

*На правах рукописи*



**МЕЗИНА Ксения Александровна**

**РАДИОАКТИВНОСТЬ НАЗЕМНЫХ ЭКОСИСТЕМ  
НА ПРИМЕРЕ МОХОВОГО И ЛИШАЙНИКОВОГО ПОКРОВОВ  
АРКТИЧЕСКОГО И ЮЖНОГО РЕГИОНОВ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ**

1.6.4 – «Минералогия, кристаллография.  
Геохимия, геохимические методы поисков полезных ископаемых»

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата геолого-минералогических наук

Новосибирск – 2024

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте геологии и минералогии им. В.С. Соболева Сибирского отделения Российской академии наук (ИГМ СО РАН).

**Научный руководитель: Мельгунов Михаил Сергеевич**

кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, заведующий лабораторией геохимии радиоактивных элементов и экогеохимии Института геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН

**Официальные оппоненты: Язык Егор Григорьевич**

доктор геолого-минералогических наук, профессор отделения геологии инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета (г. Томск)

**Яковлев Евгений Юрьевич**

кандидат геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией экологической радиологии Института геодинамики и геологии имени чл.-корр. РАН Ф.Н. Юдахина Федерального исследовательского центра комплексного изучения Арктики им. Н. П. Лаврова УрО РАН (г. Архангельск)

**Ведущая организация:**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН (г. Иркутск)

Защита состоится 5 февраля 2025 года в 14-00 часов на заседании диссертационного совета 24.1.050.02 при ФГБУН Институте геологии и минералогии им. В. С. Соболева СО РАН в большом конференц-зале.

Отзыв в одном экземпляре, оформленный в соответствии с требованиями Минобрнауки России, просим направлять по адресу: 630090, г. Новосибирск, пр-т ак. Коптюга, 3, Гаськовой О.Л. Тел./факс: +7 (383) 373-03-28; +7(383) 373-05-61 e-mail: gaskova@igm.nsc.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБУН ИГМ СО РАН [https://www.igm.nsc.ru/images/diss/loadfiles\\_dzubenko/mezina/dis-Mezina.pdf](https://www.igm.nsc.ru/images/diss/loadfiles_dzubenko/mezina/dis-Mezina.pdf).

Автореферат разослан 16 декабря 2024 года.

Ученый секретарь диссертационного совета,  
доктор геолого-минералогических наук

О.Л. Гаськова

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность исследования.** Атмосферный перенос вещества является одним из основных факторов, определяющих формирование и состояние современного геохимического фона поверхности. Естественные и искусственные радионуклиды широко применяются для исследования потоков вещества в окружающей среде, в том числе и в атмосфере. В эколого-геохимических исследованиях для характеристики процессов атмосферного переноса вещества часто используют радиоактивные изотопы-индикаторы такие  $^7\text{Be}$ ,  $^{210}\text{Pb}$  и  $^{137}\text{Cs}$  [Peters, 1959; Wan et al., 1987; Feely et al., 1989; Brost et al., 1991; Baskaran et al., 1993; Papastefanou, Ioannidou, 1996; Ioannidou, Papastefanou, 2006]. Во-первых, это связано с совместным поступлением этих радионуклидов с веществом атмосферных выпадений. Во-вторых, их активности достаточно велики, что позволяет проводить их определение с высокой надежностью, достоверностью и экспрессностью методом полупроводниковой гамма-спектрометрии.

Мхи и лишайники являются общепринятыми биоиндикаторами загрязнения окружающей среды, используемыми как инструмент при изучении процессов атмосферного переноса вещества, в том числе **микроэлементов** [Rühling, Tyler, 1970; Puckett, 1988; Tyler, 1990; Berg, Steinnes, 1997; Riget et al., 2000; Szczepaniak, Biziuk, 2003; Harmens et al., 2010; Bargagli, 2016; Lazo et al., 2019], **радионуклидов естественного и искусственного происхождения** [Нифонтова, Куликов, 1977; Нифонтова, 1997, 2003; Nifontova, 2006; Krmar et al., 2007, 2013; Вардуни и др., 2014; Kılıç et al., 2019; Anderson et al., 2022].

Поскольку питание мхов и лишайников преимущественно связано с атмосферным поступлением, то важным этапом работы является изучение радионуклидного состава атмосферных выпадений как одного из основных источников поступления радионуклидов на земную поверхность.

В мировой практике доказано, что более 80%  $^7\text{Be}$  и  $^{210}\text{Pb}$ , находящихся в нижних слоях атмосферы, осаждаются непосредственно с «мокрыми или влажными» выпадениями (дождь, снег) [Baskaran, 1995]. Если исключить локальное воздействие предприятий ЯТЦ, то современное поступление  $^{137}\text{Cs}$  на земную поверхность преимущественно связано с его переносом в составе пылевых и сажистых частиц, поступающих в атмосферу при выветривании ранее загрязненных почв и при сгорании большого количества органического материала во время сильных природных пожаров [Shcherbov, 2012; Щербов и др., 2015].

Одним из самых доступных, удобных и надежных способов получения информации о поступлении загрязняющих веществ из атмосферы на подстилающую поверхность является исследование снежного покрова [Бортникова и др., 2009; Таловская и др., 2014с]. Снежный покров является природным депономтом, накапливающим информацию об атмосферных поступлениях за достаточно большой промежуток времени от первого выпадения поздней осенью до его таяния весной [Veysseyre et al., 2001]. Практически отсутствуют широко известные данные по исследованиям совместного сезонного атмосферного поступления  $^7\text{Be}$ ,  $^{210}\text{Pb}$  и  $^{137}\text{Cs}$ , основанным на изучении интегральных проб снега, накопленных в зимний период на той или иной территории. В этом плане абсолютно неизученным остается такой обширный

регион, как Западная Сибирь, ограниченный с юга и севера 49° и 73° с.ш., с запада на восток – 60° и 90° в.д. Время ежегодного устойчивого снежного покрова для этой территории варьирует от 5-6 месяцев на юге и до 8-9 месяцев на севере.

Учитывая широкое распространение мхов и лишайников в окружающей среде и их вовлечение в трофические цепи живых организмов, вопрос об их радиоактивности становится актуальным. Общепринятым этапом при изучении радиоактивности живых организмов является оценка степени воздействия на них ионизирующих излучений, выраженная в расчете мощности поглощенной дозы [Зарипова, 2008; Физические ..., 2017].

**Цель исследования** – установить особенности, выявить условия и закономерности формирования современного уровня радиоактивности мохово-лишайникового покрова Арктического и южного регионов Западной Сибири.

**Задачи научного исследования:**

1. Оценить современный уровень поступления  $^7\text{Be}$ ,  $^{210}\text{Pb}$ , и  $^{137}\text{Cs}$  на земную поверхность из атмосферы в составе снеговых выпадений на территории Арктического и южного регионов Западной Сибири.

2. Установить современные уровни содержаний  $^7\text{Be}$ ,  $^{210}\text{Pb}$ , и  $^{137}\text{Cs}$  в сквозных видах лишайников и мхов, характерных для исследуемых территорий. Дать сравнительную характеристику пространственного распределения  $^7\text{Be}$ ,  $^{210}\text{Pb}$ , и  $^{137}\text{Cs}$  в мохово-лишайниковом покрове наземных экосистем Арктического и южного регионов Западной Сибири.

3. Оценить степень воздействия ионизирующих излучений на мхи и лишайники, связанных с окружающими их источниками естественной и искусственной радиоактивности.

**Научная новизна**

Впервые оценен вклад снеговых выпадений как одного из основных источников поступления радионуклидов в общую радиоактивность мхов и лишайников на территориях Арктического и южного регионов Западной Сибири.

Актуализирована на 2017-2020 гг. база данных по содержаниям  $^7\text{Be}$ ,  $^{210}\text{Pb}$  и  $^{137}\text{Cs}$  в мохово-лишайниковом покрове наземных экосистем на территориях Арктического и южного регионов Западной Сибири.

Впервые дана сравнительная характеристика пространственного распределения  $^7\text{Be}$ ,  $^{210}\text{Pb}$  и  $^{137}\text{Cs}$  в мохово-лишайниковом покрове наземных экосистем Арктического и южного регионов Западной Сибири.

Впервые для территории Арктического и южного регионов Западной Сибири проведена оценка степени воздействия ионизирующих излучений на мхи и лишайники в естественных условиях их обитания.

**Практическая значимость**

Полученные результаты исследований представляют собой основу для проведения в дальнейшем фундаментальных (глобальный и региональный атмосферный перенос вещества) и прикладных (экогеохимической направленности) исследований. Выявление региональных фоновых содержаний радионуклидов в компонентах окружающей среды является первым шагом к обнаружению площадей с их аномальными концентрациями естественной и техногенной природы. Это важно для решения проблем рационального

природопользования, особенно в районах проживания коренных народов Сибири. Представлен объемный материал о современных уровнях содержания  $^7\text{Be}$ ,  $^{210}\text{Pb}$  и  $^{137}\text{Cs}$  в лишайниках и мхах, который может служить базовой основой для проведения длительных мониторинговых и прогнозных исследований.

### **Фактический материал и методы исследования**

В основу диссертационной работы положены материалы, полученные при проведении экспедиционных работ на территории Арктического и южного регионов Западной Сибири (Алтайский край, Новосибирская область и Ямало-Ненецкий автономный округ) в период с октября 2017 по октябрь 2022 гг. Всего в работе было изучено 361 проба (из них: снеговых вод – 57, лишайников – 170, мхов – 72, лесной подстилки – 27 и почв – 35) и выполнено свыше 1000 измерений активности радионуклидов гамма-спектрометрическим методом. Аналитические исследования проведены в ЦКП Многоэлементных и изотопных исследований СО РАН (ИГМ СО РАН) с применением аттестованных методик и стандартных образцов сравнения.

**Достоверность защищаемых научных результатов** обеспечена статистически значимым количеством изученных образцов, современной методикой их отбора и пробоподготовки, применением комплекса высокочувствительных аналитических методов исследования, глубиной проработки полученного материала и литературы по теме исследований, а также апробацией результатов исследований на российских и зарубежных конференциях и публикациями в ведущих международных изданиях (WoS, Scopus).

### **Апробация работы и публикации**

Материалы диссертационной работы опубликованы в 22 работах, в том числе в 6 статьях в рецензируемых научных журналах, входящих в перечень ВАК. Основные результаты работы были представлены и обсуждены в ходе очного участия на международных и всероссийских конференциях, школах-семинарах: XXVIII, XXX Всероссийских молодежных конференциях «Строение литосферы и геодинамика» (Иркутск, 2019, 2023), 7th International conference on radiation in various fields of research (Herceg Novi, Montenegro, 2019), 16th International Symposium on Water-Rock Interaction and 13th International Symposium on Applied Isotope Geochemistry (Томск, 2019), Goldschmidt (Barcelona, Spain, 2019), I молодежной научной конференции-школе, приуроч. к 60-летию юбилею ДВГИ ДВО РАН (Владивосток, 2019), XXXI молодёжной научной школе-конференции, посвящ. памяти чл.-корр. АН СССР К.О. Кратца (Санкт-Петербург, 2020), EGU General Assembly 2021 (Vienna, Austria, 2021), VI Международной конференции «Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека» (Томск, 2021), Всероссийской конференции «Современные направления развития геохимии» с участием зарубежных ученых, посвящ. 65-летию Института геохимии им. А.П. Виноградова и 105-летию со дня рождения акад. Л.В. Таусона (Иркутск, 2022), XIII Международной биогеохимической школы-конференции «Эволюция биосферы, биогеохимические циклы и биогеохимические технологии: связь фундаментальных и прикладных исследований», посвящ. 160-летию со дня рождения В.И. Вернадского (Пушино, 2023).

**Соответствие результатов работы научным специальностям.** Результаты работы соответствуют пунктам 13, 14, 16 и 22 паспорта научной специальности 1.6.4. «Минералогия, кристаллография. Геохимия, геохимические методы поиска полезных ископаемых»

#### **Личный вклад автора**

Все представленные результаты в диссертации являются оригинальными и получены при участии автора или непосредственно им лично. Автор лично участвовал в экспедиционных работах, самостоятельно проводил пробоподготовку исследуемых образцов и определение содержаний радионуклидов во мхах, лишайниках и атмосферных выпадениях (снег) методом полупроводниковой гамма-спектрометрии. Автором лично проведена статистическая обработка данных и дана интерпретация полученных результатов.

#### **Объем и структура диссертации**

Диссертация изложена на 220 страницах и состоит из введения, шести глав, заключения, списка литературы, содержащего 416 наименований, а также 76 рисунков, 28 таблиц и 3 приложения.

#### **Благодарности**

Автор искренне признателен научному руководителю к.г.-м.н. Мельгунову М.С. за методическую помощь и конструктивные замечания на всем протяжении выполнения работы. Отдельную благодарность автор выражает д.г.-м.н. Леоновой Г.А. за ценные рекомендации в процессе подготовки диссертации. Автор искренне благодарит сотрудников лаборатории №216 и №218 ИГМ СО РАН к.г.-м.н. Мальцева А.Е., к.г.-м.н. Восель Ю.С., к.г.-м.н. Щербова Б.Л., к.г.-м.н. Кропачеву М.Ю. за полезные советы при выполнении работы, д.г.-м.н. Страховенко В.Д., к.г.-м.н. Беянина Д.К., к.г.-м.н. Густайтис М.А., к.г.-м.н. Лазареву Е.В., к.г.-м.н. Мягкую И.Н. и к.г.-м.н. Сарыг-оолу Б.Ю. за консультации и ценные рекомендации в оформлении диссертации. Автор выражает признательность коллегам-аналитикам за помощь в выполнении работы: д.г.-м.н. Солотчиной Э.П., Мирошниченко Л.В., к.т.н. Кармановой Н.Г., к.г.-м.н. Никитину И.А., Макаровой И.В. и Чернаковой Н.И. Автор сердечно благодарит своих родных и близких людей за моральную поддержку. Работа выполнена при частичной финансовой поддержке проектов РНФ №18-77-10039, №23-27-00307 и гранта РФФИ №17-05-41076 РГО\_а.

### **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность исследования, определены цель и этапы исследования, представлены научная новизна и практическая значимость, обозначен личный вклад автора и апробация работы. **В Главе 1 «Современное состояние изученности радиоактивности наземных экосистем Арктического и южного регионов Западной Сибири»** представлен обзор работ по тематике исследования – содержание радионуклидов во мхах и лишайниках как биоиндикаторах загрязнения атмосферного воздуха; снеговых атмосферных выпадениях как одного из важнейших источников поступления радионуклидов во мхи и лишайники Арктического и южного регионов Западной Сибири, а также дана характеристика меры радиационного воздействия на живые организмы. **В Главе 2 «Объекты исследования»** определены основные объекты (мхи,

лишайники, снеговые выпадения, подстилающие почвы) и территории исследования (рис. 1), а также дана характеристика природно-геологических особенностей исследуемых районов. В Глава 3 «Методы исследования» описаны используемые методики пробоотбора и пробоподготовки объектов исследования, аналитические методы, в том числе, гамма-спектрометрический анализ – основной метод определения содержаний радионуклидов. В Главе 4 «Снеговые атмосферные выпадения как один из важнейших источников поступления радионуклидов в наземные экосистемы» представлены данные об особенностях поступления  $^{210}\text{Pb}$ ,  $^7\text{Be}$  и  $^{137}\text{Cs}$  в составе сезонных снеговых выпадений – одного из важнейших источников их поступления в лишайники и мхи. Глава 5 «Содержание радионуклидов во мхах и лишайниках Арктическом и южном регионах Западной Сибири» посвящена интерпретации полученных аналитических данных по содержанию  $^{210}\text{Pb}$ ,  $^7\text{Be}$  и  $^{137}\text{Cs}$  во мхах и лишайниках как объектах исследования. Представлены данные по локальному и региональному площадному распределению, сезонной зависимости поступления рассматриваемых радионуклидов, а также их вертикальное распределение в системах «лишайник-лесная подстилка» и «мох-лесная подстилка». В Главе 6 «Оценка степени воздействия радиоактивных полей на мхи и лишайники, произрастающие в Арктической и южной частях Западной Сибири» определены основные источники воздействия радиоактивности на лишайники, мхи и даны их характеристика. Проведены оценки степени воздействия радиоактивности на лишайники и мхи.

## ОБОСНОВАНИЕ ВЫНОСИМЫХ НА ЗАЩИТУ РЕЗУЛЬТАТОВ

**Первое защищаемое положение:** *Изотопы  $^{210}\text{Pb}$  и  $^7\text{Be}$  обнаружены во всех выделенных фракциях взвешенного и растворенного вещества снеговой воды.  $^7\text{Be}$  преимущественно связан с растворенным,  $^{210}\text{Pb}$  со взвешенным веществом. Индикатором наличия антропогенного воздействия является  $^7\text{Be}/^{210}\text{Pb}$  отношение во взвешенном веществе снеговых вод, составляющее 0,5-0,7 для условно-фоновых районов и 1,1-1,8 вблизи источников повышенной техногенной нагрузки. Поток осадения  $^{210}\text{Pb}$  и  $^7\text{Be}$  в составе снеговых выпадений коррелируют с количеством осадков за сезон. Содержания  $^{137}\text{Cs}$  в сезонных снеговых выпадениях не превышают 1 Бк/м<sup>2</sup>.*

Для территории Арктического региона Западной Сибири в зимний период 2018-2019 гг средние удельные активности  $^{210}\text{Pb}$ ,  $^7\text{Be}$  и  $^{137}\text{Cs}$  в снеговых водах составили 104 (71-140); 248 (148-358) и 0,9 (0,1-1,8) мБк/л при интегральном их поступлении в составе «мокрых» и «сухих» выпадений 25 (12-51); 59 (27-119) и 0,2 (0,1-0,4) Бк/(м<sup>2</sup>×сезон) соответственно. За этот же период для территории южного региона Западной Сибири средние удельные активности  $^{210}\text{Pb}$ ,  $^7\text{Be}$  и  $^{137}\text{Cs}$  в снеговой воде составили 182 (99-281); 276 (136-450) и 0,8 (0,3-1,2) мБк/л при интегральном их поступлении 25 (8-47); 38 (10-75) и 0,1 (0,0-0,2) Бк/(м<sup>2</sup>×сезон) соответственно. Эти результаты наравне с многолетними наблюдениями в южном регионе показывают, что поток осадения  $^{137}\text{Cs}$  на территории Западной Сибири не превышает 1 Бк/(м<sup>2</sup>×сезон), что свидетельствует о незначительных его

современных поступлениях из атмосферы. Уровни концентраций  $^{137}\text{Cs}$  в исследованных образцах близки к пределу обнаружения используемого аналитического метода. Погрешность их определения превышает 30%, что делает невозможным совместную статистическую интерпретацию данных по  $^{137}\text{Cs}$  и данных, полученных для  $^{210}\text{Pb}$  и  $^7\text{Be}$ .

Результаты исследования радионуклидного состава снеговых вод показывают, что  $^{210}\text{Pb}$  и  $^7\text{Be}$  обнаружены во всех выделенных фракциях взвешенного и растворенного вещества: а) крупнозернистая фракция взвешенного вещества, состоящая из пылевых частиц  $> 3\text{ мкм}$ ; б) фракция  $0,45\text{--}3\text{ мкм}$  – крупнозернистая фракция, состоящая из пылевых частиц размерностью от  $0,45$  до  $3\text{ мкм}$ ; в) фракция  $< 0,45\text{ мкм}$  – мелкодисперсная фракция растворенного вещества, состоящая из наноразмерных аэрозольных частиц, коллоидов и растворенной компоненты.  $^7\text{Be}$  преимущественно связан с растворенным веществом снеговых вод, а  $^{210}\text{Pb}$  со взвешенным веществом (рис. 2).

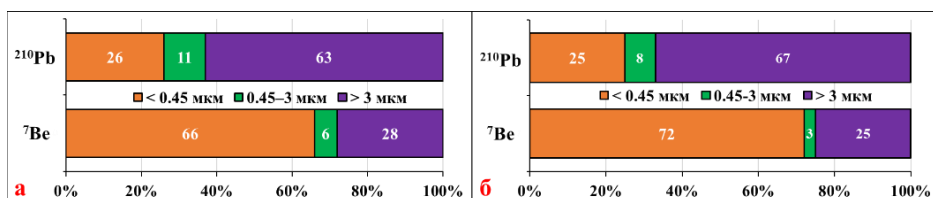


Рис. 2 – Усредненные значения долей (%) в общей активности  $^{210}\text{Pb}$  и  $^7\text{Be}$  во фракциях взвешенного и растворенного вещества снеговой воды, отобранной на территории Арктического (а) и южного (б) регионов Западной Сибири

Изучение характера распределения  $^{210}\text{Pb}$  и  $^7\text{Be}$  по фракциям взвешенного и растворенного вещества снеговых вод показало, что по доле фракции  $> 3\text{ мкм}$  взвешенного вещества снеговой воды от общей активности  $^7\text{Be}$  выделяются две группы точек (рис. 3, 4). Распределение  $^7\text{Be}$  и  $^{210}\text{Pb}$  по фракциям взвешенного и растворенного вещества снеговых вод для образцов Группы 1, отобранных на территориях с повышенной техногенной нагрузкой (рис. 3а, 4а), значительно отличается от образцов Группы 2, расположенных на условно-фоновых территориях (рис. 3б, 4б).

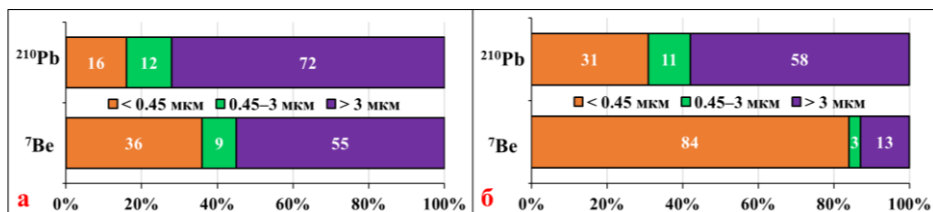


Рис. 3 – Усредненные значения долей (%) в общей активности  $^{210}\text{Pb}$  и  $^7\text{Be}$  во фракциях взвешенного и растворенного вещества снеговой воды на территориях с повышенной антропогенной нагрузкой (а) и условно-фоновых территориях (б) Арктического региона Западной Сибири

В образцах Группы 1 доля фракции  $> 3\text{ мкм}$  от общей активности  $^7\text{Be}$  составляет в среднем 55% для Арктической части Западной Сибири и 49% для южной части.



Для образцов Группы 2 характерен низкий вклад этой фракции – 13% и 17% соответственно. Помимо этого, в Группе 1 наблюдается более высокий вклад крупнозернистых фракций (> 0,45 мкм) в суммарную активность  $^{210}\text{Pb}$ , составляющий 84-90%. В образцах Группы 2 доля этих фракций ниже – 69-70%.

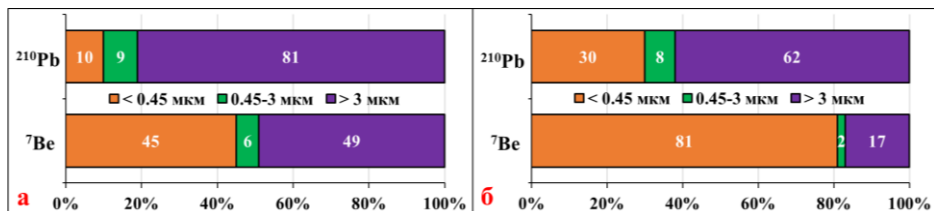


Рис. 4 – Усредненные значения долей (%) в общей активности  $^{210}\text{Pb}$  и  $^7\text{Be}$  во фракциях взвешенного и растворенного вещества снеговой воды на территориях с повышенной антропогенной нагрузкой (а) и условно-фоновых территориях (б) южного региона Западной Сибири

Для выделенных групп образцов наблюдаются существенные отличия в удельных активностях фракций взвешенного и растворенного вещества, пересчитанных на единицу объема снеговых вод (рис. 5, 6).

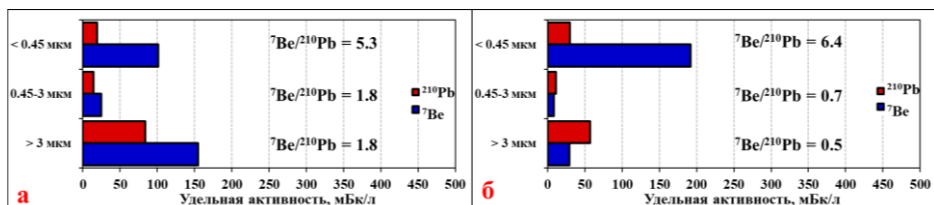


Рис. 5 – Усредненные значения удельных активностей  $^{210}\text{Pb}$  и  $^7\text{Be}$  во фракциях взвешенного и растворенного вещества снеговой воды на территориях с повышенной антропогенной нагрузкой (а) и условно-фоновых территориях (б) Арктического региона Западной Сибири

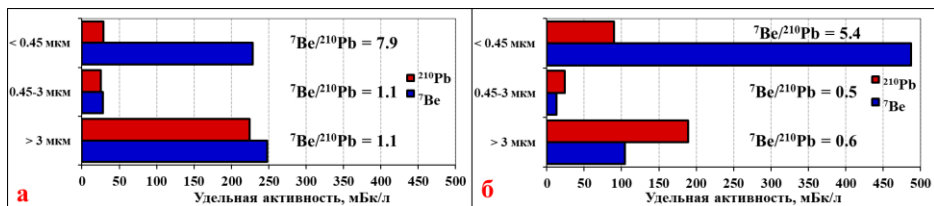


Рис. 6 – Усредненные значения удельных активностей  $^{210}\text{Pb}$  и  $^7\text{Be}$  во фракциях взвешенного и растворенного вещества снеговой воды на территориях с повышенной антропогенной нагрузкой (а) и условно-фоновых территориях (б) южного региона Западной Сибири

Удельная активность  $^7\text{Be}$  во фракции < 0,45 мкм в образцах Группы 1 почти в два раза ниже, чем в образцах Группы 2. Во фракциях > 0,45 мкм наблюдается обратная картина для этого изотопа – более высокие удельные активности в Группе 1. Для  $^{210}\text{Pb}$  эти различия не столь значительны, но общая тенденция сохраняется. Несмотря на значительные различия в перераспределении активностей  $^7\text{Be}$  и  $^{210}\text{Pb}$  между фракциями взвешенного и растворенного вещества образцов разных групп, их суммарные активности в снеговых водах отличаются

не столь существенно. В образцах, отобранных на территориях с повышенной техногенной нагрузкой удельные активности  ${}^7\text{Be}$  и  ${}^{210}\text{Pb}$  в снеговых водах в среднем на 20% выше, чем в образцах, отобранных на условно-фоновых территориях.

Показательно ведет себя  ${}^7\text{Be}/{}^{210}\text{Pb}$  отношение. Для взвешенного вещества снеговых вод, отобранных на условно-фоновых территориях, наблюдаются более низкие  ${}^7\text{Be}/{}^{210}\text{Pb}$  отношения (0,5-0,7). Для территорий с повышенной техногенной нагрузкой это соотношение выше и достигает величины 1,1 в южном регионе и 1,8 в Арктическом.

Разделение изученных образцов на группы согласно территориальному расположению точек их отбора хорошо прослеживается на диаграммах рассеяния, построенных в координатах потоков осаднения  ${}^7\text{Be}$  и  ${}^{210}\text{Pb}$  для фракции  $> 3$  мкм взвешенного вещества снеговых вод (рис. 7.). На обоих графиках четко выделяются две области точек, соответствующие выделенным Группе 1 и Группе 2. Для образцов Группы 1 наблюдается очень сильная корреляционная зависимость между потоками осаднения  ${}^7\text{Be}$  и  ${}^{210}\text{Pb}$  как для Арктического региона ( $r = 0,99$ ), так и южного ( $r = 0,83$ ). Корреляционные связи в Группе 2 для Арктического региона, несмотря на заметный линейный тренд в распределении точек на диаграммах рассеяния, несколько ниже и составляют  $r = 0,45$ . Для потоков осаднения  ${}^7\text{Be}$  и  ${}^{210}\text{Pb}$  южного региона корреляционная связь более значима ( $r = 0,99$ ).

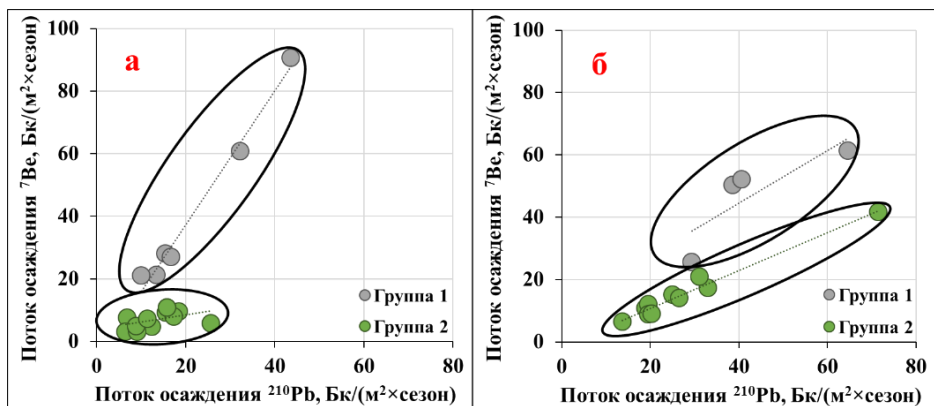


Рис. 7 – Потоки осаднения  ${}^{210}\text{Pb}$  и  ${}^7\text{Be}$  во фракции ( $> 3$  мкм) взвешенного вещества снеговой воды Арктического (а) и южного(б) региона Западной Сибири

Таким образом, наблюдается значительное увеличение вклада крупнозернистых фракций взвешенного вещества снеговых вод в общую активность  ${}^7\text{Be}$  в снеговых осадках, выпадающих на территориях с повышенной техногенной нагрузкой. В работе [Papastefanou, Ioannidou, 1996] было показано, что в присутствии поллютантов в гранулометрическом составе атмосферных аэрозолей  ${}^7\text{Be}$  смещается в сторону большей размерности частиц.

Если рассмотреть сезонное поступление  ${}^{210}\text{Pb}$  и  ${}^7\text{Be}$  в составе снеговых выпадений, то для потоков осаднения  ${}^{210}\text{Pb}$  и  ${}^7\text{Be}$  наблюдается тесная корреляционная связь с количеством выпавших осадков как для территории

Арктического региона, так и южного (рис. 8). Мониторинговые наблюдения в пределах южного региона показали, что эта тенденция сохраняется от года к году. Столь сильные положительные корреляции объясняются тем, что вымывание с осадками является одним из важнейших механизмов удаления этих изотопов из атмосферы [Baskaran, 1995].

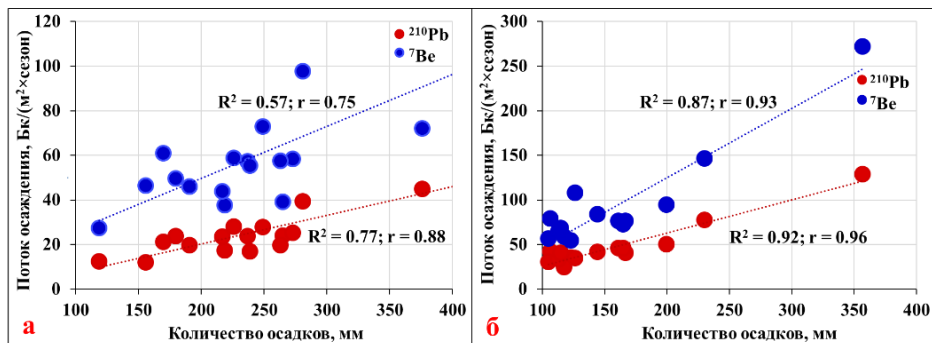


Рис. 8 – Зависимость потоков осаджения  $^7\text{Be}$  и  $^{210}\text{Pb}$  от рассчитанного количества выпавших осадков в точках отбора Арктического региона (а, 2018-2019 гг.) и южного региона (б, 2020-2021 гг.) Западной Сибири

**Второе защищаемое положение:** Для  $^{210}\text{Pb}$ ,  $^7\text{Be}$  и  $^{137}\text{Cs}$  установлены существенно различные особенности накопления в системах «лишайник/мох-лесная подстилка». Различие определяется периодами полураспада радионуклидов и временными параметрами их поступления на земную поверхность.  $^7\text{Be}$  является индикатором вертикальной миграции атмосферного вещества по телу растений. В пределах исследованных территорий установлены современные уровни запасов  $^{210}\text{Pb}$ ,  $^7\text{Be}$  и  $^{137}\text{Cs}$  в мохово-лишайниковом покрове Западной Сибири. Содержание  $^7\text{Be}$  в лишайниках и мхах коррелирует с количеством выпавших осадков.

Изучено вертикальное распределение  $^{210}\text{Pb}$ ,  $^7\text{Be}$  и  $^{137}\text{Cs}$  в системах «лишайник-лесная подстилка» и «мох-лесная подстилка» на территориях Арктического и южного регионов Западной Сибири (рис. 9-11).

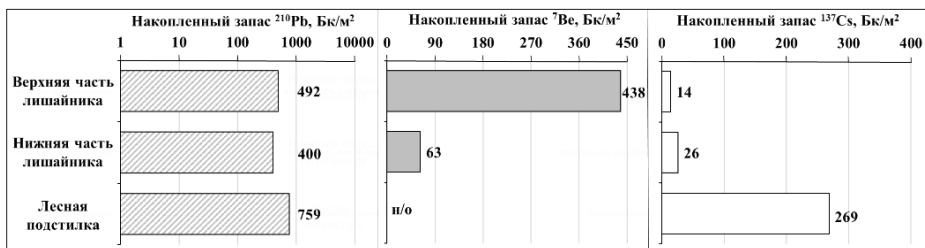


Рис. 9 – Величины средних накопленных запасов  $^{210}\text{Pb}$ ,  $^7\text{Be}$  и  $^{137}\text{Cs}$  в системе «лишайник-лесная подстилка» на территории Арктического региона Западной Сибири

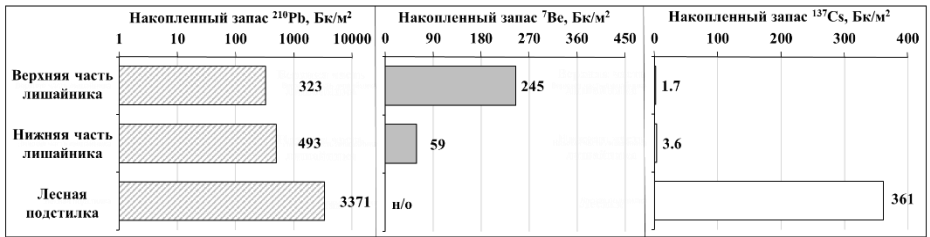


Рис. 10 – Величины средних накопленных запасов  $^{210}\text{Pb}$ ,  $^7\text{Be}$  и  $^{137}\text{Cs}$  в системе «лишайник-лесная подстилка» на территории южного региона Западной Сибири

Полученные аналитические данные показали существенные различия в особенностях распределения исследуемых радионуклидов. Самые высокие накопленные запасы  $^{210}\text{Pb}$  и  $^{137}\text{Cs}$  наблюдаются в слое лесной подстилки. Для  $^7\text{Be}$  наблюдается обратная картина, он концентрируется в верхней части таллома лишайника и тела мха. Содержания  $^7\text{Be}$  в слое лесной подстилке ниже пределов обнаружения (н/о) используемого аналитического метода.

Следует отметить, что для Арктического региона в талломе лишайника наблюдаются более высокие запасы  $^{137}\text{Cs}$  и  $^7\text{Be}$  при их близких значениях для  $^{210}\text{Pb}$  (рис. 9-10). Существенное отличие наблюдается для слоя лесной подстилки. Для южного региона характерны более высокие запасы как  $^{137}\text{Cs}$ , так и  $^{210}\text{Pb}$ . Причем, если для первого это превышение составляет порядка 34%, то для последнего его запасы более чем в 4 раза выше (3371 против 759 Бк/м<sup>2</sup>).

Закономерности вертикального распределения  $^{210}\text{Pb}$ ,  $^7\text{Be}$  и  $^{137}\text{Cs}$  в системе «мох-лесная подстилка» изучены только для южного региона Западной Сибири (рис. 11). В целом, характер распределения аналогичен системе «лишайник-лесная подстилка». Для мха характерно более плавное перераспределение  $^7\text{Be}$  по телу мха. В лишайниках, в верхней части таллома, сконцентрировано до 81% этого изотопа и лишь 19% находятся в его нижней части. Во мхах его перераспределение от верхней части к нижней происходит в пропорции 58-32-10%. Учитывая короткий период полураспада  $^7\text{Be}$  ( $T_{1/2} = 53$  дня), такой характер вертикального распределения говорит о наличии его миграции по телу растений за счет промывки атмосферными водами. Причем, у мхов этот процесс более выражен. Поскольку  $^{210}\text{Pb}$ ,  $^7\text{Be}$  и  $^{137}\text{Cs}$  поступают из атмосферы, как правило, в составе одних и тех же носителей (пылевые и аэрозольные частицы различной размерности), то следует предположить, что и  $^{210}\text{Pb}$ , и  $^{137}\text{Cs}$  так же будут подвержены аналогичной вертикальной миграции. Однако, учитывая значительно большие периоды полураспада  $^{210}\text{Pb}$  ( $T_{1/2} = 22$  года) и  $^{137}\text{Cs}$  ( $T_{1/2} = 30$  лет), особенности характера их накопления значительно отличаются. Это определяется временными рамками их поступления из атмосферы. Приток  $^{210}\text{Pb}$  происходит постоянно, что дает его постепенное накопление во всех компонентах системы с максимальным концентрированием в лесной подстилке. Как было показано ранее, современное поступление  $^{137}\text{Cs}$  из атмосферы невелико, что подтверждается его низкими запасами в теле растений. Его большие запасы в лесной подстилке связаны с прошлыми выпадениями в результате ядерных испытаний на Семипалатинском полигоне в период 1949-1963 гг. и определяются миграционными процессами и особенностями жизненных циклов растений.

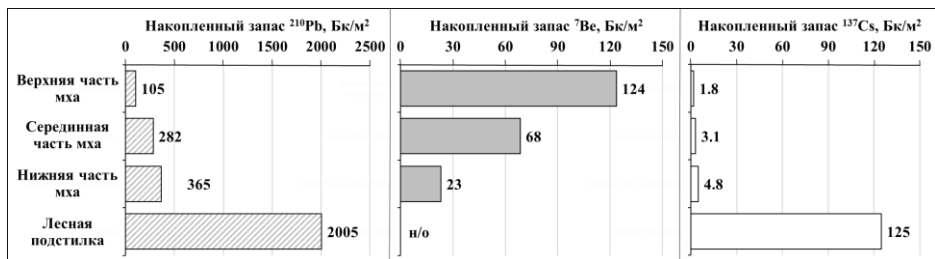


Рис. 11 – Величины средних накопленных запасов  $^{210}\text{Pb}$ ,  $^7\text{Be}$  и  $^{137}\text{Cs}$  в системе «мох-лесная подстилка» на территории южного региона Западной Сибири

По результатам статистической обработки полученных аналитических данных для лишайников и мхов, отобранных при мониторинговых полевых наблюдениях 2017-2020 гг., проведена оценка средних по региону содержаний  $^{210}\text{Pb}$ ,  $^7\text{Be}$  и  $^{137}\text{Cs}$  (рис. 12) и их запасов в мохово-лишайниковом покрове (рис. 13) на территории Арктического и южного регионов Западной Сибири.

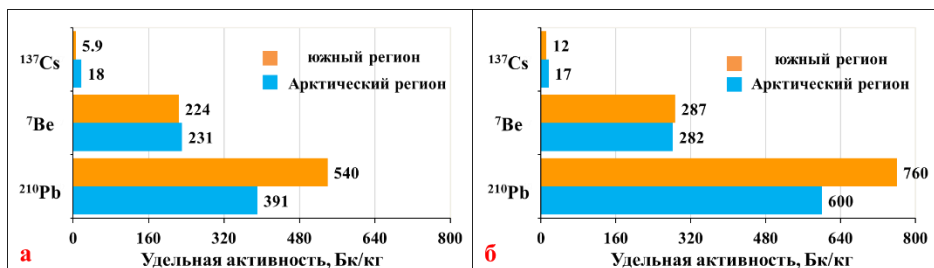


Рис. 12 – Усредненные региональные значения удельных активностей  $^{210}\text{Pb}$ ,  $^7\text{Be}$  и  $^{137}\text{Cs}$  в лишайниках (а) и мхах (б)

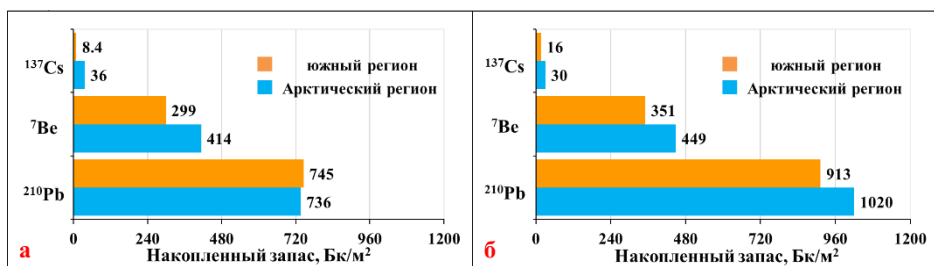


Рис. 13 – Усредненные региональные значения накопленных запасов  $^{210}\text{Pb}$ ,  $^7\text{Be}$  и  $^{137}\text{Cs}$  в лишайниках (а) и мхах (б)

Диапазоны средних региональных содержаний  $^7\text{Be}$ ,  $^{210}\text{Pb}$  и  $^{137}\text{Cs}$  в мохово-лишайниковом покрове наземных экосистем Западной Сибири составляют 224-287, 391-760 и 5,9-18 Бк/кг соответственно. Южный регион характеризуется более высокими средними содержаниями  $^{210}\text{Pb}$  по сравнению с Арктической частью Западной Сибири, как в лишайниках (540 против 391 Бк/кг), так и во мхах (760 против 600 Бк/кг). Для обоих регионов содержания  $^{210}\text{Pb}$  во мхах выше, чем в

лишайниках в среднем на 32%. Средние величины удельных активностей  $^7\text{Be}$  в лишайниках из северных и южных территорий Западной Сибири имеют близкие значения – 231 и 224 Бк/кг соответственно. Такая же картина наблюдается для мхов исследуемых территорий (282 и 287 Бк/кг). Усредненные значения удельных активностей  $^{137}\text{Cs}$  намного ниже, чем  $^{210}\text{Pb}$  и  $^7\text{Be}$  и составляют 5,9 и 18 Бк/кг для лишайников Алтайского края и ЯНАО, 12 и 17 Бк/кг для мхов соответственно.

Диапазоны средних значений региональных запасов  $^7\text{Be}$ ,  $^{210}\text{Pb}$  и  $^{137}\text{Cs}$  в мохово-лишайниковом покрове наземных экосистем Западной Сибири составляют 299-449, 736-1020 и 8,4-36 Бк/м<sup>2</sup> соответственно. При близких значениях региональных содержаний  $^7\text{Be}$  для Арктического региона фиксируются его более высокие запасы – на 22% во мхах и 28% в лишайниках. Для южного региона характерны более высокие содержания  $^{210}\text{Pb}$  как в лишайниках, так и во мхах при близких значениях его региональных запасов. Стоит отметить, что запасы  $^{137}\text{Cs}$  в лишайниках и мхах ЯНАО в 4 и 2 раза выше, чем в лишайниках и мхах Алтайского края, соответственно.

При мониторинговых наблюдениях на территории Арктического региона Западной Сибири в 2017-2020 гг. региональные запасы  $^7\text{Be}$  в лишайниках и мхах составили 325-492 и 335-499 Бк/м<sup>2</sup> соответственно. Пониженные значения запасов  $^7\text{Be}$  в 2018 году связаны с меньшим количеством атмосферных осадков, выпавших на данной территории в этот период. Что и подтверждается данными о количестве выпавших осадков на ближайших метеостанциях (<https://rp5.ru/>) к точкам отбора проб лишайников и мхов. В 2018 году выпало в 1,4-1,5 раз меньше осадков, чем в 2019 и 2020 гг. На рис. 14 наблюдается прямая зависимость между количеством выпавших осадков и накопленным запасом  $^7\text{Be}$  в лишайниках и мхах. Чем меньше количество выпавших осадков, тем меньше активность  $^7\text{Be}$ . Аналогичная картина наблюдается для лишайников и мхов южного региона Западной Сибири (рис. 15). Минимальное количество выпавших осадков и накопленных запасов  $^7\text{Be}$  в лишайниках и мхах зафиксированы в 2019 году.

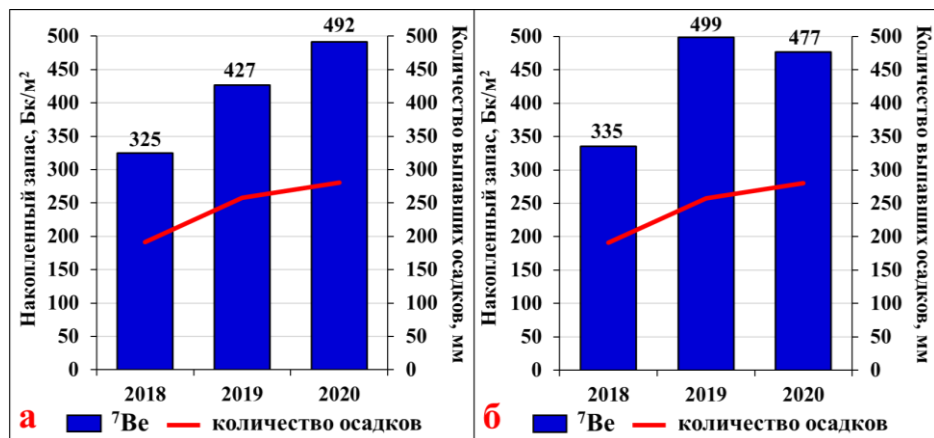


Рис. 14 – Усредненные данные о количестве выпавших осадков и накопленных запасах  $^7\text{Be}$  в лишайниках (а) и мхах (б) Арктического региона Западной Сибири

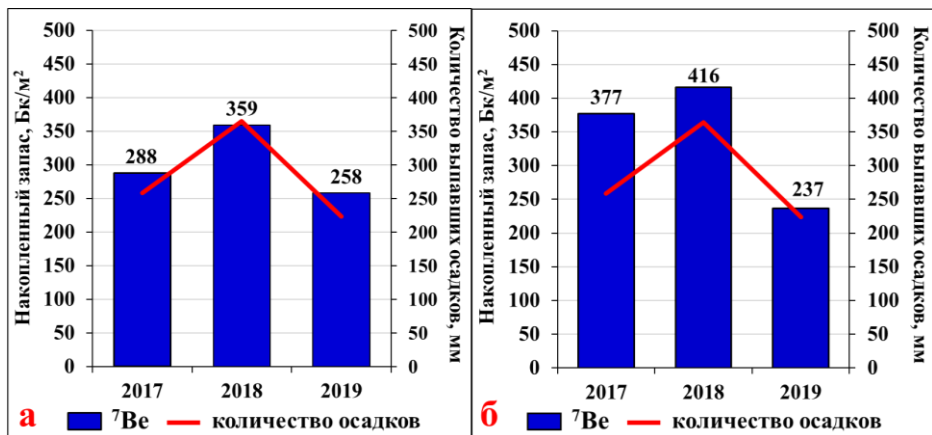


Рис. 15 – Усредненные данные о количестве выпавших осадков и накопленных запасах  $^7\text{Be}$  в лишайниках (а) и мхах (б) южного региона Западной Сибири

У лишайников и мхов в пределах исследуемых территорий наблюдается широкий диапазон колебаний концентраций  $^{210}\text{Pb}$ ,  $^7\text{Be}$  и  $^{137}\text{Cs}$ . При этом содержания каждого рассматриваемого радионуклида во мхах и лишайниках изменяются в пределах одного порядка величин. В значительной степени это связано с разнообразием анатомо-морфологического строения, возрастной неоднородностью организмов, неравномерностью площадного поступления, вертикальным распределением по слоевищам кустистых лишайников и дерновинкам напочвенных мхов и т.д.

**Третье защищаемое положение:** Для исследуемых регионов Западной Сибири суммарная мощность поглощенной дозы составляет 13,5-18,5 мкГр/сут для лишайников и 19,9-25,4 мкГр/сут для мхов. Вклад внутреннего облучения в суммарную поглощенную дозу составляет более 98%. Основным дозообразующим радионуклидом является  $^{210}\text{Po}$ , вклад которого в суммарную поглощенную дозу составляет более 79%.

В окружающей среде все живые организмы, начиная от микроорганизмов и заканчивая человеком, подвергаются постоянному воздействию ионизирующего излучения от различных радионуклидов как естественного, так и искусственного происхождения. Основной величиной для оценки степени воздействия облучения ионизирующим излучением компонентов наземных экосистем является поглощенная доза. В отличие от человека (для которого оцениваются эффективные дозы за год), природные организмы имеют жизненные циклы различной продолжительности. Поэтому оценка доз производится за более короткие промежутки времени и рассчитывается в единицах мощности дозы в мГр/сут, либо мкГр/ч [Практические ..., 2015; Сазыкина и др., 2022]. Среди различных типов излучений, которые могут вносить вклад в поглощенную дозу, наиболее важными в условиях окружающей среды являются  $\alpha$ -,  $\beta$ - и  $\gamma$ -излучение [Ulanovsky et al., 2008].

Существует два вида облучения: если радиоактивные вещества находятся вне организма и облучают его снаружи, то речь идет о внешнем облучении. Наиболее опасным, создающим основную дозовую нагрузку, в этом случае является  $\gamma$ -излучение. Несмотря на относительно низкую ионизирующую способность, оно обладает большой проникающей способностью. При попадании радионуклидов внутрь организма с воздухом, пищей и водой, происходит его внутреннее облучение. При котором основной вклад вносят короткодействующие, высокоионизирующие  $\alpha$ - и  $\beta$ -излучения.

Согласно методическим рекомендациям «Оценка радиационно-экологического воздействия на объекты природной среды по данным мониторинга радиационной обстановки» [Рекомендации Р 52.18.820-2015] суммарная мощность поглощенной дозы облучения  $i$ -го объекта наземной экосистемы равна сумме мощности поглощенной дозы, связанной с внутренним облучением  $i$ -го объекта наземной экосистемы от  $j$ -го радионуклида, попавшего в ткани организма наземной экосистемы ( $D_{i,j}^{\text{внутр}}$ ), и мощности поглощенной дозы, связанной с внешним облучением  $i$ -го объекта наземной экосистемы от  $j$ -го радионуклида, содержащегося в объектах среды обитания ( $D_{i,j}^{\text{внешн}}$ ):

$$D_{i,j} = D_{i,j}^{\text{внутр}} + D_{i,j}^{\text{внешн}}. \quad (6.1)$$

Основным источником внешнего облучения мхов и лишайников является подстилаящая почва, поэтому было изучено содержание  $^{238}\text{U}$  ( $^{226}\text{Ra}$ ),  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{40}\text{K}$  и  $^{137}\text{Cs}$ ) радионуклидов, содержащихся в слое подстилаящей почвы 0-30 см, отобранной на территории Арктического и южного регионов Западной Сибири (рис. 16). Удельная активность радионуклидов разных слоев подстилаящей почвы была усреднена.

Различия в содержаниях  $^{238}\text{U}$  ( $^{226}\text{Ra}$ ),  $^{40}\text{K}$  и  $^{137}\text{Cs}$  для исследуемых почв Западной Сибири, полученных в настоящем исследовании и другими авторами, могут быть связаны с несопоставимыми по размеру выборками, мощностью исследуемого почвенного покрова, а также более широким географическим охватом исследуемых территории.

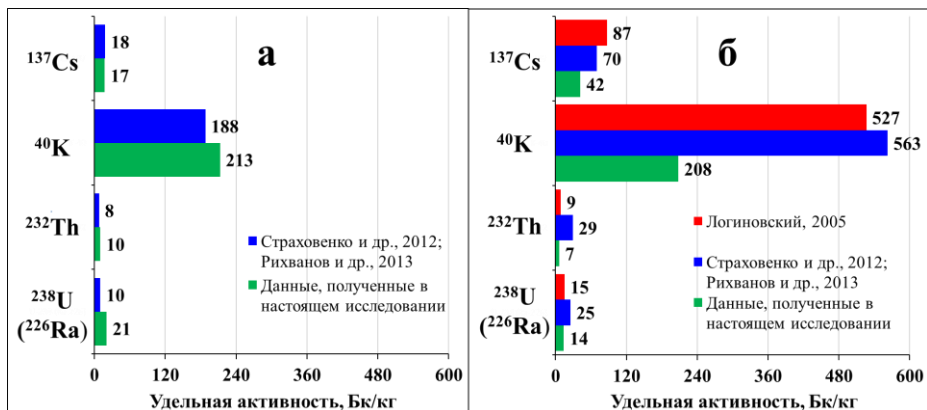


Рис. 16 – Средние содержания  $^{238}\text{U}$  ( $^{226}\text{Ra}$ ),  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{40}\text{K}$  и  $^{137}\text{Cs}$  в почвах Арктического (а) и южного (б) регионов Западной Сибири



В настоящем исследовании образцы почв отбирали в местах отбора мхов и лишайников, полученные значений содержаний  $^{238}\text{U}$  ( $^{226}\text{Ra}$ ),  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{40}\text{K}$  и ( $^{137}\text{Cs}$ ) в них будут использоваться в качестве исходных данных для расчета мощности поглощенной дозы мхов и лишайников, связанных с внешним облучением.

Мощность поглощенной дозы внешнего облучения  $i$ -го объекта наземной экосистемы, находящегося на поверхности земли, от  $i$ -го радионуклида, рассчитывается для верхнего 30-ти см слоя почвы и оценивается при консервативном приближении как мощность дозы от полубесконечного источника [Beck et al, 1972; Saito, Jacob, 1995; Jibiri, 2001; Jibiri, Bankole, 2006], и представляется в виде [Радиоэкологическая ..., 2015]:

$$D_{S i,j}^{\text{внешн}} = 0,5 \times DCF_{S i,j}^{\text{внешн}} \times A_{\text{уд } i}^{\text{почва}} \times \alpha_j^{\text{поверх}} \times \tau, \quad (6.2)$$

где  $D_{S i,j}^{\text{внешн}}$  – мощность поглощенной дозы при внешнем облучении  $i$ -го объекта наземной экосистемы от  $j$ -го радионуклида, при нахождении на поверхности земли, мкГр/сут;

$DCF_{S i,j}^{\text{внешн}}$  – фактор дозовой конверсии для внешнего облучения  $i$ -го объекта наземной экосистемы от  $j$ -го радионуклида, (мкГр/ч)/(Бк/кг);

$A_{\text{уд } i}^{\text{почва}}$  – удельная активность  $i$ -го радионуклида в почве, Бк/кг;

$\alpha_j^{\text{поверх}}$  – доля времени, которую  $j$ -й организм наземной экосистемы проводит на поверхности загрязненной почвы;

$\tau$  – переводной коэффициент, равный 24 (мкГр/сут)/(мкГр/ч).

Мощность поглощенной дозы, связанная с внутренним облучением ( $D_{i,j}^{\text{внутр}}$ , мкГр/сут)  $i$ -го объекта наземной биоты от  $j$ -го радионуклида, находящегося внутри организма, рассчитывали по формуле:

$$D_{i,j}^{\text{внутр}} = DCF_{i,j}^{\text{внутр}} \times A_{\text{уд } i,j}^{\text{внутр}} \times \tau, \quad (6.3)$$

где  $DCF_{i,j}^{\text{внутр}}$  – фактор дозовой конверсии для внутреннего облучения  $i$ -го объекта наземной экосистемы от  $j$ -го радионуклида, (мкГр/ч)/(Бк/кг сырого веса);

$A_{\text{уд } i,j}^{\text{внутр}}$  – удельная активность  $j$ -го радионуклида в организме  $i$ -го объекта наземной экосистемы, Бк/кг сырого веса;

$\tau$  – переводной коэффициент, равный 24 (мкГр/сут)/(мкГр/ч).

В качестве исходных использовались усредненные данные мониторинга за 2017-2021 гг., полученные в настоящем исследовании, а также данные из работ [Malikova et al., 2019] и [Мезина, Мельгунов, 2022]. Рассчитанные значения содержаний радионуклидов в компонентах наземных экосистем были получены для сухой массы мха и лишайника, поэтому для пересчета их на сырую массу использовались данные о процентном содержании сухой массы в растениях, приведенные в компьютерной программе ERICA Assessment Tool версии 1.3.1.51.

$$A_{\text{уд}}^{\text{внутр}} = 0,36 \times A_{\text{сух}}, \dots \dots \dots (6.4)$$

где  $A_{\text{сух}}$  – удельная активность радионуклида, Бк/кг сухого веса.

Наиболее опасным, создающим основную дозовую нагрузку при внутреннем облучении, является  $\alpha$ -излучение. Особенности морфологического строения и способа питания преимущественно за счет поступления минеральных веществ из

атмосферы, приводят к накоплению  $^{210}\text{Pb}$  в значительных количествах в лишайниках и мхах (~ 140-270 Бк/кг сырого веса). Учитывая это, следует ожидать наличия радиоактивного равновесия между  $^{210}\text{Pb}$  и его дочерним продуктом  $^{210}\text{Po}$ , имеющим период полураспада 138 дней.  $^{210}\text{Po}$  является  $\alpha$ -излучателем. Поскольку его предполагаемая активность сравнима с активностью  $^{210}\text{Pb}$  и значительно превосходит активности других радионуклидов (< 5 Бк/кг сырого веса), распадающихся по схеме альфа-распада, его можно считать основным дозообразующим  $\alpha$ -излучателем при внутреннем облучении мхов и лишайников.

В соответствии с формулами 6.1-6.3 были рассчитаны суммарные мощности поглощенной дозы, включающей внутреннее и внешнее облучения, лишайников и мхов, отобранных на территории Арктического и южного регионов Западной Сибири. Суммарная мощность поглощенной дозы, формируемая за счет внутреннего и внешнего облучения лишайника, произрастающего на территории Алтайского края и ЯНАО, в среднем составляет 18,5 и 13,5 мкГр/сут соответственно. Эта величина для мха, произрастающего на территории Алтайского края и ЯНАО, составляет 25,4 и 19,9 мкГр/сут соответственно.

Мощность поглощенной дозы, связанная с внутренним облучением лишайника и мха, составляет 98-99%, а доля внешнего облучения значительно ниже и составляет 1-2%.

На рис. 17 представлен вклад отдельных радионуклидов в мощность поглощенной дозы лишайника и мха, произрастающих на территории Арктического и южного регионов Западной Сибири. Наиболее опасным, создающим основную дозовую нагрузку при внутреннем облучении лишайников и мхов, является  $\alpha$ -излучение, вклад которого составляет 94%. Из исследуемых радионуклидов,  $^{210}\text{Po}$  является  $\alpha$ -излучателем, его вклад составляет 80-81%. Вклад других  $\alpha$ -излучающих радионуклидов таких, как  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  и их дочерних радионуклидов ( $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{228}\text{Th}$ ,  $^{230}\text{Th}$ ,  $^{234}\text{U}$ ) составляет 13,0-13,9%. Вклад  $\beta$ -,  $\gamma$ -излучающих радионуклидов ( $^{40}\text{K}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{210}\text{Pb}$ ) в суммарную мощность внутреннего облучения лишайника незначителен и составляет 6%.

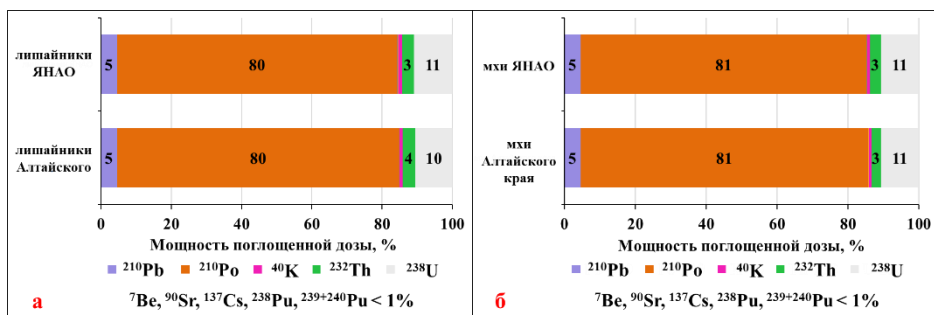


Рис. 17 – Вклад радионуклидов в суммарную мощность поглощенной дозы лишайников (а) и мхов (б) Арктического и южного регионов Западной Сибири

Расчётные оценки суммарной мощности поглощенной дозы облучения лишайников и мхов Арктического и южного регионов Западной Сибири,

полученные на основе данных мониторинга радиационной обстановки, значительно ниже критериев безопасного уровня облучения (БУОБ) 1-10 мГр/сут. В рамках проекта ERICA был рекомендован БУОБ для всех групп организмов равный 10 мкГр/ч (0,24 мГр/сут).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для территории Арктического региона Западной Сибири в зимний период 2018-2019 гг средние удельные активности  $^{210}\text{Pb}$ ,  $^7\text{Be}$  и  $^{137}\text{Cs}$  в снеговых водах составили 104 (71-140); 248 (148-358) и 0,9 (0,1-1,8) мБк/л при их интегральном поступлении в составе «мокрых» и «сухих» выпадений 25 (12-51); 59 (27-119) и 0,2 (0,1-0,4) Бк/(м<sup>2</sup>×сезон) соответственно. За этот же период для территории южного региона Западной Сибири средние удельные активности  $^{210}\text{Pb}$ ,  $^7\text{Be}$  и  $^{137}\text{Cs}$  в снеговой воде составили 182 (99-281); 276 (136-450) и 0,8 (0,3-1,2) мБк/л при их интегральном поступлении 25 (8-47); 38 (10-75) и 0,1 (0,0-0,2) Бк/(м<sup>2</sup>×сезон) соответственно. Эти результаты наравне с многолетними наблюдениями в южном регионе показывают, что поток осадения  $^{137}\text{Cs}$  на территории Западной Сибири не превышает 1 Бк/(м<sup>2</sup>×сезон), что свидетельствует о незначительных его современных поступлениях из атмосферы.

Исследование распределения  $^{210}\text{Pb}$  и  $^7\text{Be}$  по фракциям взвешенного и растворенного вещества снеговых вод показало, что  $^7\text{Be}$  преимущественно связан с растворенным веществом снеговых вод, а  $^{210}\text{Pb}$  со взвешенным веществом.

Наличие рядом техногенного источника, вносящего дополнительный объем пылевой и аэрозольной компоненты, приводит к резкому возрастанию вклада крупнозернистой фракции взвешенного вещества в общей активности  $^7\text{Be}$ . Индикатором подобного воздействия является  $^7\text{Be}/^{210}\text{Pb}$  отношение во взвешенном веществе снеговых вод, составляющее 0,5-0,7 для условно-фоновых районов и 1,1-1,8 вблизи источников повышенной техногенной нагрузки. Такая картина наблюдалась как в Арктическом, так и южном регионах Западной Сибири.

Потоки осадения  $^{210}\text{Pb}$  и  $^7\text{Be}$  в составе снеговых выпадений коррелируют с количеством осадков за сезон.

Изучено вертикальное распределение  $^{210}\text{Pb}$ ,  $^7\text{Be}$  и  $^{137}\text{Cs}$  в системах «лишайник/мох-лесная подстилка» и «мох-лесная подстилка» на территориях Арктического и южного регионов Западной Сибири. Самые высокие накопленные запасы  $^{210}\text{Pb}$  и  $^{137}\text{Cs}$  наблюдаются в слое лесной подстилки. Для  $^7\text{Be}$  наблюдается обратная картина, он концентрируется в верхней части таллома лишайника и тела мха. Для Арктического региона в талломе лишайника наблюдаются более высокие запасы  $^{137}\text{Cs}$  и  $^7\text{Be}$  при их близких значениях для  $^{210}\text{Pb}$ . Существенное отличие наблюдается для слоя лесной подстилки. Для южного региона в ней характерны более высокие запасы как  $^{137}\text{Cs}$ , так и  $^{210}\text{Pb}$ .

Особенности вертикального распределения исследуемых радионуклидов в системе «мох-лесная подстилка» аналогичны системе «лишайник-лесная подстилка». Для мха характерно более плавное перераспределение  $^7\text{Be}$  по его телу, в отличие от таллома лишайника. Учитывая короткий период полураспада  $^7\text{Be}$ , такой характер вертикального распределения говорит о наличии его миграции по телу растений за счет промывки атмосферными водами. Причем, у мхов этот

процесс более выражен. Особенности вертикального распределения  $^{210}\text{Pb}$ ,  $^7\text{Be}$  и  $^{137}\text{Cs}$  значительно отличаются. Это определяется периодами полураспада этих радионуклидов и временными рамками их поступления из атмосферы.

В пределах исследованных территорий установлены современные уровни содержаний и запасов  $^{210}\text{Pb}$ ,  $^7\text{Be}$  и  $^{137}\text{Cs}$  в мохово-лишайниковом покрове Западной Сибири. Для южного региона характерны более высокие содержания  $^{210}\text{Pb}$  как в лишайниках, так и во мхах при близких значениях его региональных запасов. Для обоих регионов содержания  $^{210}\text{Pb}$  во мхах выше, чем в лишайниках в среднем на 32%. При близких значениях региональных содержаний  $^7\text{Be}$  для Арктического региона фиксируются его более высокие запасы – на 22% во мхах и 28% в лишайниках. Содержание  $^7\text{Be}$  в лишайниках и мхах коррелирует с количеством выпавших осадков. Усредненные значения удельных активностей  $^{137}\text{Cs}$  намного ниже, чем  $^{210}\text{Pb}$  и  $^7\text{Be}$ .

Суммарная мощность поглощенной дозы при внутреннем и внешнем облучении лишайника и мха, произрастающих на территории Алтайского края и ЯНАО, в среднем составила 13,5-18,5 и 19,9-24,4 мкГр/сут соответственно. Доля внутреннего облучения от суммарной мощности поглощенной дозы составила более 98%. Наиболее опасным, создающим основную дозовую нагрузку при внутреннем облучении лишайников и мхов, являлось  $\alpha$ -излучение, вклад которого составил 94%. Дозовая нагрузка, главным образом, обусловлена  $^{210}\text{Po}$  и составила более 79%. Расчётные оценки суммарной мощности поглощенной дозы облучения лишайников и мхов Арктического и южного регионов Западной Сибири, полученные на основе данных мониторинга радиационной обстановки, значительно ниже критериев безопасного уровня облучения.

### Список опубликованных работ по теме диссертации

#### *Статьи в рецензируемых журналах:*

1. **Mezina, K.**  $^7\text{Be}$ ,  $^{210}\text{Pb}_{\text{atm}}$  and  $^{137}\text{Cs}$  in snow deposits in the Arctic part of Western Siberia (Yamal-Nenets autonomous district) / K. Mezina, M. Melgunov, D. Belyanin // Atmosphere. – 2020. – Vol. 11. – № 8. – P. 825.
2. Vosel, Y. Accumulation of natural radionuclides ( $^7\text{Be}$ ,  $^{210}\text{Pb}$ ) and micro-elements in mosses, lichens and cedar and larch needles in the Arctic Western Siberia / Y. Vosel, D. Belyanin, M. Melgunov, S. Vosel, **K. Mezina**, M. Kropacheva, I. Zhurkova, B. Shcherbov // Environmental Science and Pollution Research. – 2020. – P. 1-13.
3. Belyanin, D. Radioisotope  $^7\text{Be}$ ,  $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{40}\text{K}$  in the needles of larch and cedar in the Novy Urengoy region (Arctic part of Western Siberia) / D. Belyanin, Y. Vosel, **K. Mezina**, M. Melgunov, M. Kropacheva, B. Shcherbov, M. Rubanov, I. Zhurkova // Applied Geochemistry. – 2020. – P. 104822.
4. Vosel, Y. Distribution of  $^{137}\text{Cs}$  in lichens, mosses and pine needles along the transect from the north to the south of Western Siberia / Y. Vosel, D. Belyanin, S. Vosel, M. Melgunov, **K. Mezina**, B. Shcherbov // Science of The Total Environment. – 2021. – P. 147874.
5. Леонова, Г. А. Природные радиоизотопы и  $^{137}\text{Cs}$  в разрезе Шерстобитовского верхового болота Барабинской лесостепи (Западная Сибирь) / Г. А. Леонова, М. С. Мельгунов, **К. А. Мезина**, А. Е. Мальцев, Ю. И. Прейс // Геология и

минерально-сырьевые ресурсы Сибири. – 2021. – С. 96-109.

6. Leonova, G. A. Natural and manmade ( $^{137}\text{Cs}$ ) radioisotopes in Holocene sequence of the Sherstobitovsky raised bog in the Barabinsk forest-steppe (West Siberia) / G. A. Leonova, M. S. Melgunov, **K. A. Mezina**, Y. I. Preis, A. E. Maltsev, A. S. Shavekin, M. V. Rubanov // Applied Geochemistry. – 2022. – Vol. 140. – P. 105258.

**Публикации в иных изданиях:**

1. **Mezina, K.**  $^7\text{Be}$ ,  $^{210}\text{Pb}$  and  $^{137}\text{Cs}$  in atmospheric deposition of Southern and Arctic regions of Western Siberia / K. Mezina, M. Melgunov, D. Belyanin // RAD Conference Proceeding. – 2020. – Vol. 4. – P.161-166.

2. Melgunov, M. Radioactive elements in atmospheric precipitations of the Western Siberia / M. Melgunov, **K. Mezina**, B. Sherbov, Y. Vosel, I. Zhurkova, D. Belyanin // E3S Web of Conferences. – 2019. – Vol. 98. – P. 10003.

3. Belyanin, D. Sources and accumulation of  $^7\text{Be}$ ,  $^{210}\text{Pb}$  and  $^{137}\text{Cs}$  isotopes in the annual needles of larch and cedar in Novy Urengoy region (Arctic part of Western Siberia) / D. Belyanin, Y. Vosel, **K. Mezina**, M. Melgunov, M. Kropacheva, B. Shcherbov, M. Rubanov, I. Zhurkova // E3S Web of Conferences. – 2019. – Vol. 98. – P. 12002.

**Избранные публикации в трудах конференций и сборниках тезисов:**

1. **Мезина, К. А.** Особенности поступления  $^7\text{Be}$  и  $^{210}\text{Pb}$  в различных ландшафтных зонах юга Западной Сибири / К. А. Мезина, М. С. Мельгунов // Строение литосферы и геодинамика: Материалы XXVIII Всероссийской молодежной конференции (Иркутск, 8-14 апреля 2019 г.). – Иркутск: Институт земной коры СО РАН, 2019. – С. 108-109.

2. **Мезина, К. А.** Сравнительный анализ характера поступления  $^7\text{Be}$ ,  $^{210}\text{Pb}$  и  $^{137}\text{Cs}$  в лишайниках, мхах и хвое Арктической и южной зонах Западной Сибири / К. А. Мезина, М. С. Мельгунов, Ю. С. Восель, Д. К. Белянин // Материалы двадцать пятой Всероссийской научной конференции студентов-физиков и молодых учёных ВНКФС-25 (Крым, 19-26 апреля 2019 г.). – Екатеринбург – Ростов-на-Дону-Крым: издательство АСФ России, 2019. – С. 458.

3. **Mezina, K.**  $^7\text{Be}$ ,  $^{210}\text{Pb}$  and  $^{137}\text{Cs}$  in the biogeocenosis components of the Arctic and southern zones of Western Siberia / K. Mezina, Y. Vosel, M. Melgunov, D. Belyanin, B. Shcherbov, I. Zhurkova, M. Rubanov // RAD 2019 Conference: Book of abstracts 7th international conference on radiation in various fields of research (Montenegro, 10-14 June 2019). – Niš, Serbia, RAD Centre, 2019. – P. 83.

4. **Mezina, K.** The concentrations of radioisotopes and trace elements in the annual cedar and larch needles in New Urengoy region (Arctic part of Western Siberia) / K. Mezina, D. Belyanin, Yu. Vosel, M. Melgunov, M. Kropacheva, B. Shcherbov, M. Rubanov, I. Zhurkova // Goldschmidt: Book of abstract international conference (Spain, Barcelona, 18-23 August 2019). – 2019.

5. **Мезина, К. А.**  $^7\text{Be}$ ,  $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  в атмосферных осадках на юге и севере Западной Сибири / К. А. Мезина, М. С. Мельгунов, Д. К. Белянин // Геология на окраине континента: Материалы I молодежной научной конференции-школы, приуроченной к 60-летию юбилею ДВГИ ДВО РАН (Владивосток, 14-19 сентября 2019 г.). – Владивосток: Издательство Дальневосточного федерального университета, 2019. – С. 128-130.

6. **Мезина, К. А.** Исследование радионуклидного состава снежного покрова Арктической части Западной Сибири ядерно-геофизическим методом / К. А. Мезина, М. С. Мельгунов, Д. К. Белянин // Актуальные проблемы геологии, геофизики и геоэкологии: Материалы XXXI молодежной научной школы-конференции, посвящ. памяти чл.-корр. АН СССР К.О. Кратца (Санкт-Петербург, 5-9 октября 2020 г.). – Санкт-Петербург: Своё издательство, 2020. – С. 185-188.
7. **Mezina, K.** Natural and artificial radioactivity of soil of the Arctic part of Western Siberia / K. Mezina, M. Melgunov, D. Belyanin // EGU General Assembly 2021 (19-30 April 2021). – Copernicus Meetings, 2021. – №. EGU21-16193.
8. **Мезина, К. А.** Pb-210 и Po-210 во мхах и лишайниках Западной Сибири / К. А. Мезина, М. С. Мельгунов // Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека: Материалы VI Международной конференции (Томск, 20-24 сентября 2021 г.). – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2021. – Т. 2. – С. 142-146.
9. Мельгунов, М. С. Влияние процедуры озоления на правильность определения удельных активностей  $^{210}\text{Pb}$ ,  $^7\text{Be}$  и  $^{137}\text{Cs}$  в лишайниках и мхах / М. С. Мельгунов, **К. А. Мезина** // Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека: Материалы VI Международной конференции (Томск, 20-24 сентября 2021 г.). – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2021. – Т. 2. – С. 147-156.
10. **Мезина, К. А.** Радиоактивные элементы во мхах и лишайниках юга и севера Западной Сибири / К. А. Мезина, М. С. Мельгунов // Современные направления развития геохимии: Материалы Всероссийской конференции (с участием зарубежных ученых), посвященной 65-летию Института геохимии им. А.П. Виноградова и 105-летию со дня рождения академика Л.В. Таусона (Иркутск, 21-25 ноября 2022). – Иркутск: Изд-во Института географии им. В.Б. Сочавы СО РАН, 2022. – Т. 2. – С.50-52.
11. **Мезина, К. А.** Распределение  $^{210}\text{Pb}$ ,  $^7\text{Be}$  и  $^{137}\text{Cs}$  в системе «лишайник – лесная подстилка» на примере южной части Западной Сибири // К. А. Мезина, М. С. Мельгунов / Строеие литосферы и геодинамика: Материалы XXX Всероссийской молодежной конференции (Иркутск, 16-21 мая 2023 г.). – Иркутск: Институт земной коры СО РАН, 2023. – С. 158-161.
12. **Мезина, К. А.**  $^7\text{Be}$ ,  $^{210}\text{Pb}$  и  $^{137}\text{Cs}$  в снеговых отложениях южной части Западной Сибири // К. А. Мезина, М. С. Мельгунов / Строеие литосферы и геодинамика: Материалы XXX Всероссийской молодежной конференции (Иркутск, 16-21 мая 2023 г.). – Иркутск: Институт земной коры СО РАН, 2023. – С. 162-165.
13. Мельгунов, М. С. Бериллий-7 как индикатор миграции атмосферного вещества по таллому лишайника *Cladonia Stellaris* // М. С. Мельгунов, **К. А. Мезина**, А. А. Ломова / Эволюция биосферы, биогеохимические циклы и биогеохимические технологии: связь фундаментальных и прикладных исследований: Материалы XIII Международной биогеохимической школы-конференции, посвященной 160-летию со дня рождения В. И. Вернадского (Пушино, 25-28 сентября 2023 г.). – Пушино: Товарищество научных исследований КМК, 2023. – С. 87-90.

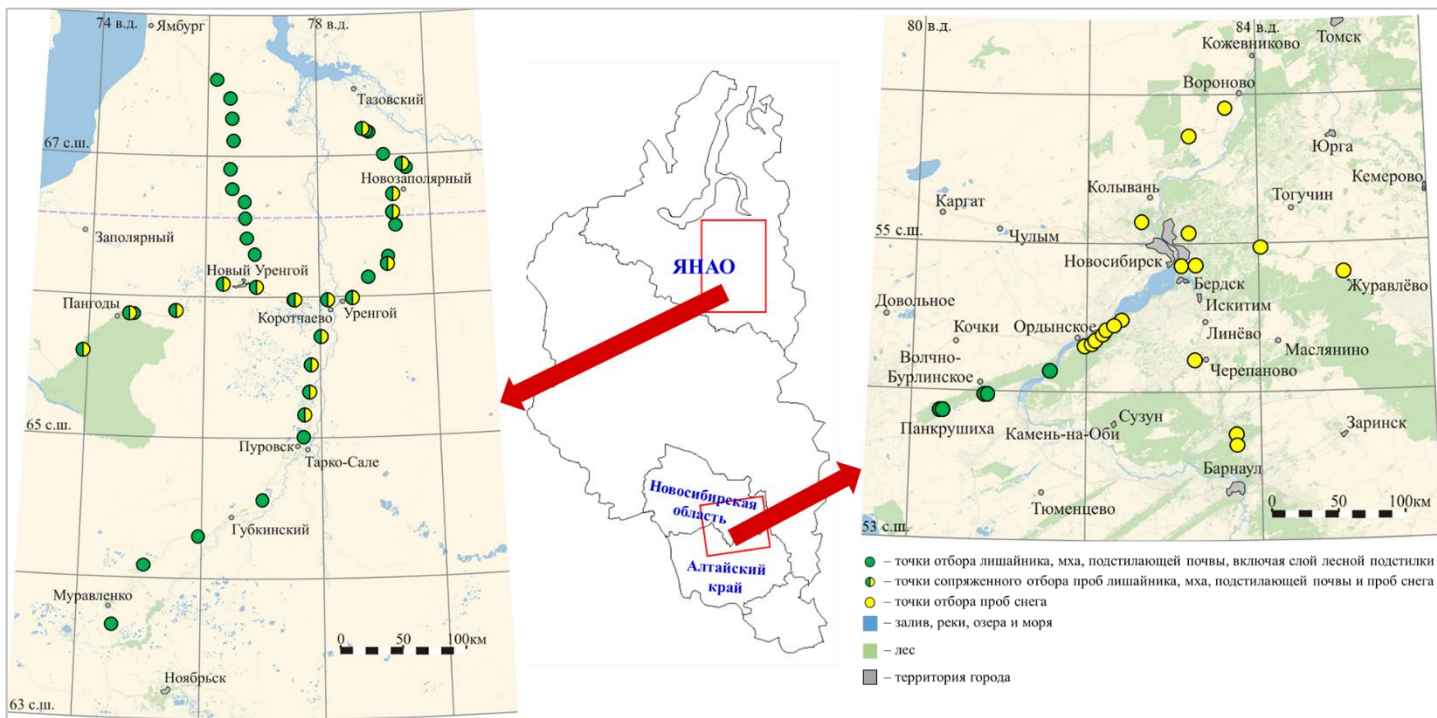


Рис.1. Карта-схема районов исследования на территории Арктического и южного регионов Западной Сибири