

На правах рукописи

Карл Лидия Эдуардовна

**РАДИОЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ЗАЩИТА НАСЕЛЕНИЯ НА
ПОТЕНЦИАЛЬНО РАДОНООПАСНЫХ ТЕРРИТОРИЯХ**

1.5.15. Экология

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата биологических наук

Москва, 2024

Работа выполнена в департаменте экологии человека и биоэлементологии института экологии Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы» (РУДН)

Научный руководитель: **Лашенцова Татьяна Николаевна**, доктор биологических наук, профессор департамента экологии человека и биоэлементологии Института экологии РУДН, профессор кафедры радиационной медицины МБУ ИНО ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России

Официальные оппоненты: **Панов Алексей Валерьевич**, доктор биологических наук, профессор Российской академии наук, И.о. директора Обнинского института атомной энергетики — филиал федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

Лукашенко Сергей Николаевич, доктор биологических наук, главный научный сотрудник лаборатории радиохимии и аналитической химии Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии»

Ведущая организация:

Федеральное бюджетное учреждение науки «Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева» Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека.

Защита состоится «25» июня 2024 г. в 16:00 часов на заседании диссертационного совета ПДС 0800.002 на базе РУДН (115093, г. Москва, Подольское шоссе, д. 8/5, к. 1096).

С диссертацией можно ознакомиться на сайте <https://www.rudn.ru/science/dissovet> и в Учебно-научном информационном библиографическом центре Российского университета дружбы народов им. Патриса Лумумбы по адресу: 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6.

Автореферат разослан « ____ » _____ г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
ПДС 0800.002

Аникина Елизавета Вячеславовна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Наибольший вклад в суммарную годовую эффективную дозу облучения (СГЭД) населения вносят природные источники ионизирующего излучения, основным из которых является газ радон (^{222}Rn) и его дочерние продукты распада (ДПР). Основными путями поступления ^{222}Rn в воздух помещений являются грунты, содержащие естественные радионуклиды (ЕРН), геологические разломы на территории, а также строительные материалы. ^{222}Rn переносится в грунте за счет механизмов диффузии и конвекции, поступает в приземный слой атмосферного воздуха, затем в помещения, если имеются нарушения в герметичности перекрытий, перемещается по высоте зданий по вентиляционным системам конвективными потоками. ^{222}Rn при распаде в воздухе испускает α -частицы с энергией 5,49 МэВ, которые сорбируются твердыми частицами пыли, образуя радиоактивные аэрозоли, которые формируют радиационную нагрузку при вдыхании. Эпидемиологические исследования, проведенные в ряде стран мира, доказали, что ^{222}Rn , как потенциальный инициатор рака лёгких, стоит на втором месте после курения (*BEIR VI, 1999; UNSCEAR, 2000*).

Степень разработанности темы. Международное сообщество в лице МАГАТЭ, ВОЗ, МКРЗ уделяет огромное внимание этой проблеме, инициирует исследования в разных странах (*Cohen B. L., 1986; Castren O., 1992; Åkerblom G., 1993; Lubin J.H., 1997, 2004; Andersen C. E., 2001; Darby S., 2005, 2006 и др.*). Эти работы показали условия превышения допустимого ограничения дозы для населения в жилых и общественных зданиях, при вдыхании атмосферного воздуха, содержащего ^{222}Rn . В России изучением уровней облучения населения ^{222}Rn занимаются организации в разных ведомствах: Роспотребнадзор, ФМБА России, Росатом, РАН и многие другие. Исследования ведущих российских ученых (*Крисюк Э.М., 1985; Стамат И.П., 2014; Онищенко Г.Г.; Романович И.К., 2014; Маренный А.М., 2015, 2019; Микляев П.С., 2015; Ярмошенко И.В., 2015; Жуковский М.В., 2016, 2022; Барковский А.Н., 2021; Панов А.В., 2023 и др.*) показали вклад ^{222}Rn и его ДПР в облучение населения в разных регионах России. Вклад может быть существенным в формирование дозы внутреннего облучения, и иногда достигать величины 80% от СГЭД облучения. Эти работы позволили выявить потенциально радоноопасные территории, отличающиеся как природным, так и техногенным происхождением, которые возникли при создании ряда отраслей промышленности и военно-промышленного комплекса, привели к формированию когорты населения, проживающего в районе их расположения. У населения, проживающего в этих регионах, у персонала, работающего на таких предприятиях, и в окружающей среде на загрязнённых территориях, формируется дозовая нагрузка за счет ЕРН, которую важно оценить для соблюдения требований радиационной безопасности. Защита населения может решаться путем проведения

комплексной оценки состояния территорий, в зависимости от радиоэкологического состояния территории, и проведения оценки потенциальной опасности, основой для принятия управленческих решений (Коренков И.П. 2008, 2009, 2014, 2018, 2021; Лащенкова Т.Н., 2008, 2014, 2016-2018, 2021).

Потенциально радоноопасные территории могут располагаться в регионах с разной геологической структурой, в разных природных зонах, отличаться физико-географическими характеристиками, соответственно обладать разными исходными условиями для формирования повышенной радоноопасности. В данной работе в качестве объектов мониторинга выбрали территории в разных районах расположения: предприятие по добыче золота и монацита (города Бaley, Забайкальского края) и предприятие по добыче урана ЛПО Алмаз (Лермонтов Ставропольского края), которые давно выведены из эксплуатации. Исследования этих объектов наследия после реабилитации проводились в разные годы, последние публикации (Карпенко Е.И. 2012, 2020; Шандала Н. К., 2017; 2019; Панов А. В., 2023 и др.) описывают состояние территории в настоящем.

Исследования по влиянию ЕРН, в том числе и ^{222}Rn и его ДПР, на здоровье населения позволили выявить, что существуют отличия от фоновых региональных показателей заболеваемости, которые достоверно показаны в работах (Пахолкина О.А., 2011; Карпенко Е.И., 2012; Шандала Н.К., 2019; Лягинская А.М., 2021 и др.). Радиоэкологическая оценка состояния территории за счет ЕРН является основой для снижения дозовой нагрузки, и является решением важной актуальной научно-квалификационной задачи для защиты населения, которая решается в данной работе. Существующая опасность для проживания населения на потенциально радоноопасных территориях зависит от радиоэкологических параметров, характеризующих территории, и геологического строения территории, требует радиоэкологической защиты путем оценки потенциальной опасности по радиационному фактору.

В настоящее время самым надежным инструментом оценки опасности загрязнения окружающей среды, в том числе и радиоактивного, является оценка риска. Методы оценки риска для здоровья человека от воздействия ^{222}Rn и его ДПР научно обоснованы и хорошо проработаны, существуют разные модели (Радон-2014, ЕРА-2003, Tomasek-2014, Wismut-2018, BEIR VI, и др.). В этом направлении проводятся научные исследования (Демин В.Ф., 2015; Жуковский М.В., 2017; Онищенко А.Д., 2021 и многие др.).

Для оценки потенциального риска в России на данный момент разработано несколько методик в ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева (МР 2.6.1.0145-19; МР 2.6.1.0172-20), однако единых методологических подходов оценки степени опасности за счет поступления ^{222}Rn и его ДПР не существует.

Содержание ^{222}Rn в воздухе помещений зданий разного назначения нормируется в единицах эквивалентной равновесной объемной активности радона (ЭРОA_{Rn}), которая выражает соотношение объемных активностей ^{222}Rn (OA_{Rn}) и его ДПР через безразмерный коэффициент равновесия F . Существуют проблемы в его оценке, которые существенно влияют на оценку величины СГЭД за счет поступления ^{222}Rn . Коэффициент равновесия F выражает соотношение объемных активностей ^{222}Rn и его ДПР и в среднем варьируется от 0,2 до 0,7 в зависимости от разных факторов, определяющих скорость удаления ДПР воздуха из помещений (Ярмошенко И.В., 2015; Гулабянц Л.А., 2020 и др.).

Такой принцип нормирования связан с тем, что основную часть дозы внутреннего облучения ^{222}Rn формируют его ДПР изотопы ^{214}Bi и ^{214}Pb (Публикации МКРЗ 65,115,126; Демин В.Ф., 2012, Жуковский М.В., 2021). F может определяться инструментально, однако при проведении широкомасштабного мониторинга зачастую такая возможность отсутствует, в этом случае F в международных документах принимается равным 0,4, а в Российских – 0,5 (UNSCEAR, 2000; UNSCEAR, 2006). Различие связано с географическими и климатическими особенностями, а также с условиями режима проветривания помещений в России (Кирдин И. А., 2003). Актуальность решения этих проблем требует унификации подходов и совершенствования нормативно-правового обеспечения по ограничению природного облучения.

Исходя из этого, **целью работы** является разработка критериев радиозоологической защиты населения на потенциально радоноопасных территориях.

Для достижения этой цели были поставлены и решены **следующие задачи**:

1. Выявить закономерности поступления ^{222}Rn в помещения жилых и общественных зданий на потенциально радоноопасных территориях;
2. Разработать радиозоологические критерии оценки степени потенциальной радоноопасности территории;
3. Выявить корреляционные зависимости между радиозоологическими критериями оценки степени потенциальной радоноопасности территории и параметрами контроля территории при радиозоологическом мониторинге;
4. Разработать систему типирования территории по потенциальной радоноопасности;
5. Разработать предложения по совершенствованию нормативно-правовой базы по ограничению природного облучения в Российской Федерации.

Объекты мониторинга. В качестве объектов мониторинга выбрали территории проживания населения в районе расположения двух объектов ядерного наследия, которые расположены в разных регионах России: предприятия по добыче

золота и монацита (город Балей Забайкальского края) и территория предприятия по добыче урана ЛПО «Алмаз» (город Лермонтов Ставропольского края).

Объектом исследования являются воздух помещений жилых зданий и детских учреждений на территории проживания населения на потенциально радоноопасных территориях.

Предметом исследования является объемная активность ^{222}Rn в воздухе помещений жилых и общественных зданий и удельное содержание природных радионуклидов в почвах и грунтах.

Научная новизна

1. Впервые установлены закономерности поступления и распределения ^{222}Rn в помещения зданий, которые показали, что референтным показателем является объемная активность ^{222}Rn на первых этажах зданий с нарушениями в перекрытиях;

2. Впервые разработаны радиоэкологические критерии оценки степени потенциальной радоноопасности территории в зависимости от содержания ^{222}Rn и его ДПР в помещениях на 1 этажах зданий с нарушениями в перекрытиях;

3. Впервые разработаны корреляционные зависимости между объемной активностью ^{222}Rn и его ДПР в помещениях на 1 этажах зданий с нарушениями в перекрытиях и плотностью потока ^{222}Rn (ППР), содержанием природных радионуклидов в горных породах вблизи здания, а также геологических характеристик территории;

4. Впервые разработана система оценки степени потенциальной опасности территории по радиоэкологическим критериям, в зависимости от ППР и содержания ^{226}Ra в горных породах, которые пропорционально определяют объемную активность ^{222}Rn и его ДПР в помещениях на 1 этажах зданий с нарушениями в перекрытиях;

5. Впервые на основе корреляционно - регрессионного анализа данных предлагаются референтные параметры контроля на потенциально радоноопасной территории для регулирования защиты населения.

Теоретическая и практическая значимость

Результаты исследования позволяют расширить теоретическое представление и практическую реализацию в способах защиты населения на потенциально радоноопасных территориях. Разработаны и утверждены Методические указания МУ 2.6.062 – 2017 «Углубленное обследование объектов с высокими уровнями содержания радона в помещениях». Получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ: Специализированное программное обеспечение «Радон-Lab» (RU2021665443). Результаты исследования использованы в учебном процессе института экологии РУДН в рамках курса «Радиационная безопасность территорий».

Основные положения, выносимые на защиту

1. Закономерности поступления радона в помещения зданий определяются содержанием природных радионуклидов в горных породах, показателями радиационной обстановки, характеризующими территорию, и геологическим строением территории, референтным показателем является объёмная активность радона на первых этажах зданий с нарушениями в перекрытиях;

2. Радиоэкологические критерии оценки степени потенциальной радоноопасности территории в зависимости от содержания ^{222}Rn и его ДПР в помещениях на 1 этажах зданий с нарушениями в перекрытиях; степень опасности определяется содержанием ^{226}Ra или $A_{\text{эфф}}$ в горных породах и поверхностных отложениях;

3. Уравнение регрессии, которое описывает зависимость объёмной активности ^{222}Rn и его ДПР в помещениях на 1 этажах зданий с нарушениями в перекрытиях от ППР на территории, содержания природных радионуклидов в горных породах вблизи здания, а также геологических характеристик территории, позволяет прогнозировать потенциальную опасность территории;

4. Система типирования территории, в зависимости от содержания природных радионуклидов в горных породах (^{226}Ra или $A_{\text{эфф}}$), формирующих на территории ППР и МАЭД ГИ; позволяющая установить требования к зданиям в зависимости от стадии эксплуатации: проектируемые, эксплуатируемые, аварийные;

5. Референтные параметры контроля на потенциально радоноопасной территории для регулирования защиты по содержанию ^{226}Ra для проектируемых зданий до 40, эксплуатируемых - от 40 до 85 и для аварийных - выше 85 Бк/кг, которые будут формировать ЭРОА_{Rn} в помещениях 100, от 100 до 200, выше 200 Бк/кг.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности

Диссертационная работа соответствует паспорту специальности 1.5.15. Экология по пунктам: п.10. Антропогенное воздействие на популяции, сообщества и экосистемы. Биологические эффекты загрязнения среды токсичными веществами (экотоксикология). Разработка биологических методов и критериев оценки состояния среды, биоиндикация, биотестирование, биомониторинг. Разработка экологически обоснованных норм воздействия хозяйственной деятельности человека на живую природу; п.12. Экологические принципы охраны природы на популяционно-видовом и экосистемном уровнях.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 22 работы, из них 4 статьи в журналах, индексируемых международными базами данных (Scopus, Web of Science), из них 2 статьи в рецензируемых ВАК журналах; 11 тезисов докладов на российских и международных научных конференциях); получено 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы доложены и обсуждены на следующих российских, международных конференциях и симпозиумах: IAEA Virtual Event - Regional Workshop for Good Laboratory Practice in the Measurement of Radon and Inter-Comparison Exercise for Passive Measurements and Quality Assurance in Measurement of Radon (2020, Германия); Ninth international conference on radiation in various fields of research RAD 2021 (2021, Черногория); IAEA Virtual Event - Training Course on Good Laboratory Practice in the Measurement of Radon and Proficiency Testing Exercise for Passive Radon Detectors (2021, Австрия); II Национальный конгресс с международным участием по экологии человека, гигиене и медицине окружающей среды «Сысинские чтения – 2021» (2021, Москва); Всероссийский симпозиум и школа-конференция молодых ученых «Физико-химические методы в междисциплинарных экологических исследованиях» (2021, Севастополь); VIII Съезд по радиационным исследованиям (2021, Москва); Конференции молодых учёных с международным участием «Ильинские чтения 2018», «Ильинские чтения 2019», «Ильинские чтения 2021», «Ильинские чтения 2022» (2018, 2019, 2021, 2022, Москва); XXIV Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов» (2017, 2018, 2019, 2020, Москва); IX Российская конференция с международным участием «Радиохимия 2018», «Радиохимия 2022» (2018, 2022, Санкт-Петербург); V Международная (XVIII Региональная) Научная конференция «Техногенные системы и экологический риск» (2022, Обнинск).

Личный вклад автора. При планировании, организации и проведении исследований по всем разделам и этапам работы доля участия автора составила 80 %. Анализ полученных материалов и обобщение результатов исследований полностью проведены автором.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 6 глав, заключения, выводов, списка использованных источников, 4 приложений. Работа изложена на 170 страницах машинописного текста, включая 29 таблиц и 42 рисунков. Список использованных источников содержит 166 источников, из них 41 зарубежных.

Все материалы, представленные в данной работе, получены в рамках темы НИР ФГУП Научно-технического центра радиационно-химической безопасности и гигиены ФМБА России: «Разработка и научное обоснование мероприятий по контролю и снижению загрязнения среды природными или техногенно-сконцентрированными альфа-нуклидами на территориях прошлых мест добычи и переработки урановых руд и других объектов ядерного наследия» с 2009 по 2018 годы; а также в рамках диссертационного исследования Карл Л.Э. при поддержке гранта РФФИ «№20-38-90291 с 2020 по 2022 годы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертации, поставлена цель и определены задачи работы, представлены научная новизна и практическая значимость работы, сформулированы основные положения, выносимы на защиту. Представлена информация о личном вкладе автора и апробации результатов.

Первая глава представляет собой обзор литературных данных, касающихся проблемы облучения населения ^{222}Rn и его ДПР на территориях с повышенной потенциальной радоноопасностью. Глава состоит из семи разделов. В 1 разделе описываются риски для населения при облучении ^{222}Rn и его ДПР, структура облучения населения в РФ, выделяются существующие проблемы, во 2 и 3 разделе описывается как формируется естественный радиационный фон территории; геохимические особенности природных радионуклидов ^{222}Rn , ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{238}U и механизмы формирования выхода ^{222}Rn на земную поверхность, определяется понятие потенциально радоноопасной территории. В 4 разделе рассматривается нормативно-правовое регулирование. В 5 разделе описываются источники воздействия ^{222}Rn . В 6 - приводится анализ существующих методов оценки потенциальной радоноопасности территории. В 7 разделе приводятся выводы по первой главе.

Во **второй главе** изложены методические аспекты работы и представлен объем исследования. Измерения OARn в помещениях зданий проводили интегральным методом с помощью комплекта аппаратуры ТРЕК-РЭИ-1М, диапазон измерений при экспозиции 90 суток от 20 до 2000 Бк/м³. Радиационное обследование территории проводили по показателю МАЭД ГИ с помощью дозиметра гамма-излучения «Дрозд» на высоте 0,1 м от поверхности почвы (диапазон измерений: от $1 \cdot 10^{-1}$ до 10^3 мкЗв/ч). Измерение ППР на открытой местности с поверхности грунта проводили с использованием измерительного комплекса для мониторинга радона «Камера01», диапазон измерений: $(3 - 1 \cdot 10^5 \text{ мБк/м}^2\text{с})$. Отбор проб почвы проводили по *ГОСТу 17.4.4.02-2017* на глубине 0,1-0,2 м, объем пробы составлял около 1 л. Измерение удельной активности радионуклидов проводили на стационарном гамма-спектрометрическом комплексе «РАДЭК» и гамма-спектрометрическом комплексе «Прогресс» Оба комплекса оснащены сцинтилляционными детекторами NaJ (Tl) 63X63 мм. Минимально измеряемая удельная активность составляет для ^{226}Ra – 8 Бк/кг, для ^{232}Th – 5 Бк/кг, для ^{40}K – 50 Бк/кг. Статистическую обработку данных проводили посредством ПО Microsoft Excel 2021 и Statistica 10, карты распределения показателей радиационной обстановки построили при помощи QGIS 3.20.

В качестве критерия оценки использовали значение эквивалентной равновесной объемной активности радона (ЭРОARn), значение которой нормируется п. 5.3.3. *НРБ-99/2009* и не должно превышать 200 Бк/м³ в

эксплуатируемых жилых помещениях и 100 Бк/м³ проектируемых. Значение ЭРОА_{Rn} рассчитывается из формулы:

$$\text{ЭРОА}_{Rn} = \text{ОА}_{Rn} \times F, \quad (1)$$

где ОА_{Rn} – измеренная объемная активность радона, Бк/м³; F - коэффициент радиоактивного равновесия между ²²²Rn и его ДПР, отн. ед.

Среднегодовое ЭРОА_{Rn} рассчитывали по МУ 2.6.1. 037 – 2015, расчет СГЭД_{Rn} проводили по МУ 2.6.1.2397- 08, индивидуальный пожизненный риск (ИПР) рассчитывали по МР 2.6.1.0145 – 19.

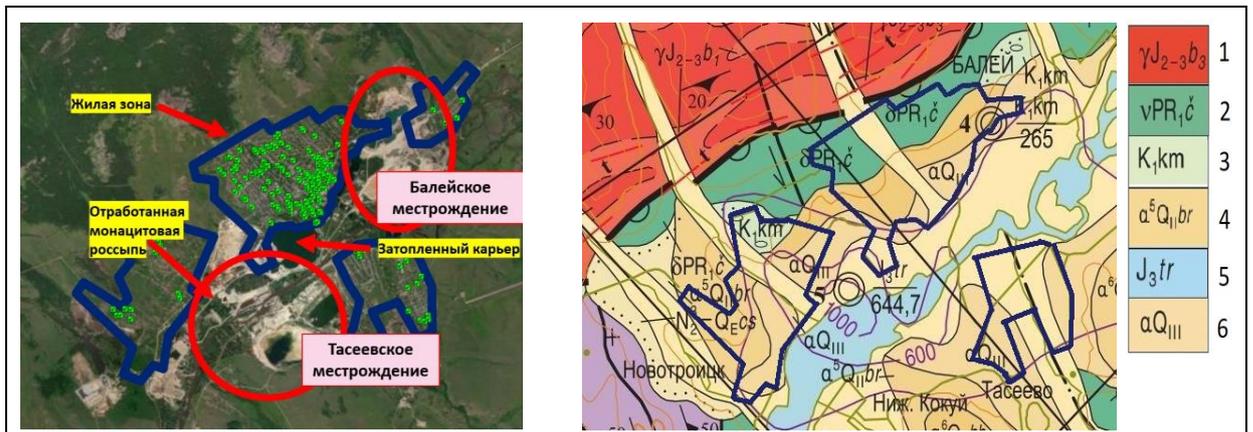
Объем исследования: ОА_{Rn} в помещениях общественных и жилых зданий в теплый и отопительный период, начиная с 2016 в городе Балей, Забайкальский край - 1296 изм., в городе Лермонтов - 3236 изм., также МАЭД ГИ – 165 изм.; ППР – 119 изм.; уд. активности ²²⁶Ra, ²³²Th, ⁴⁰K - 120 проб почвы и грунтов.

Результаты исследования

Территории городов Балей и Лермонтов расположены в разных природных зонах, отличающихся геологическим строением и физико-географическими характеристиками, соответственно условиями формирования радоноопасности. Объекты наследия расположены в непосредственной близости к жилой зоне городов. Деятельность предприятий привела к образованию хвостохранилищ, карьеров и отвалов, к изменению гидрологического режима и загрязнению территории природными радионуклидами ²³²Th и ²³⁸U при распаде которых образуются ^{220,222}Rn и их ДПР.

Город Балей, Забайкальский край. Предприятия «Балейзолото» и Новотроицкое рудоуправление занимались добычей золота и монацита, содержащего торий и уран, оказывая техногенное воздействие на территорию города. На рисунке 1 представлено пространственное расположение предприятий по территории и точек обследования на содержание ²²²Rn в помещениях общественных и жилых зданиях.

Детальный анализ геологического строения позволил разделить в зависимости от механического и минерального состава и физико-химических характеристик и выявить однотипные территории, определить какими горными породами представлена территория: тип 1 - осадочными породами в виде песчано-галечных отложений, галечников, супесей, суглинков, глин; тип 2 - осадочными породами в виде фангломератов, конгломератов, конгломерато-брекчий, песчаников, алевролитов; тип 3 - основными и ультраосновными магматическими породами, такими как габбро, пироксены, а также кварцевыми диоритами, габбродиоритами, диоритами.



Условные обозначения: 1 - Граниты двуслюдяные, мусковитовые, пегматоидные, жилы и дайки пегматитов, аплитов, гранитов; 2 - Габбро, пироксениты, кварцевые диориты, диориты, габбродиориты; 3 - Фангломераты, конгломераты, песчаники, алевролиты; 4 - Пески, песчано-галечные отложения; 5 - Конгломераты, туфоконгломераты, песчаники, алевролиты, андезиты, андезибазальты, трахиандезиты, трахиандези базальты и их туфы; 6 - Аллювиальные пески, галечники, песчано-валунно-галечные и гравийно-галечные отложения, суглинки, глины; 7 – очертание жилой зоны города Балей и близлежащих поселков.

Рисунок 1 - Характеризация пространственного распределения минеральных пород по территории проживания населения

На рисунке представлен фрагмент Государственной геологической карты масштабом 1:200 000, лист М-50-III (Рутштейн И. Г., 2000). Тип отложений на территории определяет скорость эксхалляции радона, на этих 3 территориях разная степень потенциальной опасности. Провели теоретический расчет удельного содержания ^{226}Ra для горных пород через коэффициент равновесия между ^{238}U и ^{226}Ra и массовое содержание ^{238}U в горных породах. Получили для каждого типа территории удельную активность ^{226}Ra , которая меняется от 0,4 до 85 Бк/кг. Провели радиоэкологическое обследование территории проживания населения в разных районах города Балей и окрестностей. Статистическая обработка данных показала, что значения OAR_n подчиняются логнормальному распределению, параметры распределения представлены в таблице 1.

Таблица 1 - Параметры распределения ЭРОА $_{Rn}$ (Бк/м 3) в помещениях общественных и жилых зданий на территории г. Балей, n = 1296 шт.

Этаж	n, шт.	СА	СГ	СО	Мин.	Макс.	Медиана*	ЭРОА $_{Rn}$ >200Бк/м 3	
								шт.	%
1	726	228	133	286	<10	2087	123 (102-144)	249	34
2	435	162	102	187	10	1130	92 (74-110)	109	25
3	111	122	91	97	19	551	88 (70-106)	21	19
4	22	47	45	13	15	69	48 (43-53)	0	0
Все этажи	1296	194	116	246	<10	2087	107 (94-120)	380	29

СА – среднее арифметическое; СГ – среднее геометрическое; СО – стандартное отклонение; * в скобках 95% доверительный интервал

ЭРОА $_{Rn}$ на всех этажах лежит в интервале 94-120 (med=107) Бк/кг, что не превышает 200 Бк/м 3 , снижается по мере увеличения этажа здания. На 1-х этажах –

102-144 (med=123) Бк/кг, при максимальном 2087 Бк/м³, что превышает норматив до 10 раз; на 2-х этажах - 74-110 (med=92) Бк/м³, на 3-х этажах – 70-106 (med=88) Бк/м³, превышении в отдельных помещениях от 2 до 5 раз. На 4-х этажах превышений нет.

Для оценки изменения содержания ²²²Rn в помещениях в зависимости этажа здания применили непараметрический дисперсионный анализ с использованием критерия Краскела-Уоллиса, который показал, что достигнутый уровень статистической значимости (p) составил <0,001 (H=52,91; N= 1296; df=3), что говорит о статистически значимой разнице для разных этажей. Для попарной проверки различий между этажами рассчитали критерий Манна-Уитни, результаты в таблице 2.

Таблица 2 – Критерии Манна-Уитни для независимых выборок значений ЭРОА_{Rn} в помещениях жилых и общественных зданий в городе Балей в зависимости от этажа

Группа этажей	N первая группа, шт	N вторая группа,шт	U	Z	p
1 и 2	726	435	133456	4,4	< 0,017
1 и 3	726	111	31934	3,5	< 0,017
2 и 3	435	111	23086	0,7	0,477

Выявили, что значения ЭРОА_{Rn} в помещениях на 1 этажах статистически значимо отличаются от других этажей, в них сосредоточено 65% превышений от общего числа измерений. Для выяснения причин провели исследование зависимости ЭРОА_{Rn} от типа здания, от вида строительного материала и этажности здания, результаты обработки данных в таблице 3.

Таблица 3 - ЭРОА_{Rn} в помещениях жилых и общественных зданий в городе Балей в зависимости от строительного материала и этажности зданий, n=1296изм.

Строительный материал	Кол-во этажей	Медиана ЭРОА _{Rn} , Бк/м ³		ЭРОА _{Rn} >200 Бк/м ³ на 1 этажах, %
		1 этаж	Верхние	
Дерево	1	105 (75-135)		27
	2	49 (15-83)	42 (24-60)	0
Кирпич	1	93 (48-138)		27
	2	130 (98-162)	105 (80-129)	42
	3	136 (60-211)	99 (78-120)	41
	4 и выше	58 (48-68)	48 (45-51)	0
Шлакоблок	1	213 (150-276)		55
	2	210 (142-277)	179 (142-216)	42
	3	87 (61-113)	43 (27-58)	0

Получили, что основные превышения сосредоточены на 1 этажах шлакоблочных одноэтажных зданий, деревянных одноэтажных и кирпичных 2,3-х

этажных. Все эти здания старого года постройки, без организованных подвалов, с нарушенными перекрытиями, что позволяет радону свободно поступать в здания, содержание которого на первых этажах напрямую характеризуют скорость его поступления из почвы. Превышения на верхних этажах связаны с использованием для строительства песок из отвалов горнодобывающего производства, содержащих высокие концентрации ^{238}U и ^{232}Th . Контроль строительных материалов по радиационному фактору в то время не был организован.

Результаты измерений ЭРОА_{Rn} в помещениях на 1-х этажах зданий с нарушенными перекрытиями нанесли на геологическую карту г. Балей (рисунок 2) и соотнесли с типом отложений, в зависимости от содержания ^{226}Ra .

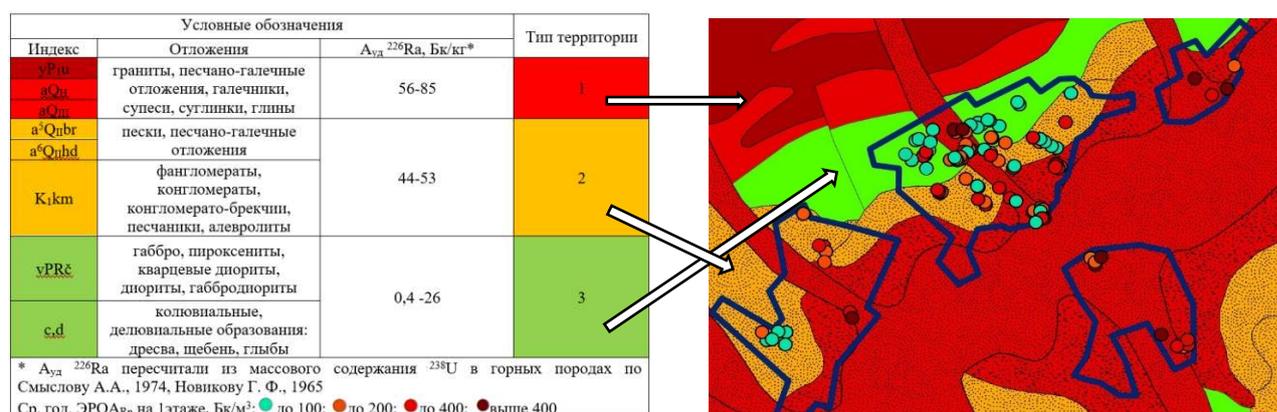


Рисунок 2 – Категорирование территории г. Балей по степени радоноопасности в зависимости от $A_{\text{уд}}^{226}\text{Ra}$

Пространственное распределение ^{226}Ra положили в основу деления территории по типам, по потенциальной радоноопасности, таблица 4.

Таблица 4 - Оценка степени опасности территории г. Балей для населения в зависимости от содержания ^{226}Ra в горных породах и поверхностных отложениях и содержания ^{222}Rn 1-х этажах зданий с нарушениями в перекрытиях, n=726 изм.

Тип территории	Медиана ЭРОА _{Rn}	$A_{\text{уд}}^{226}\text{Ra}$	СГЭД _{Rn} *	Степень радоноопасности территории**
Ед.изм	Бк/м ³	Бк/кг	мЗв/год	
1	198 (141-255)	85 и выше	12,6(9-16,3)	Высокая
2	111 (90-132)	36-85	7,1(5,8-8,5)	Повышенная
3	96 (74-118)	до 36	6,2(4,8-7,6)	Допустимая

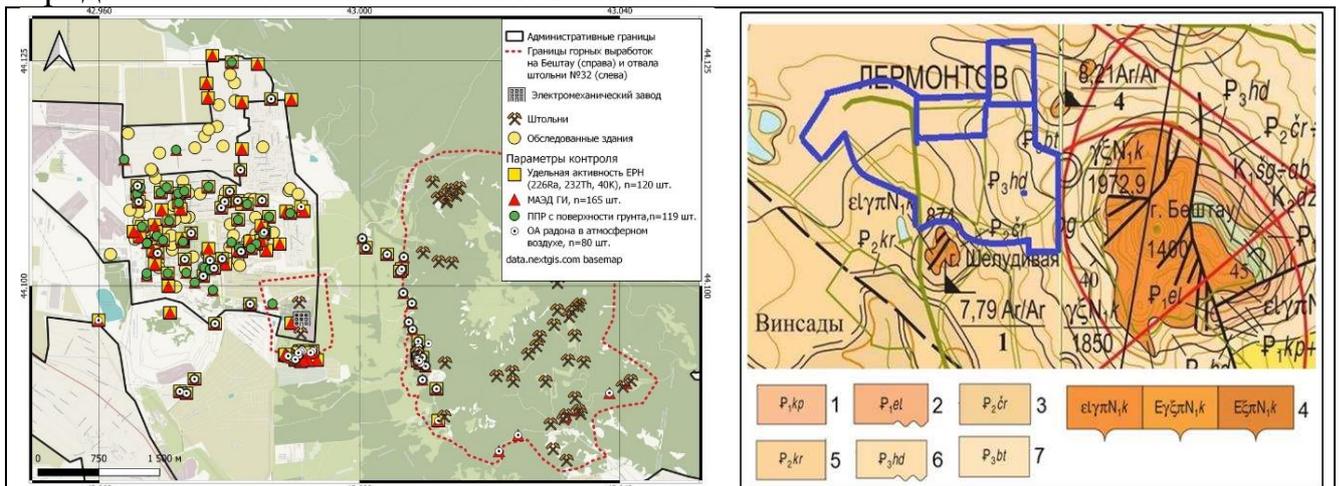
* СГЭД_{Rn} только за счет ^{222}Rn и его ДПР; ** - классификация по потенциальной опасности объектов, загрязненных природными радионуклидами, в зависимости от СГЭД, по ОСПОРБ-99/2010

Получили 3 типа территории, отличающихся геологическим строением и содержанием ^{226}Ra , оценили по консервативному сценарию СГЭД только за счет ^{222}Rn и его ДПР (СГЭД_{Rn}), сравнили с содержанием ^{226}Ra в почве, а расчетное СГЭД_{Rn} - с ограничением СГЭД_{Rn} по потенциальной опасности объектов, загрязненных природными радионуклидами (по ОСПОРБ-99/2010). При СГЭД_{Rn} >10 мЗв - высокая опасность проживания населения, 47 % зданий имеют такие

помещения, при $СГЭД_{Rn} > 15$ мЗв – отселение – для 23 % зданий нужен комплекс мероприятий по изменению ситуации.

Город Лермонтов, Ставропольский край. Предложенную систему типирования территории проверили на другом объекте, который обследован в работе более детально. ЛПО «Алмаз» осуществлял разработку урановых месторождений с 1949 года, после закрытия предприятия территория остается потенциально радоноопасная. Работы по ликвидации рудника и закрытию штолен и стволов выполняли по техническим решениям и в соответствии с нормативами того период, позже выявились технологические недостатки рекультивации. Время изменило состояние отвалов, дренажной системы, существует вероятность загрязнения близлежащих территорий.

Территория в зависимости от способа использования различается: жилая зона; зона отвала штольни №32, примыкающую вплотную к жилой зоне; территория горы Бештау, где имеются незакрытые штольни. Важно оценить степень влияния предприятия на жилую зону. На рисунке 3 карта района обследования, расположение пунктов контроля и геологическое строение территории г. Лермонтов, которое показало, что территория горы Бештау сложена бештаунитами, жилая зона - относительно слаборадиоактивными осадочными породами и аллювиальными отложениями.



Условные обозначения: 1 –глины, песчаники; 2 – мергели, глины, прослои песчаников; 3 – глины, алевролиты, мергели, прослои песчаников, известняков; 4 – гранит-порфиры, умереннощелочные гранит-порфиры, щелочные граносиенит-порфиры, щелочные сиенит-порфиры; 5 – известняки, мергели, прослои глин; 6 – глины, мергели, прослои известняков, алевролитов; 7 – глины, линзовидные прослои и линзы сидеритов, доломитов, мергелей.

Рисунок 3 – Геологическая характеристика территории для проживания населения, расположения предприятий, распределение точек контроля $ОА_{Rn}$, $n = 3236$ изм.

На рис.3 представлен фрагмент Государственной геологической карты масштабом 1:200 000, листы L38 XXXI, XXXII Детальное радиационное обследование территории провели по показателям МАЭД ГИ, ППР, содержание природных радионуклидов в горных породах и поверхностных отложениях, и определили $ОА_{Rn}$ в помещениях жилых и общественных зданий на территории проживания населения.

Провели статистическую обработку массива данных, которая показала логнормальный закон распределения данных. Полученные результаты измерения $ОА_{Rn}$ в помещениях зданий в зависимости от этажа и наличия подвала представлены в таблице 5.

Таблица 5 - Параметры распределения $ЭРОА_{Rn}$ ($Бк/м^3$) в помещениях общественных и жилых зданий на территории г. Лермонтов, $n= 3236$ изм.

Этаж	N, шт.	СА	СГ	СО	Мин.	Макс.	Медиана*	$ЭРОА_{Rn} > 200 Бк/м^3$	
								шт	%
Подвал	318	341	193	327	<10	1555	189 (153-224)	154	48
1	1683	248	146	254	<10	1980	153 (141-165)	700	42
2	978	135	94	129	<10	955	89 (81-97)	203	21
3	239	225	161	208	14	1465	163 (137-189)	90	38
4-5	18	57	36	71	<10	298	35 (<10-68)	1	6
Все этажи (без подвала)	2918	207	125	222	<10	1980	119 (111-127)	994	34

СА – среднее арифметическое; СГ – среднее геометрическое; СО – стандартное отклонение. * в скобках 95% доверительный интервал.

Выявили логнормальное распределения данных, со статистически значимым превышением на 1 этажах в 42% помещений от общего числа. Медиана не превышает $200 Бк/м^3$, при максимальном превышении в 3,5 раза.

Непараметрический дисперсионный анализ с использованием критерия Краскела-Уоллиса показал, что достигнутый уровень статистической значимости (p) составил менее 0,001 ($H=193,95$; $N= 3236$; $df=4$), что говорит о статистически значимой разнице $ЭРОА_{Rn}$ на разных этажах. Для попарной проверки различий между этажами рассчитали критерий Манна-Уитни, результаты попарных расчетов представлены в таблице 6.

Таблица 6 – Рассчитанные критерии Манна-Уитни для независимых выборок значений $ЭРОА_{Rn}$ в зависимости от этажа здания в городе Лермонтов

Группа этажей	N первая группа, шт	N вторая группа,шт	U	Z	p
Подвал и 1	318	1683	226515	4,35	<0,0125
1 и 2	1683	978	626251	10,30	<0,0125
2 и 3	978	239	74800	-8,64	<0,0125
1 и 3	1683	239	190227	-1,36	0,175

Получили статистически значимое отличие значений $ЭРОА_{Rn}$ на 1 этажах от других этажей. В таблице 7 оценили зависимость от строительного материала и этажности зданий, выявили, что наибольший % превышений на 1 этажах в одноэтажных кирпичных и шлакоблочных зданиях.

Таблица 7 – ЭРОА_{Rn}, в помещениях жилых и общественных зданий в г. Лермонтов в зависимости от строительного материала и этажности зданий

Строительный материал	Кол-во этажей	ЭРОА _{Rn} , Бк/м ³		на 1 этажах >200 Бк/м ³ , %
		1 этаж	Этажи выше	
Дерево	1	152 (109-194)		25
Кирпич	1	316 (244-388)		69
	2	108 (86-130)	62 (45-79)	34
	3	156 (122-190)	187 (150-224)	46
	4	148 (<10-290)	168 (74-262)	43
	5 и выше	101 (30-171)	25 (15-35)	29
Шлакоблок	1	230 (111-349)		67
	2	65 (49-81)	66 (56-76)	4

Оценка радиационной обстановки в районе расположения объектов ЛПО «Алмаз» и жилой зоны г. Лермонтов

Для выявления причинно-следственных связей использовали визуальный подход и построили диаграммы размаха зависимости удельного содержания природных радионуклидов (рисунок 4), характеризующих территорию, и таких параметров контроля, как МАЭД ГИ и ППР, характеризующих воздействие на население.

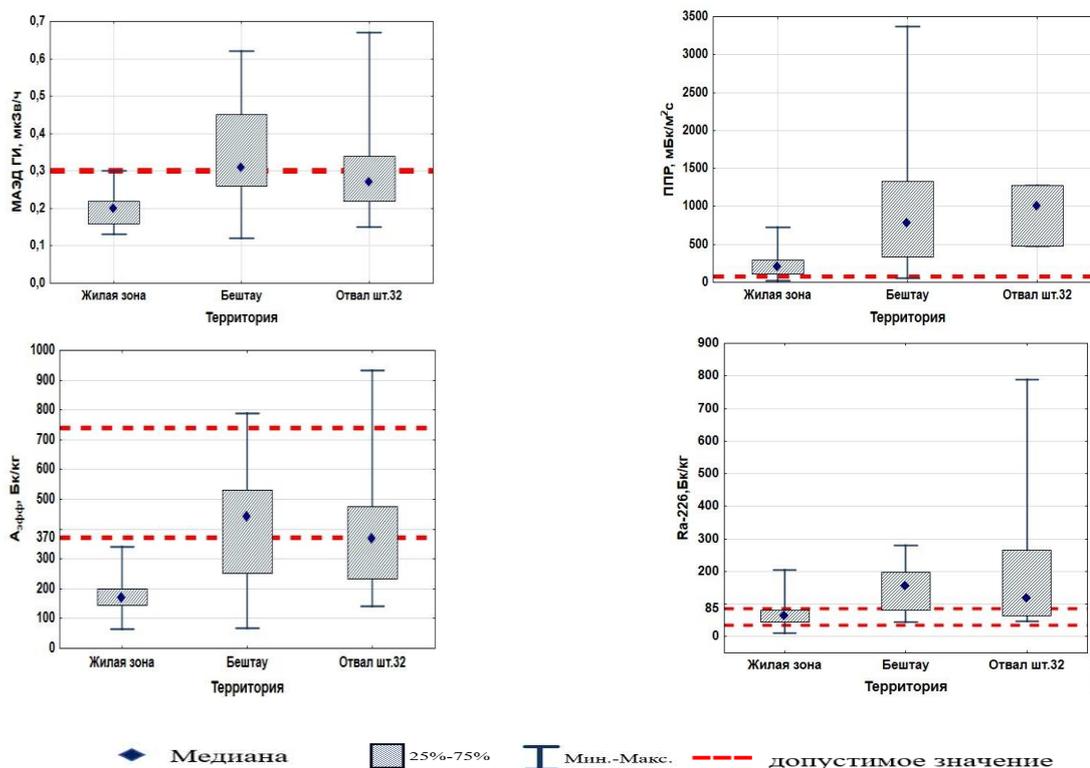


Рисунок 4 – Диаграммы размаха значений параметров радиационной обстановки на территории жилой зоны г. Лермонтов и в районе расположения объектов ЛПО «Алмаз»

На графиках нанесены линии допустимых значений по следующим показателям: МАЭД ГИ = 0,3 мкЗв/ч; ППР = 80 мБк/м²с; А_{эфф} = 370 Бк/кг – I класс,

740 Бк/кг – II класс использования для твердых отходов, содержащих природные радионуклиды (ОСПОРБ-99/2010, НРБ-99/2009) и содержание ^{226}Ra в интервале от 36 до 85 Бк/кг. Получили, что на диаграмме размаха жилая зона вся лежит в этом интервале, а территория горы Бештау и зона отвала шт. №32 существенно выходит за пределы. При этом $A_{\text{эфф}}$ менее 370 Бк/кг и коррелирует с МАЭД ГИ, которые менее 0,3 мкЗв/ч.

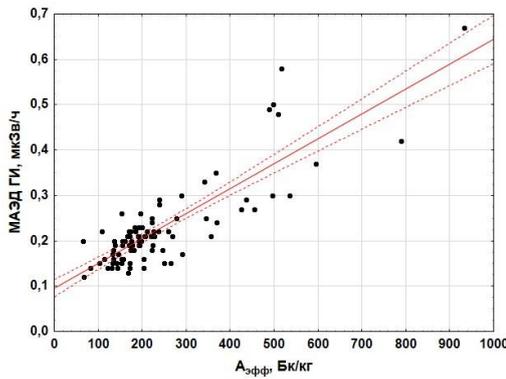
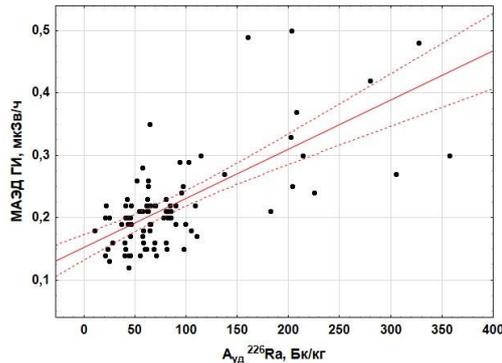
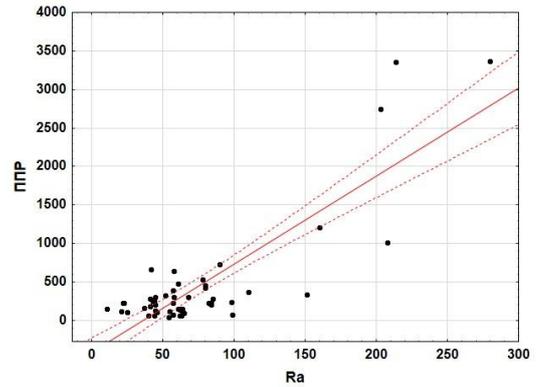
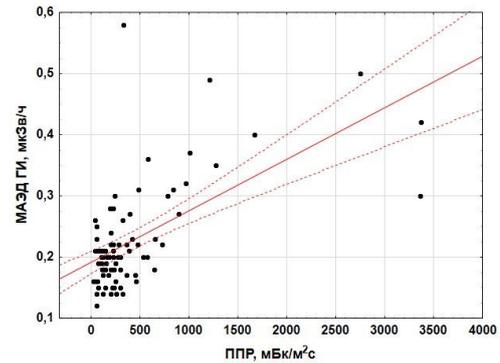
Провели типирование этой территории по степени потенциальной опасности по содержанию ^{226}Ra , которая была предложена в Балее: $A_{\text{уд}}^{226}\text{Ra} < 36$ Бк/кг – 1 тип территории, $36 \text{ Бк/кг} < A_{\text{уд}}^{226}\text{Ra} < 85$ Бк/кг – 2 тип, $A_{\text{уд}}^{226}\text{Ra} > 85$ Бк/кг – 3 тип. Получили, что в целом территория по содержанию ^{226}Ra в Лермонтове относятся к 2 типу, лежат в тех же интервалах, как и в г. Балей, где ППР выше 80 мБк/м²с. Следовательно, предложенная нами система категорирования работает и в Лермонтове. Для детального обоснования предложений провели корреляционно – регрессионный (КР) анализ, который позволяет установить зависимость показателей радиационной обстановки на территории (МАЭД ГИ и ППР) и содержания природных радионуклидов в почве, в данном случае представленной в основном $A_{\text{уд}}^{226}\text{Ra}$.

На первом этапе КР анализа выбрали факторы, влияющие на зависимую переменную, в нашем случае – ЭРОА_{Rn} на 1 этажах зданий. Помимо МАЭД ГИ, ППР, $A_{\text{эфф}}$, $A_{\text{уд}}^{226}\text{Ra}$ вблизи здания для КР анализа включили другие факторы, которые могут значимо влиять на ОА_{Rn} на 1 этажах зданий, такие как: тип четвертичных (пески, глины и суглинки, суглинки и супеси) и дочетвертичных (мергели, майкопские глины) отложений; состояние здания (с нарушениями в перекрытиях или нет); строительный материал (шлакоблочные, деревянные, кирпичные). Для номинальных факторов применялся метод фиктивных переменных (Dumty) (Гржибовский А.М., 2017).

На втором этапе КР анализа поочередно исключали мультиколлинеарные факторы. Для выявления корреляционных зависимостей между МАЭД ГИ и ППР с $A_{\text{уд}}^{226}\text{Ra}$ и соответственно $A_{\text{эфф}}$ рассчитали непараметрический коэффициент корреляции Спирмена для логнормального распределения значений, таблица 8.

Таблица 8 – Коэффициенты корреляции Спирмена для показателей радиационной обстановки во всех 3 зонах обследуемой территории в районе Лермонтова

Сравниваемые параметры	n, число измерений	r	α
ППР & Ra	54	0,4	<0,05
МАЭД ГИ & Ra	100	0,6	<0,05
МАЭД ГИ & $A_{\text{эфф}}$	100	0,7	<0,05
ППР & МАЭД ГИ	82	0,5	<0,05
r - коэффициент Спирмена; α -уровень значимости.			

МАЭД ГИ & $A_{эфф}$ МАЭД ГИ & $A_{уд}^{226}\text{Ra}$ ППР & ^{226}Ra 

ППР & МАЭД ГИ

Рисунок 5 – Диаграммы рассеяния для значений:
 МАЭД ГИ - $A_{эфф}$, $A_{уд}^{226}\text{Ra}$; ППР - $A_{уд}^{226}\text{Ra}$, МАЭД ГИ

Визуальная оценка диаграммы рассеяния показала наличие корреляции между показателями МАЭД ГИ и $A_{эфф}$, которое подтверждается рассчитанным коэффициентом корреляции $r = 0,7$ (уровень значимости α менее 0,05).

Уравнение регрессии МАЭД ГИ – $A_{эфф}$ имеет следующий вид:

$$y = 0,10 + 0,0005 \cdot x, \text{ где } y - \text{МАЭД ГИ, мкЗв/ч; } x - A_{эфф}, \text{ Бк/кг} \quad (2)$$

Из уравнения (2) получили: при $A_{эфф} < 370$ Бк/кг, МАЭД ГИ $< 0,28$ мкЗв/ч; при $A_{эфф} = 740$ Бк/кг, МАЭД ГИ = 0,47 мкЗв/ч. Рассчитанный коэффициент корреляции $r = 0,6$ показывает наличие связи между МАЭД ГИ и $A_{уд}^{226}\text{Ra}$, уравнение имеет вид:

$$y = 0,15 + 0,0008 \cdot x, \text{ где } y - \text{МАЭД ГИ, мкЗв/ч; } x - A_{уд}^{226}\text{Ra, Бк/кг} \quad (3)$$

Из уравнения (3) получили: при МАЭД ГИ = 0,3 мкЗв/ч, $A_{уд}^{226}\text{Ra} \approx 188$ Бк/кг.

Коэффициент корреляции между ППР и $A_{уд}^{226}\text{Ra}$ равен 0,4 – низкая степень корреляции. Это объясняется тем, что на значения ППР помимо содержания ^{226}Ra в поверхностных отложениях, влияет множество факторов, таких как тип породы, ее дисперсный и механический состав, температура, влажность и др. Поэтому для оценки корреляции ППР и $A_{уд}^{226}\text{Ra}$ данные разделили на группы в зависимости от типа горных пород и поверхностных отложений. Значимые корреляции ППР и $A_{уд}^{226}\text{Ra}$ получены только для аллювиальных отложений: $r = 0,7$ при $\alpha < 0,05$.

Уравнение регрессии имеет вид:

$$y = 2,9 \cdot x - 13,6, \text{ где } y - \text{ППР, мБк/м}^2\text{с, } x - A_{уд}^{226}\text{Ra, Бк/кг} \quad (4)$$

Из уравнения (4) следует, что при ППР = 80 мБк/м²с для аллювиальных отложений $A_{уд}^{226}\text{Ra} = 32$ Бк/кг; при ППР = 250 мБк/м²с, $A_{уд}^{226}\text{Ra} = 91$ Бк/кг и согласуется с предложенной системой типирования по $A_{уд}^{226}\text{Ra}$. Для таких типов почв это уравнение можно использовать. Далее оценили, какие параметры радиационной обстановки статистически значимо влияют на зависимую переменную ЭРОА_{Rn} на 1 этаже. Исключили факторы, у которых уровень значимости $p > 0,05$. Итоги регрессии представили в таблице 9.

Таблица 9 – Итоги регрессии для зависимой переменной ЭРОА_{Rn} на 1 этаже от $A_{уд}^{226}\text{Ra}$, ППР, типа отложений (глина, пески), наличия нарушений в перекрытиях, $n=51$

Показатель	бета	СО	b	СО	t(48)	p-знач.
Константа			-382	64	-5,9	$3,30 \times 10^{-7}$
$A_{уд}^{226}\text{Ra}$, Бк/кг	0,72	0,07	5,9	0,6	9,9	$2,96 \times 10^{-13}$
Пески (аллювиальные отложения)	0,32	0,07	133	30	4,4	$5,38 \times 10^{-5}$
Есть нарушения в перекрытиях	0,21	0,06	156	47	3,3	$1,70 \times 10^{-3}$
ППР, мБк/м ² с	0,17	0,07	0,2	0,07	2,5	$1,56 \times 10^{-2}$
Глины (майкопские)	0,17	0,07	70	28	2,5	$1,64 \times 10^{-2}$
$R=0,9$ $R^2=0,82$ Скоррект. $R^2=0,80$, $F(5,48)=42,5$ $p<0,05$ Станд. ошибка оценки: 77						

Из регрессии исключили следующие факторы: МАЭД ГИ, четвертичные отложения – глины, суглинки, супеси; дочетвертичные отложения – мергели; тип здания – современные, строительный материал. В таблице 9 остались факторы, статистически значимо влияющие на ОА_{Rn} на 1 этаже. Анализ показал, что самое большое влияние оказывает содержание ^{226}Ra ($p = 2,96 \times 10^{-13}$), (чем меньше p , тем значимее влияние), коэффициент $b = 5,9$. Меньшее влияние оказывает ППР и расположение зданий на майкопских глинах ($p=1,56 \times 10^{-2}$ и $1,64 \times 10^{-2}$ соответственно).

Третьим этапом составили уравнение множественной регрессии (УМР) по формуле:

$$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + \dots + b_kX_k \quad (5)$$

где b_0 – константа регрессии, b_k – коэффициенты регрессии; X_k – факторы.

Полученное уравнение для зданий имеет вид:

$$\text{ЭРОА}_{Rn} \text{ на 1 этаже} = -382 + 5,9 \cdot A_{уд}^{226}\text{Ra} + 0,2 \cdot \text{ППР} + 133 \times Q^* + 70 \times C^{**} + 156 \times N^{***}, \quad (6)$$

где $A_{уд}^{226}\text{Ra}$ – удельная активность радия в грунте вблизи расположения здания; ППР – плотность потока радона с поверхности грунта вблизи здания

* – если здание расположено на песчаных отложениях, то $Q = 1$, если нет – $Q=0$;

** - если здание расположено на глинах, то $C=1$, нет – $C = 0$;

*** - если здание с нарушениями в перекрытиях – $N=1$, нет – $N=0$.

Полученное уравнение позволяет прогнозировать вероятные поступления ^{222}Rn на 1 этажи по результатам проведения первичного мониторинга на территории в зависимости от величины параметров контроля: $A_{\text{уд}}^{226}\text{Ra}$, ППР и типа отложений. Это позволит обоснованно привязать точки контроля на этапе составления программы мониторинга, проводить осознанный выбор зданий для первоочередного обследования, существенно оптимизировать объём мониторинга.

Четвертым этапом проверили приемлемость полученной модели, для этого оценили значение R^2 равное 0,8 (скорректированное) и провели дисперсионный анализ – уровень значимости составил $p = 1,63 \times 10^{-16}$, все это позволяет сделать вывод, что разработанная регрессионная модель приемлема и работает лучше, чем обычный прогноз по средним значениям.

Пространственная оценка. Провели стандартизированную оценку, которая показала пространственное распределение всех параметров контроля всех 3 зон на территории Лермонтова (рисунок 6).

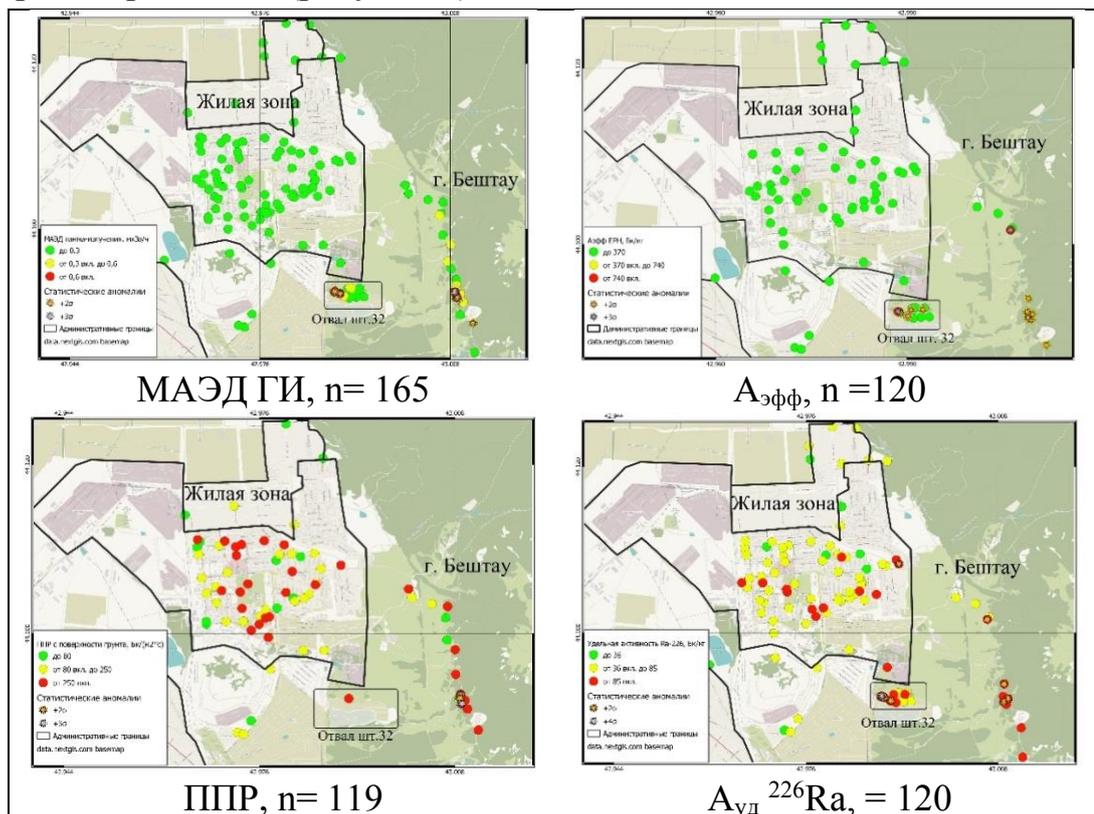


Рисунок 6 – Пространственное распределение МАЭД ГИ, ППР, $A_{\text{эфф}}$ и $A_{\text{уд}}^{226}\text{Ra}$

Это позволило выявить участки на территории с повышенным содержанием природных радионуклидов, также выявить закономерное снижение показателей при переходе от центральной части массива Бештау и зоны отвалов к жилой зоне. Для зданий с нарушениями в перекрытиях при ЭРОА_{Rn} на 1 этажах до 200 Бк/м³ и ППР до 80 мБк/м²с теоретический расчёт дает содержание ^{226}Ra : для аллювиальных

песчаных отложений - до 47 Бк/кг, для глин - 58 Бк/кг; на иных территориях - до 70 Бк/кг.

Далее оценили реальное содержание ^{226}Ra на территории по результатам мониторинга, сравнили теоретические и реальные данные, сравнили с данными геологической карты, соотнесли с распределением ЭРОА_{Rn} в помещениях на первых этажах зданий. Реальное содержание ^{226}Ra в горных породах и отложениях менялось от 30 до 156 Бк/кг. Провели сортировку данных, которые разделили их на 3 группы, получили медианное значение в каждой группе по ЭРОА_{Rn} и соответствующее им содержание ^{226}Ra . Рассчитали СГЭД_{Rn} в помещениях для каждой группы и далее индивидуальный пожизненный риск (ИПР) по МР 2.6.1.0145 – 19.

Результаты такой оценки привели таблице 10. Каждой группе придали статус тип территории от 1 до 3 по степени потенциальной радоноопасности. Для оценки степени потенциальной радоноопасности использовали классификацию по ограничению по СГЭД по ОСПОРБ-99/2010 для природного облучения, без учета остальных природных радионуклидов.

Таблица 10 – Типирование территории по степени потенциальной радоноопасности в зависимости ЭРОА ^{222}Rn на 1 этажах в зданиях с нарушениями в перекрытиях

Тип территории	Медиана ЭРОА _{Rn}	$A_{\text{уд}}^{226}\text{Ra}$	СГЭД _{Rn} *, мЗв/год	ИПР**	Степень опасности
Ед.изм	Бк/м ³	Бк/кг	мЗв/год	-	-
1	222 (183-261)	102(87-156)	14,2	$2,5 \times 10^{-3}$	Высокая
2	115 (90-140)	67 (44-77)	7,4	$1,3 \times 10^{-3}$	Повышенная
3	68 (43–93)	30(19-41)	4,4	$7,8 \times 10^{-4}$	Допустимая
* - среднегодовая эффективная доза за счет ^{222}Rn и его ДПР;					
** - индивидуальный пожизненный риск					

Анализ таблицы 10 выявил, что на территории с $A_{\text{уд}}^{226}\text{Ra}$ до 41 Бк/кг на 1 этажах медиана ЭРОА_{Rn} составляет 68 Бк/м³, а СГЭД 4,4 мЗв/год, что соответствует допустимому уровню облучения по ОСПОРОБ. Но при содержании ^{226}Ra от 44 до 77 Бк/кг ЭРОА_{Rn} меньше 200 Бк/м³, а СГЭД уже более 5 мЗв/год, и составляет 6,4 мЗв/год, соответственно степень опасности повышенная. При $A_{\text{уд}}^{226}\text{Ra}$ выше 87 Бк/кг, ЭРОА_{Rn} превышает 200 Бк/м³, СГЭД выше 10 мЗв/год, облучение высокое.

Это подтверждает давно назревшие проблемы, связанные с регулированием радона как наиболее значимого фактора радиационного риска на территории, требующей переработки российской нормативной базы по радиационной безопасности для гармонизации отечественного нормирования с международной практикой регулирования радона, ориентированного на ОА_{Rn}, равную 300 Бк/м³.

Сейчас это особенно актуально, поскольку продолжается ревизия системы обеспечения радиационной безопасности в России.

Таблица 11 – Сравнение нормативной базы России и других стран

Страна	Допустимый уровень ОА _{Rn} /ЭРОА _{Rn} *, Бк/м ³		СГЭД _{Rn} , мЗв/год	ИПР	Степень радоно- опасност и
	Эксплуатируемые	Строящиеся			
Германия	100/40	100/40	3,3	5,77×10 ⁻⁴	Низкая
США	148/59	148/59	4,8	8,5×10 ⁻⁴	
Канада	200/80	200/80	6,4	1,1×10 ⁻³	Повышен ная
Швеция					
ВОЗ	300/120		10	1,7×10 ⁻³	
Финляндия	400/200	200/100	12,8	2,3×10 ⁻³	Высокая
Россия					

*Для иностранных государств при $F=0,4$; для России при $F=0,5$.

Типирование территории провели в зависимости от содержания ²²⁶Ra в горных породах и отложениях и СГЭД_{Rn} в жилой зоны г. Лермонтов. Эти исследования позволили предложить референтные параметры контроля на потенциально радоноопасной территории для регулирования защиты населения. На основе проведенного выше корреляционно - регрессионного анализа данных позволяет предложить для проектируемых, эксплуатируемых и аварийных территорий референтные показатели в зависимости от А_{уд} ²²⁶Ra, представленные в таблице 12.

Таблица 12 – Референтные показатели для оценки степени потенциальной радоноопасности территории

Классификация*	Нормируемые			Реальные	Референтные
	ЭРОА _{Rn} *	СГЭД**	ППР	СГЭД _{реал} ***	А _{уд} ²²⁶ Ra
Ед.изм.	Бк/м ³	мЗв/год	мБк/м ² с	мЗв/год	Бк/кг
Проектируемые	до 100	5	80	до 6,4	40
Эксплуатируемые	100-200	5-10	250	6,4 – 12,8	40-85
Аварийные	<200	<10	< 250	>12,8	> 85

* НРБ-99/2009; ** - ОСПОРБ-99/2010; *** - СГЭД, реальная, рассчитанная МУ 2.4.1.1088-02

Предложенные референтные показатели позволят защищать население, снизить радиационную нагрузку на население, создадут условия для оптимизации объёма мониторинга, создадут условия для принятия управленческих решений для администрации регионов. В работе предложен комплекс мероприятий по защите населения от радона. Для этого разработаны предложения для снижения содержания радона в эксплуатируемых зданиях: рекомендуются мероприятия,

направленные на изоляцию, иногда устранение источника поступления радона в здание; удаление радона из помещений здания за счет оптимизации работы системы воздухообмена в помещении.

Выводы:

1. Разработаны критерии радиоэкологической защиты населения на потенциально радоноопасных территориях, позволяющие оценить степень опасности территории для проживания населения в зависимости от содержания ^{222}Rn и его ДПР в помещениях на 1 этажах зданий с нарушениями в перекрытиях;

2. Выявлены закономерности поступления и распределения ^{222}Rn в помещениях зданий, которые показали, что референтным показателем является объёмная активность радона на первых этажах зданий с нарушениями в перекрытиях. Получили, что средние значения ЭРОА_{Rn} составляют:

- медиана ЭРОА_{Rn} в помещениях Балей составила 107 Бк/м³, при доверительном интервале от 94 до 120 Бк/м³, при среднем значении на 1 этажах – 123 Бк/м³, что не превышает нормируемый показатель; но максимальное - 2087 Бк/м³ выше в 10,4 раз 200 Бк/м³;

- в г. Лермонтов 111 - 127 (med=119) Бк/м³, что не превышает нормируемый показатель 200 Бк/м³ при средних значениях на 1 этажах – 153 Бк/м³, максимальное до 1980 Бк/м³, что выше в 9,9 раз;

- ЭРОА_{Rn} в помещениях на 1 этажах статистически значимо отличаются от других этажей, в них сосредоточено 65% превышений от общего числа измерений, превышения составляют до 10 раз, и находятся в зданиях, которые имеют нарушения в перекрытиях, расположены в г. Балей и в г. Лермонтов в одноэтажных шлакоблочных, деревянных и кирпичных зданиях, построенных в период активной эксплуатации предприятий;

3. Разработали радиоэкологические критерии оценки степени потенциальной радоноопасности территории в зависимости от ППР с поверхности на территории и содержания ^{226}Ra в горных породах, которые пропорционально определяют объёмную активность ^{222}Rn и его ДПР в помещениях на 1 этажах зданий с нарушениями в перекрытиях и получили, что г. Балей при содержании ^{226}Ra до 36 Бк/кг, только за счет ^{222}Rn и его ДПР СГЭД составляет 6,2 мЗв/год, «допустимая», 36-85 Бк/кг, СГЭД_{Rn} - 7,1 мЗв/год «повышенная», а 85 Бк/кг и выше - 12,6 мЗв/год «Высокая» степень радоноопасности территории;

4. Выявили корреляционные зависимости между радиоэкологическими критериями оценки степени потенциальной радоноопасности территории и параметрами контроля территории при радиоэкологическом мониторинге:

- корреляцию между показателями МАЭД ГИ и $A_{эфф}$, которая подтверждается рассчитанным $r = 0,7$;

– корреляцию ППР и $A_{уд}^{226}\text{Ra}$ для территорий, представленных песчаными аллювиальными отложениями, $r = 0,7$;

– корреляционные зависимости между ЭРОА_{Rn} в помещениях на 1 этажах, описываемые уравнением множественной регрессии в зависимости от $A_{уд}^{226}\text{Ra}$ в грунте, ППР; типа горных пород, наличия нарушений в перекрытиях, которое позволяет прогнозировать потенциальную радоноопасность территории;

5. Разработана система оценки степени потенциальной опасности территории по радиоэкологическим критериям, в зависимости содержания ^{226}Ra в горных породах, которые пропорционально определяют объёмную активность ^{222}Rn и его ДПР в помещениях на 1 этажах зданий с нарушениями в перекрытиях: $A_{уд}^{226}\text{Ra}$ меньше 36 Бк/кг – 1 тип территории, допустимая; от 36 Бк/кг до 85 Бк/кг – 2 тип, повышенная; $A_{уд}^{226}\text{Ra}$ больше 85 Бк/кг – 3 тип, высокая степень радоноопасности;

6. Предложили референтные параметры контроля на потенциально радоноопасной территории для регулирования защиты населения на основе корреляционно - регрессионного анализа по содержанию ^{226}Ra для «проектируемых» до 40, «эксплуатируемых» от 40 до 85 и для «аварийных» выше 85 Бк/кг, которые будут формировать ЭРОА_{Rn} и его ДПР в помещениях 100, от 100 до 200, выше до 200 Бк/кг.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ:

Публикации в рецензируемых научных изданиях

1. Lashchenova T., Karl L., Marenyy A., Kiselev S. Improving radioecological monitoring of potentially radon-hazardous territories //E3S Web of Conferences. – EDP Sciences, 2020. – Т. 169. – С. 02004.
2. Vasilyev A., Yarmoshenko I., Onishchenko A., Hoffmann M., Malinovsky G., Marenyy A., Karl L. Radon measurements in big buildings: pilot study in Russia //Radiation Protection Dosimetry. – 2020. – Т. 191. – №. 2. – С. 214-218.
3. Лащенко Т.Н., Карл Л.Э., Маренный А.М. Радиационно-гигиенический мониторинг на потенциально радоноопасных территориях // Медицинская радиология и радиационная безопасность. – 2021. – Т. 66. – №. 4. – С. 42-50.
4. Маренный А.М., Антропов С.Ю., Карл Л.Э. и др. Система мотивированного сбора информации о содержании радона в помещениях с участием населения // Радиационная гигиена. – 2022. – Т. 15, – № 1. – С. 96-103.

Патенты

1. Маренный А.М., Антропов С.Ю., Карл Л.Э. Специализированное программное обеспечение "РАДОН-LAB" // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ – № RU 2021665443; заявл. 2021664655, 20.09.2021; опубл. 27.09.2021 – 1 с.

Публикации в других изданиях

1. Karl L.E. The problem of radon irradiation of the population of the city of Baley of the Transbaikal region // People. Science. Innovations in the New Millennium. - М.: РУДН, 2018. С.89-93.
2. Карл Л. Э., Лащенко Т.Н., Маренный А.М., Киселев С.М. Радиоэкологический мониторинг потенциально радоноопасных территорий / Актуальные проблемы экологии и природопользования. – М.: РУДН, 2020. – С. 353-356.
3. Karl L., Lashchenova T., Marenyy A. Monitoring studies to assess the condition of drinking water supply sources in potentially radon-hazardous areas by specific gross alpha activity // Ninth international conference on radiation in various fields of research. – Montenegro.: Niš, 2021. – P. 193.
4. Карл Л.Э. Оценка доз внутреннего облучения населения, проживающего на потенциально радоноопасных территориях / VIII Съезд по радиационным исследованиям, Москва, 12-15 окт. 2021 г.: Тез. В 78 докл. – Дубна: ОИЯИ, 2021. – С.391.
5. Карл Л.Э., Лащенко Т.Н. Оценка доз внутреннего облучения за счет природных радионуклидов для населения, проживающего вблизи объекта ядерного

наследия / Физико-химические методы в междисциплинарных экологических исследованиях. – 2021. – С. 91-92.

6. Карл Л.Э., Лащенкова Т.Н. Радиационно-гигиеническая оценка помещений детских учреждений на потенциально радоноопасных территориях / Сысинские чтения-2021. – 2021. – С. 204-209.

7. Карл Л.Э. и др. Радиоэкологический мониторинг объектов окружающей среды на территории с потенциальной радоноопасностью / Ильинские чтения 2022. – 2022. – С. 32-34.

8. Кайгородов Е. И., Карл Л. Э., Губанова Ю. К. Мониторинг объемной активности радона в детских учреждениях на потенциально радоноопасной территории в Ставропольском крае / Физико-химические методы в междисциплинарных экологических исследованиях. – 2021. – с. 207-208.

9. Кайгородов Е. И., Карл Л. Э. Анализ существующих методов измерения объемной активности радона в атмосферном воздухе при мониторинге потенциально радоноопасных территорий / Актуальные проблемы экологии и природопользования. – 2021. – с. 288-293.

10. Кайгородов Е. И., Карл Л. Э., Губанова Ю. К. Контроль объемной активности радона в детских образовательных учреждениях г. Пятигорска / Юбилейная международная научно-практическая конференция «ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России: 75 лет на страже здоровья людей». – 2021. – с. 123-125.

11. Кайгородов Е. И., Карл Л. Э., Губанова Ю. К., Мнацаканян М. Р. Кайгородов Е. И. и др. Категорирование территории жилой зоны г. Пятигорск по потенциальной радоноопасности / Ильинские чтения 2022. – 2022. – С. 29-31.

Благодарности

Автор выражает глубокую благодарность и искреннюю признательность своему научному руководителю д-р биол. наук Лашеновой Т. Н. за постановку задачи, постоянную поддержку и помощь на всех этапах, значительный вклад в формирование диссертационного исследования.

Автор благодарен д-р физ.-мат. наук Маренному А.М. за предоставленную возможность работать по данному направлению, помощь и поддержку на протяжении всего времени. Автор благодарен своему административному руководителю в РУДН д-р биол. наук Киричуку А.А. за исключительное терпение и поддержку, необходимую помощь на протяжении всей работы. Автор выражает благодарность д-р геол.-минерал. наук Микляеву П. С. и канд. техн. наук Петровой Т. Б. за проведение полевых исследований, за обсуждение и ценные советы в направлении исследования. Автор благодарен своим административным руководителям в НТЦ РХБГ д-р хим. наук Новикову С.В., канд. физ.-мат. наук Герцену Г.П. за постоянную поддержку и помощь в работе. Автор благодарит д-р биол. наук Коренкова И. П., канд. техн. наук Цапалова А. А., канд. физ.-мат. наук Антропова С. Ю. за ценные советы и помощь в проведении исследования; канд. техн. наук Щитова Д. В., Сидякина П. А., Мурзабекова М. А за помощь, гостеприимство и предоставление возможности проведения полевых исследований в г. Лермонтов.

Автор выражает благодарность всем своим коллегам, единомышленникам за понимание, неоценимую помощь при проведении работ, обсуждении результатов.

Карл Лидия Эдуардовна
**«Радиоэкологическая защита населения на потенциально
радоноопасных территориях»**

Современные радиоэкологические и гигиенические исследования по оценке влияния естественной радиации на организм человека показали, что на данный момент развития общества основной вклад в облучение населения вносят природные источники ионизирующего излучения, при этом из них от 50 до 90 % обусловлены радоном 222 и дочерними продуктами его распада.

В диссертационной работе провели радиоэкологический мониторинг двух потенциально радоноопасных территорий: г. Балей Забайкальского края и г. Лермонтов Ставропольского края. В результате работы выявили закономерности поступления и распределения радона в помещения зданий. На основе корреляционно-регрессионного анализа разработали критерии оценки потенциальной радоноопасности территории. Выявили, что референтным показателем, характеризующим территорию, является объемная активность радона на первых этажах зданий с нарушениями в перекрытиях. В результате исследования разработали предложения по совершенствованию нормативно-правового обеспечения по ограничению природного облучения и рекомендации по противорадоновой защите детских учреждений г. Лермонтов.

Karl Lidiya
**«Radioecological protection of the population in potentially radon-
hazardous territories»**

Modern radioecological and hygienic researches on estimation of impact of natural radiation on human organism have shown that at the current moment of society development the main contribution to population exposure is made by natural sources of ionising radiation, and from 50 to 90 % of them are caused by radon 222 and its daughter products of decay.

In the thesis research we carried out radioecological monitoring of two potentially radon-prone territories: the town of Baley, Zabaikalsky region, and the town of Lermontov, Stavropol region. As a result of the study the inflow and distribution patterns of radon into the premises of buildings were revealed. On the basis of correlation-regression analysis we developed criteria for assessment of potential radon hazard of the territory. It was revealed that the reference indicator characterising the territory is the volumetric activity of radon on the ground floors of buildings with violations in the sub-floor ceilings. As a result of the study we developed proposals to improve the regulatory and legal support to limit natural exposure and recommendations for anti-radon protection of children's institutions in Lermontov.