ППР в контрольной и фоновых точках, температуры воздуха и почвы на разных глубинах представлены на Рисунке 11. Результатом эксперимента стало выявление 4 фактов увеличения ППР на поверхности земли. Повышения активности радона происходили постепенно по мере оттаивания почвы. Но с середины мая 2021 года температура воздуха резко увеличилась до 15-20 градусов Цельсия. Данный факт привел к оттаиванию источника радона в начале июня, что обусловило резкий скачок плотности потока радона на поверхности земли через 1-2 дня после оттаивания источника радона на глубине 1,6 метра. С момента начала оттаивания «активного» слоя до момента его полного оттаивания плотность потока радона увеличилась примерно в 7-8 раз достигая максимального значения около 240 мБк/(м<sup>2</sup>·с).

Несмотря на очевидный характер зависимости ППР от температуры окружающего воздуха и почвы, был проведен статистический анализ полученных данных. По результатам корреляционного анализа выявились сильные и очень сильные связи между ППР в контрольной точке и температурами почвы на глубине 0,5 м ( $R=0,86$ ) на глубине 1,0 м ( $R=0,87$ ) и на глубине 1,5 м ( $R=0,98$ ). При этом теснота связи уменьшается с температурой на поверхности почвы ( $R=0,75$ ) и температурой воздуха ( $R=0,61$ ). Это говорит о том, что по большей части ( $R^2=0,96$ ) варьирование ППР в контрольной точке было обусловлено оттаиванием источника

радона на глубине 1,6 м. В фоновой точке наоборот наиболее тесная связь наблюдается с температурой на поверхности почвы ( $R=0,91$ ).

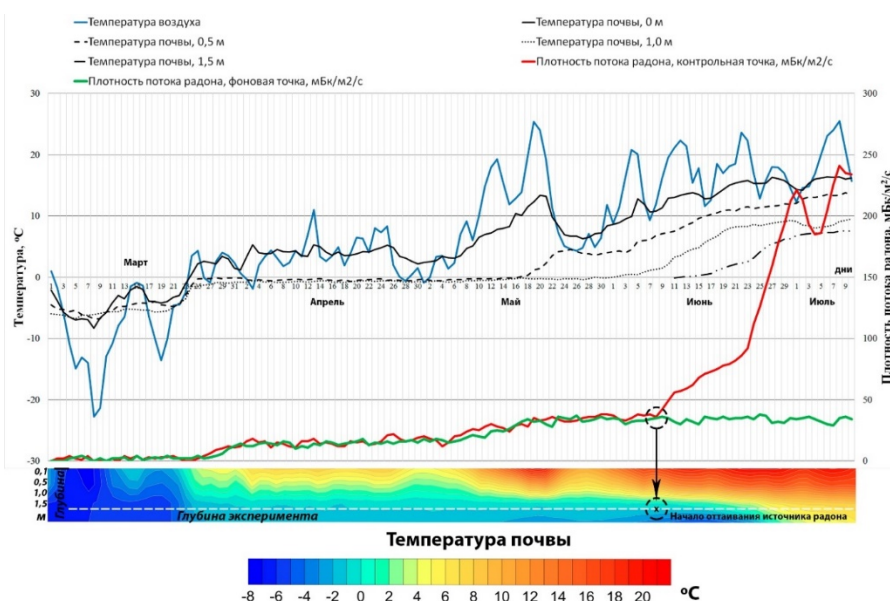


Рисунок 11 – Временные колебания ППР и температуры почвы и атмосферного воздуха

По результатам эксперимента и его статистического анализа было показано, что изменение радоновой обстановки может происходить при изменении мерзлотных условий в геологической среде. Предполагается, что это может быть связано с физическими свойствами льда и мерзлых пород. И в первую очередь это касается пористости льда, которая зачастую не превышает нескольких процентов (Puchkov, 2022). В свою очередь пористость будет оказывать влияние на эманирование породы. В связи с этим можно предположить, что эманирование породы в ее мерзлом состоянии будет намного ниже, чем в оттаявшем состоянии. Исходя из этого, поступательное оттаивание ММП, особенно на территориях с неблагоприятным радиогеохимическим фоном, может усугубить радоновую обстановку с превышением установленных законодательством нормативов в жилых и производственных помещениях и на застраиваемых территориях.

**3. Донные осадки реки Колва Большеземельской тундры на участках, в пределах которых осуществляется нефтегазодобывающая деятельность, характеризуются содержанием Ra-226, превышающим фоновые значения в 4 - 5 раз. Выявлена сильная корреляционная связь между удельной активностью Ra-226 с содержанием нефтепродуктов в донных осадках. Основным источником загрязнения донных осадков реки Колва радионуклидом Ra-226 является поступление нефтепродуктов в речной бассейн.**

Третье защищаемое положение основано на результатах оценки содержания естественных радионуклидов Ra-226, Ra-228, Th-232, K-40, Pb-210 в донных осадках рек Печорского бассейна (устьевая часть реки Печора, Колва и Уса). Как известно, одной из основных особенностей бассейна реки Колва является наличие значительного количества нефтегазовых месторождений (Тимонина, 2018, Отчет, 2005), разведка и разработка которых может наносить значительный ущерб природной среде и человеку, в том числе и в радиоэкологическом плане (Лебедев, 2016, Кубарев, 2012, Юдин, 2004, Хайкович, 2003). Для выявления источников и закономерностей накопления радионуклидов в донных осадках дополнительно оценивалось содержание нефтепродуктов.

Проведенные исследования на территории Печорского бассейна показали, что на отдельных участках реки Колва в донных осадках выявлено повышенное содержание Ra-226 с удельной активностью до 89,0 Бк/кг (Рисунок 12) на участке от в.п. Харьягинский и далее к устью реки. Удельные активности других естественных радионуклидов, в том числе и Ra-228, находятся на фоновом уровне и не превышает среднемировые значения.

Результаты корреляционного анализа показывают, что повышенное накопление Ra-226 в донных осадках имеет тесную связь с содержанием в них нефтепродуктов ( $R=0,74$ ) (Рисунок 13). Это указывает на поступление в поверхностные воды отходов нефтегазовой деятельности и последующее радионуклидное загрязнение водной среды.

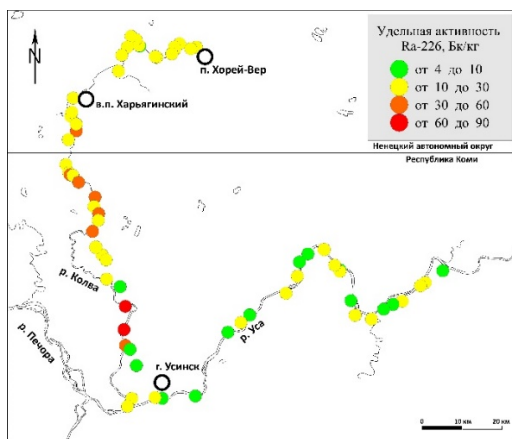


Рисунок 12 – Удельные активности Ra-226 (а) и Ra-228 (б) в донных осадках рек Колва и Уса

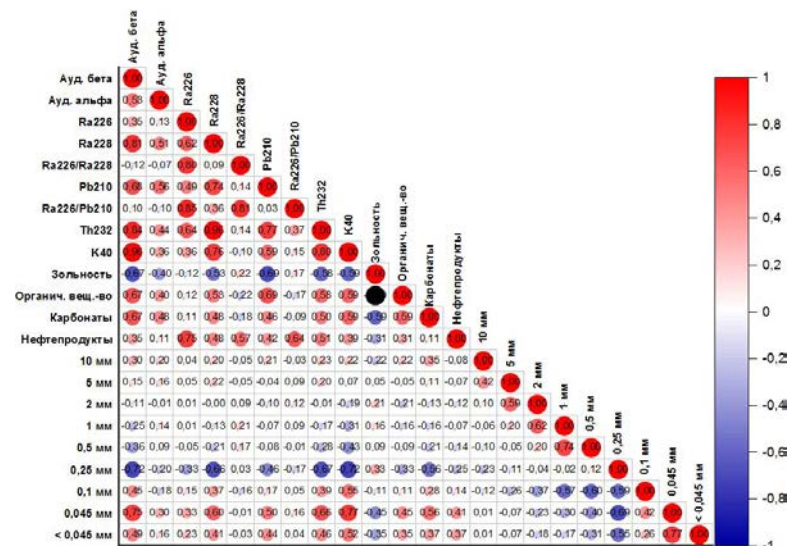


Рисунок 13 – Корреляционная матрица взаимосвязей между радиационными, гранулометрическими и физико-химическими параметрами в донных осадках рек Колва и Уса

Дополнительную информацию о закономерностях распределения радионуклидов в донных осадках реки Колва может дать оценка изотопных

отношений Ra-226/Ra-228 и Ra-226/Pb-210. Значения изотопного отношения Ra-226/Ra-228 изменяются в диапазоне от 0,49 до 2,99 отн. ед. со средним значением 1,03 отн. ед. Повышенные значения изотопного отношения выше 1,0 отн. ед. наблюдается в тех же точках, где выявлены высокие значения удельной активности Ra-226, что также указывает на дополнительный источник поступления Ra-226 помимо его природного происхождения. Вероятно, это объясняется тем, что степень подвижности у Ra-228 выше, чем у Ra-226 (Bai and Wan, 1998). И несмотря на то, что оба радионуклида присутствуют в кристаллических решетках глинистых минералов, карбонатные и обменные формы содержат больше Ra-228, чем Ra-226 (Dai et al., 2019). Похожая картина наблюдается и для изотопного отношения Ra-226/Pb-210. Данный параметр варьирует от 0,38 до 3,42 со средним значением 1,02. Так же, как и с предыдущим изотопным отношением повышенные значения Ra-226/Pb-210 выше 1,0 отн. ед. наблюдается в тех же точках, где выявлены высокие значения удельной активности Ra-226. Можно сделать вывод, что избыточное поступление Ra-226 в донные осадки относительно свежее, потому что Pb-210 как продукт его распада не успел накопиться до тех же соотношений, что встречаются в целом по остальным пробам донных осадков.

Донные осадки рек Уса и Печора не отличаются повышенным содержанием Ra-226. Однако для Печоры в отдельных точках удельная активность Ra-226 в два раза выше значений, характерных для других крупных рек региона (Северная Двина, Золотица). Результаты корреляционного анализа также показали наличие связи удельной активности Ra-226 и нефтепродуктов в донных осадках ( $R=0,55$ ). Данное обстоятельство может указывать на снос Ra-226 с водосборной площади реки Колва, в донных осадках которой отмечены участки повышенного содержания данного радионуклида.

Результаты исследований донных отложений реки Колва показали, что на территории бассейна реки имеются техногенные источники поступления естественных радионуклидов в водоем. Такими источниками могут быть разливы нефтепродуктов в результате разгерметизации нефтепроводов, несанкционированные сбросы нефтепродуктов в водоёмы, геологоразведочные работы и пробная эксплуатация скважин, транспортировка, переработка и утилизация нефти и нефтепродуктов, эксплуатация шламонакопителей и других объектов нефтегазовой инфраструктуры (Двадненко, 2017, Булатов, 2021).

Результаты экспедиционных работ на участке автомобильной трассы вдоль реки Колва от в.п. Харьягинский до г. Усинск показали наличие локальных мест нефтяных загрязнений почвы и присутствия нефтешламов вне охранных зон нефтепроводов. Всего выявлено 8 участков с наличием нефтяных загрязнений и присутствия нефтешламов. На 2 участках выявлены зоны повышенного уровня гамма-излучения – до 5,30 мкЗв/ч. В данных точках производился отбор проб для

дальнейшего качественного и количественного анализа радионуклидного состава. Удельная активность Ra-226 достигала  $6900 \pm 890$  Бк/кг, Ra-228 –  $1030 \pm 110$  Бк/кг, Th-232 –  $1340 \pm 150$  Бк/кг, K-40 –  $500 \pm 150$  Бк/кг, Pb-210 –  $1090 \pm 150$  Бк/кг.

Результаты измерений отобранных проб (таблица 5.4) показали типичный радионуклидный состав для отходов нефтяной промышленности (Нозик, 2010). Основная активность обусловлена радионуклидами радия, тория, калия, поступающими вместе с попутными минерализованными водами и осаждающимися на поверхностях технологического оборудования в виде солей радия и бария.

В целом можно сделать вывод, что радиологический риск для здоровья людей, использующих речные отложения в качестве строительных материалов, на текущий момент отсутствует. Значения параметров радиационной опасности в среднем находятся на уровне ниже среднемирового и не представляют существенной опасности для здоровья населения. В настоящее время в районах дельты р. Печоры, бассейнов рек Колва и Уса наблюдается относительно низкий уровень естественной радиоактивности. Отдельные участки с повышенной удельной активностью Ra-226 в донных осадках реки Колва указывают на локальное загрязнение реки нефтепродуктами, что приводит к необходимости организации радиационного мониторинга за поверхностными водами, донными отложениями, почвами бассейна реки. Выявленные участки размещения нефтешламов и загрязнения почв нефтепродуктами показывают повышенный уровень дозы гамма-излучения. По результатам радионуклидного анализа отобранные пробы являются отходами с повышенным содержанием естественных радионуклидов, радиоактивными отходами не являются. При этом наличие таких участков, свободных для проезда и прохода, требует проведения инспекционных работ с целью выявления других подобных участков, их локализации, радиометрического обследования и принятия решений о дальнейшем обращении с отходами.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения диссертационной работы в период с 2019 по 2023 года на примере трех ключевых участков Ненецкого автономного округа (Канинская и Большеземельская тундры, устьевая часть реки Печора) автором получен обширный фактический материал, характеризующий радиоэкологическую обстановку в регионе в целом. Полученные результаты позволили сделать следующие выводы:

1) Установлено, что активность Cs-137 в донных отложениях изученных рек Ненецкого автономного округа в основном варьирует в диапазоне от минимально-измеряемых значений до  $5,4$  Бк/кг со средним значением не более  $3,3$  Бк/кг.

Наиболее высокие активности, достигающие 36,0 Бк/кг, обнаружены в западной части Ненецкого автономного округа в бассейне реки Несь, что превышает активность Cs-137 в донных отложениях большинства рек Северо-Запада России. Формирование зоны повышенного содержания техногенного Cs-137 в донных осадках вероятно обусловлено стоком с водосборной площади реки Несь, ее гидрологическими особенностями, а также аккумуляцией Cs-137 мелкодисперсными фракциями донных отложениях.

2) Установлено, что плотность загрязнения почв бассейна реки Несь радионуклидом Cs-137 в 2-3 раза превышает имеющиеся данные по Канинской тундре. Впервые проведена оценка содержания Sr-90, Am-241, Pu-238, Pu-239+240 в почвах Канинской тундры. Обнаружено, что латеральное распределение техногенных радионуклидов определяется особенностями рельефа территории. Расчеты изотопных отношений Sr-90/Cs-137, Pu-238/Pu-239+240, Pu-239+240/Cs-137, Am-241/Pu-239+240 и траекторий движения воздушных масс на основе модели HYSPLIT показали, что основными источниками загрязнения техногенными радионуклидами являются глобальные атмосферные выпадения и авария на Чернобыльской АЭС.

3) Выявлено, что изученная рыба из реки Несь (щука, окунь) характеризуются повышенным содержанием техногенных радионуклидов Cs-137 и Sr-90 по сравнению с другими реками региона. Удельные активности Cs-137 и Sr-90 в биологических системах северного оленя Ненецкого автономного округа соответствуют значениям других арктических регионов. Содержание радионуклидов в рыбе и северном олене не превышают установленных норм и требований в области продовольственной безопасности. Расчет дозовых нагрузок при потреблении изученных рыбы и мяса оленя показал, что значение пероральной дозы составляет 0,079 мЗв/год для окуня, 0,065 мЗв/год для щуки и 0,093 мЗв/год для мышечной ткани оленя, что ниже установленных законодательством уровней в 1 мЗв/год.

4) Результаты полевых наблюдений и экспериментальных исследований показали, что многолетнемерзлые породы играют роль барьера для поступления Rn-222 из геологических слоев. Барьерная функция может быть объяснена низкими коэффициентами пористости и проницаемости льда и мерзлых пород, что в свою очередь затрудняет эманации Rn-222 в свободное пространство. Исходя из этого, поступательное оттаивание многолетнемерзлых пород, особенно на территориях с неблагоприятным радиогеохимическим фоном, может усугубить радоновую обстановку с превышением установленных законодательством нормативов.

5) На территории бассейна реки Ома Ненецкого автономного округа установлена связь изменения радиационных параметров (мощность дозы гамма-

излучения, плотность потока радона, радионуклидный состав торфа) с мощностью сезонно-талого слоя.

6) Результаты экспериментальных работ по имитации процесса деградации многолетнемерзлых пород показали, что в условиях оттаивания источника радона происходит резкое возрастание его плотности потока с поверхности грунта.

7) Проведенные исследования на территории Печорского бассейна показали, что на отдельных участках реки Колва в донных осадках выявлено повышенное содержание Ra-226 с удельной активностью до 89,0 Бк/кг. Установлена тесная связь Ra-226 и нефтепродуктов в донных осадках ( $R=0,74$ ). Это указывает на поступление в поверхностные воды продуктов и отходов нефтегазовой деятельности и последующее радионуклидное загрязнение водной среды. Это также подтверждается схожими значениями изотопных отношений Ra-226/Ra-228 и Ra-226/Pb-210 в донных осадках и нефтешламе бассейна реки Колва.

8) В донных осадках дельты реки Печора установлены повышенные активности Ra-226 (до 38,4 Бк/кг), что в два раза превышает значения удельной активности, характерные для других крупных рек региона (Северная Двина, Золотица). Причиной повышенного содержания Ra-226 в донных осадках Печоры является вероятный снос загрязнения с водосборной площади реки Колва, в донных осадках которой также отмечены участки повышенного содержания данного радионуклида.

9) На участках размещения нефтешламов и загрязнения почв нефтепродуктами обнаружен повышенный уровень дозы гамма-излучения – до 5,3 мкЗв/ч. Радионуклидный анализ отобранных проб в соответствии с законодательством в области радиационной безопасности являются отходами с повышенным содержанием естественных радионуклидов, радиоактивными отходами не являются. В тоже время наличие таких участков, свободных для проезда и прохода, требует проведения инспекционных работ с целью выявления других подобных участков, их локализации, радиометрического обследования и принятия решений о дальнейшем обращении с отходами.

## СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### Публикации в изданиях, входящих в перечень ВАК:

1) Пучков, А.В. Естественные и искусственные радионуклиды в снеговом покрове условной чистой территории Ненецкого автономного округа [Текст] / А.В. Пучков, Е.Ю. Яковлев, С.В. Дружинин // Успехи современного естествознания. – 2020. – № 4. – С. 140-145. DOI: 10.17513/use.37376.

2) Пучков, А.В. Радиационные параметры гидробионтов условно чистой территории Ненецкого автономного округа [Текст] / А.В. Пучков, Е.Ю. Яковлев,



С.В. Дружинин // Успехи современного естествознания. – 2020. – № 6. – С. 118-122. DOI: 10.17513/use.37420.

3) Пучков, А.В. Радиоактивность нефтешлама: первые результаты исследований территории Большеземельской тундры [Текст] / А.В. Пучков, Е.Ю. Яковлев, А.С. Дружинина, С.В. Дружинин // Успехи современного естествознания. – 2022. – № 10. – С. 75-80. DOI: 10.17513/use.37911.

4) 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) [Текст] / А.В. Пучков, Е.Ю. Яковлев // Вестник Геонаук. – 2023. – Выпуск № 1 (337). – С. 42-51. DOI: 10.19110/geov.2023.1.5.

5) Пучков, А.В. Накопление радионуклидов в рыбе из рек северо-западного сектора Российской Арктики [Текст] / А.В. Пучков, А.С. Дружинина, Е.Ю. Яковлев, С.В. Дружинин // Арктика: экология и экономика. – 2023. – Т. 13. – № 1. – С. 127-137. DOI: 10.25283/2223-4594-2023-1-127-137.

#### **Публикации в изданиях, входящих в перечень Web of Science и Scopus:**

1) Yakovlev, E. Assessment of current natural and anthropogenic radionuclide activity concentrations in the bottom sediments from the Barents sea [Текст] / E. Yakovlev, A. Puchkov // Marine Pollution Bulletin. – 2020. – Т. 160. – С. 111571. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2020.111571.

2) Puchkov, A.V. Radon hazard in permafrost conditions: current state of research [Текст] / A.V. Puchkov, E.Yu. Yakovlev, N. Hasson, G.A.N. Sobrinho, Yu.V. Tsykareva, A.S. Tyshov, P.I. Lapikov, E.V. Ushakova // Geography, Environment, Sustainability. – 2021. – Т. 14. – № 4. – С. 93-104. DOI: 10.24057/2071-9388-2021-037.

3) Yakovlev, E.Yu. Assessing the natural and anthropogenic radionuclide activities of the Pechora River estuary: Bottom sediments and water (Arctic Ocean Basin) [Текст] / Yakovlev E., Puchkov A., Bykov V. // Marine Pollution Bulletin. – 2021. – Т. 172. – С. 112765. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2021.112765.

4) Puchkov, A.V. Radon flux density in conditions of permafrost thawing: simulation experiment [Текст] / A.V. Puchkov, E.V. Berezina, E.Yu. Yakovlev, N.R. Hasson, S.V. Druzhinin, A.S. Tyshov, E.V. Ushakova, L.S. Koshelev, P.I. Lapikov // Geography, Environment, Sustainability. – 2022. – Т. 15. – № 3. – С. 5-18. DOI: 10.24057/2071-9388-2022-023.

5) Puchkov, A.V. Assessing the natural and anthropogenic radionuclide activities in fish from Arctic rivers (Northwestern Russia) [Текст] / A.V. Puchkov, A.S. Druzhinin, E.Yu. Yakovlev, S.V. Druzhinin // Pollution. – 2023. – Т. 9. – № 3. – С. 1098-1116. DOI: 10.22059/POLL.2023.350148.1668.

#### **Публикации в других изданиях:**

1) Пучков, А.В. Особенности формирования радиоэкологической обстановки устьевой части реки Печора [Текст] / А.В. Пучков, Е.Ю. Яковлев // Новое в познании процессов рудообразования. Труды молодых ученых, посвященные 90-летию ИГЕМ РАН, 2020. – С. 99-103.

2) Яковлев, Е.Ю. Оценка современного радиационно-экологического состояния Баренцева моря по результатам донных отложений [Текст] / Е.Ю. Яковлев, А.В. Пучков // Науки о Земле: от теории к практике. Арчиловские чтения – 2020. Материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, Чебоксары, 05–08 ноября 2020 года. – С. 218-223.

3) Пучков, А. В. Радиоэкологические особенности и современное состояние их изученности на территории Ненецкого автономного округа [Текст] / А.В. Пучков, Е.Ю. Яковлев // Арктические исследования: от экстенсивного освоения к комплексному развитию. Материалы II международной научно-практической конференции, Архангельск, 11–14 ноября 2020 года. – С. 299-303.

4) Пучков, А.В. Оценка радиационных характеристик атмосферного воздуха фоновых территорий Ненецкого автономного округа по результатам изучения снегового покрова [Текст] / А.В. Пучков, Е.Ю. Яковлев, С.В. Дружинин // Арктические исследования: от экстенсивного освоения к комплексному развитию. Материалы II международной научно-практической конференции, Архангельск, 11–14 ноября 2020 года. – С. 303-307.

5) Puchkov, A.V. Radon in conditions of permafrost degradation: scenario of the changing the level of radon hazard of the territory [Текст] / A.V. Puchkov, E.Yu. Yakovlev, N. Hasson. // Актуальные проблемы и перспективы развития геокриологии: материалы VI Всероссийского научного молодежного геокриологического форума с международным участием. ФГБУН Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова; отв. ред. А.Н. Федоров. – Якутск: Издательство ФГБУН Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН. – 2021. – С. 134-135.

6) Пучков, А.В. Радиоопасность арктических территорий: современное состояние изученности и перспективы развития тематики [Текст] / А.В. Пучков, Е.Ю. Яковлев, Н. Хассон, Ю.В. Цыкарева, А.С. Тышов, П.С. Лапиков, Е.В. Ушакова // В сборнике: Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека. Материалы VI Международной конференции. В 2-х томах. Томск, 20-24 сентября 2021 года. – С. 496-499.

7) Яковлев, Е.Ю. Современное радиоэкологическое состояние устьевой части реки Печора [Текст] / Е.Ю. Яковлев, А.В. Пучков // В сборнике: Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека. Материалы VI Международной конференции. В 2-х томах. Томск, 20-24 сентября 2021 года. – С. 645-649.

8) Пучков, А.В. Изотопные отношения Sr-90/Cs-137 в разных мерзлотных условиях (на примере Ненецкого автономного округа) [Текст] / А.В. Пучков, Е.Ю. Яковлев // В книге: Молодые - Научкам о Земле. Тезисы докладов X Международной научной конференции молодых ученых. В 7-ми томах. Редколлегия: Ю.П. Панов, Р.Н. Мустаев. Москва, 31 марта – 01 апреля 2022 года. С. 211-215.

9) Пучков, А.В. Плотность потока радона в условиях оттаивания мерзлого грунта (имитация многолетнемерзлых пород) / А.В. Пучков, Е.Ю. Яковлев, А.С. Тышов // В книге: Молодые - Научкам о Земле. Тезисы докладов X Международной научной конференции молодых ученых. В 7-ми томах. Редколлегия: Ю.П. Панов, Р.Н. Мустаев. Москва, 31 марта – 01 апреля 2022 года. С. 216-219.

10) Пучков, А.В. Особенности миграции радона в условиях оттаивания мерзлого грунта: анализ результатов эксперимента по имитации многолетнемерзлых пород [Текст] / А.В. Пучков, Е.Ю. Яковлев // Радиобиология и экологическая безопасность-2022: материалы Международной научной конференции, г. Гомель, Республика Беларусь. 26-27 мая 2022 г. – С. 122-124.

11) Пучков, А.В. Радиоактивность малоземельской тундры: слабоинтенсивный след после ядерных испытаний на архипелаге Новая Земля / А.В. Пучков, Е.Ю. Яковлев [Текст] // Радиобиология и экологическая безопасность – 2022: материалы Международной научной конференции, г. Гомель, Республика Беларусь. 26-27 мая 2022 г. – С. 125-128.

12) Пучков, А.В. Оценка активности радионуклидов в рыбе реки Несь (Ненецкий автономный округ) [Текст] / А.В. Пучков, А.С. Дружинина, Е.Ю. Яковлев, С.В. Дружинин // В сборнике: Биомониторинг в Арктике. Сборник материалов III международной конференции. Архангельск, 11-12 октября 2022 года. С. 94-97.

13) Пучков, А.В. Источники и уровни радиоактивного загрязнения тундровых территорий Ненецкого автономного округа [Текст] / А.В. Пучков, Е.Ю. Яковлев // В сборнике: Новое в познании процессов рудообразования. Сборник материалов. Москва, 28 ноября – 02 декабря 2022 года. С. 204-207.

14) Пучков, А.В. Радиоактивность малоземельской тундры: торф и почва бассейна реки Несь [Текст] / А.В. Пучков, Е.Ю. Яковлев // В сборнике: Арктические исследования: от экстенсивного освоения к комплексному развитию. Материалы III Международной молодежной научно-практической конференции. Архангельск, 26–28 апреля 2022 года С. 242-244.