

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное Государственное Автономное Образовательное
учреждение Высшего Образования
«Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы»

На правах рукописи

Карл Лидия Эдуардовна

**РАДИОЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ЗАЩИТА НАСЕЛЕНИЯ НА
ПОТЕНЦИАЛЬНО РАДОНООПАСНЫХ ТЕРРИТОРИЯХ**

1.5.15. Экология

Диссертация на соискание ученой степени кандидата
биологических наук

Научный руководитель:
доктор биологических наук
Лащенко Татьяна Николаевна

Москва,
2024

ОГЛАВЛЕНИЕ

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ	5
ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ.....	6
ГЛАВА 1. ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР	15
1.1. Структура облучения населения ИИИ.....	15
1.2. Естественный радиационный фон.....	20
1.3. Формирование потенциальной радоноопасности на территории.....	24
1.3.1. Геохимия естественных радионуклидов ^{238}U , ^{232}Th , ^{226}Ra	24
1.3.2. Механизмы эксхалации радона с земной поверхности	28
1.4. Нормативно-правовое обеспечение радиационной безопасности.....	31
1.4.1. Нормирование радона в помещениях жилых и общественных зданий	32
1.4.2. Содержания природных радионуклидов в объектах окружающей среды	33
1.4.3. Ограничение дозовых нагрузок населения и персонала от воздействия природных ИИИ	34
1.5. Источники ПИИИ на население	36
1.6. Методы измерения объемной активности радона	37
1.6.1. Определение содержания радона в воздухе помещений	37
1.6.1.1. Инспекционные методы измерения	38
1.6.1.2. Квазиинтегральные методы	41
1.6.1.3. Интегральные методы	42
1.6.2. Анализ данных по содержанию радона	45
1.7. Выводы по главе 1.....	46
ГЛАВА 2. ОБЪЕМ, МЕТОДЫ И МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЯ, КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ РЕЗУЛЬТАТА	48
2.1. Объём исследования	48
2.2. Аппаратура и методы измерений	49
2.3. Интегральный метод измерений объемной активности радона комплектом «ТРЕК-РЭИ-1М»	51
2.3.1. Отбор проб воздуха.....	51
2.3.2. Принцип измерения интегральным методом	51
2.3.3. Расчет объемной активности радона.....	53
2.3.1. Обоснование выбора коэффициента равновесия F	54
2.4. Углубленное обследование зданий	54
2.5. Статистическая обработка данных.....	55
2.6. Расчет среднегодовой дозы облучения населения	55
2.7. Расчет индивидуального пожизненного риска	57
ГЛАВА 3. ОПИСАНИЕ ОБЪЕКТОВ МОНИТОРИНГА	58

3.1. Город Балей Забайкальский край	59
3.1.1. Физико-географическая характеристика	59
3.1.2. Геологическое строение	62
3.1.3. Основные источники техногенного воздействия	66
3.2. Город Лермонтов Ставропольский край	68
3.2.1. Физико-географическая характеристика	69
3.2.2. Геологическое строение	71
3.2.3. Деятельность предприятия по добыче урана	77
3.3. Выводы по главе 3.....	78
ГЛАВА 4. РАДИОЭКОЛОГИЧЕСКОЕ ОБСЛЕДОВАНИЕ	
ТЕРРИТОРИИ Г. БАЛЕЙ	80
4.1. Выбор точек контроля	80
4.2. Результаты измерения объемной активности радона в помещениях зданий в г. Балей	81
4.3. Закономерности распределения объемной активности радона в помещениях зданий г. Балей.....	82
4.3.1. Зависимость объемной активности радона от этажа.....	83
4.3.2. Зависимость объемной активности радона от строительного материала	87
4.4. Категорирование территории города Балей по степени потенциальной радоноопасности в зависимости от удельного содержания ^{226}Ra в коренных горных породах и поверхностных отложениях	92
4.5. Выводы по главе 4.....	98
ГЛАВА 5. РАДИОЭКОЛОГИЧЕСКОЕ ОБСЛЕДОВАНИЕ	
ТЕРРИТОРИИ Г. ЛЕРМОНТОВ.....	99
5.1. Выбор точек контроля	99
5.1.1. Результаты измерения объемной активности радона в помещениях зданий г. Лермонтов	100
5.1.2. Закономерности распределения ЭРОА радона в зданиях города Лермонтов	102
5.1.2.1. Зависимость объемной активности радона от этажа.....	102
5.1.2.2. Зависимость объемной активности радона от строительного материала	104
5.2. Сравнение объёмной активности радона в помещениях жилых и общественных зданий объектов мониторинга городов Балей и Лермонтов.....	108
5.2.1. Превышение объёмной активности радона ЭРОА _{Rn} выше 200 Бк/м ³ в помещениях г. Балей и г. Лермонтов	108
5.2.2. Объёмная активность радона на первых этажах в г. Балей и г. Лермонтов с превышением ЭРОА _{Rn}	109

5.3. Выводы по главе 5.....	110
ГЛАВА 6. ОЦЕНКА СТЕПЕНИ РАДИАЦИОННОЙ ОПАСНОСТИ ТЕРРИТОРИИ Г. ЛЕРМОНТОВ МЕТОДОМ КОРРЕЛЯЦИОННО-РЕГРЕССИОННОГО АНАЛИЗА	111
6.1. Оценка радиационной обстановки в районе расположения объектов ЛПО «Алмаз» и в жилой зоны г. Лермонтов	111
6.2. Корреляционно-регрессионный анализ.....	116
6.2.1. Выбор факторов	116
6.2.2. Поиск мультиколлинеарных факторов	118
6.2.3. Анализ регрессионного уравнения.....	121
6.2.4. Оценка приемлемости модели.....	122
6.2.4.1. Анализ остатков	122
6.2.4.2. Дисперсионный анализ данных.....	122
6.2.4.3. Построение прогноза	123
6.3. Стандартизированная оценка пространственного распределения радиационного обследования	124
6.1. Выводы по главе 6.....	128
ГЛАВА 7. ПРОТИВОРАДОНОВАЯ ЗАЩИТА ДЕТСКИХ УЧРЕЖДЕНИЙ Г.ЛЕРМОНТОВ НА ОСНОВЕ УГЛУБЛЕННОГО ОБСЛЕДОВАНИЯ ЗДАНИЙ.....	130
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	133
ВЫВОДЫ	134
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	136
ПРИЛОЖЕНИЕ 1.....	158
ПРИЛОЖЕНИЕ 2.....	161
ПРИЛОЖЕНИЕ 3.....	162
ПРИЛОЖЕНИЕ 4.....	163

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

ВОЗ	Всемирная организация здравоохранения
ДНК	Дезоксирибонуклеиновая кислота
ДПР	Дочерние продукты распада
ЕРН	Естественные радионуклиды
ЕСКИД	Единая система контроля и учёта индивидуальных доз облучения граждан
ИИИ	Источники ионизирующего излучения
$K_{эм}$	Коэффициент эманирования
МАРЗ	Международное агентство по изучению раковых заболеваний
МКРЗ	Международная комиссия по радиологической защите
НКДАР ООН	Научный комитет по действию атомной радиации организации объединенных наций
НРБ-99/2009	Нормы радиационной безопасности
OA_{Rn}	Объемная активность радона
ОСПОРБ-99/2010	Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности
ПИИИ	Природные источники ионизирующего излучения
РУ	Референтный уровень
СанПин	Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы
$ЭРОA_{Rn}$	Эквивалентная равновесная объемная активность радона
СГЭД	Среднегодовая эффективная доза облучения
ФЭУ	Фотоэлектронный умножитель
ППД	Полупроводниковый детектор
ТТД	Твердотельный трековый детектор

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Наибольший вклад в суммарную годовую эффективную дозу облучения (СЭГД) 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 подпольных 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 [12, 32].

Международное сообщество в лице МАГАТЭ, ВОЗ, МКРЗ уделяет огромное внимание этой проблеме и инициирует исследования в разных странах мира проводились исследования ученых [1 - 10, 13, 14, 16 -20, 23 – 35, 37 - 43], которые показали, что существует превышение 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 другие. Исследования видных ученых [2, 17, 50, 67, 68, 97, 98, 100, 101, 107, 132, 142, 143, 155, 156] позволили выявить, что вклад ^{222}Rn и его ДПР облучение населения в разных регионах России, может быть существенным. Вклад ^{222}Rn и его ДПР в формирование дозы внутреннего облучения может достигать

величины 80% от среднегодовой эффективной дозы (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 окружающая среда на загрязнённых территориях, формируется дозовая нагрузка за счет ЕРН, которую необходимо оценивать. Защита населения может решаться путем проведения комплексной оценки состояния территорий, оценки потенциальной опасности для принятия решений для защиты, в зависимости радиоэкологического состояния территории [74, 84, 89 – 91, 93 – 95, 117, 125, 151, 157].

Эти территории расположены в регионах с разной геологической структурой и в разных природных зонах, отличаются физико-географическими характеристиками, соответственно исходными условиями для формирования повышенной радоноопасности. В данной работе в качестве объектов мониторинга выбрали отличающиеся территории, где располагаются предприятие по добыче золота и монацита (города Балей, Забайкальского края) и предприятия 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 [81, 82, 126, 133, 164] описывают состояние территории в настоящем. Исследования по влиянию ЕРН, в том числе и ^{222}Rn , на здоровье населения позволили выявить, что существуют отличия от фоновых региональных показателей, которые достоверно показаны в работах [6, 70, 71, 79, 82, 164]. Радиоэкологическая оценка состояния территории за счет ЕРН является основой для снижения дозовой нагрузки, является решением важной актуальной научно-

квалификационной задачей для защиты населения, которая решается в данной работе.

Следует отметить, что 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 [9, 12, 23, 26- 31, 34, 35, 37, 38, 66, 122,137]. В этом направлении проводятся научные исследования [66, 121, 137]. Однако при оценке риска в России на данный момент не существует единых методологических подходов оценки за счет поступления ^{222}Rn и его ДПР, разработано несколько методик в ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева (*MP 2.6.1.0145-19; MP 2.6.1.0172-20*) [131, 145].

Содержание ^{222}Rn в воздухе помещений зданий разного назначения нормируется в единицах эквивалентной равновесной объемной активности радона (ЭРОА_{Rn}), которая выражает соотношение объемных активностей ^{222}Rn (ОА_{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 из внутреннего воздуха помещений [59, 65]. Такой принцип нормирования связан с тем, что основную часть дозы внутреннего облучения ^{222}Rn формируют его ДПР изотопы ^{214}Bi и ^{214}Pb [66, 75, 137, 142, 149]. 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 [32, 33]. Различие связано с географическими и климатическими особенностями, а также условиями режима проветривания помещений в России [83]. Актуальность решения этих проблем требует

унификации подходов и совершенствования нормативно-правового обеспечения по ограничению природного облучения.

Существующая опасность для проживания населения на потенциально радоноопасных территориях требует радиоэкологической защиты путем оценки потенциальной опасности по радиационному фактору, является важной и актуальной задачей, которая решается в данной работе.

Исходя из этого, **целью работы** является разработка критериев радиоэкологической 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 радиоэкологические критерии оценки степени потенциальной радоноопасности территории;
3. Выявить корреляционные зависимости между радиоэкологическими критериями оценки степени потенциальной радоноопасности территории и параметрами контроля территории при радиоэкологическом 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 объёмная активность радона 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 объёмной активностью ^{222}Rn и его ДПР в помещениях на 1 этажах зданий с нарушениями в перекрытиях и плотностью потока радона, мощностью гамма-излучения на территории, содержанием природных радионуклидов в горных породах вблизи здания, а также геологических характеристик территории;

4. Впервые разработана система оценки степени потенциальной опасности по радиоэкологическим критериям, характеризующим территорию, в зависимости от МАЭД ГИ и ППР с поверхности на территории, которая пропорционально определяет объёмную активность газа ^{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

Практическая значимость

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».

Соответствие диссертации паспорту научной специальности.

Диссертационная работа соответствует паспорту специальности 1.5.15 - Экология:

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.

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, 7 глав, выводов, списка использованных источников. Работа изложена на 164 страницах машинописного текста, включая 29 таблиц и 42 рисунков. Список использованных источников содержит 166 источников, из них 43 зарубежных.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Закономерности поступления радона в помещения зданий зависят от радиоэкологических параметров территории, характеризующих радиационную обстановку на территории, а определяется содержанием природных радионуклидов в горных породах и геологическим строением территории;

2. Система оценки степени потенциальной опасности по радиоэкологическим критериям, характеризующим территорию, в зависимости от МАЭД ГИ и ППР с поверхности на территории, которая пропорционально определяет объёмную активность ^{222}Rn и его ДПР в помещениях на 1 этажах зданий с нарушениями в перекрытиях;

3. Уравнение регрессии, полученное на основе регрессионного анализа данных, которое описывает ОА_{Rn} и его ДПР в помещениях на 1 этажах зданий с нарушениями в перекрытиях в зависимости от плотности потока радона, содержанием природных радионуклидов в горных породах вблизи здания, а также геологических характеристик территории;

4. Система типирования территории, в зависимости от содержания природных радионуклидов в горных породах, формирующих на территории ППР и МАЭД ГИ; описывается уравнением регрессии, позволяющего установить референтные содержание ^{226}Ra в зависимости от стадии эксплуатации здания: проектируемые, эксплуатируемые, аварийные.

5. Референтные параметры контроля на потенциально радоноопасной территории для регулирования защиты населения, которые описываются уравнением регрессии, позволяющим на основе корреляционно - регрессионного анализа предложить референтные показатели по содержанию ^{226}Ra для проектируемых до 40, эксплуатируемых (40 до 85) и для аварийных территорий выше 85 Бк/кг, которые будут формировать объёмную активность в помещениях 100, от 100 до 200, выше до 200 Бк/кг.

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.

Благодарности. Автор выражает глубокую благодарность и искреннюю признательность своему научному руководителю д-р биол. наук, Лашеновой Т. Н. за постановку задачи, постоянную поддержку и значительный вклад в формирование диссертационного исследования, за помощь и поддержку на всех его этапах, д-р физ.-мат. наук Маренному А.М., д-р геол.-минерал. наук Микляеву П. С. и канд. техн. наук Петровой Т. Б. за постоянную поддержку проводимых работ, за проведение полевых исследований, за обсуждение и ценные советы в направлении исследования. Автор благодарен канд. физ.-мат. наук Герцену Г.П., д-р биол. наук Коренкову И. П, канд. техн. наук Цапалову А. А., канд. физ.-мат. наук Антропову С. Ю. за помощь и поддержку на протяжении всей работы; канд. техн. наук Щитову Д. В., Сидякину П. А, Мурзабекову М. А за помощь и предоставление возможности проведения полевых исследований в г. Лермонтов. Автор выражает благодарность своим коллегам, единомышленникам за понимание, неоценимую помощь при проведении работ, обсуждении результатов.

ГЛАВА 1. ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР

На сегодняшний день в центре внимания стоит проблема облучения населения радоном (^{222}Rn) и его ДПР на территориях с повышенным содержанием природных радионуклидов, таких как ^{238}U , ^{232}Th , ^{226}Ra . Проведенные исследования [56, 62, 76, 85, 96 – 98, 118 - 120] позволили выявить территории с повышенным содержанием ^{222}Rn , которые являются потенциально радоноопасными, расположены в разных регионах России, например на Алтае, в Забайкалье, на Северном Кавказе, в Северо-Западном и Дальневосточном регионах, на Камчатке и т.д. Повышенное содержание ^{222}Rn на таких территориях может быть связано как с геологическими особенностями, так и в результате хозяйственной деятельности на территории, такой как добыча полезных ископаемых, которая приводит к изменению гидрологических сетей, образованию хвостохранилищ, карьеров, отвалов и выходу природных радионуклидов за их пределы. Для обеспечения радиационной безопасности и защиты населения на таких территориях требуется проведение широкомасштабного комплексного радиационного мониторинга, при проведении которого есть ряд проблем, связанных с необходимостью оптимизации, аналитическим и методическим обеспечением, решение которых является важной и актуальной задачей [115].

1.1. Структура облучения населения ИИИ

В течение всей истории существования Земли все живые организмы были подвержены воздействию естественного радиационного фона, который формируется за счет ПИИИ. В результате использования ИИИ в промышленности, сельском хозяйстве, в медицине и научных исследованиях, при испытаниях ядерного оружия и производства материалов для военных целей, добычи полезных ископаемых и др., появились новые, искусственные ИИИ [33, 32].

Облучение населения подразделяется: природное, медицинское и техногенное. Согласно современным оценкам, вклад ПИИИ для населения

занимает первое место, которое формирует около 80% индивидуальной годовой эффективной дозы. За ним следует медицинское излучение (примерно 20% дозы) и, наконец, техногенное излучение (менее 1% дозы) [33, 55, 144].

Структура среднегодовых эффективных доз облучения (СГЭД) населения Земли по данным Научного комитета по действию атомной радиации Организации Объединённых Наций (НКДАР ООН) представлена в таблице 1 [33].

Таблица 1 – СГЭД населения Земли по данным НКДАР ООН [30]

Источники	Среднемировая доза, мЗв/год	Диапазон, мЗв/год
Природные источники ионизирующего излучения		
Ингаляционное поступление (газ ^{222}Rn)	1,26	0,2–10
Внешнее терригенное гамма-излучение	0,48	0,3–1
Проглатывание с водой и пищей	0,29	0,2–1
Космическое излучение	0,39	0,3–1
<i>Всего за счет ПИИИ</i>	<i>2,4</i>	<i>1–13</i>
Искусственные источники ионизирующего излучения		
Медицинская диагностика (не лечение)	0,6	<i>От 0 до нескольких десятков</i>
Ядерные испытания в атмосфере	0,005	<i>В районе испытательных полигонов до сих пор наблюдаются повышенные дозы облучения</i>
Профессиональное облучение	0,005	~0–20
Чернобыльская авария (Глобальные выпадения)	0,002	<i>В 1986 году средняя доза облучения более чем 300 000 ликвидаторов аварии составила почти 150 мЗв; еще более 350 000 человек получили дозу, превышающую 10 мЗв</i>
Ядерный топливный цикл (ЯТЦ), население	0,0002	<i>Дозы облучения критических групп населения на расстоянии 1 км от некоторых ядерных реакторов достигают 0,02 мЗв</i>
<i>Всего за счет искусственных ИИИ</i>	<i>0,6</i>	<i>От нуля до нескольких десятков</i>

По данным НКДАР ООН, среднемировое значение СГЭД за счет всех ПИИИ составляет в среднем 2,4 мЗв/год, при этом за счет изотопов радона в помещениях жилых и общественных зданий около 1,2 мЗв/год, что составляет ~52% от всех ПИИИ, однако для больших контингентов населения в разных странах эта величина может составлять от менее 1 мЗв/год до 10 мЗв/год [32, 33, 97].

Сбор и учет информации об уровнях и дозах облучения населения ведется Роспотребнадзором в рамках единой государственной системы контроля и учета индивидуальных доз облучения граждан (ЕСКИД), в том числе и природного облучения. С 2001 года была введена форма государственного (федерального) статистического наблюдения № 4-ДОЗ, в которых аккумулируются по настоящее время данные по дозам облучения населения [55, 162] за счет всех источников воздействия.

Структура годовой дозы облучения населения РФ от всех источников излучения в 2021 году, согласно данным ЕСКИД, представлена на рисунке 1 [55, 144].

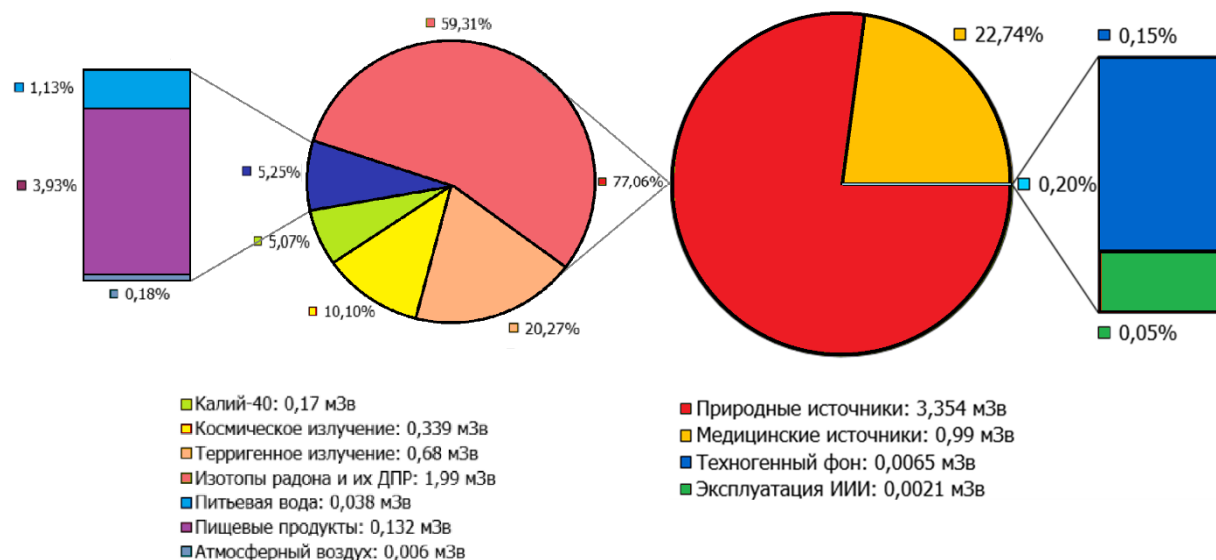


Рисунок 1 – Структура средней индивидуальной годовой дозы облучения населения РФ за счет всех источников излучения в 2021 году [55, 144]

Как показано выше, среднегодовые дозы облучения населения ПИИИ составляют в среднем по Земному шару 2,4 мЗв, а по России – 3,4 мЗв [55, 33].

Техногенный фон является результатом антропогенной деятельности и вносит вклад в СГЭД населения России в среднем 0,20%. Основными источниками техногенного радиоактивного загрязнения окружающей среды являются следующее: ядерные испытания на военных полигонах, мирные ядерные испытания и атомные бомбардировки Хиросимы и Нагасаки; деятельность предприятий ЯТЦ, включая добычу и переработку урана; утилизация радиоактивных материалов; аварии на атомных электростанциях, реакторах и предприятиях ядерного цикла; выбросы экзогенных радионуклидов в атмосферу при сжигании каменного угля и природного газа; использование фосфорных удобрений в сельском хозяйстве и продуктов переработки фосфоритов в промышленности, таких как фосфогипс в строительстве.

Актуальной и отдельной проблемой стоит медицинское облучение: относительный вклад этого источника растет вместе с ростом количества оказываемых медицинских услуг и составляет 0,8 мЗв/год [144].

Установлено, что в России [114, 115, 155]:

« - средняя по стране индивидуальная годовая эффективная доза облучения населения за счет всех природных источников излучения составляет около 3,4 мЗв/год, причем наибольшая ее часть формируется за счет облучения населения изотопами радона в воздухе помещений;

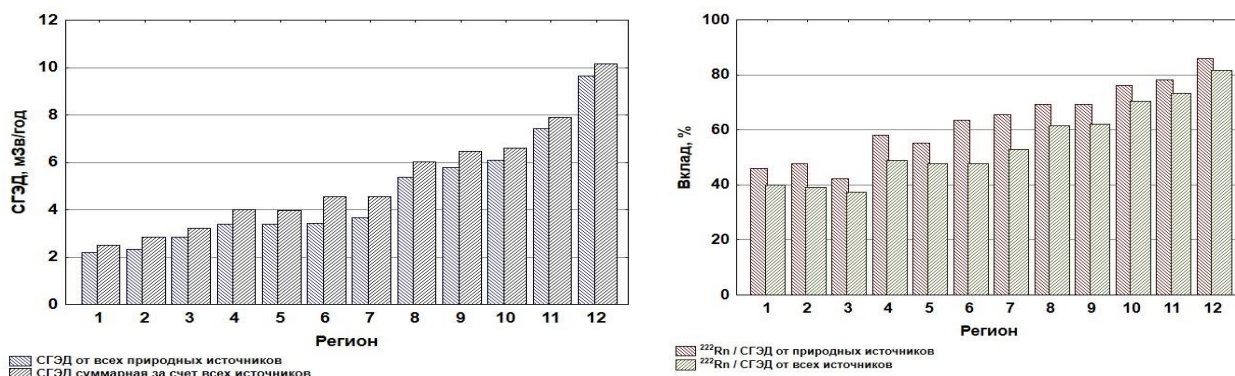
– в среднем около 58%; – примерно три четверти населения страны имеют средние дозы облучения за счет всех природных источников излучения в диапазоне от 2,0 до 4,0 мЗв/год;

– среднегодовые эффективные дозы природного облучения превышают 5 мЗв/год у 10,2 % населения (около 15 млн чел.), а дозы природного облучения 0,78% населения (около 1,1 млн чел.) превышают 10 мЗв/год;

– практически все население, которое подвергается повышенному (свыше 5 мЗв/год) и высокому (свыше 10 мЗв/год) облучению природными источниками излучения, проживает на территории 17 субъектов РФ с общей численностью населения около 30 млн человек;

– в Российской Федерации имеются два субъекта с максимальными уровнями природного облучения: средние дозы облучения жителей Республики Алтай близки к 10 мЗв/год, а жителей Еврейской АО составляют около 7,0 мЗв/год».

Территории отдельных субъектов РФ, в зависимости от потенциальной радоноопасности, сильно отличаются структурой доз и уровнями природного облучения, которые представлены на рисунке 2.



1 - Костромская область; 2 - Архангельская область; 3 - Брянская область; 4 - **Российская Федерация**; 5 - Новгородская область; 6 - Волгоградская область; 7 - Красноярский край; 8 - Иркутская область, 9 - Забайкальский край; 10 - Ставропольский край; 11 - Еврейская АО; 12 - Республика Алтай

Рисунок 2 – Соотношение значений СГЭД от природных источников и всех источников излучения (а) и вклад изотопов ^{222}Rn в воздухе помещений в СГЭД за счет всех природных источников и в СГЭД за счет всех источников излучения (б)

Для всех регионов России вклад радона в суммарные дозы облучения населения за счет природного облучения, в целом выше 50%, соответственно с увеличением, которых увеличивается и вклад радона. Для таких регионов, как Забайкальский край, Иркутская область, этот показатель составляет от 69%. А для территорий с низкими уровнями облучения населения от ПИИИ, вклад радона в суммарные дозы около 50% [155].

1.2. Естественный радиационный фон

Облучение населения за счет природных ИИИ складывается за счет облучения космогенными радионуклидами (в основном ^3H и ^{14}C), образующимися при взаимодействия космического излучения с веществом атмосферы и внутреннего облучения терригенными радионуклидами, повсеместно присутствующими в земной коре, воздухе, воде, строительных материалах и организме человека (^{40}K , изотопы урана, радия, тория, ^{222}Rn и его ДПР радона и др.) [97].

Космическое излучение образуется в результате термоядерных реакций в недрах звезд и галактик и представляет собой поток заряженных частиц, попадающих на Землю в количестве, пропорциональном солнечной активности.

Разделяют первичное и вторичное космическое излучение. Первичное в большей степени представляет собой протонное излучение (примерно 92%), меньше – альфа-излучение (около 7%) и менее 1% поток ядер Li, Be, C, N, O. Вторичное излучение – это гамма- и бета-излучение, а также излучение протонов и мезонов, образующихся в результате взаимодействия первичного космического излучения с веществом атмосферы [97, 110].

Иные природные радиоактивные элементы входят в состав земной коры. При образовании Земли в ее состав входило значительно большее количество радионуклидов, многие из которых за миллиарды лет жизни планеты полностью распались. Природные радионуклиды, входящие в состав земной коры – это те элементы, период полураспада которых сравним с возрастом Земли, и их дочерние продукты распада.

Радиоактивные элементы, в заметных количествах присутствующие в земной коре с момента образования Земли, имеют долгий период полураспада и называются долгоживущими. Эти радионуклиды представлены тремя радиоактивными рядами последовательно распадающихся нуклидов, родоначальниками которых являются ^{238}U ($T_{1/2}=4,5\cdot 10^9$ лет), ^{235}U ($T_{1/2}=7,04\cdot 10^8$ лет) и ^{232}Th ($T_{1/2}=1,3\cdot 10^{10}$ лет) соответственно

ЕРН повсеместно сосредоточены во всех объектах окружающей среды, в материалах геологической среды, строительных материалах и пищевых продуктах. Их воздействие на человека и окружающую среду является объектом изучения разных наук, изучающих поведение радионуклидов в окружающей среде и воздействие ионизирующего излучения на население и персонал, работающий на добывающих и перерабатывающих предприятиях ядерно-топливного цикла (ЯТЦ).

История открытия и изучения изотопов ^{222}Rn насчитывает уже более 100 лет. Радон является продуктом радиоактивного распада радия. Известны три естественных изотопов радона: ^{222}Rn – собственно радон, продукт в цепочке распада ^{238}U ; ^{220}Rn – торон, продукт в цепочке распада ^{232}Th ; и ^{219}Rn – актинон, продукт в цепочке распада ^{235}U . Все природные изотопы радона радиоактивны [72, 143].

В цепочке распада ^{238}U следует выделить радионуклид ^{226}Ra , в результате распада которого рождается ^{222}Rn – наиболее долгоживущий изотоп радона, радиоактивный одноатомный газ без цвета и запаха, самый тяжелый (в 7,5 раз тяжелее воздуха), самый редкий, из всех существующих на Земле газов. Содержание (по массе) радона в атмосфере оценивается цифрой $7 \cdot 10^{-17} \%$. Если принять, что масса атмосферы Земли $5 \cdot 10^{18}$ кг, то масса радона в атмосфере составляет всего $\sim 0,35$ кг.

При обычных условиях радон подчиняется закону Генри и другим газовым законам и, как и другие инертные газы, не вступает в химические реакции. Радон хорошо растворяется в воде, причем растворимость его уменьшается с повышением температуры и увеличением концентрации растворимых солей. Растворимость в воде при комнатной температуре 460 мл/л. В органических растворителях, в жировой ткани человека растворимость радона в десятки раз выше, чем в воде.

Радон распадается с периодом 3,8235 суток, испуская альфа-частицу с энергией 5,59 МэВ, и образует ряд дочерних продуктов распада, основными из которых являются RaA (^{218}Po), RaB (^{214}Pb) и RaC (^{214}Bi). ДПР радона

отличаются от радона химической природой, массой, периодом полураспада и наличием электрического заряда. Конечным продуктом уранового ряда является стабильный изотоп свинца – ^{206}Pb [108].

Радон является инертным газом, но его ДПР имеют положительный заряд и могут притягиваться и «прилипать» к пылинкам в воздухе, образуя радиоактивные аэрозоли. RaA (^{218}Po) распадается с периодом 3 мин, испуская альфа-частицу с энергией 6 МэВ. Другие члены этой цепочки (ДПР) также распадаются с испусканием альфа- и бета-частиц, и фотонного излучения. Период полураспада RaB (^{214}Pb) составляет 26,8 мин, RaC (^{214}Bi) – 19,7 мин.

В цепочке распада ^{232}Th интерес представляет ^{224}Ra , распадающийся с периодом полураспада 3,63 суток с образованием атомов инертного газа торона (^{220}Rn). Торон, в свою очередь, распадается с периодом 55,6 с, испуская альфа-частицу с энергией 6,4 МэВ, и образует дальнейшую цепочку альфа-распадов с наиболее известными изотопами, формирующими радиоактивные аэрозоли: ThA (^{216}Po), ThB (^{212}Pb), ThC (^{212}Bi) – так называемыми дочерними продуктами торона (ДПТ). Конечным продуктом в ториевом ряду является стабильный изотоп свинца – ^{208}Pb [11, 108].

Вследствие наличия газообразных радионуклидов в радиоактивных семействах, все изотопы радона и продукты их распада содержатся в разных количествах во всех объектах окружающей среды – воздухе, воде и грунте. В высокой концентрации радон находится в почве и грунтах, содержащих урановую руду, гранит, сланец, юрские глины, фосфориты и др., для которых характерно повышенное содержание урана или тория. Радон можно обнаружить также в почве, содержащей определенные типы промышленных отходов, таких как отработанная порода из урановых, полиметаллических и фосфатных шахт.

Радон вносит примерно в 20 раз больший вклад в суммарную дозу облучения по сравнению с тороном [159]. Поэтому при рассмотрении проблемы радиационной безопасности основную роль играет именно радон, а торон – существенно меньшую в большинстве ситуаций. Актинон имеет

период полураспада всего 3,96 с и, как следствие, дает небольшой вклад в дозу облучения, которым обычно пренебрегают.

Особенности воздействия ^{222}Rn на организм человека определяются его физико-химическими свойствами. Так как ^{222}Rn является инертным радиоактивным газом, то основной путь его проникновения и воздействия на организм человека связан с поступлением в органы дыхания в составе вдыхаемого воздуха.

Непосредственно ^{222}Rn создает невысокий вклад в дозу облучения легких (не более 2% от суммы вклада изотопов радона и ДПР), а наибольшие значения дозы внутреннего облучения радоном приходится на дочерние ^{218}Po , ^{214}Bi , ^{214}Pb и ^{210}Po . Это связано с тем, что ^{222}Rn инертен, и большая его часть, попадающая в респираторный тракт с вдыхаемым воздухом, в последствие выдыхается, в то время как его короткоживущие ДПР оседают в респираторном тракте и облучают ткани легких.

Так как альфа-частицы, излучаемые радоном и его ДПР, обладают энергией в диапазоне от 4 до 9 МэВ, то данное излучение характеризуется как плотно-ионизирующее, и при взаимодействии с биологической тканью оно имеет высокую относительную биологическую эффективность [41].

1.3. Формирование потенциальной радоноопасности на территории

1.3.1. Геохимия естественных радионуклидов ^{238}U , ^{232}Th , ^{226}Ra

Основные исследования по изучению геохимических характеристик радионуклидов проводились еще в 60-70-е годы 20 века. Советскими и российскими учеными, такими как В.И. Вернадский, А.П. Виноградов, Д.И. Щербаков, В.И. Баранов, В.И. Герасимовский, А.И. Перельмана, В.В. Щербина, Л.В. Таусон, Л.В. Комлев, И.Е. Старик, В.Г. Хлопин, А.И. Тутаринов, Я.Н. Белевцев, Н.П. Ермолаев, Г.В. Войткевич, А.А. Смыслов, В.Е. Плющев, Г.Б. Наумов, М.Н. Альтгаузен, Ф.А. Алексеев, Р.П. Готтих, Н.А. Титаевой, С.Г. Неручева, А.И. Германова и многими другими, а также

зарубежными: Adams, Larsen, Roders, Lovering, Sackett, Rosholt, Husmann, Heier, Davis, Tatsumoto, Vine подробно исследованы геохимические особенности радиоактивных элементов в геологических процессах. В этих исследованиях в основном приводится содержание урана и тория в минералах и горных породах разного состава и происхождения [39, 53, 54, 58, 124, 141, 154, 157, 159].

Геохимические особенности радионуклидов определяются их положением в периодической системе и связаны главным образом с механизмами формирования и преобразования минералов, в кристаллической решетке которых локализованы ионы и атомы изотопов.

Уран является самым тяжелым из химических элементов, достоверно известных в земной коре— он обладает порядковым номером 92 и атомным весом 238,07. В природе известны три изотопа урана, которые характеризуются следующей распространенностью и периодами полураспада его изотопов: $^{238}\text{U} = 99,2739\%$, $T_{1/2} = 4,51 \cdot 10^9$ лет; $^{235}\text{U} = 0,7205\%$, $T_{1/2} = 7,13 \cdot 10^8$ лет; $^{234}\text{U} = 0,0056\%$, $T_{1/2} = 2,475 \cdot 10^5$ лет [124].

Торий - химический элемент 3-й группы седьмого периода периодической системы химических элементов Д. И. Менделеева, с атомным номером 90.

Уран и торий являются членами семейства актиноиды, представителями 5f-элементов, наряду с актинием, протактинием и плутонием. В естественных условиях уран существует как шестивалентный и четырехвалентный элемент, однако его соединения в трехвалентном состоянии удается получить только в лабораторных условиях, хотя данная валентность соответствует группе актиноидов в периодической системе.

Шестивалентный уран проявляет свойства слабого основания. Ион U^{+6} является энергетически нестабильным, его соединения быстро гидролизуются с образованием солей уранила UO_2^{2+} . Что же касается четырехвалентного урана, то его присутствие проявляется в виде катиона U^{4+} , образующего соли типа UCl_4 или $\text{U}(\text{SO}_4)_2$. Четырехвалентный уран

обладает свойствами гораздо более слабого основания, чем шестивалентный. Трехвалентный уран отвечает главной валентности актиноидов, равной трем, обладает более сильно выраженными основными свойствами, чем четырехвалентный уран [124].

В геологической среде торий и уран находятся в форме минералов в составе горных пород, преимущественно магматических. Известно более 100 ториевых и торий содержащих минералов, наиболее распространенные из которых – торианит, торит, церианит и монацит. Минералы урана делятся на первичные (IV) и вторичные (VI). Распространены карбонаты, сульфаты, ванадаты, фосфаты и силикаты урана. Для сульфатов урана (IV) (ураниловая соль) характерно явление люминесценции.

Согласно А.П. Виноградову, среднее содержание урана в земной коре составляет $2,5 \cdot 10^{-40}\%$, а тория $13 \cdot 10^{-40}\%$. Концентрация ^{232}Th и $^{238,235}\text{U}$ в горных породах зависит от принадлежности этих пород к глобальному резервуару (континентальному или океаническому), серии щелочности и содержания SiO_2 .

В одинаковых по составу породах концентрация этих элементов может отличаться более чем на математический порядок в зависимости от принадлежности к более обедненному или более обогащенному резервуару, где более обогащенный (континентальный) резервуар будет иметь более высокие концентрации ^{232}Th и $^{238,235}\text{U}$.

Содержание ^{232}Th и $^{238,235}\text{U}$ в зависимости от щелочности меняется, последовательно возрастая от толеитовой серии, через известково-щелочную к субщелочной. В этой последовательности возрастание щелочности ведет и к увеличению концентрации ^{232}Th и $^{238,235}\text{U}$, при этом связь между ^{232}Th и ^{40}K более жесткая, чем связь ^{40}K и $^{238,235}\text{U}$, что приводит к увеличению соотношения $^{232}\text{Th} / ^{238,235}\text{U}$.

В зависимости от содержания SiO_2 концентрации ^{232}Th , $^{238,235}\text{U}$ и ^{40}K увеличиваются в порядке ультраосновные – основные – средние – кислые, однако при равном содержании SiO_2 концентрации ^{232}Th , $^{238,235}\text{U}$ и ^{40}K могут

сильно варьировать в зависимости от принадлежности к глобальному резервуару и серии щелочности [159].

Постоянными геохимическими спутниками ^{238}U являются его продукты распада ^{226}Ra , ^{222}Rn , хотя каждый из них по своему положению в периодической системе (в соответствии со строением их атомов), характеризуется присущими ему геохимическими свойствами, отличными от урана. Их совместное нахождение с ураном определяется не свойствами электронных оболочек, а связано с ядерным процессом [124].

Первым продуктом распада в рядах ^{232}Th , $^{238,235}\text{U}$ является радий. Известно 4 изотопа радия: $^{228,224}\text{Ra}$, образующиеся в ряду ^{232}Th ; ^{226}Ra , образующийся в ряду ^{238}U и являющийся наиболее долгоживущим ($T_{1/2}=1602$ года); а также ^{223}Ra , образующийся в ряду ^{235}U .

Сравнительно малая продолжительность жизни радия обуславливает его поведение в окружающей среде. Наиболее долгоживущие изотопы ($^{226,228}\text{Ra}$) участвуют в геохимических процессах продолжительностью до 10 тыс. и до 40 лет соответственно. В случае, если продолжительность этих процессов больше, $^{226,228}\text{Ra}$, принимая в них участие, находятся в равновесии со своими материнскими радионуклидами.

Радий в составе горных пород не является результатом геохимических процессов образования магмы и его концентрации определяются концентрациями ^{232}Th , $^{238,235}\text{U}$, за исключением молодых вулканических пород, уже подверженных метаморфизму, в образовании которых участвуют летучие хлориды радия и бария, которые являются изотопными носителями самого радия.

Существует нарушение радиоактивного равновесия в продуктах кор выветривания, которое проявляется в избытке радия относительно урана. Например, коэффициент равновесия между ураном и радием может колебаться от единицы в зоне дезинтеграции до 1,7 в глинистых продуктах. На некоторых участках наблюдается сдвиг в сторону радия на сотни и тысячи процентов, что приводит к отсутствию урана и значительному

присутствию радия. Сорбционный и биогеохимический барьеры играют важную роль в концентрации радия в горных породах, почвах и илах. Известны геохимические провинции с повышенным содержанием радия на Земле [36, 48, 159].

Подсчеты баланса радиоактивных элементов, выполненные В.И. Васильевой с учетом плотности и пористости пород, свидетельствуют о значительном общем дефиците урана и радия в образованиях кор выветривания [48, 159].

Состояние равновесия между U и Ra характеризуется коэффициентом равновесия C_{pp} . Величина C_{pp} подсчитывается из выражения:

$$C_{pp} = \frac{Ra}{U} \cdot \frac{1}{3,7 \cdot 10^{-7}} = \frac{Ra}{U} \cdot 2,9 \cdot 10^6, \quad (1)$$

где Ra – содержание Ra в исследуемой руде, %; U – содержание U, %

При наличии кислой реакции уран легко выносится такими водами, а радий накапливается в виде сульфатов. Происходит сдвиг радиоактивного равновесия. Являясь дочерними продуктами распада радия, в рядах ^{235}U , ^{238}U , ^{232}Th , образуются изотопы радона: ^{222}Rn (радон), ^{220}Rn (торон), ^{219}Rn (актинон), наиболее долгоживущим из которых является ^{222}Rn ($T_{1/2}=3,8$ суток), другие же имеют $T_{1/2}$ 54,5 с и 3,9 с соответственно [48, 159].

1.3.2. Механизмы эксхалации радона с земной поверхности

Радон образуется при распаде изотопов радия в рядах актиния, урана-радия и тория, родоначальниками которых являются $^{235,238}\text{U}$ и ^{232}Th соответственно, и входящих в структуры различных минералов, в составе горных пород, минеральная составляющая которых меняется в зависимости от их происхождения [72]. Вне зависимости от структуры минерала, содержащего материнский радий, радон не способен эманировать в газовую фазу, если он образовался в глубине кристаллической решетки этого минерала. Это связано с тем, что время перехода радона из твердой фазы кристаллической решетки минерала в газовую фазу окружающей среды больше, чем продолжительность периода полураспада радона. По этой же

причине, способность радона к миграции не оказывает существенного влияния на его перераспределение в геологической среде, а основной причиной его повышенного содержания в поровом воздухе объясняется концентрацией материнского радия.

Перенос радона в поровом пространстве описывается двумя основными моделями – диффузионного и конвективного переноса. Диффузионный перенос осуществляется без приложения внешних сил вследствие теплового движения атомов в условиях неравномерной концентрации радона, в итоге приводя к выравниванию его концентрации в определенном объеме [72].

Ведущим и наиболее изученным механизмом радона является диффузия, а параметром, характеризующим расстояние от источника эманирования из материнской породы до момента эксхалации, является диффузионная длина, которая даже при наиболее благоприятных условиях, в наименее плотном грунте не превышает двух метров. Редким исключением могут являться зоны сейсмической активности и места разуплотнения грунта, где ведущим механизмом переноса радона в почвенном воздухе является конвекция [72, 106, 107].

В устойчивых системах, таких как горные породы и минералы, не подверженные выщелачиванию и коллоидному переносу, ^{226}Ra находится в равновесии с материнскими нуклидами. Поскольку ^{226}Ra имеет период полураспада 1600 лет, геохимические процессы, в которых он может участвовать самостоятельно, имеют непродолжительный срок, за исключением процессов породообразования с участием изотопных носителей ^{226}Ra , таких как, например, хлорид бария. Поэтому концентрация ^{226}Ra в породах и почвах, как правило, зависит от присутствия в них равновесных ураносодержащих минералов [72, 159].

Конвективный перенос радона осуществляется при воздействии внешних сил одновременно с движением воздуха или воды, соответственно находясь в объеме газовой или жидкостной фазы. В этом случае перенос радона осуществляется по мере движения фазы, в которой он находится, с

той же скоростью и в соответствии с условиями и законами миграции газов и жидкостей [72, 106, 163].

Поскольку преобладающим механизмом переноса радона является диффузия, наибольшая скорость эксхалации радона будет наблюдаться в верхних слоях почвы, сложенных четвертичными отложениями, такими как песчаные, глинистые отложения, обладающие большим коэффициентом диффузии, чем коренные материнские отложения, однако в случаях обнажения дочетвертичных отложений в результате эрозии или антропогенной деятельности, источником высокой эксхалации радона за счет диффузии могут быть и метаморфические и магматические породы [72, 107, 163]. Конвективный перенос радона преобладает в трещинах скальных пород (гранитов, базальтов, известняков, песчаников и т.п.). Для ненарушенных скальных пород и рыхлых песчано-глинистых отложений более характерна диффузия. В микропорах глинистых пород объемное перемещение газов затруднено, и в ненарушенных глинах диффузия является единственным механизмом переноса радона. Конвективный перенос радона характерен для горноскладчатых областей и щитов платформ (южная Европа, Скандинавия, Кавказ, Урал и т.п.), где на дневную поверхность выходят скальные породы. В таких районах миграционные потоки вещества приурочены к зонам повышенной трещиноватости и раздробленности пород, в которых перенос жидкостей и газов происходит значительно активнее, чем в ненарушенных скальных массивах. Наиболее интенсивно конвекция протекает на территориях с высоким геотермальным градиентом в зонах активных тектонических разломов, где радон выносится к поверхности земли в восходящих газовых струях и потоках подземных вод с относительно больших глубин (до 100 м), образуя мощные радоновые аномалии в приповерхностных отложениях и почве [106, 111, 159, 165]. То есть в данных условиях поступление радона к поверхности земли определяется в основном выносом «глубинного» радона. В районах с высокой сейсмической активностью содержание радона в почвенном воздухе испытывает

значительные колебания в периоды концентрации и разгрузки напряжений в земной коре, в связи с чем эти колебания изучаются в целях прогноза землетрясений [57, 72, 106, 153, 159].

1.4. Нормативно-правовое обеспечение радиационной безопасности

Правовые основы радиационной безопасности в России определены в нормативных правовых документах разного уровня. Основными являются Федеральные законы: ФЗ от 09.01.1996 № 3-ФЗ (ред. от 18.03.2023 «О радиационной безопасности населения» и Федеральный закон от 30.03.1999 № 52-ФЗ «О санитарно-эпидемиологическом благополучии населения».

Требования радиационной безопасности при воздействии ИИИ на персонал, население и окружающую природную среду регулируются двумя документами:

- Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009) [113];
- Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ-99/2010) [123].

Допустимое значение эффективной дозы, обусловленной суммарным воздействием природных источников излучения, для населения не устанавливается. Снижение облучения населения достигается путем установления системы ограничений на облучение населения от отдельных природных источников излучения, которые прописаны в:

- СанПиН 2.6.1.2800-10 «Требования радиационной безопасности при облучении населения природными источниками ионизирующего излучения» [60];
- МУ 2.6.1.2397-08 Оценка доз облучения групп населения, подвергающихся повышенному облучению за счет природных источников ионизирующего излучения [128].
- Методические указания МУ 2.6.1.2838-11 «Радиационный контроль и санитарно-эпидемиологическая оценка жилых, общественных и производственных зданий и сооружений после окончания их строительства,

капитального ремонта, реконструкции по показателям радиационной безопасности» Главный государственный санитарный врач РФ 28.01.2011 [139].

Требования распространяются на регулируемые ИИИ: изотопы ^{222}Rn и его ДПР, гамма-излучение природных радионуклидов [113, 123].

1.4.1. Нормирование радона в помещениях жилых и общественных зданий

В приземном слое атмосферного воздуха измеряется объёмная активность радона. А нормируется содержание радона, согласно НРБ-99/200, в единицах ЭРОА_{Rn} для воздуха помещений на стадиях строительства и эксплуатации жилых и общественных зданий. При этом среднегодовая ЭРОА_{Rn} в воздухе помещений жилых и общественных зданий на стадии строительства не должна превышать 100 Бк/м^3 , а на стадии эксплуатации 200 Бк/м^3 . ЭРОА_{Rn} определяется как $\text{ЭРОА}_{\text{Rn}} = \text{ОА}_{\text{Rn}} \times F$, где F – коэффициент равновесия изотопов радона и их ДПР. F определяется инструментально, если такой возможности нет, то принимается равным 0,4 согласно рекомендациям МКРЗ, либо 0,5 согласно методике определения среднегодовых значений ЭРОА_{Rn} [75, 113, 123, 142, 146 - 150].

Согласно СанПиН 2.6.1.2800-10 среднегодовая ЭРОА_{Rn} в воздухе помещений эксплуатируемых зданий производственного назначения не должна превышать 300 Бк/м^3 ; до ввода в эксплуатацию, после окончания строительства не должна превышать 150 Бк/м^3 [60].

При проектировании участков под строительство жилых и общественных зданий МУ 2.6.1.2398-08 и СанПиН 2.6.1.2800-10 контролируется плотность потока радона (ППР) из грунта. Согласно санитарным правилам, земельный участок, отведенный под строительство, будет соответствовать требованиям если значения ППР с поверхности грунта с учетом погрешности не превышают $80 \text{ мБк/(м}^2 \cdot \text{с)}$. Земельные участки, отведенные под строительство производственных зданий, будут

соответствовать требованиям санитарных правил если ППР с поверхности грунта с учетом погрешности не превышает 250 мБк/(м²*с) [60, 140].

1.4.2. Содержания природных радионуклидов в объектах окружающей среды

Содержания природных радионуклидов в объектах окружающей среды не нормируется.

В стандартных условиях монофакторного поступления радионуклидов, определенных в разделе 8 НРБ-99/2009, годовое поступление радионуклидов через органы дыхания и среднегодовая объемная активность их во вдыхаемом воздухе не должны превышать числовых значений ПГП и ДОА, приведенных в Приложениях 1 и 2 НРБ-99/2009, где пределы доз взяты равными 20 мЗв в год для персонала и 1 мЗв в год для населения для техногенного облучения. В условиях нестандартного поступления радионуклидов величины ПГП и ДОА устанавливаются в соответствии с санитарным законодательством. Для природного облучения вводится понятие ограничение дозовых нагрузок.

Удельное содержание ЕРН в объектах окружающей среды определяется по показателям удельной и объемной активности, в зависимости от размерности объекта окружающей среды (масса или объем). Для оценки содержания в твердых материалах основных ЕРН (²²⁶Ra, ²³²Th, ⁴⁰K) используется усредненный показатель удельной эффективной активности ($A_{эфф}$) [70]. Однако во многих исследованиях показатель $A_{эфф}$, согласно НРБ-99/2009, используется для оценки строительных материалов, а также других твердых материалов, потенциально содержащих ЕРН, такие как почвы. Для будущего строительства жилых и производственных зданий и дорог должны применяться грунты и породы с соответствующими НРБ-99/2009 уровнями $A_{эфф}$, где согласно Пункту 5.3.4.:

$A_{эфф} = A_{Ra} + 1,3A_{Th} + 0,09A_K \leq 370$ Бк/кг для материалов, используемых в строящихся и реконструируемых жилых и общественных зданий;

$A_{эфф} = A_{Ra} + 1,3A_{Th} + 0,09A_K \leq 740$ Бк/кг для материалов, используемых в дорожном строительстве в пределах территории населенных пунктов и зон перспективной застройки, а также при возведении производственных сооружений;

$A_{эфф} = A_{Ra} + 1,3A_{Th} + 0,09A_K \leq 1500$ Бк/кг для материалов, используемых для строительства вне населенных пунктов,

где A_{Ra} – удельная активность ^{226}Ra , A_{Th} – удельная активность ^{232}Th , A_K – удельная активность ^{40}K .

1.4.3. Ограничение дозовых нагрузок населения и персонала от воздействия природных ИИИ

Из ОСПОРБ – 99/2010 следует: «Степень радиационной безопасности населения характеризуют следующие значения эффективных доз облучения от всех основных природных источников ионизирующего излучения:

- менее 5 мЗв/год - приемлемый уровень облучения населения от природных источников ионизирующего излучения;
- свыше 5 до 10 мЗв/год - облучение населения является повышенным;
- более 10 мЗв/год - облучение населения является высоким.

Для оценку степени радиационной безопасности населения за счет изотопов ^{222}Rn и его ДПР, например воздуха в помещениях или в питьевой воде, её можно характеризовать в сравнении с величиной допустимого ограничения эффективных доз облучения.

В первоочередном порядке необходимо проводить мероприятия по снижению уровней облучения от ПИИИ для групп населения, подвергающихся облучению в дозах более 10 мЗв/год.[74]

Обзор литературы [69, 91, 116, 121, 157, 166] позволил выявить ряд проблем, связанных с современным нормированием радона и его ДПР в жилых и производственных помещениях.

Нормирование содержания радона в жилых и общественных помещениях в России осуществляется с 1989 года по показателю ЭРОА_{Rn}. У такого метода есть свои преимущества и недостатки.

Преимуществом применения ЭРОА_{Rn}, при нормировании содержания радона для населения, является то, что при расчете эффективной дозы не можно не учитывать неизвестный сдвиг равновесия между радоном и его ДПР. Однако не существует таких технических средств, которые позволили бы напрямую измерить среднегодовое значение ЭРОА_{Rn} и его ДПР. Есть неопределенность в расчетах из-за сезонных вариаций поступления радона.

В России при обследовании уровней радона в помещениях применяют разные методы измерения ОА_{Rn}. Для перехода от измеренной ОА_{Rn} к ЭРОА_{Rn} используют фиксированное значение коэффициента равновесия F, которое может быть равным от 0,4 до 0,5, исходя из разных документов. Часто возникают недопонимание и проблемы, связанные с использованием в России нормирования по ЭРОА_{Rn}, а не по измеренной величине ОА_{Rn} [69]. Эти проблемы приводят к непониманию, особенно при работе с международными организациями, такими как НКДАР ООН и ВОЗ.

В соответствии с рекомендациями МКРЗ (Публикация 65 МКРЗ) [75] в процессе оптимизации защиты в ситуации существующего облучения устанавливается референтный уровень (РУ).

Облучение радоном относится именно к ситуации существующего облучения, поскольку источник радона – естественная радиоактивность земной коры, существует на момент принятия решения о необходимости обеспечения защиты и является объектом, на который невозможно воздействовать непосредственно.

Референтный уровень (РУ) представляет собой уровень дозы или риска, выше которого неприемлемо допускать облучение и ниже которого следует проводить оптимизацию защиты. Введение понятия РУ в рекомендациях МКРЗ в 2007 г. явилось определенной новацией. В противоположность уровню вмешательства РУ, который не устанавливает четкую границу между безопасным и опасным воздействием, а определяет неприемлемо высокий уровень риска. Основываясь на данных объединенного анализа риска возникновения рака легкого при облучении

радоном и данных по дозиметрическому моделированию легких, МКРЗ рекомендовала установить национальные РУ объемной активности (ОА) радона не выше 300 Бк/м^3 , что соответствует годовой эффективной дозе 10 мЗв [149]. Те же данные побудили ВОЗ рекомендовать снизить национальный РУ до 100 Бк/м^3 [43].

Если в качестве приоритета использовать ограничение значения величины годовой эффективной дозы, то в этом случае очень большое количество зданий будет необходимо реабилитировать, что с экономической точки зрения совершенно неподъемная работа на данном временном этапе. Это проблема, которая будет рассматриваться в данной работе.

1.5. Источники ПИИИ на население

После признания радона ведущим фактором в облучении населения, началось интенсивное исследование территорий, в результате которого были собраны данные об уровнях радона в зданиях разных регионов Российской Федерации [157].

В России на протяжении более 50 лет ведется активное обследование территорий в разных субъектах на содержание ^{222}Rn и его ДПР в зданиях и учреждениях, такие работы проводятся разными организациями Роспотребнадзора, в структуре ФМБА подведомственными организациями: ФГУП НТЦ РХБГ и ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна, организации Росатома (ФГУП «РАДОН» и др.), организации РАН (ИПЭ УрО РАН, институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН и др.) и некоторые другие. Проведенные исследования позволили выявить территории, которые характеризуются повышенным содержанием ^{222}Rn , и соответственно, являются потенциально радоноопасными для проживания населения.

Территории, где осуществляется добыча и переработка урановых руд, а также прилегающие к ним территории могут быть загрязнены естественными радионуклидами.

Такие территории в районе уранодобывающих предприятий могут представлять потенциальную опасность из-за высокого содержания изотопов

урана, ^{226}Ra и ^{232}Th . Кроме того, они являются источником радиоактивного газа радона и его дочерних продуктов распада (ДПР), которые вносят значительный вклад в общую годовую эффективную дозу облучения (СГЭД) для персонала и населения. Доля этой дозы может составлять до 80% от общей СГЭД [8, 32, 33].

Проведенный анализ радиационного состояния предприятий неядерных отраслей промышленности указывает на необходимость уделять особое внимание вопросам обеспечения радиационной безопасности работников при воздействии природных ПИИИ в производственной среде. Эта проблема актуальна не только для отраслей, где высокий уровень облучения связан с особенностями производственного процесса, таких как неурановые рудники, шахты, подземные сооружения, переработка минерального и органического сырья, но также и для обычных производственных помещений [155, 156].

В горнодобывающей отрасли наибольшие уровни облучения работников природными источниками излучения обычно возникают в процессе производства. В зависимости от вида добываемых полезных ископаемых дозы облучения работников часто составляют 50-100 мЗв/год [156].

1.6. Методы измерения объемной активности радона

1.6.1. Определение содержания радона в воздухе помещений

Существующие методы измерения ОА_{Rn} можно разделить на 3 основные группы: мгновенно-разовые (инспекционные), полу-(квази-)интегральные и интегральные. В качестве исключения можно выделить радон-мониторы, способные проводить как разовые измерения, так и длительный мониторинг, однако эти приборы, как правило, основаны на датчиках, используемых в приборах для инспекционных измерений. В зависимости от цели используется тот метод, который подходит под конкретную решаемую задачу при радиационном контроле или мониторинге.

Также важно отметить, что квазиинтегральные методы измерения OA_{Rn} подразумевают использования измерительной аппаратуры, предназначенной и для контроля ППР.

1.6.1.1. Инспекционные методы измерения

Инспекционные методы измерения позволяют получить значения OA_{Rn} за короткий промежуток времени. Они позволяют получить значения OA_{Rn} и $ЭРОA_{Rn}$ в режиме реального времени. Для инспекционных измерений OA_{Rn} в приборах используются сцинтилляционные и полупроводниковые детекторы, либо ионизационные камеры [109].

Радиометры радона, в которых используется сцинтилляционный детектор, также называют «Ячейками Лукаса». Принцип работы ячеек Лукаса заключается в регистрации α -излучающих ДПР ^{222}Rn (^{218}Po , ^{214}Po) на стенках, покрытых сцинтиллятором $ZnS(Ag)$, имеющим окно для сопряжения с фотоэлектронным умножителем (ФЭУ) [21]. При распаде ^{218}Po , ^{214}Po при взаимодействии α -частицы с детектором возникают сцинтилляции, интенсивность которых пропорциональна энергии α -частиц. К преимуществам ячеек Лукаса можно отнести высокую чувствительность, которая позволяет производить измерения в широком диапазоне OA_{Rn} с высокой точностью. Главными недостатками ячеек Лукаса можно назвать высокую стоимость технических элементов, при их недостаточной надежности, что в свою очередь ставит под сомнение возможность использования такого оборудования в качестве полевого.

Одним из наиболее распространенных приборов со сцинтилляционным детектором является радиометр «Radon Scout PMT» производимый немецкой компанией «SARAD GmbH». Главными преимуществами этого прибора является достаточно высокая скорость и точность измерений, большой диапазон детектируемой активности (для Radon Scout RTM от 0 до 10 МБк/м³). Такие приборы часто используются в лабораториях радиационного контроля, когда основной задачей является измерения большого количества воздушных проб за короткое время. К примеру, такие

задачи могут решаться при геологической разведке месторождений урана. В качестве недостатка сцинтилляционных детекторов важно отметить недостаточное разрешение, которое не всегда позволяет производить спектрометрический анализ детектируемых аэрозолей, что необходимо для идентификации ДПР радона, следовательно исключается возможность инструментального определения OA_{Rn} [52].

В настоящее время широко распространены радиометры радона, в основе которых используется электростатическая камера с полупроводниковыми детекторами (ППД). Забор воздуха в электростатическую камеру осуществляется либо активно, путём прокачки воздуха, либо пассивно через пористый материал. Определение OA_{Rn} в этом случае происходит за счет детектирования α -частиц ^{218}Po , 90% атомов которого имеют положительный заряд. Для обеспечения направленного движения α -частиц в сторону ППД внутри электростатической камеры между стенкой и детектором создается разность потенциалов от 1 до 4 кВ, после чего происходит их осаждение на поверхности детектора или фильтра и регистрация. Среди приборов с электростатической камерой и ППД наибольшее распространения в России нашли радиометры из серии «РРА-01М» и их современная модификация «Альфарад» (НТМ «Защита») и радиометр РАА-3-01 «АльфаАЭРО» (НТЦ «Амплитуда»). Диапазон измерения OA_{Rn} при измерении радиометром «Альфарад» составляет от 20 до 2×10^4 Бк/м³. Предел допускаемой основной относительной погрешности при измерении в диапазоне от 20 до 100 Бк/м³ – $\pm 30\%$; в диапазоне от 100 до 20000 Бк/м³ – $\pm 20\%$. «Альфарад» имеет два измерительных канала, предназначенных для измерения OA_{Rn} и $ЭРОA_{Rn}$ в воздухе, а также имеет режим измерения OA_{Rn} в воде методом барботирования. Радиометр «АльфаАЭРО» широко используется в качестве полевого прибора, а также службами радиационной безопасности различных предприятий. Основной режим работы «АльфаАЭРО» заключается в непрерывной прокачке воздуха через электростатическую камеру и осаждении ДПР $^{222,220}Rn$ на

аналитическом фильтре. Ключевой особенностью данного прибора является его способность инструментально определять OA_{Rn} , $ЭРОA_{Rn}$ и коэффициент равновесия в режиме непрерывного мониторинга. Относительная неопределенность измерения данного прибора рассчитывается статистически при помощи программного обеспечения самого прибора при доверительном интервале $p=0,95$ и составляет от 15% до 30% для $ЭРОA_{Rn}$ и от 20% до 40% для OA_{Rn} [51].

Радиометры с ППД имеют ряд преимуществ перед сцинтилляционными радиометрами. Радиометры радона с электростатической камерой ввиду хорошего разрешения ППД имеют возможность инструментально определять $ЭРОA_{Rn}$ и коэффициент равновесия, являются более надежными и могут использоваться в качестве полевых приборов. Однако стоит учесть, что ППД имеют меньшую чувствительность относительно сцинтилляционных детекторов.

Наиболее технологически сложными радиометрами радона являются приборы, в основе которых используется ионизационная камера [52]. В основе ионизационной камеры используется атмосферный воздух или иная смесь газов. Внутри ионизационной камеры находятся два электрода, на которые подается постоянное напряжение, а газ-наполнитель является проводником. Регистрация α -частиц в этом случае основана на их способности к ионизации. Образуя заряженные атомы проводника из нейтральных, α -частицы ДПР радона приводят к изменению проводимости наполнителя, и, следовательно, к изменению силы тока пропорционально OA_{Rn} . Так же, как и в электростатических камерах, отбор воздуха в ионизационных камерах осуществляется либо пассивно через фильтр, либо активно с принудительной прокачкой.

В связи с технологическими сложностями таких приборов они имеют значительно более высокую стоимость в сравнении с другими. Радиометры с ионизационной камерой имеют наиболее высокий диапазон измерения OA_{Rn} и высокую точность измерений. Ввиду высокой стоимости и инерционности

таких приборов их не используют в качестве полевых. Такие приборы не рассчитаны на быструю обработку большого количества проб. Чаще всего такие приборы используются в качестве эталонов, и применяются в сфере обеспечения единства измерений. Среди специалистов широко пользуется спросом эталонный радиометр OA_{Rn} «AlphaGUARD» ранее производимый немецкой компанией «SAPHYMO GmbH», в 2016 году вошедшей в структуру французского производителя Bertin Technologies. Этот прибор обладает не большой неопределенностью: 15% при OA_{Rn} от 10 до 100 Бк/м³ и 6% при OA_{Rn} более 100 Бк/м³ и имеет диапазон измерения OA_{Rn} от 10 до 2.000.000 Бк/м³.

1.6.1.2. Квазиинтегральные методы

Квазиинтегральные методы измерения параметров радона основаны на его способности к сорбции на активированном угле. Такие методы применяются в случае необходимости учета динамики радона за сравнительно небольшой промежуток времени. Известно, что значения OA_{Rn} могут претерпевать временные колебания, связанные с климатическими условиями и условиями воздухообмена. При измерении такими методами можно получить средние значения OA_{Rn} за 1-6 суток и среднее значение ППР за 1-10 часов. Такие методы измерения OA_{Rn} являются наиболее актуальными, если решаемые задачи не требуют получения динамики радона за более продолжительный период времени (сезон или год), но инспекционных измерений недостаточно для достоверной оценки среднего содержания радона в помещении за определенный временной интервал. Такие задачи могут решаться при вводе новых зданий в эксплуатацию или при оценке потенциальной радоноопасности зданий на стадии строительства, а также при оценке потенциальной радоноопасности участков земли, отведенных под строительство на предпроектной стадии.

Для квазиинтегральных измерений среди российских специалистов широко применяется измерительный комплекс «КАМЕРА-01» (НТЦ «Нитон»). Комплекс предназначен для измерения OA_{Rn} в воздухе и воде,

OA_{226Ra} в воде и ППР с поверхности земли и строительных конструкций. Принцип работы с данным измерительным комплексом заключается в предварительном экспонировании угля в специальных колонках и последующим измерением активности на блоках детектирования γ - и β -излучения (БДБ). Измерение OA_{Rn} в активированном угле на БДБ проводится в спектрометрическом режиме по γ - и β -излучению короткоживущих ДПР радона ^{214}Pb и ^{214}Bi , находящихся в равновесии с ^{222}Rn . Для пассивного отбора воздуха на активированный уголь при экспонировании адсорберов на ППР используются накопительные колонки НК-32, при экспонировании на OA_{Rn} – сорбционные колонки СК-13. В комплексе предусмотрена возможность принудительной прокачки для активного отбора для измерения OA_{Rn} в пробах воздуха [101].

«КАМЕРА-01» имеет предел допускаемой основной относительной погрешности $\pm 30\%$ для всех режимов. Основными преимуществами данного метода можно назвать хорошую точность измерений, и крайне невысокую стоимость. Однако поскольку уголь имеет невысокий предел сорбции радона, квазиинтегральные методы не могут использоваться при необходимости получения среднегодовых значений OA_{Rn} , а измерительный комплекс «КАМЕРА-01» имеет диапазон измерения OA_{Rn} при пассивном отборе от 20 до 100.000 Бк/м³, что существенно ниже диапазонов измерений многих радиометров. Поскольку измерения OA_{Rn} в угле производится по дочерним ^{214}Pb и ^{214}Bi , которые находятся в равновесии с ^{222}Rn , данный метод исключает возможность инструментального определения ЭРОА_{Rn} и коэффициента равновесия [101].

1.6.1.3. Интегральные методы

Согласно пункту 5 НРБ-99/2009 нормируемой величиной воздействия радона на населения является среднегодовая ЭРОА_{Rn}, которая рассчитывается по результатам измерений разной длительности в разные сезоны. При проведении радиоэкологического мониторинга ЭРОА_{Rn} использование инспекционных методов измерения не имеет экономической

целесообразности, а квазиинтегральные методы не могут использоваться из-за предела сорбции радона на активированном угле. Поэтому при проведении мониторинга содержания радона в помещениях используются интегральные методы. Суть методов заключается в регистрации α -частиц изотопов радона и их ДПП на поверхности твердотельных трековых детекторов (ТТД). Разные материалы, изготовленные из органических полимеров, имеют способность регистрировать α -излучение. α -частицы, попадая на материал таких детекторов, оставляют следы (треки). Образование треков происходит вследствие полной или частичной потери энергии налетающей частицы, в результате чего происходит радиационное нарушение в объеме материала. Вдоль трека происходит изменение структуры вещества и увеличение химической растворимости материала ТТД [101]. В качестве ТТД используются различные материалы. Широко распространены CR-39, LR-115 и Makrofol, реже используется поликарбонат. Большинство этих материалов, используемых для определения уровней концентрации радона, регистрируют только тяжелые частицы, и не способны регистрировать β - и γ -излучение, а треки α -частиц ДПП радона визуально не отличимы от треков ^{222}Rn , и, следовательно, с их помощью невозможно инструментально определить ЭРОА_{Rn} или фактор равновесия. Поэтому измеряемой величиной при определении содержания радона интегральным методом является ОА_{Rn} . Для исключения внешнего влияния на результат измерений ТТД помещаются в пробоотборные камеры (экспозиметры), конструктивно выполненные таким образом, чтобы не допустить проникновения в них других изотопов радона, но обеспечить свободное прохождение ^{222}Rn [101].

На сегодняшний день единственным зарегистрированным в России средством измерения ОА_{Rn} интегральным методом является комплект аппаратуры ТРЕК-РЭИ-1М. Комплект предназначен для экспонирования детекторов LR-115-2. Суть методики заключается в экспонировании детекторов, помещенных в экспозиметры РЭИ-4 на протяжении двух месяцев в тёплый и двух месяцев в отопительный период. После экспозиции

детекторы подвергают химическому травлению с целью дальнейшего обнаружения треков. Для химического травления детекторов LR-115-2 используется 6N раствор NaOH. Травление производится на протяжении 120 минут при температуре 50°C. После травления треки можно обнаружить и подсчитать оптическим способом, либо с помощью электроискрового счетчика АИСТ-4. Электроискровой счетчик позволяет автоматизировать процесс подсчета треков, что имеет большую значимость при проведении мониторинга. ТРЕК-РЭИ-1М имеет диапазон измеряемых значений OA_{Rn} в воздухе от 20 до 2000 Бк/м³ при экспозиции в течение 30 сут., при этом измерительный диапазон расширяется пропорционально времени экспозиции. Пределы основной допустимой относительной погрешности: $\pm 50\%$ процентов при OA_{Rn} от 20 до 50 Бк/м³ и $\pm 30\%$ при OA_{Rn} от 50 до 2000 Бк/м³ [66]. Детекторы LR-115-2 имеют ограниченный диапазон энергий регистрируемых α -частиц (от 1,5 до 3 МэВ), однако при измерении OA_{Rn} этого диапазона достаточно.

Наиболее распространенными в мире ТТД для интегральных измерений OA_{Rn} являются детекторы CR-39. CR-39 (алилдигликолькарбонат) широко используется в оптике для производства линз и защитных экранов, поэтому является значительно более доступным. В отличие от LR-115-2 CR-39 имеют значительно более широкий диапазон регистрации частиц. CR-39 значительно более плотный и пластичный, условия химического травления для него делают процесс обработки материала в несколько раз более трудоёмким. Длительность травления LR-115-2 занимает 120 минут, в то время как продолжительность травления CR-39 может составлять от нескольких часов до нескольких суток в зависимости от условий травления и производителя материала. В то же время эта пластичность делает детектор проще в обращении, в то время как даже незначительные повреждения плёнки (царапины, потёртости и т.д.) после химической обработки становятся существенными дефектами, влияющими на результат подсчета треков. Главными преимуществами CR-39 являются его значительно более

широкий измерительный диапазон и доступность. Поскольку CR-39 повсеместно широко применяется в оптике, его можно приобрести даже на общественных интернет-площадках.

Интегральные методы измерения OA_{Rn} используются для проведения годового мониторинга содержания радона в помещениях. Кроме того, эти методы отличаются невысокой стоимостью оборудования и себестоимостью его использования, и обладают необходимой точностью. Одной из главных проблем этого метода является необходимость использования усредненного коэффициента равновесия при определении среднегодовых значений $ЭРОA_{Rn}$, что зачастую приводит к неправильной оценке СГЭД облучения населения за счет природных ИИИ. Приоритетной задачей является освоение CR-39 и организация производства аналога плёнки Kodak, поскольку эта компания прекратила производство LR-115–2. В данный момент уже имеется аналоговый опытный образец нитроцеллюлозной плёнки [77].

1.6.2. Анализ данных по содержанию радона

При анализе данных о содержании ^{222}Rn в зданиях, необходимо учитывать закон распределения данных, который, как показывают исследования [85, 88, 99] не описывается нормальным распределением. Исходя из этого для того, чтобы оценить средний показатель OA_{Rn} использование среднего арифметического значения некорректно, так как это приводит к завышению показателя в 1,3–2,1 раза. Это приводит к ошибочным оценкам СГЭД облучения населения и рисков для здоровья населения [8, 32, 88].

Автор [85], который разработал подходы к оценке массивов данных о содержании радона, утверждает, что: «Анализ необходимо начинать с валидации данных, т.е. проверки соответствия результатов метрологическим характеристикам использованных средств измерений (сравнение с нижней границей диапазона измерений и пределом насыщения для конкретного ТТД). Далее следует предварительный анализ данных: построение Q-Q диаграммы для визуальной оценки соответствия распределения значений натуральных

логарифмов ОА радона нормальному закону; поиск выбросов с помощью модифицированного тау-теста Томпсона с дальнейшей идентификацией верхних экстремальных значений с помощью модифицированного метода Тьюки и итерационным их устранением из массива. Завершающий этап – это основной анализ данных: проверка гипотезы о нормальном характере распределения значений натуральных логарифмов ОА радона с помощью критерия Колмогорова-Смирнова (т.н. Goodness-of-Fit test) и значения натурального логарифма функции правдоподобия (т.н. Log-likelihood function); расчет основных характеристик, описывающих массив данных (медиана с 95% доверительным интервалом, геометрическое стандартное отклонение, минимум и максимум, квантили распределения уровня 0,90 и 0,95, ожидаемая доля значений ОА радона выше 400 Бк/м³)» [85,88].

1.7. Выводы по главе 1

Проблема облучения населения радоном актуальна и исследуется как зарубежными, так и российскими исследователями. Проведенные экспериментальные исследования разными исследователями позволили выявить основные механизмы и поступления радона в здания, однако существует неопределенность в оценке радоноопасности территорий в реальных условиях, с учетом разных факторов.

В связи с этим, в данном диссертационном исследовании были определены задачи по выявлению закономерности поступления радона в помещения жилых и общественных зданий на потенциально радоноопасных территориях в реальных условиях; по выявлению корреляционных зависимостей между объемной активностью радона в помещениях жилых и общественных зданий и радиационными показателями и геологическими характеристиками территории. Видна проблема отсутствия радиоэкологических критериев оценки и при оценке степени потенциальной радоноопасности территории.

Референтный уровень (РУ) представляет собой уровень дозы или риска, выше которого неприемлемо допускать облучение и ниже которого следует

проводить оптимизацию защиты. Введение понятия РУ в рекомендациях МКРЗ в 2007 г. явилось определенной новацией. В противоположность уровню вмешательства РУ, который не устанавливает четкую границу между безопасным и опасным воздействием, а определяет неприемлемо высокий уровень риска. Основываясь на данных объединенного анализа риска возникновения рака легкого при облучении радоном и данных по дозиметрическому моделированию легких, МКРЗ рекомендовала установить национальные РУ объемной активности ОА радона не выше 300 Бк/м^3 , что соответствует годовой эффективной дозе 10 мЗв. Те же данные побудили ВОЗ рекомендовать снизить национальный РУ до 100 Бк/м^3 [43, 149, 115, 164].

Таким образом, сопоставление недостатков и преимуществ использования ОА_{Rn} , ЭРОА_{Rn} и эффективной дозы в качестве нормируемой величины показывает, что для установления РУ будет оправдано использовать среднегодовую ОА_{Rn} . При этом следует оговорить условия, при которых устанавливается данная норма (длительность пребывания, значение коэффициента равновесия, значения дозовых коэффициентов и др.) [121, 166].

При расчете эффективных доз от ПИИИ методом расчета [128, 130] получается, что при среднегодовой ЭРОА_{Rn} в воздухе жилых домов на уровне 200 Бк/м^3 , годовая эффективная доза облучения людей составляет около 13 мЗв. Поэтому отдельные группы людей в разных субъектах РФ получают дозы только за счет ^{222}Rn в домах на уровне 20–30 мЗв/год и выше [68]. При этом нормативное значение ЭРОА_{Rn} в воздухе помещений составляет 100 Бк/м^3 для вводимых в эксплуатацию и 200 Бк/м^3 для эксплуатируемых зданий.

Проведенный анализ нормативно-правового обеспечения радиационной безопасности при облучении радоном выявил ряд проблем, поэтому необходимо разработать предложения по совершенствованию нормативно-правового обеспечения по ограничению природного облучения.

ГЛАВА 2. ОБЪЕМ, МЕТОДЫ И МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЯ, КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ РЕЗУЛЬТАТА

2.1. Объём исследования

Объём исследования составил (таблица 2): начиная с 2016 в городе Балей, Забайкальский край в теплый и отопительный период провели 1 296 изм. OA_{Rn} в помещениях общественных и жилых зданий; в городе Лермонтов, Ставропольский край OA_{Rn} в помещениях общественных и жилых зданий – 3 236 изм.; МАЭД ГИ – 165 изм.; ППР – 119 изм.; 120 проб почвы и грунтов - удельной активности ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K .

Таблица 2 – Объём исследования в г. Балей и г. Лермонтов

Параметры контроля	n, шт
Город Балей	
OA_{Rn} в помещения жилых и общественных зданий:	1 296
Город Лермонтов	
OA_{Rn} в помещения жилых и общественных зданий:	3 236
Радиационное обследование территории по показателям:	
МАЭД ГИ, мкЗв/ч	165
ППР, мБк/м ² с	120
Удельная активность в почве на территории природных радионуклидов ^{40}K , ^{226}Ra , ^{232}Th , Бк/кг	120

Полевые исследования проводились в период с 2016 по 2018 года: в октябре 2016, в июне и в октябре 2017, а также с апреля по октябрь 2018 года. Проводили исследования в жилой зоне г. Лермонтова, включая отвалы штольни №32 на юго-восточной окраине города, а также в пределах массива горы Бештау. На горе Бештау исследовали западный склон горы, непосредственно прилегающий к городу, от Орлиных Скал до Монастырского озера, а также юго-западные и южные склоны, где расположена основная часть бывших горных выработок.

В пределах территории г. Лермонтова провели измерение МАЭД ГИ на высоте 0,1 м от поверхности земли, удельная активность радионуклидов в

пробах пробы почвы, грунта, донных отложений, а также ППР с поверхности грунта.

Провели детальные исследования радиационной обстановки на территории детских садов и школ города Лермонтов (всего 15 объектов), которые включали: измерения МАЭД ГИ и ППР в точках, расположенных по периметру зданий на расстоянии не более 10 м друг от друга, а также определение удельной активности естественных радионуклидов в грунтах. Отбор проб грунта проводился из скважин, пробуренных ручным буром до глубины 0,5 - 1,5 м (2- 4 скважины на территорию каждого объекта).

В результате проведенных исследований вся территория города была охвачена сетью точек опробования, достаточной для того, чтобы охарактеризовать радиационную обстановку г. Лермонтова и его окрестностей.

2.2. Аппаратура и методы измерений

Радиационное обследование территории проводили МАЭД ГИ с помощью дозиметра гамма-излучения «Дрозд» на высоте 0,1 м от поверхности почвы. В каждой точке проводили не менее трех измерений с погрешностью не более 20 %, по которым вычислялось среднее значение МАЭД ГИ в точке.

Измерения ППР проводили с использованием оборудования, входящего в измерительный комплекс для мониторинга радона «Камера01». Накопительные камеры НК-32 устанавливали на поверхность почвы в специально подготовленные лунки. Время экспонирования камер составляло от 4 до 8 часов. После экспонирования уголь из накопительных камер пересыпался в сорбционные колонки СК-13 и доставлялся в лабораторию. По истечении 3 часов с момента окончания экспонирования проводились измерения активности радона в угле (по дочерним продуктам распада) и определение плотности потока радона с использованием бета-радиометра «Камера» и программного обеспечения «Радон-98».

ППР с поверхности грунта измеряли при помощи оборудования из измерительного комплекса для мониторинга радона "Камера 01". Для измерения использовали накопительные камеры НК-32 (рисунок 4), установленных на поверхность почвы. Время, в течение которого происходило измерение, составляло около 8 часов. После этого уголь из накопительных камер пересыпали в сорбционные колонки СК-13 и направляли в лабораторию. Через 3 часа после окончания измерений проводили определение активности радона в угле и ППР с использованием бета-радиометра "Камера" и программного обеспечения "Радон-98" на основе дочерних продуктов распада.

Пробы подпочвенного воздуха и воздуха в устьях штолен отбирали на активированный уголь с помощью пробоотборника (почвенного зонда), входящего в комплект оборудования радиометра «РАДОН» и шприца Жане. Это делали для последующего определения объемной активности радона в подпочвенном воздухе, как функции активности радона в угле, в соответствии с методикой и при помощи оборудования, входящего в комплект «Камера» [50].



Рисунок 4 – Накопительная камера НК-32, установленная в подготовленную лунку

Пробы грунта и почвы, объемом около 1 л, отбирали в двойные полиэтиленовые пакеты и снабжались этикетками, глубина отбора проб почвы составляла 0,1-0,2 м. Измерения удельной активности радионуклидов

проводились на стационарном гамма-спектрометрическом комплексе «РАДЭК» (ЦГиЭ г. Лермонтов ФМБА России) и гамма-спектрометрическом комплексе «Прогресс» (кафедра «Строительство» инженерного факультета Пятигорского филиала СКФУ). Оба комплекса оснащены сцинтилляционными детекторами NaJ(Tl) 63X63 мм. Погрешность измерений удельной активности Ra-226, Th-232 и K-40 не превышает 30% (2σ). Минимально измеряемая удельная активность составляет для Ra-226 – 8 Бк/кг, для Th-232 – 5 Бк/кг, для K-40 – 50 Бк/кг.

2.3. Интегральный метод измерений объемной активности радона комплектом «ТРЕК-РЭИ-1М»

2.3.1. Отбор проб воздуха

Для проведения измерений OA_{Rn} (размещения экспозиметров радона в помещениях) выбирали преимущественно помещения с наиболее длительным пребыванием населения или персонала. В детских садах – это игровые комнаты, комнаты для занятий и т.д., в школах – классы, в медицинских и иных учреждениях рабочие кабинеты, в жилых домах – спальни и гостиные. Обследование помещений в режиме их штатной эксплуатации проходило в два периода: в теплый период и в отопительный период.

Выборка включала в себя дома малой этажности разных годов постройки, имеющие различные строительные характеристики, из различных стройматериалов (шлакоблочные, деревянные, кирпичные, брусчатые, крупнопанельные), с подвалами и без них.

2.3.2. Принцип измерения интегральным методом

Измерения OA_{Rn} в зданиях проводились интегральным методом с помощью комплекта аппаратуры ТРЕК-РЭИ-1М. Принцип измерения OA_{Rn} интегральным методом заключается в том, что когда альфа частицы радона попадают на детектор, они оставляют радиационные повреждения (треки), которые после специальной химической обработки подсчитываются.

Интегральный метод измерения объемной активности радона проводят с помощью комплекта «ТРЕК-РЭИ-1М».

Комплект аппаратуры для измерения объемной активности радона в воздухе трековым методом ТРЕК-РЭИ-1М работает на основе принципа регистрации альфа-излучения радона и его ДПР с помощью трековых нитроцеллюлозных детекторов, которые размещают в пробоотборные камеры, с последующей химической обработкой детекторов (травлением) и подсчетом количества зарегистрированных следов (треков) альфа-частиц электроискровым методом.

Для измерений готовили пробоотборные камеры (экспозиметры), содержащие внутри себя трековые нитроцеллюлозные детекторы. Пример экспозиметра можно увидеть на рисунке 5.



Рисунок 5 – Экспозиметр РЭИ-4

Каждому экспозиметру и детектору присваивали номер. После подготовки, экспозиметры развешивали в исследуемых помещениях.

После экспонирования все камеры собираются, из них извлекаются детекторы, которые подвергают химической обработке (травлению).

Для травления детекторов готовится 6N раствор NaOH в дистиллированной воде. [80]

Детекторы подвергаются травлению в течение 2 часов при температуре 50 градусов. После травления детекторы извлекают и промывают в дистиллированной воде, затем сушат.

Для подсчета полученных треков используется искровой счетчик треков «АИСТ-4». Внешний вид и лицевая панель счетчиков АИСТ-4 и показаны на рисунке 6.

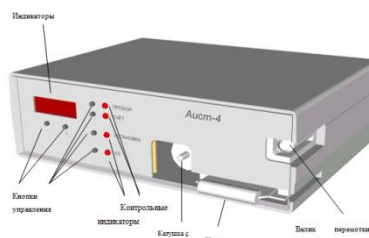


Рисунок 6 – Искровой счетчик треков Аист-4

Прибор включает в себя следующие узлы: кассету, автоматизированный механизм прижима и лентопротяжки, электронный блок.

Принцип работы искрового счетчика заключается в следующем. Два электрода (пластина, алюминизированная лента) и детектор представляют собой конденсатор, который заряжается от источника высокого напряжения через сопротивление.

Через сквозные треки в детекторе происходит искровой пробой. Каждый измерительный цикл включает в себя два режима: “пробой” и “счет”, которые осуществляются при разных значениях высокого напряжения, подаваемого на детектор.

2.3.3. Расчет объемной активности радона

После подсчета количества импульсов, рассчитывается ОА радона. Значение ОА радона, Бк/м³, рассчитывают по формуле:

$$A_{Rn} = \frac{N_{\text{ср}} - N_{\text{ф}}}{\varepsilon \cdot T} \quad (2)$$

где: A_{Rn} - объемная активность радона, Бк/м³, зафиксированная соответствующим детектором; $N_{\text{ср}}$ - среднее значение счета на детекторе из ПКТД РЭИ-4 в режиме "счет", трек/см²; $N_{\text{ф}}$ - среднее значение фона для данного ТД, трек/см²; ε - чувствительность соответствующего ТД, указанная в паспорте комплекта, (трек/см²)/(Бк*сутки/м³); T - длительность экспозиции, сутки [101].

ЭРОА_{Rn} рассчитали значения сезонных и годовых индивидуальных годовых эффективных доз внутреннего облучения взрослых жителей за счет короткоживущих ДПР изотопов радона в воздухе [101].

2.3.1. Обоснование выбора коэффициента равновесия F

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 из внутреннего воздуха помещений. Такой принцип нормирования связан с тем, что основную часть дозы внутреннего облучения ^{222}Rn формируют его ДПР изотопы ^{214}Bi и ^{214}Pb . 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 [29, 30]. Различие связано с географическими и климатическими особенностями, а также условиями режима проветривания помещений в России. В работе использовали значение 0,5.

2.4. Углубленное обследование зданий

Углубленное радоновое обследование зданий проводили с использованием совокупности дозиметрических, радиометрических и спектрометрических измерений. Обследование проводили по МУ 2.6.062 – 2017 [90], которое разработано во ФГУП НТЦ РХБГ ФМБА России с непосредственным участием автора диссертации. Углубленные обследования направлены на проведение измерений для выявления значимости вклада грунта под зданием и строительных материалов в формирование сверхнормативных уровней радона, идентификации основных источников поступления радона в каждом из зданий, для выявления путей поступления на разные этажи и путей переноса радона внутри зданий. Суть метода углубленного обследования заключается в том, что после проведения предварительного измерения радона в помещениях зданий интегральным

методом, учитывающим все колебания радона в течение длительного времени, проводится измерения OA_{Rn} экспрессными методами и измеряется спектрометрическими методами удельная активность ЕРН в строительных материалах, а также проводится радиоэкологическая оценка территории. Все эти этапы позволяют в конкретном здании выявить все источники поступления радона, на основании которых разрабатываются противорадоновые мероприятия, предусмотренные соответствующими методическими рекомендациями.

2.5. Статистическая обработка данных

Статистическую обработку данных проводили посредством ПО Microsoft Excel 2021 и Statistica 10, карты распределения показателей радиационной обстановки построили при помощи QGIS 3.20.

Для проверки закона распределения полученных данных использовали визуальный подход: построение Q-Q диаграмм и гистограмм распределения значений; а также критерии Шапиро- Вилка [30], и Колмогорова-Смирнова [30, 85].

Выбор статистического критерия для оценки различий между выборками основывался на характере распределения данных: для нормально распределенных данных использовались параметрические критерии, а при ассиметричном распределении - непараметрические. Использованные критерии: Краскела-Уоллиса; критерий Манна-Уитни, одновыборочный критерий Вилкоксона [153]. Корреляционный анализ проводили с использованием расчета непараметрического коэффициента корреляции Спирмена. Результаты считались статистически значимыми при $p < 0,05$.

2.6. Расчет среднегодовой дозы облучения населения

Метод определения индивидуальных эффективных доз внутреннего облучения населения за счет изотопов радона и его короткоживущих дочерних продуктов в воздухе представлен в МУ 2.6.1.1088-02 «Оценка

индивидуальных эффективных доз облучения населения за счет природных источников ионизирующего излучения» [130].

Значение индивидуальной годовой эффективной дозы внутреннего облучения взрослых жителей населенного пункта (района и т.п.) За счет короткоживущих дочерних продуктов изотопов радона в воздухе рассчитывается по данным измерений ЭРОА изотопов радона в воздухе помещений и атмосферном воздухе на территории населенного пункта (района и т.п.) по формуле:

Доза за отопительный и теплый периоды при условии принятия измеренного значения ЭРОА_{Rn} ко всему периоду рассчитывается по формулам:

- для отопительного периода:

$$E^{вн, Rn} = 0,01584 \cdot (K_{от} \cdot (ЭРОА_{экр.ул} + 4 \cdot ЭРОА_{от.зд.})), \text{ мЗв}, \quad (3)$$

- для теплого периода:

$$E^{вн, Rn} = 0,01584 \cdot (K_{т} \cdot (ЭРОА_{экр.ул} + 4 \cdot ЭРОА_{т.зд.})) \text{ мЗв}, \quad (4)$$

- среднегодовая доза (как сумма доз отопительного и теплого периодов в году):

$$E^{вн, Rn} = 0,01584 \cdot (K_{от} \cdot (ЭРОА_{экр.ул} + 4 \cdot ЭРОА_{от.зд.}) + K_{т} \cdot (ЭРОА_{экр.ул} + 4 \cdot ЭРОА_{т.зд.})), \text{ мЗв/год}, \quad (5)$$

в которых приняты следующие обозначения:

ЭРОА_{экр.ул} - значение ЭРОА_{Rn} в воздухе на открытой территории населенного пункта (ЭРОА_{экр.ул} = 6,5 Бк/м³ в соответствии с данными о среднемировых значениях ЭРОА_{Rn} в приземном слое атмосферного воздуха при отсутствии измерений);

ЭРОА_{от.зд.} - ЭРОА_{Rn} в помещениях жилых и общественных зданиях, Бк/м³, за отопительный период года;

ЭРОА_{т.зд.} - ЭРОА радона в помещениях жилых и общественных зданиях, Бк/м³, за теплый период года.

$K_{т, от}$ - доля теплого / отопительного периода в году [133].

2.7. Расчет индивидуального пожизненного риска

Индивидуальный пожизненный риск рассчитывали по МР 2.6.1.0145-19 [145]. Оценка радиационного риска за счет воздействия природных ИИИ в течение года проводится по двум факторам: внутреннее облучение при ингаляционном поступлении радона и его ДПР и внутреннее облучение за счет употребления питьевой воды, содержащей радон.

Значение ИПР за счет употребления питьевой воды, содержащей радон, рассчитывается по формуле (6):

$$Риск_w = K_{ном} \cdot E_{Rn,w} \quad (6)$$

где $K_{ном}$ – номинальный коэффициент риска, значение которого, согласно п. 2.3

$E_{Rn,w}$, Зв – эффективная доза внутреннего облучения, обусловленная присутствием радона в питьевой воде.

Значение среднего ИПР смерти от радон-индуцированного рака легкого, вызванного облучением радоном и его ДПР в течение одного календарного года, рассчитывается по формуле (7):

$$Риск_{Rn} = 8800 \cdot 8 \cdot 10^{-10} \cdot (A_{Rn}^{здания} \cdot \Omega + A_{Rn}^{улица} \cdot [1 - \Omega]), \quad (7)$$

где 8800, ч/год – стандартное количество часов в году;

$8 \cdot 10^{-10}$ м³/(Бк·ч) – номинальный коэффициент риска, рекомендованный в Публикации 126 Международной комиссии по радиологической защите;

$A_{Rn}^{здания}$, Бк/м³ – ОА радона в воздухе помещений;

$A_{Rn}^{улица}$, Бк/м³ – ОА радона в воздухе на открытой территории населенных пунктов;

Ω – относительное время пребывания человека в помещениях. Для населения РФ значение Ω принимается равным 0,8. При наличии достоверной информации о существенном отличии этого значения для населения конкретного субъекта РФ может быть использовано реальное значение коэффициента.

ГЛАВА 3. ОПИСАНИЕ ОБЪЕКТОВ МОНИТОРИНГА

В качестве объектов мониторинга выбрали территории проживания населения в районе предприятия по добыче золота и монацита (города Бaley, Забайкальского края) и предприятия по добыче урана ЛПО Алмаз (Лермонтов Ставропольского края).

Эти территории расположены на разных геологических структурах и природных зонах (рисунок 7), отличаются физико-географическими характеристиками, соответственно условия формирования повышенной потенциальной радоноопасности могут быть разными. Объекты наследия расположены в непосредственной близости к жилой зоне городов.

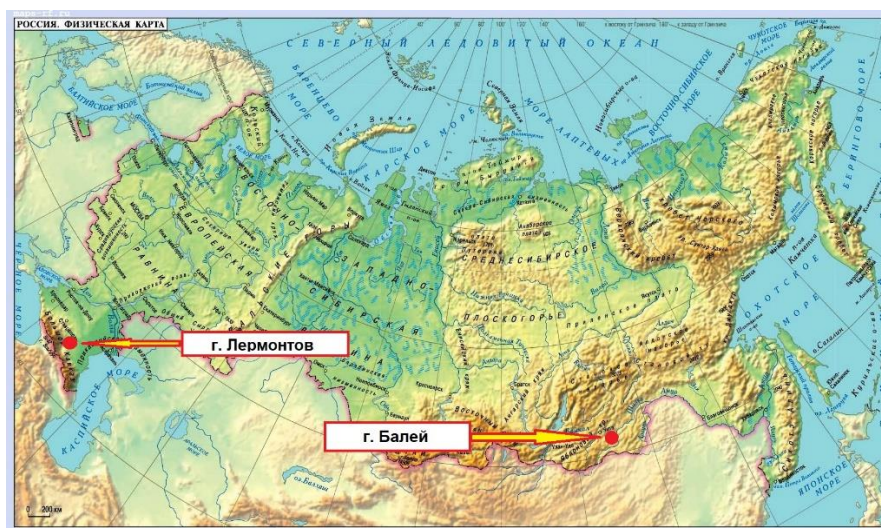


Рисунок 7 – Территории расположения объектов мониторинга

Одна из потенциально радоноопасных территорий располагается в Забайкальском крае, в районе города Бaley и его окрестностей, вблизи расположения объекта ядерного наследия. Предприятие «Бaleyзолото» разрабатывало золоторудные месторождения в непосредственной близости к городу до 1995 г., кроме того, на территории с 1949 по 1965 секретное предприятие № 1084 добывало монацит, содержащий высокие концентрации тория и урана, для разработки ториевой бомбы.

Деятельность предприятий оказала техногенное воздействие на территорию города, привела к образованию хвостохранилищ, карьеров и отвалов, изменению гидрологической сети и загрязнению территории

природными радионуклидами ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{238}U при распаде которых образуется природный газ радон, торон ($^{220,222}\text{Rn}$) и продукты их распада (ДПР).

Второй объект мониторинга расположен вблизи выведенного из эксплуатации предприятия по добыче урана ЛПО Алмаз (г. Лермонтов, Ставропольский край). Предприятие осуществляло разработку урановых месторождений с 1949 г. Эрозия и обвалы грунта изменили состояние отвалов отработанных горных пород, выявив технологические недостатки реализованных проектов по рекультивации загрязненных территорий. Выход из строя установки по очистке шахтных вод создал угрозу радиоактивного загрязнения близлежащих территорий.

Провели изучение физико-географических характеристик территории объектов мониторинга, особенностей застройки городов, провели анализ имеющихся данных предыдущих исследований радиоэкологической обстановки.

3.1. Город Балей Забайкальский край

Балей – город в Забайкальском крае, является административным центром Балейского района. Город расположен у подножия Борщовочного хребта, на правом берегу реки Унды, в 350 км к юго-востоку от города Чита. Известен своими месторождениями рассыпного и коренного золота (Балейское, Тасеевское и др.), где происходила активная добыча с 1892 года. Экологическое состояние города отличается крайне высоким загрязнением окружающей среды как природными радионуклидами, так и тяжелыми металлами [44, 73, 92, 102 - 105].

На выбранной территории провели углубленное обследование жилых и общественных зданий на содержание радона.

3.1.1. Физико-географическая характеристика

Город Балей располагается в пределах лесостепной зоны по природно-климатическим и географическим условиям. Данная территория

характеризуется также особенностями рельефа: основными структурными элементами, определяющими рельеф, являются юго-восточные отроги Борщовочного и северо-западные отроги Ононского хребтов, Бaleyская впадина. Перепады высот в пределах территории изучения определяются от 350-400 метров н.у.м., приуроченные к тальвегам долин, до 1062 метров н.у.м. (Борщовочный хребет), что приурочено превышениям водораздельных территорий, а также к гористым участкам. С гидрологической точки зрения рассматриваемая территория расположена в пределах среднего течения реки Унда [127, 136].

Город Бaley расположен в районе распространения вечной мерзлоты островного типа, которая приурочена в основном к отрицательным формам рельефа (долинам, склонам северной экспозиции, падам и локальным понижениям поверхности в форме впадин, ложбин и т.д.). Другие участки поверхности, представленные водоразделами, склонами южной экспозиции, другие положительные формы рельефа, как правило, свободны от распространения вечной мерзлоты. Рассматриваемый район по распространению вечной мерзлоты характеризуется развитием по днищу долины реки Унды, по тальвегам падей Сухая, Каменка, а также в районе Тасеевского месторождения. Распространение мерзлоты определяется наличием наледей, мочажины, распространением заболачивания почв. Мощность многолетней мерзлоты колеблется (по данным бурения сторонними организациями) от 5-6 до 35 м. Под влиянием расположения на северных экспозициях склонов вечная мерзлота по мощности больше на левом берегу реки Унды, чем на правом берегу. Верхняя граница ее залегает на глубине в пределах 1,5 - 4 метров от поверхности, углубляясь на участках распространения поверхностных и подземных вод до 5-7 метров (местами даже глубже). Поднимаясь вверх по склонам, глубина залегания верхней границы вечной мерзлоты увеличивается до 13 метров и постепенно выклинивается. Нижняя граница распространения мерзлоты находится в

основном в пределах 15-30 метров от поверхности, однако местами может достигать более 40 метров [127, 136].

Изучаемая территория характеризуется резко континентальным климатом, здесь выпадает незначительное количество атмосферных осадков, воздух сухой. Для такого климата характерны значительные различия между средними температурами зимних и летних месяцев и резкие колебания суточных температур. Количество осадков в среднем за год составляет 355 мм. Для розы ветров характерны ветры северо-западных и северо-восточных направлений. Снежный покров в зимний сезон достигает 400 мм [127, 136].

Основными факторами, определяющими климатические особенности территории, являются: значительная удаленность от морей и океанов, непосредственная близость к широко распространённым полупустынным и пустынным областям на севере Китая и Монголии. В холодные сезоны в связи с особым географическим положением на территории распространяется мощный отрог Сибирского антициклона, отчего зимой погодные условия характеризуются слабым ветровым режимом, минимальным количеством осадков, незначительной высотой снежного покрова, безоблачностью и низкими температурами. Такие условия и начало климатической зимы продолжаются с середины октября по первую декаду апреля. Далее климатическая весна наступает довольно поздно (в конце марта – начале апреля) и обуславливается быстрой сменой температур и сильными ветрами. Климатическое лето здесь достаточно короткое и продолжается с конца марта до начала сентября и характеризуется большим колебанием дневных и ночных температур. Осенний сезон короткий и отличается обычно безоблачной погодой и сравнительно небольшим количеством осадков. Они достигают годовых значений в 320-380 мм, в основном проявляющиеся в теплый период года, причем, наибольшее количество их приходится на июнь-сентябрь месяцы (более 90 % от общего количества) [127, 136].

3.1.2. Геологическое строение

Геологическое строение территории определяет ореолы распространения естественных радионуклидов в почвах и горных породах региона, в связи с этим имеет значение. На рисунке 8 представлен фрагмент Государственной геологической карты. Территория г. Балей характеризуется наличием коренных горных пород разного происхождения: осадочных и магматических [61].

Территория г. Балей характеризуется наличием коренных горных пород разного происхождения: осадочных и магматических. На этой территории осадочные горные породы представлены аллювиальными отложениями неоплейстоценовой эпохи в виде песчано-галечного материала и глинами; распространены в южной, юго-восточной части города в пределах поймы и надпойменных террас правого берега реки Унда. В пределах поймы коренные горные породы представлены аллювиальными песками, галечниками, песчано-валунно-галечными и гравийно-галечными отложениями, суглинками и глинами. Надпойменные террасы включают также пески и песчано-галечные отложения (пункты 4,6 условных обозначений).

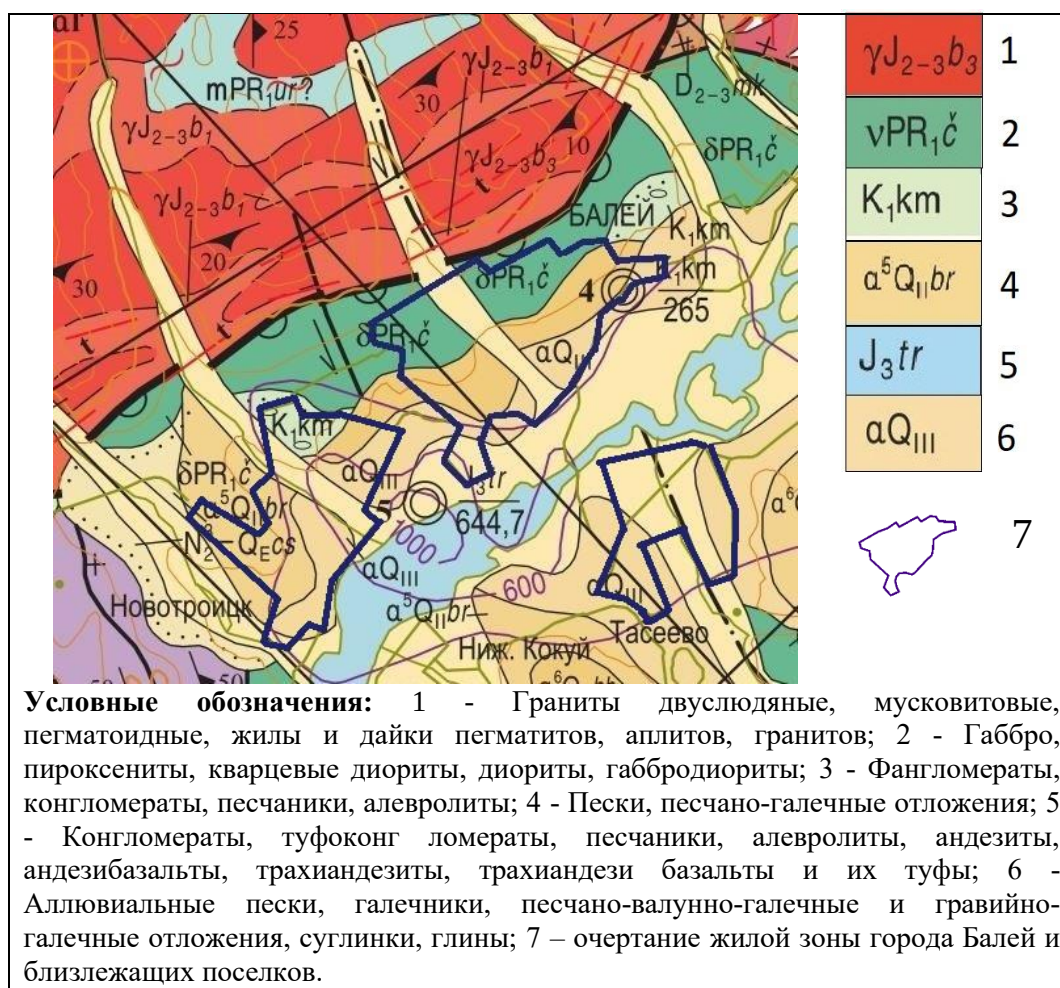
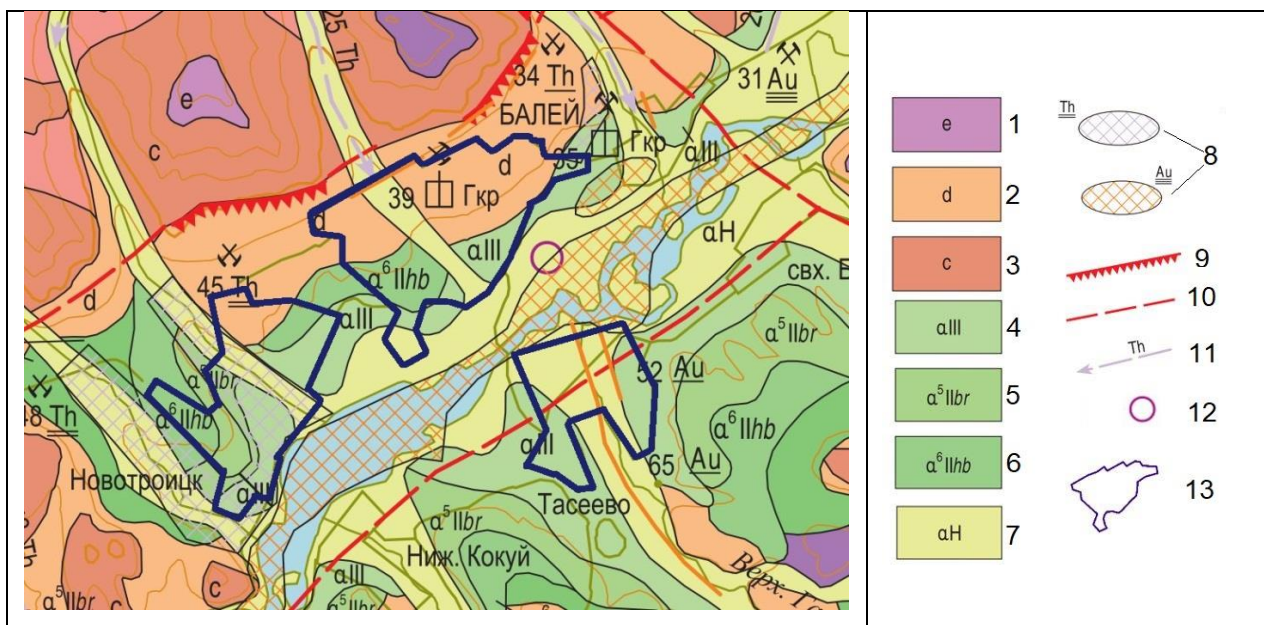


Рисунок 8 – Фрагмент Государственной геологической карты Российской Федерации масштабом 1: 200 000 (Лист М-50-III, Четвертичные отложения) [61, 63]

Через центр города в направлении северо-восток – юго-запад находится переход с осадочной к магматической части территории – Борщовочному гранитному комплексу (пункт №1 условных обозначений). Известно, что для борщовочного комплекса характерна высокая радиоактивность. Граниты борщовочного комплекса характеризуются наличием минералов, содержащих природные радионуклиды, такие как монацит, уранинит и ураноторит [61].

Ниже по склону магматические породы представлены горными породами основного состава: габбро, пироксенитами, кварцевые диоритами, диоритами, габбродииоритами раннего протерозоя. Рассмотрим карту четвертичных отложений на территории города Бaley (рисунок 9).



Условные обозначения: 1 - Элювиальные образования плоских водораздельных поверхностей. Дресва, щебень, глыбы с супесчаным, песчаным и глинистым заполнителем (0,5-3 м); 2 - Делювиальные образования нижних и средних частей склонов. Суглинки, супеси с дресвой и щебнем (1-15 м); 3 - Коллювиальные образования крутых склонов. Глыбы, щебень, дресва с незначительным количеством мелкозема (2-8 м); 4 - Аллювиальные отложения второй, третьей и четвертой надпойменных террас нерасчлененные. Пески, галечники, песчано-галечно-валунные и гравийно-галечные отложения, прослои и линзы суглинков, глин (15-25 м). *Месторождения глин кирпичных*; 5 - Боржигантайский аллювий. Отложения пятой надпойменной террасы р. Унда. Пески, песчано-галечные отложения (до 30 м); 6 - Холбонская свита. Аллювиальные отложения шестой надпойменной террасы. Переслаивание песчаных, гравийных и галечных отложений, линзы суглинков и глин. В низах разреза - галечники с включениями мелких валунов (до 71,5 м). *Месторождения песка строительного, глин кирпичных*; 7 - Аллювиальные отложения пойм. Песчано-галечные отложения, галечники, пески, супеси, суглинки, илы, глины (до 12 м). Месторождения песчано-гравийного материала и глин кирпичных. *Россыпные месторождения золота, ртути, олова, тория*; 8 - Россыпные месторождения золота (Au) и тория (Th); 9 - Тектонические (структурные) уступы четвертичного возраста (предполагаемые); 10 - Тектонические разрывы четвертичного возраста (предполагаемые); 11 - шлиховые потоки тория (в том числе непромышленные россыпи); 12 - места находок многолетней мерзлоты; 13 - очертание жилой зоны города Балей и близлежащих поселков.

Рисунок 9 – Фрагмент карты четвертичных образований Государственной геологической карты Российской Федерации масштаба 1:200 000 (Лист М-50- III) [61, 63]

Четвертичные отложения в районе территории города Балей представлены делювиальными образованиями нижних и средних частей склонов Борщовочного хребта (п.2), а также аллювиальными отложениями, р. Унда. В верхней части хребта преобладает элювий плоских водораздельных поверхностей, представленный дресвой, щебнем, и глыбами с супесчаным, песчаным и глинистым заполнителем. Мощность элювия изменяется от 0,5 до 3м) (п.1).

На склонах распространены коллювиальные образования, представляющие собой глыбы, щебень, дресва с незначительным количеством мелкозема. Мощность этих образований достигает 8 м (п.3).

Надпойменные террасы реки Унда представлены комплексом аллювиальных отложений, представляющий собой преимущественно пески, галечники, песчано-галечно-валунные и гравийно-галечные отложения. (п.4-5).

Далее рассмотрим карту полезных ископаемых на территории города Балей. Карта полезных ископаемых представлена на рисунке 10.

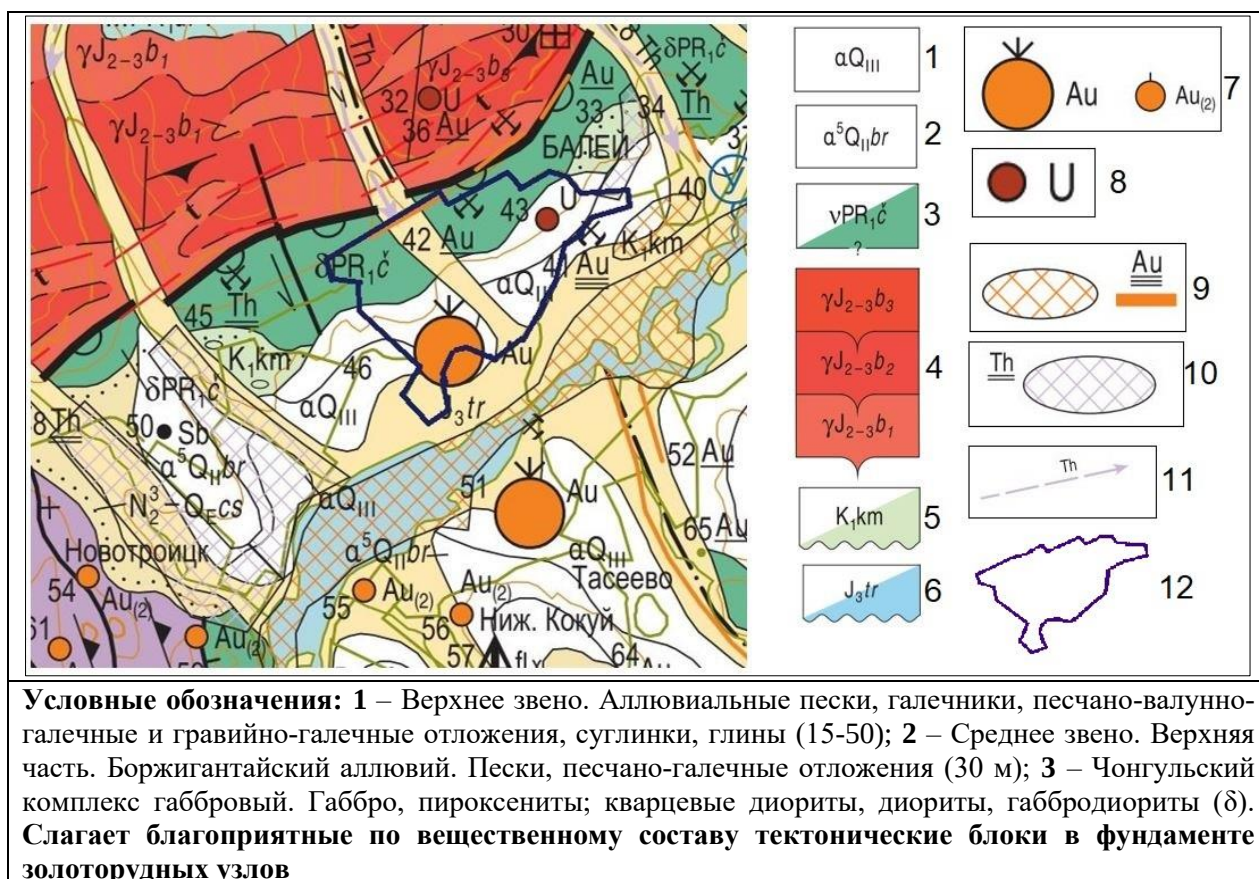


Рисунок 10 – Фрагмент карты полезных ископаемых Государственной геологической карты Российской Федерации масштаба 1:200 000 (Лист М-50- III) [58, 63]

В районе Борщовочного комплекса известно 12 урановых проявлений гидротермального типа. Большинство из них размещается в юго-восточной краевой части Борщовочного гранитного массива в зонах калишпатизации, альбитизации, березитизации и аргиллизации. На карте видно, что в зоне дробления и гидротермальных изменений борщовочных гранитов залегает

проявление №32 «Борщовочное» мощностью 0,5-1,3 м, длиной 25 м с содержанием ^{238}U 0,005-0,36% в зоне дробления (п.8).

Кроме того, пластообразная рудная залежь ^{238}U , размерами 450-600x700-900 м и мощностью от 0,8-1,2 до 4-10м, с содержанием ^{238}U 0,01-0,3%, установлена и в четвертичных пролювиально-аллювиальных отложениях конуса выноса и располагается в черте города Балей (п.8).

Вблизи территории поселка Новотроицк, который входит в состав города Балей, располагаются россыпные месторождения ^{232}Th (п.10) в виде монацитовых россыпей. Установлено, что коренными источниками монацитовых россыпей являются пегматоидные и лейкократовые граниты, а также пегматиты Борщовочного гранитного плутона. Наиболее крупными и богатыми являются пролювиально-аллювиальные россыпи, приуроченные к "белесой" толще в предгорьях Борщовочного хребта. Элювиально-делювиальные и пролювиально-делювиальные россыпи также имеют иногда богатые содержания монацита, но размеры их мелкие. На карте часть из них показана как шлиховые потоки (п.11). По неполным сведениям [61, 63] длина монацитовых россыпей составляла 2,8-6 км, средняя ширина 12-42 м, мощность массы 10-80 м, среднее содержание монацита 240-500 г/м³. Суммарные запасы монацита составляли 65 тыс.т, тория 5,2 тыс.т [61, 63].

3.1.3. Основные источники техногенного воздействия

Добыча россыпей началась в 1858 году, проводилась, в основном, открытым способом, и к 1917 году было добыто более 2400 пудов золота. В 1926 – 1928 годах было открыто Балейское месторождение (урочище Золотая Горка). Был создан комбинат «Балейзолото», 2 сентября 1929 года было добыто первое рудное золото. С этого времени началось интенсивное развитие Балей, а комбинат «Балейзолото» стал одним из ведущих предприятий золотой промышленности страны в предвоенные и послевоенные годы [61, 63].

Новотроицкое рудоуправление, входившее в состав предприятия п/я А1084, в период с 1949 по 1964 год вело разработку монацитовых россыпных

месторождений для последующего извлечения тория. Предприятие располагалось в непосредственной близости от поселка Новотроицк Балейского района Забайкальского края. В состав основные производственных объектов предприятия входили: - семь небольших карьеров; 13 - обогатительная фабрика с промывочными гравитационными установками; - доводочная фабрика для переработки черного концентрата методом магнитной сепарации; - гидротехнические сооружения; - промплощадка с административно-бытовыми помещениями, складскими и прочими зданиями и сооружениями.

В 1964 году предприятие было закрыто. Предприятие оставило после себя незаконсервированные карьеры, хвостохранилища и часть обогатительной и доводочной фабрик. Большинство объектов деятельности предприятия п/я А-1084 оказались загрязнены монацитом. Его содержание в отходах обогатительной фабрики составляло 0,5 %, доводочной – 2 %. Кроме того, на территории промплощадки и жилого поселка Новотроицкого рудоуправления были построены разные объекты с применением торийсодержащих отходов горного производства, которое использовали в качестве наполнителя бетона, штукатурного и строительного растворов [73, 92, 102].

В период с 2013—2015 гг. ФГУП «РосРАО» проводил работы по дезактивации и частичной рекультивации ряда объектов на территории, прилегающей к бывшим объектам предприятия. В ходе этих работ ликвидированы аварийные строительные объекты, загрязненные торием, а также дезактивировано 35 участков, имеющих следы радиоактивного загрязнения (общая площадь 11 га) [102]. Однако, несмотря на комплекс мер, направленных на снижение уровня радиационного загрязнения, множество уже неиспользуемых объектов остаются потенциально радиационно опасными [102].

Согласно данным, предоставленным Управлением Роспотребнадзора по Забайкальскому краю, в период 2010–2018 гг. в г. Балей проводили

исследование состояния территории разные организации, в том числе ФГУП «Научно-технический центр радиационно-химической безопасности и гигиены» ФМБА России (НТЦ РХБГ) [160].

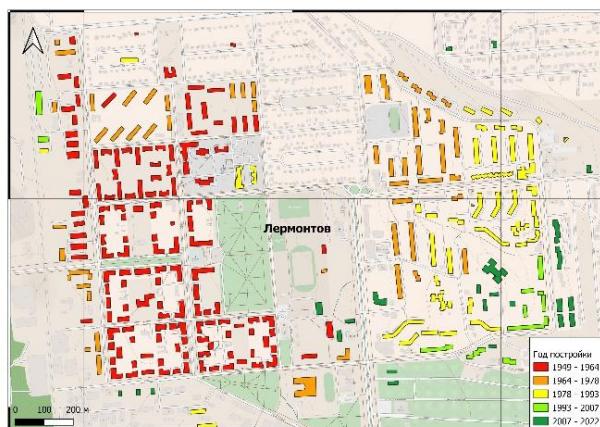
3.2. Город Лермонтов Ставропольский край

Город Лермонтов – один из самых молодых городов Ставропольского края, расположен в центральной части региона Кавказских Минеральных Вод. Входит в состав особо охраняемого эколого-курортного региона Российской Федерации — Кавказских Минеральных Вод (КМВ).

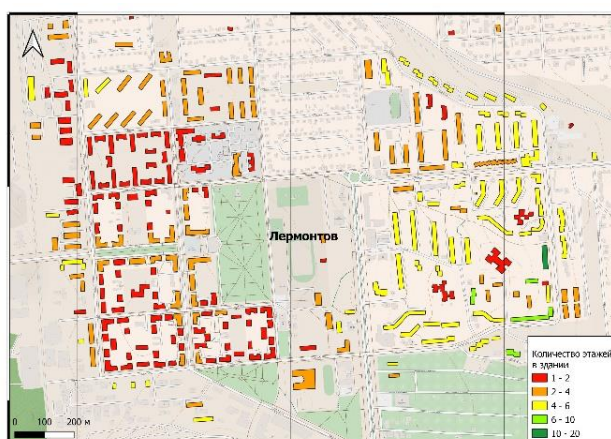
Город расположен на высоте 650 м над уровнем моря в 182 км к юго-востоку от города Ставрополя и граничит с городом-курортом Пятигорском, с городом-курортом Железноводском и с Предгорным районом. Площадь территории города Лермонтова составляет 30,78 тыс. км².

Город Лермонтов был создан в 1952 году и развивался как специализированный город, основным градообразующим предприятием которого было Горно-химическое рудоуправление Министерства среднего машиностроения СССР. С 1956 года город Лермонтов вошел в категорию городов краевого подчинения [87].

Изучили информацию о состоянии жилищного фонда в городе Лермонтов, которая представлена в открытом доступе в сети Интернет [85], нанесли на карту города данные о годах постройки (рисунок 11).



а



б

Рисунок 11 – Годы постройки (а) и этажность (б) зданий г. Лермонтов

Условно город по времени застройки можно разделить на две части: западная - старой застройки и восточная - современной застройки, которая разделяется проспектом Лермонтова.

По характеру застройки город можно разделить на три части: старая часть города (застройка до 1970 года, здания 1-3 этажности в основном без подвалов); современная часть города (многоэтажные здания с подвалами); частный сектор (одноэтажные дома, построенные с использованием материалов с гор Шелудивая, Бештау, в некоторых случаях из отвалов горных пород урановых выработок) [79].

3.2.1. Физико-географическая характеристика

Город Лермонтов расположен на юге Ставропольского края близ окраины города Пятигорска (в пределах 5-7 км от северо-западной его окраины). Территория по географическому своему положению приурочена к

Минераловодской предгорной равнине, при этом располагаясь на водоразделе между долинами рек Кума и Подкумок. Поверхность территории представляет из себя полого-волнистую равнину с высотами до 600 метров, при этом осложненную неглубокими долинами рек, которые, в свою очередь, формируют слабо возвышенные водоразделы и междуречья.

Рельеф территории в пределах г. Лермонтов во много осложнен горными эффузивными образованиями – лакколитами, в центре среди которых находится гора Бештау. В целом рельеф территории сложен так, что город окружен горами Бештау (1401 м), Шелудивая (974 м) и Острая (881 м). По форме Бештау имеет форму пятиглавого конуса и поднимается на 700-800 м относительно окружающей ее равниной поверхностью, которая распространяется на юге и востоке города. Гора представляет собой сложную геологическую структуру и имеет несколько вершин. Данные структуры приурочены к городу Лермонтов и представлены Горой Лохматой, горой Скала (Два Брата) и Малым Бештау. Склоны горы Бештау представлены как пологими поверхностями у подошвы гористого образования, так и крутыми участками у вершины, которые разделены на высоте 820-880 м.н.у.м.

Самый осложненный участок склона находится в юго-западной части, примыкая к горе Скала. Там склон осложнен балками Монастырская, Мокрая и др. Южная часть города Лермонтов расположены в пределах горы Шелудивая, западный склон которой осложнен отрицательными формами рельефа, связанными с разрезкой в процессе добычи строительных материалов. В северо-восточной части города расположен небольшой массив горы Острой, который частично разработан карьерами. Остальные горные образования в районе изучения, а также лакколиты (гора Железная, Развалка, Бык и Верблюды) окружают город Лермонтов с северо-востока, располагаясь на расстоянии 4-12 км от его окраины.

Жилая застройка города Лермонтов находится в пределах холмистого плато, которое постепенно возвышается в направлении к горе Бештау на восток. Абсолютные отметки высот варьируются от 630-680 м в западной

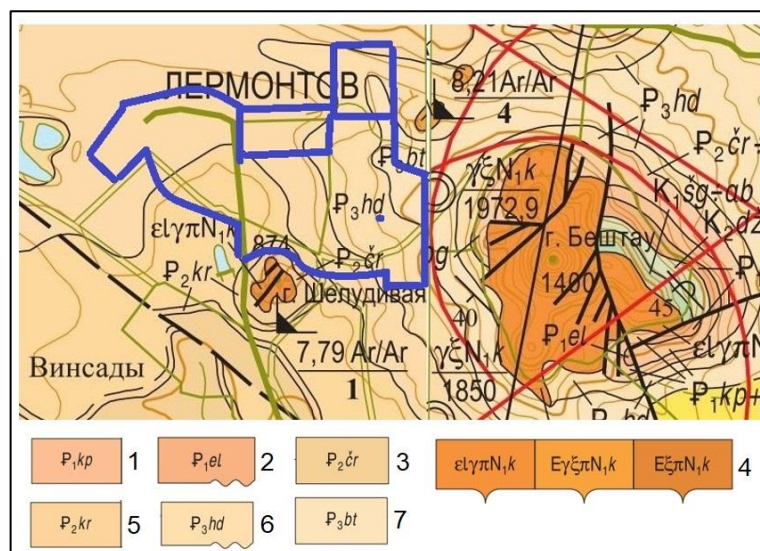
части города до 765-780 м на востоке и 830-875 м в районе бывшего лагеря в городе «Орлиные скалы». Предгорья Бештау покрыты лесными массивами и кустарниковой растительностью в комплексе с обнаженными участками поверхности в пределах более высоких абсолютных отметок высот. Западная часть города находится на III-IV террасе реки Подкумок.

Климатические условия города Лермонтов характеризуются как резко континентальные. Зима здесь умеренно прохладная, летний сезон напротив, очень жаркое. Весна характеризуется мягкими, теплыми погодными условиями, а осень – умеренно прохладная. Минимальные температуры отмечаются в январе (до -33°C), а максимальные отмечаются в июле (до $39-40^{\circ}\text{C}$). Среднемесячные температуры характеризуются следующими значениями: июль до $21,2^{\circ}\text{C}$, январь до $-4,8^{\circ}\text{C}$. Наиболее низкие в течение года температуры связаны с вторжением арктических воздушных масс на рассматриваемую территорию. Длительность периода времени в году выше 0°C составляет примерно 173 дня. Температуры ниже нуля начинают распространяться уже с сентября и могут доходить по продолжительности до мая. В зимний сезон характерна повышенная облачность нижнего яруса, которая сопровождается осадками. Однако гора Бештау является естественным физическим барьером на пути циркуляции влагонесущих воздушных масс часто связанных с восточными ветрами. Расчетная температура самой холодной пятидневки составляет -17°C . Отопительный период составляет 175 суток, средняя температура $-0,5^{\circ}\text{C}$ в районе исследования.

Количество осадков в пределах города Лермонтов характеризуется следующими среднегодовыми значениями: 507 мм. Наибольшее количество осадков выпадает в летнее время: в мае (70 мм), июне (84 мм) и июле (69 мм).

3.2.2. Геологическое строение

На рисунке 12 представлено строение дочетвертичных отложений территории города Лермонтов.



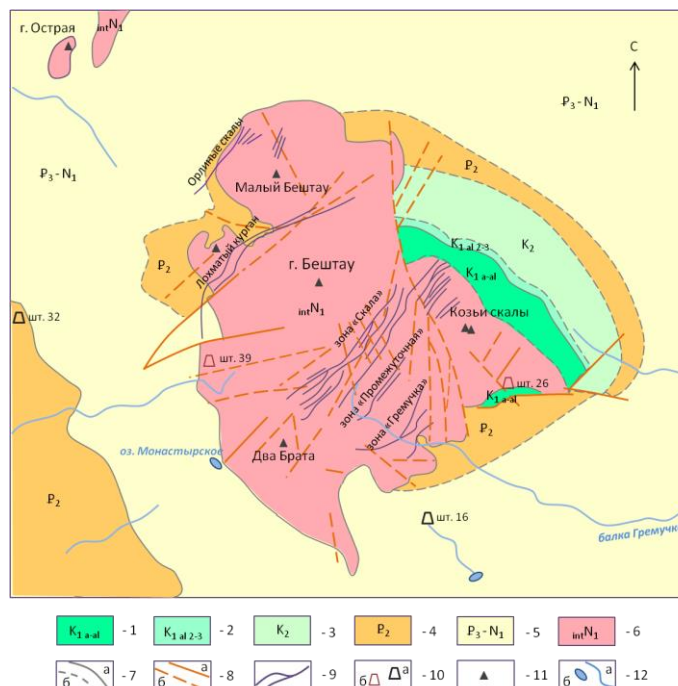
Условные обозначения: 1 –глины, песчаники; 2 – мергели, глины, прослой песчаников; 3 – глины, алевролиты, мергели, прослой песчаников, известняков; 4 – гранит-порфиры, умереннощелочные гранит-порфиры, щелочные граносиенит-порфиры, щелочные сиенит-порфиры; 5 – известняки, мергели, прослой глин; 6 – глины,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

Рисунок 12 – Фрагмент Государственной геологической карты Российской Федерации масштабом 1:200 000 (Листы L38 XXXI, XXXII)

Основным структурным компонентом области, а также всей территории Кавказских минеральных вод, который определяет ее рельеф и влияет на геологические, гидрогеологические, геохимические и геоэкологические характеристики, являются внедренные тела, пронизывающие осадочный чехол и образующие группу магматических "гор-лакколитов".

Отдельные магматические горы-лакколиты окружены обширной приподнятой равниной, состоящей из глин майкопской серии палеогенового возраста. На западе от горы Бештау равнина сменяется карбонатными породами (мергель и известняки) палеогенового и мелового возраста. Самое крупное и сложное структурное образование в районе Минеральных вод – гора Бештау. На её склонах и у подножия расположены крупные населенные пункты, такие как город Пятигорск со своими пригородами, Железноводск, Иноземцево, Лермонтов. Город Лермонтов занимает преимущественно цокольные части склонов магматических гор Бештау и Шелудива [161].

Схема геологического строения горы Бештау приведена на рисунке 13.



Вещественный состав и возраст пород: 1-3 – карбонатные отложения мелового возраста, 4 – мергели палеогенового возраста, 5 – глины майкопской серии, 6 – магматические породы (бештауниты). Прочие знаки: 7 – геологические границы установленные (а), предполагаемые (б), 8 – разломы установленные (а), предполагаемые (б), 9 – урановые рудные жилы, 10 – устья штолен действующие (а), засыпанные (б), 11 – вершины гор, 12 – водоемы.

Рисунок 13 – Геологическая карта-схема горы Бештау

Верхнюю центральную часть горы образует массив кислых щелочных магматических пород – гранит-порфиров, граносиенит-порфиров, сиенит-порфиров, кварцевых порфиров, местами, липаритов и трахитов. Породы магматического комплекса горы Бештау уникальны по своему минеральному и химическому составу, и в геологической литературе обобщенно называются «бештаунит» (рисунок 14).



Рисунок 14 – Коренной выход бештаунита в естественном обнажении [161]

Для верхней части горы, сложенной бештаунитами, характерна значительная крутизна склонов и глубокий эрозионный срез. Нижняя пьедестальная часть склонов, окружающая центральный массив, характеризующаяся слабыми уклонами, сложена толщей осадочных отложений – майкопских глин (рисунок 26), перекрытых обвальным-осыпным шлейфом. Местами по периферии магматического массива на поверхность выведены карбонатные отложения мелового возраста [143, 161]. Наиболее крупный массив осадочных отложений мелового возраста выходит на поверхность в южной части горы, ниже Козьих скал и на восточных склонах Бештау.

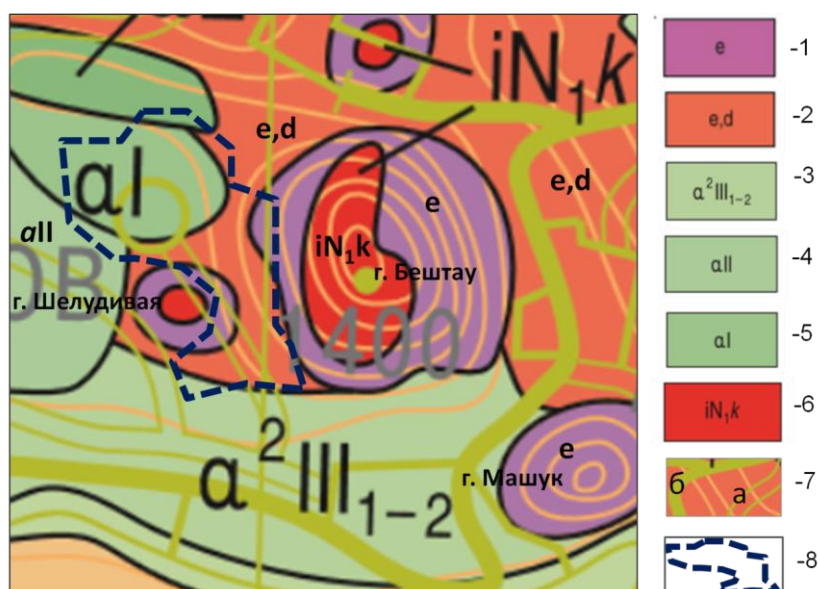
Массив Бештау рассечен сложной системой трещин и разломов (рисунок 3.9). Главный разлом проходит в меридиональном направлении и отделяет основной массив Бештау от магматического массива Козьих Скал и восточного склона, сложенного осадочными преимущественно карбонатными отложениями мелового и палеогенового возраста. Кроме того, выделяется система разломов и трещинных зон северо-восточного простирания к которой приурочены жильные урановые руды бештаугорского месторождения [5, 55, 161, 138]. Близкое геологическое строение

(центральное бештаунитовое ядро, выходящее на дневную поверхность в привершинной части) характерно и для других гор, расположенных в окрестностях Лермонтова, – Шелудивой и Острой, являющихся сателлитами по отношению к Бештау.



Рисунок 15 – Мергелистые глины майкопской серии, разбитые трещинами в котловане в районе ул. Волкова (г. Лермонтов) [161]

На рисунке 3.10 приведен фрагмент Государственной геологической карты среднемиоцен-четвертичных образований масштаба 1:1 000 000, отражающий распространение различных типов приповерхностных рыхлых четвертичных образований.



Условные обозначения: 1 – элювий магматических пород (щебень, дресва, суглинки, мощностью до 1,2 м); 2 – элювий и делювий (суглинки с щебне и дресвой, мощностью до 8,5 м, реже до 10 м); 3 – 5 аллювий надпойменных террас со второй по шестую (пески, глины, суглинки, супеси, гравий); 6 – коренные выходы бештаунитов (гранит-порфиры, граносиенит-порфиры, сиенит-порфиры, кварцевые порфиры); 7 – дороги автомобильные (а) и железнодорожные (б); контуры жилой зоны г. Лермонтова

Рисунок 16 – Фрагмент Государственной геологической карты среднемиоцен-четвертичных образований масштаба 1:1000 000 (распространение приповерхностных рыхлых отложений)

Из рисунка 16 видно, что в восточной и южной части города преимущественно распространены элювиально-делювиальные образования горного шлейфа, в то время как в западной части Лермонтова и на севере исследуемой территории в районе Острогорки, преобладают аллювиальные отложения.

Четвертичные отложения в районе исследований представлены элювиальными образованиями и обвально-осыпным горным шлейфом, перекрывающими склоны Бештау и Шелудивой, а также аллювиальными отложениями, р. Подкумок и ее притоков. В верхней части гор преобладает элювий (разрушенные бештауниты), представленные по механическому составу щебнем, дресвой и суглинками. Мощность элювия изменяется от первых десятков сантиметров (часто полностью отсутствует) до 1,2 м. Ниже по склонам, распространены делювиально-элювиальные образования,

представляющие собой осыпь, состоящую из суглинков и дресвы с многочисленными обломками магматических пород разного размера от мелкого гравия до крупных глыб (рисунок 3.10). Мощность этих образований достигает 8,5 м, а на отдельных участках у подножия пьедестальной части 20 м. По долинам рек и ручьев развит комплекс аллювиальных отложений, представляющий собой преимущественно пески, галечники, пылеватые супеси, реже суглинки и глины с хорошо окатанной галькой. Делювиальные отложения горного шлейфа местами распространяются перекрывают аллювиальные отложения [112]. Четвертичные рыхлые образования на всей территории города выступают в качестве основания фундаментов зданий.

Магматические горные породы, слагающие массив Бештау, характеризуются повышенной радиоактивностью по сравнению с карбонатными и аллювиальными отложениями прилегающей равнины. Повышенные концентрации ^{226}Ra характерны для майкопских глин (70 Бк/кг), слагающих пьедестальную часть горы, что связано с аккумуляцией урана в скоплениях костных останков рыб в этих отложениях. Еще более высокими содержаниями естественных радионуклидов обладают магматические породы – бештауниты, слагающие центральную верхнюю часть горы, $A_{\text{уд}}^{226}\text{Ra}$ в них в среднем достигает 203 Бк/кг.

3.2.3. Деятельность предприятия по добыче урана

С 1949 года ЛПО "Алмаз" занималось разработкой урановых месторождений. История создания этой организации началась в середине 20-х годов прошлого века, когда было обнаружено высокое содержание радона в подземных водах в районе гор Горячей и Бештау (г. Пятигорск). Радиогеологические исследования, проведенные экспедицией "Кольцовской" в 1940-х годах, показали высокое содержание радия и урана в породах магматических гор "лакколитов" Бештаугорского горного массива, демонстрируя перспективность использования данного месторождения в промышленных масштабах [161, 133, 134]. В 1950-х годах было создано горнодобывающее предприятие (рудоуправление № 10) для добычи

урановых руд на горе Бештау, а также гидро-металлургический завод (1954 г.) для переработки руды. Позднее был открыт рудник № 2 (1956 г.) на горе Бык. Помимо традиционной горной добычи, на предприятии была разработана и внедрена новая технология подземного шахтного серноокислотного выщелачивания урана, которая внедрена впервые в мире. Производство также привело к производству минеральных удобрений, соединений скандия и фосфора.

После образования г. Лермонтов (1956 г.) рудоуправление № 10 в 1967 г. трансформировалось в Лермонтовское горно-химическое рудоуправление (ЛГХР), а позднее преобразовано в государственное предприятие «Алмаз». Добыча урановых руд и их переработка в закись-окись урана была завершена на «Алмазе» в 1991 г. после выработки Бештаугорского месторождения и значительного снижения рентабельности производства [45, 133, 135].

После окончания добычи урана на рудниках № 1 (1975 г.) и № 2 (1990 г.) был проведён большой комплекс работ по закрытию штолен и рекультивации отвалов, что значительно улучшило радиационную обстановку на площадке предприятия, в санитарно-защитной зоне и на прилегающей территории [80, 135]. Однако с течением времени происходит частичное разрушение (эрозия, обвалы) защитных покрытий и барьеров вследствие климатических, метеорологических, геологических, сейсмических и антропогенных факторов. Это приводит к выносу на поверхность шахтных вод, содержащих высокие концентрации природных радионуклидов, размыву атмосферными осадками отвалов и хвостохранилища, смыву радиоактивных отходов в водные экосистемы, которые местное население использует в хозяйственно-бытовых и сельскохозяйственных целях (полив огородов, водопой скота при выпасе и др.) [126].

3.3. Выводы по главе 3

Детальный анализ геологического строения территории г. Балей позволил разделить ее в зависимости от механического и минерального состава и физико-химических характеристик горных пород и выявить

однотипные территории: тип 1 – представлен осадочными породами в виде песчано-галечных отложений, галечников, супесей, суглинок, глин; тип 2 – осадочными породами в виде фангломератов, конгломератов, конгломератобрекчий, песчаников, алевролитов; тип 3 – основными и ультраосновными магматическими породами, такими как габбро, пироксены, а также кварцевыми диоритами, габбродиоритами, диоритами.

Деятельность предприятий по добыче золота и монацита в г. Балей оказала существенное техногенное воздействие на экологическое состояние территории, повышенные концентрации радона в горных породах и поверхностных отложениях обусловлены, главным образом, образованием минеральной составляющей, содержащей природные радионуклиды ^{238}U и ^{232}Th ; концентрация которых происходила во времени из-за сочетания физико-географических условий формирования территорий.

Территория г. Лермонтов и гора Бештау сложены отличающимися по радоноопасности горными породами и поверхностными отложениями: территория вблизи горы Бештау, где остались незакрытые урановые штольни, представлена радиоактивными бештаунитами, а жилая зона – относительно слаборадиоактивными осадочными породами и аллювиальными отложениями.

Радоноопасность жилой зоны г. Лермонтов может быть обусловлена геологическим строением территории и природными факторами, формирующими территорию, не связана с деятельностью уранодобывающего предприятия. Оценить степень радоноопасности является одной из главных задач данного исследования.

4.1. Выбор точек контроля

Карта города Бaley с нанесенными на неё обозначениями зданий, в которых находятся обследованные помещения, представлена на рисунке 17.



Рисунок 17 – Распределение точек отбора проб в помещениях в общественных и жилых зданиях на территории, $n = 1296$ точек отбора

На рисунке нанесено схематическое пространственное распределение предприятий по территории проживания населения основных районах города и в пригороде. Точки отбора старались приблизить к техногенным объектам. Распределение точек отбора проб в помещениях в общественных и жилых зданиях на территории г. Бaley и его окрестностях показанное на рисунок 4.1, говорит о том, что жилую зону обследовали достаточно плотно.

Обследуемые здания находятся в разных частях города, а также в прилегающих к городу поселках – Новотроицк, Каменка, поселок имени Отмахова. На рисунке 4.1 выделены и отдельно отмечены территории расположения предприятий по добыче золота и монацитовая россыпь.

4.2. Результаты измерения объемной активности радона в помещениях зданий в г. Балей

Измерили OA_{Rn} в помещениях, рассчитали $ЭРОA_{Rn}$. Провели статистическую обработку данных, гистограмма распределения значений $ЭРОA_{Rn}$ и диаграмма квантиль-квантиль (Q-Q) для натуральных логарифмов значений $ЭРОA_{Rn}$ представлены на рисунке 17, параметры распределения представлена в таблице 3.

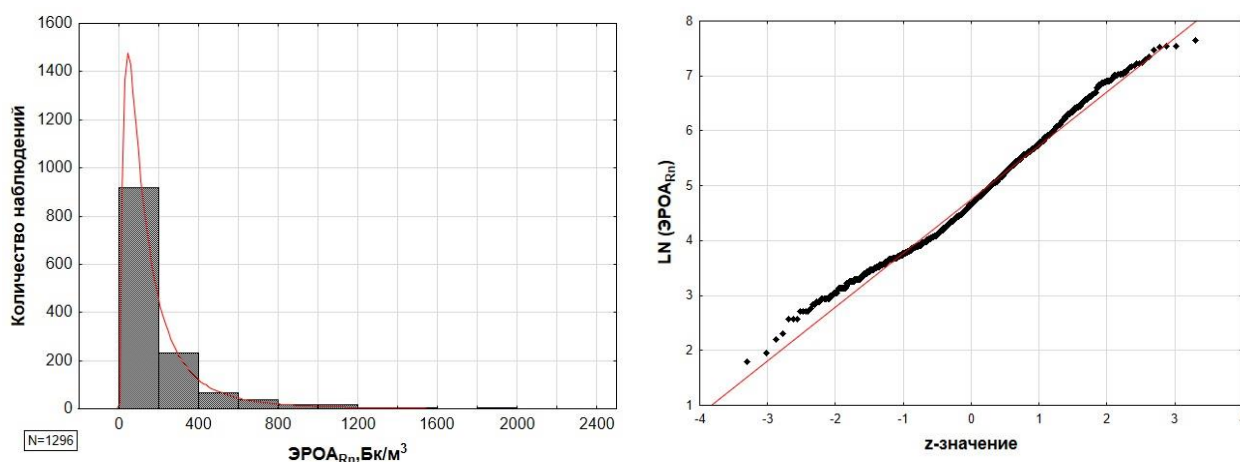


Рисунок 17 – Гистограмма частотного распределения и Q-Q диаграмма для значений $ЭРОA_{Rn}$ в помещениях жилых и общественных зданий в г. Балей

Анализ рисунка 17 показал, что значения $ЭРОA_{Rn}$ подчиняются логнормальному распределению. В качестве средней тенденции будет использоваться значение медианы и ее доверительные интервалы.

Медиана составляет 107 Бк/м^3 , при доверительном интервале от 94 до 120 Бк/м^3 , что не превышает 200 Бк/м^3 , максимальное составляет 2087 Бк/м^3 , что превышает норматив до 10 раз; на 2-ом этаже -92 Бк/м^3 , на 3-ем этаже – 88 Бк/м^3 , - среднее значение вполне допустимое, при превышении в отдельных помещениях от 2 до 5 раз. На 4 этажах превышений нет. Медиана $ЭРОA_{Rn}$ в отопительный и теплый период равна 99 и 111 Бк/м^3 соответственно.

Таблица 3 - Параметры распределения ЭРОА_{Rn} в помещениях общественных и жилых зданий на территории г. Балей, n = 1296шт.

Этаж	Сезон	N	СА	СГ	СО	Мин.	Макс.	Медиана*	Более 200Бк/м ³	
Ед. изм.		шт	Бк/м ³						шт	%
1	ОП	391	245	136	299	<10	1868	126 (96-156)	140	36
	ТП	334	208	128	270	<10	2087	122 (93-151)	108	32
	Всего	725	228	133	286	<10	2087	123 (102-144)	248	34
2	ОП	265	170	103	201	10	1130	86 (62-110)	69	26
	ТП	170	148	99	164	13	1102	99 (74-123)	40	24
	Всего	435	162	102	187	10	1130	92 (74-110)	109	25
3	ОП	87	129	99	94	19	439	98 (78-118)	20	23
	ТП	24	94	68	106	21	551	75 (33-117)	1	4
	Всего	111	122	91	97	19	551	88 (70-106)	21	19
4	ОП	18	51	49	11	15	69	52 (47-57)	0	0
	ТП	4	30	30	4	26	34	30 (26-34)	0	0
	Всего	22	47	45	13	15	69	48 (43-53)	0	0
Все этажи	ОП	764	202	117	253	<10	1868	99 (81-117)	231	30
	ТП	532	183	114	236	<10	2087	111 (91-131)	149	28
	Итого	1296	194	116	246	<10	2087	107 (94-120)	380	29

Примечание: ТП – теплый период; ОП – отопительный период; СА – среднее арифметическое; СГ – среднее геометрическое; СО – стандартное отклонение. * в скобках – 95% доверительный интервал.

Рассчитали критерий Манна-Уитни для сравнения выборок в отопительный и теплый период. Достигнутый уровень значимости составил $p=0,99$, что больше критического уровня $p=0.05$, поэтому статистически значимого различия между ЭРОА_{Rn} в отопительный и теплый период нет, поэтому для дальнейшего анализа использовали выборку без деления на периоды измерений.

4.3. Закономерности распределения объемной активности радона в помещениях зданий г. Балей

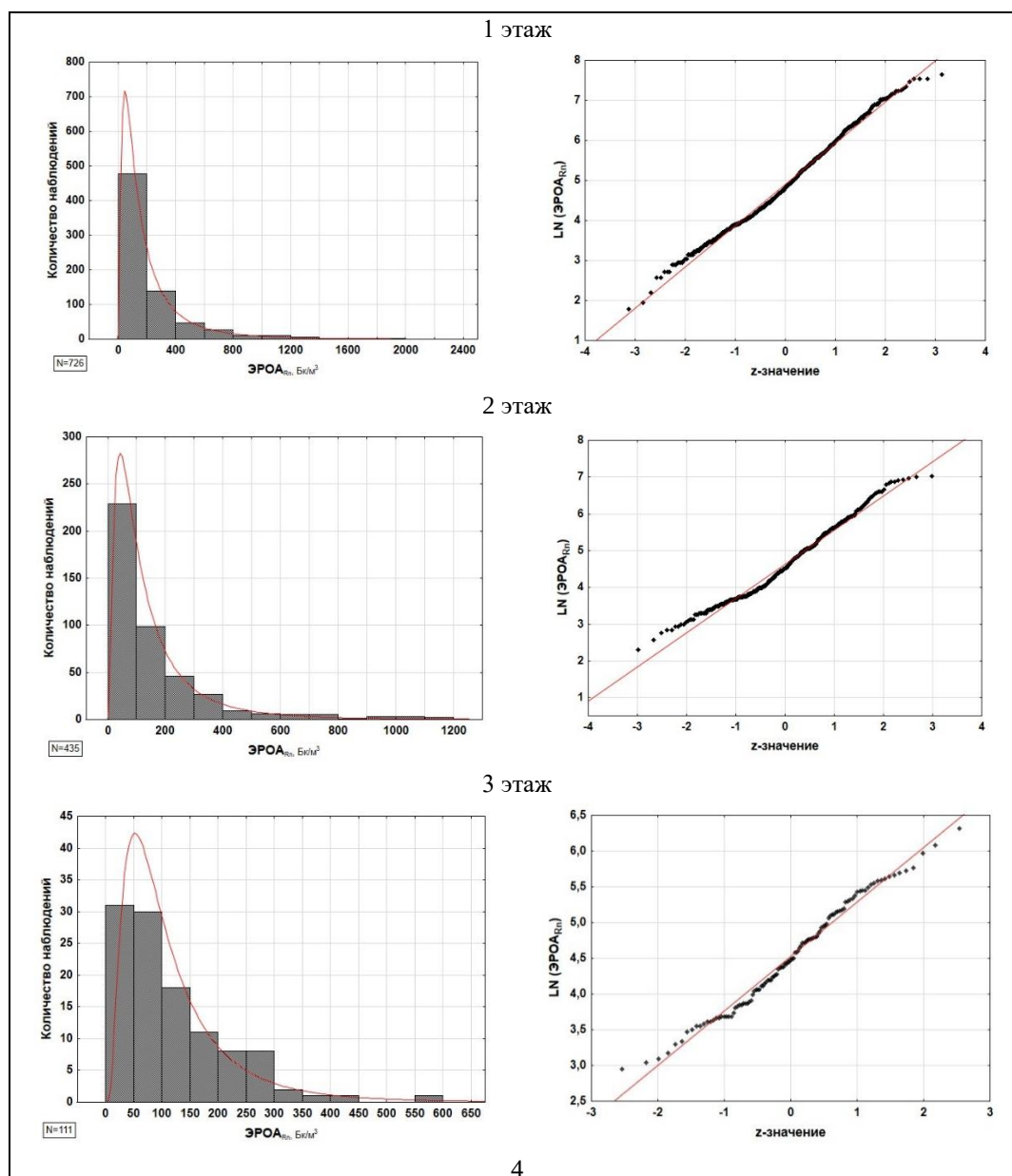
Изучили закономерности распределения ЭРОА_{Rn} в помещениях зданий г. Балей. Для этого установили общие закономерности распределения всей выборки ЭРОА_{Rn} в помещениях зданиях, затем отделили превышающие 200 Бк/м³ значения и выявили, в каких зданиях есть превышения, и далее

выявляли, какие факторы влияют на повышенные значения ЭРОА_{Rn} в помещениях.

4.3.1. Зависимость объемной активности радона от этажа

В первую очередь проверили, как распределяются значения ЭРОА_{Rn} по этажам. Построили гистограммы распределения и Q-Q диаграммы для значений ЭРОА_{Rn} во всех помещениях в зависимости от этажа здания, на котором проводилось измерение.

Гистограммы и Q-Q диаграммы представлены на рисунке 18.



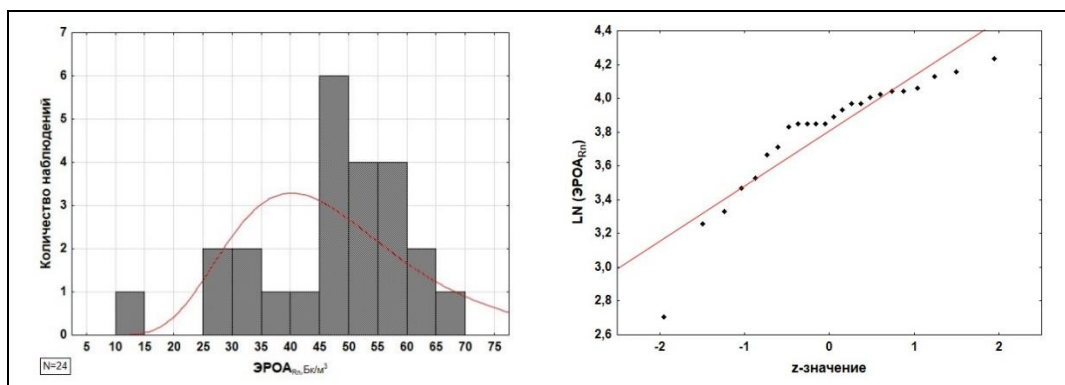


Рисунок 18 – Гистограмма частотного распределения и Q-Q диаграмма для значений ЭРОА_{Рп} в помещениях жилых и общественных зданий города Балей в зависимости от этажа

Графики распределения значений ЭРОА_{Рп} в помещениях на всех этажах соответствуют логнормальному распределению. В таблице 4 представлены результаты расчета параметров распределения ЭРОА_{Рп} в помещениях зданий в зависимости от этажа.

Таблица 4 – Параметры распределения значений ЭРОА_{Рп} в помещениях общественных и жилых зданий г. Балей в зависимости от этажа, n = 1296 шт.

Ед. изм.	N	СА	СГ	СО	Мин.	Макс.	Медиана*	Более 200Бк/м³	
	шт	Бк/м³						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.

Из таблицы 4 следует, что ЭРОА_{Рп} в помещениях общественных и жилых зданий города Балей распределяется следующим образом:

- медиана всех полученных значений ЭРОА_{Рп} в помещениях составила 107 Бк/м³, при доверительном интервале от 94 до 120 Бк/м³, что не превышает нормируемый показатель 200Бк/м³;
- максимальное значение ЭРОА_{Рп} в помещениях составило 2087 Бк/м³, что превышает в 10,4 раз 200 Бк/м³;

- наибольшее значение медиана ЭРОА_{Rn} составляет в помещениях на 1 этажах зданий, составляет 123 Бк/м³, в доверительном интервале от 102 до 144 Бк/м³;
- медиана ЭРОА_{Rn} снижается в помещениях по мере увеличения этажа здания: на 1 этажах значение составило 123 Бк/м³, на 2 - 92 Бк/м³, на 3 этажах – 88 Бк/м³, на 4 этажах – 48 Бк/м³;
- процент превышений 200 Бк/м³ в помещениях от общего числа измерений на 1 этажах зданий составил 34% (248 превышений из 725 измеренных), на 2 этажах – 25% (109 из 435), на 3 этажах – 19% (21 из 111), на 4 этажах – 0%.

Для оценки изменения содержания радона в помещении в зависимости этажа здания применили непараметрический дисперсионный анализ с использованием критерия Краскела-Уоллиса. Результаты расчета критерия показали, что достигнутый уровень статистической значимости (p) составил менее 0,001 ($H=52,91$; $N= 1296$; $df=3$), что говорит о статистически значимой разнице значений ЭРОА_{Rn} на разных этажах. Для попарной проверки различий между этажами рассчитали критерий Манна-Уитни, результаты попарных расчетов представлены в таблице 4.3. При этом выборку ЭРОА_{Rn} на 4 этажах не включили в сравнение из-за недостаточного количества измерений, в связи с малым количеством зданий в городе Балей, в которых есть 4 этажа.

Для оценки справедливости нулевой гипотезы при попарных сравнениях рассчитали новый критический уровень значимости p - для этого разделили 0,05 на число попарных сравнений (3), получили критический уровень значимости $p=0,017$.

Согласно таблице 5, достигнутые уровни значимости меньше критического в группах между 1 и 2 этажом, 1 и 3 этажом, что показывает наличие статистически значимого различия значений ЭРОА_{Rn} на 1 этажах от значений на 2 и 3 этажах.

Таблица 5 – Критерии Манна-Уитни для независимых выборок значений ЭРОА_{Рп} 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

Уровень значимости в группе «2 и 3 этажи» составил $p=0,477$, следовательно, статически значимого различия между значениями ЭРОА_{Рп} на 2 и 3 этажах нет.

Для оценки различия ЭРОА_{Рп} между этажами построили диаграмму размаха, приведенная на рисунке 19.

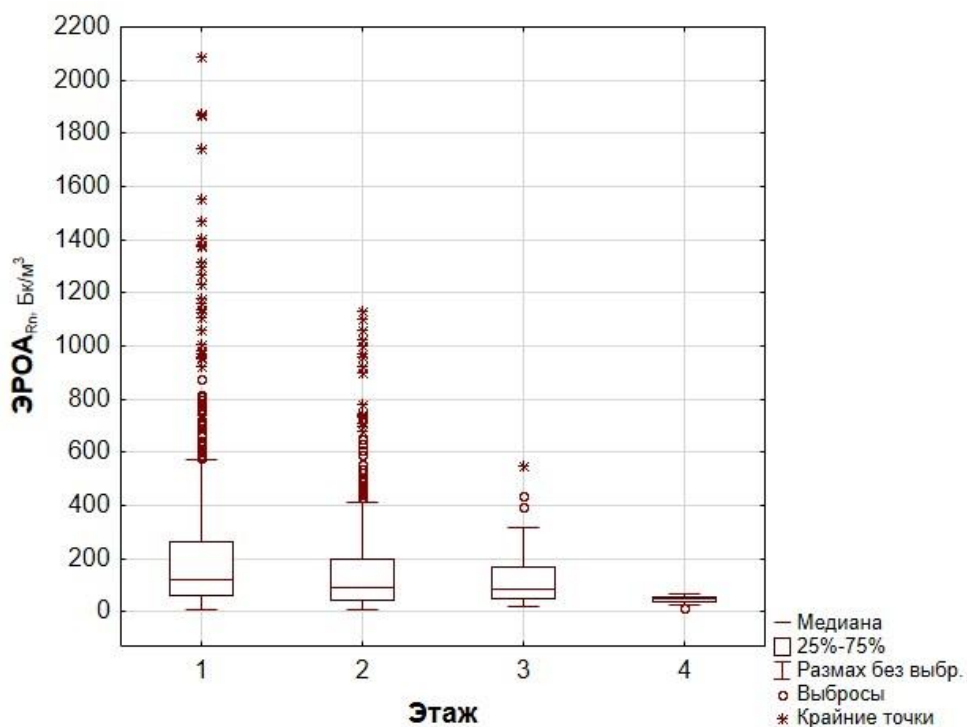


Рисунок 19– Диаграмма размаха ЭРОА_{Рп} в зависимости от этажа в городе Балей

Медианы значений ЭРОА_{Рп} на всех этажах не превышают норматив 200 Бк/м³; максимальные значения достигают 2087Бк/м³ на 1 этаже, что в 10 раз превышает нормируемое значение; максимальные значения на 2 и 3 этажах также превышают 200 Бк/м³. Наибольшее количество превышений на 1 этажах зданий.

В результате выявили, что значения ЭРОА_{Rn} на 1 этажах зданий статистически значимо отличаются от значений на других этажах: содержание радона в помещениях, которые находятся на первых этажах выше на 25%, чем на 1 и 2 этажах

Чтобы установить, что влияет на повышенные значения ЭРОА_{Rn} в помещениях на 1 этажах, провели исследование по выявлению зависимости ЭРОА_{Rn} на 1 этажах от разных факторов.

4.3.2. Зависимость объемной активности радона от строительного материала

В городе Балей за все эти годы при строительстве применялись следующие строительные материалы: дерево, кирпич и шлакоблоки.

На рисунке 20 представлена круговая диаграмма распределения обследованных зданий по строительному материалу.

Большинство обследованных зданий построены из дерева (59%), также обследованы шлакоблочные (16%) и кирпичные (24%), бетонные (1%).

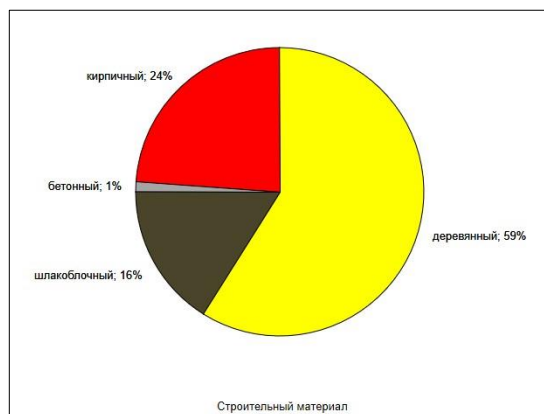


Рисунок 20 – Диаграмма распределения обследованных зданий в зависимости от строительного материала в городе Балей

Построили гистограммы распределения и Q-Q диаграммы для значений ЭРОА_{Rn} в зависимости от материала, из которого построено здание. Гистограммы и Q-Q диаграммы представлены на рисунке 21.

Распределение значений ЭРОА_{Rn} в деревянных, кирпичных и шлакоблочных зданиях - логнормальное.

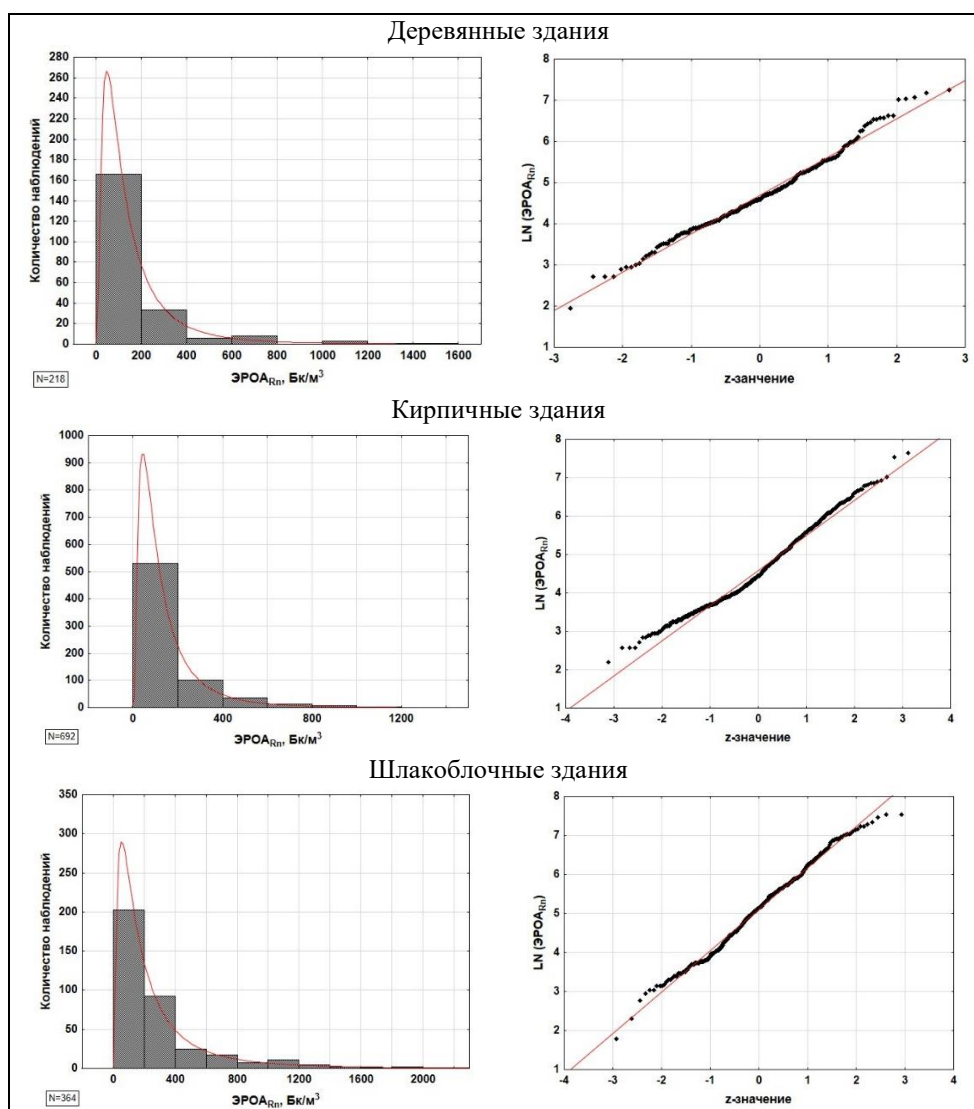


Рисунок 21 – Гистограмма частотного распределения и Q-Q диаграмма для значений ЭРОА_{Rn} в помещениях жилых и общественных зданий города Балей в зависимости от строительного материала

Для выявления факторов, влияющих на содержание радона на первых этажах зданий, провели кластеризацию ОА_{Rn} в помещениях на 1 этажах зданий, используя вычисления сходства методом «городских кварталов» в зависимости от строительного материала. Полученные результаты привели на рисунке 4.5 в виде дендрограммы.

Как видно на рисунке 22, выделилось 2 кластера: первый - деревянные здания, второй - кирпичные и шлакоблочные.

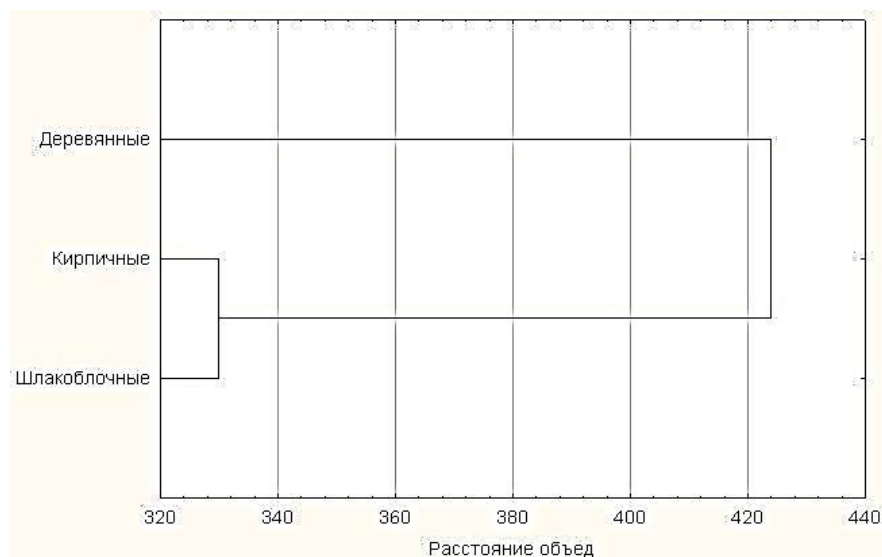


Рисунок 22 – Дендрограмма классификации значений ЭРОА_{Rn} в помещениях на первых этажах зданий в г.Балей

В таблице 4.4 представили значения ЭРОА_{Rn} в помещениях на 1 этажах во всей выборке в зависимости от строительных материалов, которые представлены деревянными, кирпичными и шлакоблочными зданиями. Статистическое распределение данных в зависимости от типа строительных материалов представлено в таблице 7.

Из таблицы 4.4 видно, что все здания представлены деревянными, кирпичными и шлакоблочными зданиями. Объёмная активность радона ЭРОА_{Rn} в деревянных, кирпичных и шлакоблочных зданиях распределяется следующим образом:

- значения СА, СГ и медианы не превышают норматив 200 Бк/м³ в деревянных, кирпичных зданиях на первых этажах;
- значения СА, СГ и медианы превышают норматив 200 Бк/м³ в шлакоблочных зданиях на первых этажах;
- в деревянных зданиях в 23%, в кирпичных в 8%, в шлакоблочных в 35% от общего числа измерений значения ЭРОА_{Rn} превышают 200 Бк/м³,

Из таблицы 6 видно, что медиана значений ЭРОА_{Rn} в г. Балей меняется от 80 до 232 Бк/м³, при этом максимальные значения ЭРОА_{Rn} на первом этаже превышают нормативное значение в 8 раз в деревянных, в 5 раз в кирпичных, в 10 раз в шлакоблочных зданиях.

Таблица 6 – Параметры распределения объёмной активности радона ЭРОА_{Rn} в г. Балей в помещениях на 1 этажах зданий в зависимости от типа строительных материалов

Параметр распределения	Деревянные	Кирпичные	Шлакоблочные
N	270	294	190
СА, Бк/м ³	181	158	407
СГ, Бк/м ³	113	102	254
СГО	2,5	2,5	2,8
Мода, Бк/м ³	49	43	89
Медиана ЭРОА_{Rn}, Бк/м³	104	87	260
Макс, Бк/м ³	1606	981	2087
Превышения ЭРОА _{Rn} 200 Бк/м ³ в помещениях на первом этаже от общего числа измерений на первом этаже, %	27	24	29
Превышения 200 Бк/м ³ в помещениях от общего числа измерений, %	23	8	35
Медиана на 2,3 этажах, Бк/м³	66	71	181
СА - среднее арифметическое значение; СГ – среднее геометрическое значение; СГО – стандартное геометрическое отклонение;			

Для защиты населения необходимо выявить все помещения и здания, где есть превышение ЭРОА_{Rn} выше 200 Бк/м³. Отделили от общей выборки все значения ЭРОА_{Rn} в помещениях жилых и общественных зданий, превышающие 200 Бк/м³ включительно. Это важно для того, чтобы понять, от каких условий зависит на этой территории превышения ЭРОА_{Rn} в помещениях проживания или нахождения населения [111].

С помощью функции «группировка» в программе Statistica сгруппировали значения по адресу и этажу и выявили, в каких зданиях и на каких этажах зарегистрировано значение ЭРОА_{Rn} выше 200 Бк/м³. Дальнейшее исследование проводили с этими данными.

На рисунке 23 представлены диаграммы распределения превышающих значений по этажам и строительным материалам.



Рисунок 23 – Диаграммы распределения значений ЭРОА_{Rn} выше 200 Бк/м³ в помещениях зданий г. Балей в зависимости от этажа и строительного материала

В таблице 7 представлено распределение помещений со значениями выше ЭРОА_{Rn} в зависимости от вида строительного материала.

Таблица 7 – Параметры распределения ЭРОА_{Rn} в г. Балей в помещениях зданий в зависимости от типа строительных материалов

Строительный материал	Кол-во этажей	Медиана ЭРОА _{Rn} , Бк/м ³		% помещений на первых этажах с ЭРОА _{Rn} более 200 Бк/м ³
		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

Большинство обследованных зданий, где есть превышения на 1 этажах – одноэтажные деревянные, старого года постройки, без подвалов, с ветхими перекрытиями. Все это позволяет радону свободно поступать в здание и там

накапливаться. Поэтому предположили, что такие здания напрямую характеризуют поступление радона.

4.4. Категорирование территории города Бaley по степени потенциальной радоноопасности в зависимости от удельного содержания ^{226}Ra в коренных горных породах и поверхностных отложениях

В главе 3, раздел 3.1.2 диссертационного исследования подробно описано геологическое строение города Бaley. В главе 1 проанализированы геохимические особенности, определяющие поведение природных радионуклидов в земной коре, которые зависят от химических свойств радионуклида, происхождения горных пород и вида минеральной составляющей, которая определяет примерное содержание природных радионуклидов.

Детальный анализ геологического строения территории позволил выявить однотипные территории, которые можно охарактеризовать и разделить в зависимости от механического и минерального состава и соответственно физико-химическим характеристикам:

- территория 1, представленная осадочными породами в виде песчано-галечных отложений, галечников, супесей, суглинков, глин;
- территория 2, представленная осадочными породами в виде фангломератов, конгломератов, конгломерато-брекчий, песчаников, алевролитов;
- территория 3, представленные основными и ультраосновными магматическими породами, такими как габбро, пироксены, а также кварцевыми диоритами, габбродиоритами, диоритами.

Тип отложений на территории определяет скорость эксхалации радона, на этих 3 территориях разная степень потенциальной опасности.

На основании литературных источников [54, 111, 154, 159] провели теоретический расчет удельного содержания ^{226}Ra для горных пород по массовому содержанию ^{238}U в горных породах.

В таблице 8 привели теоретическое массовое среднее содержание природных радионуклидов в горных породах [154, 159], и рассчитали удельную активность ($A_{\text{уд}}$) ^{226}Ra по формуле (8). При этом важным является то, это соотношение равенства $A_{\text{уд}}^{238}\text{U}$ и ^{226}Ra выполняется при условии радиоактивного равновесия ^{238}U и его ДПР, что не всегда соблюдается в более рыхлых породах. Поэтому расчет провели с использованием коэффициента равновесия от 1 – в скальных породах до 1,7 в рыхлых глинистых отложениях [111].

$$A_{\text{Ra}^{226}} = \frac{Q \times \lambda \times N_A \times m}{M \times 100} \times K_{\text{пр}}, \quad (8)$$

где Q – массовое содержание ^{238}U , % ; λ – постоянная радиоактивного распада, 1/с; N_A – число Авогадро равное $6,02 \times 10^{23}$; m – масса пробы, г; M – атомная масса ^{238}U .

Получили примерную удельную активность ^{226}Ra на территории, которое меняется от 0,4 до 85 Бк/кг, которое соотнесли со средними значениями ЭРОА_{Рн} на первых этажах старых зданий с нарушенными перекрытиями. Полученные значения ЭРОА_{Рн} в помещениях на 1-х этажах зданий с нарушенными подпольными перекрытиями нанесли на геологическую карту г. Балей (рисунок 24) и соотнести с типом отложений, которые отличаются содержанием ^{226}R . Пространственное распределение ^{226}Ra по 3 типам территории положили в основу деления территории по потенциальной радоноопасности. Для оценки этого предположения, провели радиоэкологическое обследование территории проживания населения в разных районах города Балей и окрестностей.

Исходя из таблицы 8, видно, что содержание ^{238}U и ^{232}Th в магматических горных породах, таких как граниты в среднем составляет $4,5 \times 10^{-4}\%$ и $18 \times 10^{-4}\%$ соответственно; кварцевые диориты, гранодиориты содержат $2,1 \times 10^{-4}\%$ и $8,3 \times 10^{-4}\%$; диориты $1,8 \times 10^{-4}\%$ и $6 \times 10^{-4}\%$.

Таблица 8 – Массовое содержание ^{238}U , ^{232}Th и рассчитанная $A^{226}\text{Ra}$ в горных породах, представленных на территории города Балей [154] (по А.А. Смыслову, 1974)

Горные породы, которыми представлена территория г. Балей		Теоретическое массовое содержание радионуклидов, $10^{-4} \%$ (По А.А. Смыслову, 1974)			$K_{pp}, *$	$**A_{уд}^{226}\text{Ra}$, Бк/кг
		^{238}U	^{232}Th	Th/U		
Осадочные	Кларк (Земная кора, в целом)	2,5	9,3	3,7		
	Глины и глинистые сланцы	4,0	11,5	2,4	1,7	85
	Пески	2,3	7,8	3,4	1,6	48
	Песчаники, алевролиты	2,9	10,4	3,6	1,15	41
	Конгломераты, гравелиты	2,4	9	3,7	1,15	35
Магматические	Кварцевые диориты, гранодиориты	2,1	8,3	4,0	1	26
	Диориты	1,8	6	3,3	1	22
	Габбро	0,6	1,8	3,0	1	7
	Пироксениты	0,03	0,08	2,7	1	<1
$* A_{Ra^{226}} = \frac{Q \times \lambda \times N_A \times m}{M \times 100} \times K_{pp}$, где Q – массовое содержание ^{238}U , % ; λ – постоянная радиоактивного распада, 1/с; N_A – число Авогадро равно $6,02 \times 10^{23}$; m – масса пробы, г; M – атомная масса ^{238}U , $**K_{pp}$ – коэффициент равновесия между ^{238}U и ^{226}Ra , равный (Ra/U)						

Наименьшее содержание ^{238}U и ^{232}Th в основных и ультраосновных магматических породах габбро и пироксениты, в которых содержание ^{238}U колеблется от $0,03 \times 10^{-4}$ до $0,6 \times 10^{-4}\%$; ^{232}Th – от $0,08 \times 10^{-4}$ до $1,8 \times 10^{-4}\%$.

Содержание ^{238}U и ^{232}Th в осадочных горных породах, таких как глины и глинистые сланцы в среднем составляет $4,0 \times 10^{-4}\%$ и $11,5 \times 10^{-4}\%$ соответственно. Относительно кларка, содержание природных радионуклидов выше в глинах, гранитах, песчаниках, алевролитах.

Наибольшей $A_{уд}^{226}\text{Ra}$ обладают граниты и глины: 56 - 85 Бк/кг, $A_{уд}^{226}\text{Ra}$ в песках, песчаниках и алевролитах колеблется от 44 до 53 Бк/кг; $A_{уд}^{226}\text{Ra}$ в конгломератах, гравелитах – 35 Бк/кг; в кварцевых диоритах,

гранодиоритах – 26 Бк/кг; диоритах – 22 Бк/кг. Наименьшая $A_{уд}^{226}\text{Ra}$ в пироксенитах, габбро: 0,4 – 7 Бк/кг.

Рассмотрим карту дочетвертичных и четвертичных отложений на территории города Балей и близлежащих населенных пунктов, входящих в состав города с нанесенными точками отбора проб воздуха в зданиях и делением территории на типы в зависимости от содержания ^{226}Ra в коренных породах и поверхностных отложениях, представлено на рисунке 4.7.

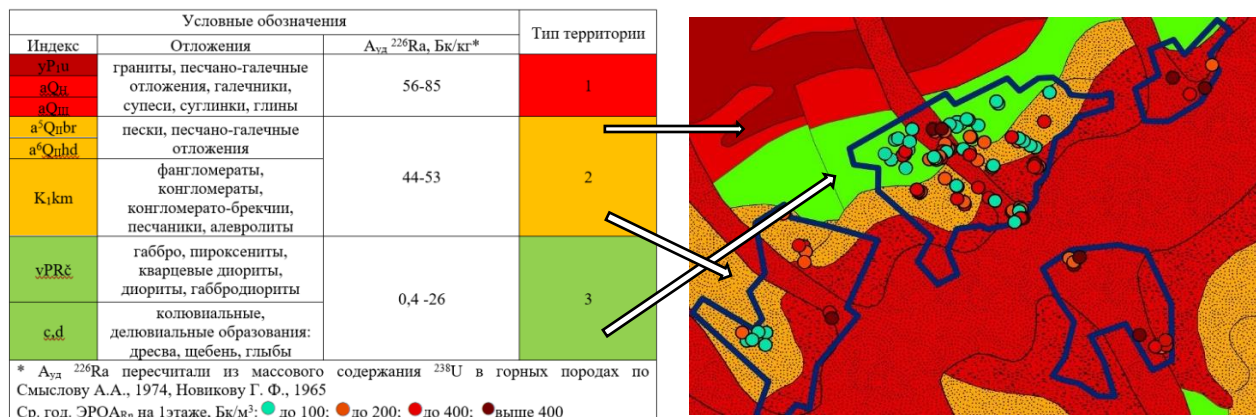


Рисунок 24 – Категорирование территории Балей по степени потенциальной радоноопасности в зависимости от $A_{уд}^{226}\text{Ra}$ в коренных горных породах и поверхностных отложениях

Как видно на рисунке 4.7, коренные породы на территории поймы и надпойменных террас реки Унда обнажены из-за эрозии под воздействием реки. Поэтому отложения на этой территории представлены одинаковыми породами.

Наибольшую потенциальную радоноопасность территории города Балей представляют магматические породы Борщовочного гранитного массива. Граниты Борщовочного комплекса характеризуются наличием минералов, содержащих природные радионуклиды, такие как монацит, уранинит и ураноторит, которые являются источниками повышенной эксхалляции радона [61]. Тяжелые акцессорные минералы, содержащие радионуклиды ^{232}Th , ^{238}U , ^{226}Ra вымываются из Борщовочного массива и переносятся в пойму и надпойменные террасы реки Унда, аккумулируясь в аллювиальных песчано-галечных отложениях.

Исходя из этого, по степени потенциальной радоноопасности территорию города Балей можно разделить на три типа в зависимости от $A_{уд}^{226}\text{Ra}$ в горных породах и поверхностных отложениях:

По механическому составу и соответственно физико-химическим характеристикам четко выделяются три типа территории

- Тип 1: территория, представленная осадочными породами в виде песчано-галечных отложений, галечников, супесей, суглинков, глин, выявили что есть превышения уран, торий, но основная часть - $A_{уд}^{226}\text{Ra}$ в которых среднем составляет 56 – 85 Бк/кг;

- Тип 2: территория, представленная осадочными породами в виде фангломератов, конгломератов, конгломерато-брекчий, песчаников, алевролитов, $УА^{226}\text{Ra}$ в которых среднем составляет 44 - 53 Бк/кг;

- Тип 3: территории, представленные основными и ультраосновными магматическими породами, такими как габбро, пироксены, а также кварцевыми диоритами, габбродиоритами, диоритами, $УА^{226}\text{Ra}$ в которых среднем составляет 0,4 - 26 Бк/кг.

Эти 2 показателя ($A_{уд}^{226}\text{Ra}$ и $ЭРОА_{Rn}$ на первых этажах) позволили нам оценить пространственное распределения потенциальной радоноопасности на территории.

Для проверки предложенного категорирования территории по потенциальной опасности и в предположении, что содержание радона на первых этажах зданий наиболее достоверно могут характеризовать территорию, рассчитали $ЭРОА_{Rn}$ на первых этажах в зависимости от типа территории.

В таблице 9 представлены значения $ЭРОА_{Rn}$ на первых этажах зданий в зависимости от типа территории. Значения $ЭРОА_{Rn}$ на первых этажах характеризуют территорию: наши теоретические рассуждения подтверждают что территория 1 наиболее потенциально радоноопасная, $ЭРОА_{Rn}$ на первых этажах зданий на этой территории наибольшая – 198 Бк/м³; территория 2 – средней потенциальной радоноопасности - $ЭРОА_{Rn}$ на первых этажах зданий

на этой территории средняя – 111 Бк/м³; территория 3 – низкой потенциальной радоноопасности, ЭРОА_{Rn} на первых этажах зданий на этой территории наименьшая и составила 96 Бк/м³.

Таблица 9 – Средние значения ЭРОА_{Rn} в помещениях на первых этажах города Балей в зависимости от типа территории

Тип территории	А _{уд} ²²⁶ Ra, Бк/кг	ЭРОА _{Rn} на первых этажах, Бк/м ³	
		Макс	Медиана
1	36-50	1407	198 (141-255)
2	29-36	1381	111 (90-132)
3	0,4-26	396	96 (74-118)

Для оценки степени радоноопасности рассчитали СГЭД за счет ²²²Rn и его ДПР в основу деления положили ограничение по дозе для природных радионуклидов в соответствии с ОСПОРБ-99/2010 от 5 до 10 мЗв, полученные результаты представлены в таблице 10.

Таблица 10 - Оценка степени опасности территории для населения в зависимости от содержания ²²⁶Ra в горных породах и поверхностных отложениях и содержания радона на первых этажах ветхих зданий с нарушенными перекрытиями, n=726 изм.

Тип территории и	Медиана ЭРОА _{Rn}	А _{уд} ²²⁶ 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, отличающиеся геологическими характеристиками и содержанием ²²⁶Ra, далее оценили по консервативному сценарию СГЭД только за счет ²²²Rn и его ДПР (СГЭД_{Rn}) для каждого типа. Сравнили каждый тип территории с содержанием ²²⁶Ra в почве и расчетное СГЭД - с ограничением СГЭД по потенциальной опасности объектов, загрязненных природными радионуклидами, по ОСПОРБ-99/2010. При СГЭД >10 мЗв - высокая опасность проживания населения, 47 % зданий имеют

такие помещения, при СГЭД >15 мЗв – отселение – для 23 % зданий нужен комплекс мероприятий по изменению ситуации.

4.5. Выводы по главе 4

Средние значения ЭРОА_{Rn} в помещениях зданий г. Балей составляют 94 - 120 (med=107) Бк/м³; ЭРОА_{Rn} снижается в помещениях по мере увеличения этажа здания: при среднем значении на 1 этажах – 123 Бк/м³, максимальное составляет 2087 Бк/м³ (что превышает норматив до 10 раз); на 2-ом этаже - 92 Бк/м³, на 3-ем этаже – 88 Бк/м³, на 4 этажах превышений нет.

ЭРОА_{Rn} на 1 этажах зданий статистически значимо отличаются ($p < 0,017$) от значений на других этажах: содержание радона в помещениях, которые находятся на первых этажах выше на 25%, чем на 1 и 2 этажах.

Большинство обследованных зданий, где есть превышения на 1 этажах – одноэтажные деревянные, старого года постройки, без подвалов, с нарушением подпольных перекрытий, что позволяет радону свободно поступать в здание и там накапливаться.

ЭРОА_{Rn} на первых этажах характеризуют потенциальную радоноопасность территории: территория 1 наиболее потенциально радоноопасная, ЭРОА_{Rn} на первых этажах зданий на этой территории наибольшая – 198 Бк/м³; территория 2 – средней потенциальной радоноопасности - ЭРОА_{Rn} на первых этажах зданий на этой территории средняя – 111 Бк/м³; территория 3 – низкой потенциальной радоноопасности, ЭРОА_{Rn} на первых этажах зданий на этой территории наименьшая и составила 96 Бк/м³.

Для подтверждения возможностей такой системы категорирования – рассмотрим второй объект мониторинга, расположенный в Ставропольском крае. Все наши предположения, наработанные в Балее, проверим на другом объекте наследия, который расположен совсем в другом регионе России, исследован нами более детально, получен существенно больший набор данных.

5.1. Выбор точек контроля

На рисунке 25 представлена карта обследованного района, расположение пунктов контроля.

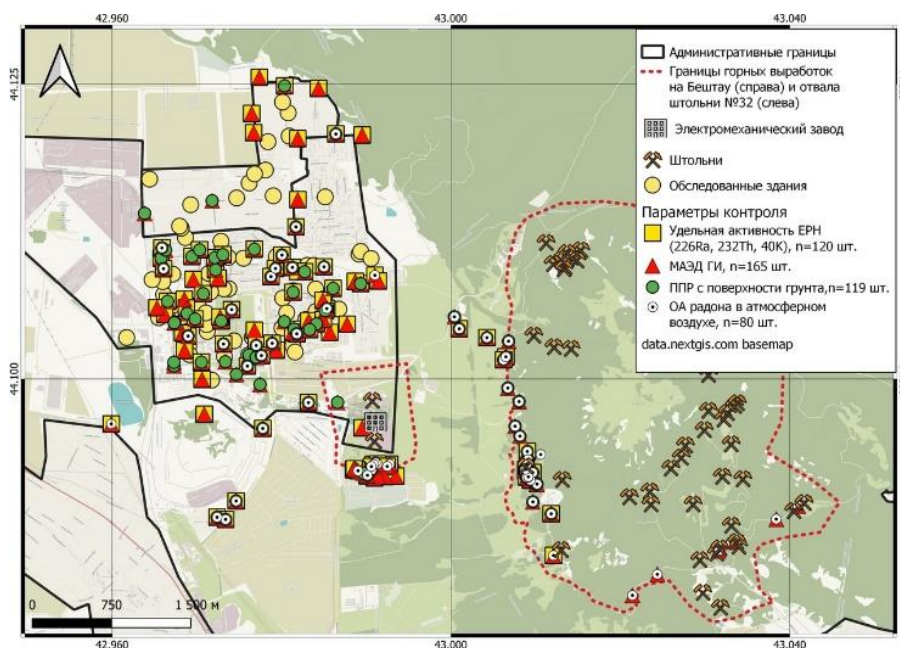


Рисунок 25 – Характеризация предприятий и районов проживания населения по территории, распределение точек контроля и отбора проб и контроля ОА в помещениях в общественных и жилых зданий на территории, n = 3236 изм.

Анализ территории позволил нам условно поделить ее на 3 зоны и выделить: жилую зону, зону отвала штольни №32, примыкающую к жилой зоне, и территорию горы Бештау, где имеются незакрытые штольни. Каждую территорию обследовали отдельно.

5.1.1. Результаты измерения объемной активности радона в помещениях зданий г. Лермонтов

Провели измерение OA_{Rn} в помещениях общественных и жилых зданий города Лермонтов, рассчитали $ЭРОA_{Rn}$.

Гистограмма распределения значений $ЭРОA_{Rn}$ и диаграмма квантиль-квантиль (Q-Q) для натуральных логарифмов значений $ЭРОA_{Rn}$ представлены на рисунке 26.

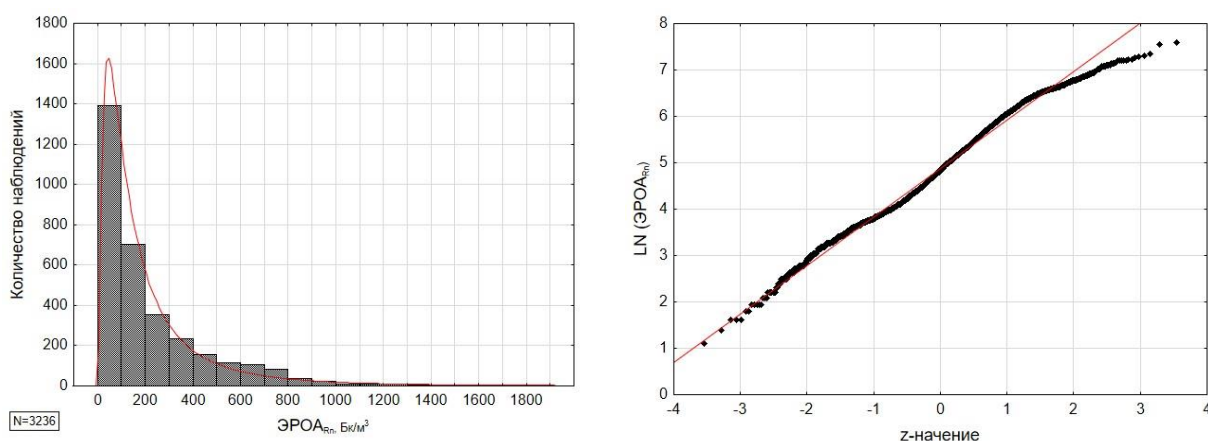


Рисунок 26 – Гистограмма частотного распределения и Q-Q диаграмма для значений $ЭРОA_{Rn}$ в помещениях жилых и общественных зданий города Лермонтов

Полученные графики распределения значений характерны для логнормального распределения. Рассчитали параметры распределения значений $ЭРОA_{Rn}$, которые представлены в таблице 11. Медиана полученных значений $ЭРОA_{Rn}$ (без учета подвала) равна 119 Бк/м³, колеблется в доверительном интервале от 111 до 127 Бк/м³, что не превышает нормируемый показатель 200Бк/м³. Максимальное значение $ЭРОA_{Rn}$ получено на первом этаже и составляет 1980Бк/м³, что превышает нормируемый показатель в 9,9 раз. Максимальные значения на всех этажах превышают 200 Бк/м³.

Медиана $ЭРОA_{Rn}$ в отопительный и теплый период составила 166 и 102 Бк/м³ соответственно. Для оценки статистического различия рассчитали одновыборочный критерий Вилкоксона, уровень достигнутый уровень

статистической значимости $p < 0,001$, что свидетельствует о различии ЭРОА_{Rn} в помещениях в теплый и холодный период.

Таблица 11 – Параметры распределения значений ЭРОА_{Rn} в помещениях общественных и жилых зданий города Лермонтов, $n = 3236$ шт.

Этаж	Сезон	Параметры распределения значений ЭРОА _{Rn}								
		N	CA	CG	CO	Мин.	Макс.	Медиана*	Более 200Бк/м ³	
Ед. изм.		шт	Бк/м ³						шт	%
Подвал	ОП	158	317	175	295	<10	1227	174 (127-220)	72	46
	ТП	160	365	213	354	16	1555	210 (155-264)	82	51
	Всего	318	341	193	327	<10	1555	189 (153-224)	154	48
1	ОП	787	290	169	275	<10	1980	197 (178-216)	390	50
	ТП	896	211	128	228	<10	1347	123 (108-138)	310	35
	Всего	1683	248	146	254	<10	1980	153 (141-165)	700	42
2	ОП	492	171	111	150	<10	955	124 (110-137)	168	34
	ТП	486	99	79	89	19	885	78 (70-86)	35	7
	Всего	978	135	94	129	<10	955	89 (81-97)	203	21
3	ОП	122	265	191	228	16	1465	198 (157-238)	60	49
	ТП	117	182	134	176	14	1217	125 (93-157)	30	26
	Всего	239	225	161	208	14	1465	163 (137-189)	90	38
4-5	ОП	9	54	28	92	<10	298	19 (<10-79)	1	11
	ТП	9	59	45	47	11	168	56 (26-86)	0	0
	Всего	18	57	36	71	<10	298	35 (<10-68)	1	6
Все этажи (без подвала)	ОП	1410	245	146	241	<10	1980	166 (153-179)	619	44
	ТП	1508	171	109	196	<10	1347	97 (87-107)	375	25
	Всего	2918	207	125	222	<10	1980	119 (111-127)	994	34
Всего	ОП	1568	252	148	248	<10	1980	166 (154-178)	691	44
	ТП	1668	190	116	224	<10	1555	102 (91-113)	457	27
	Итого	3236	220	131	238	<10	1980	126 (118-134)	1148	35

ТП – теплый период; ОП – отопительный период; СА – среднее арифметическое; СГ – среднее геометрическое; СО – стандартное отклонение.
* в скобках – 95% доверительный интервал.

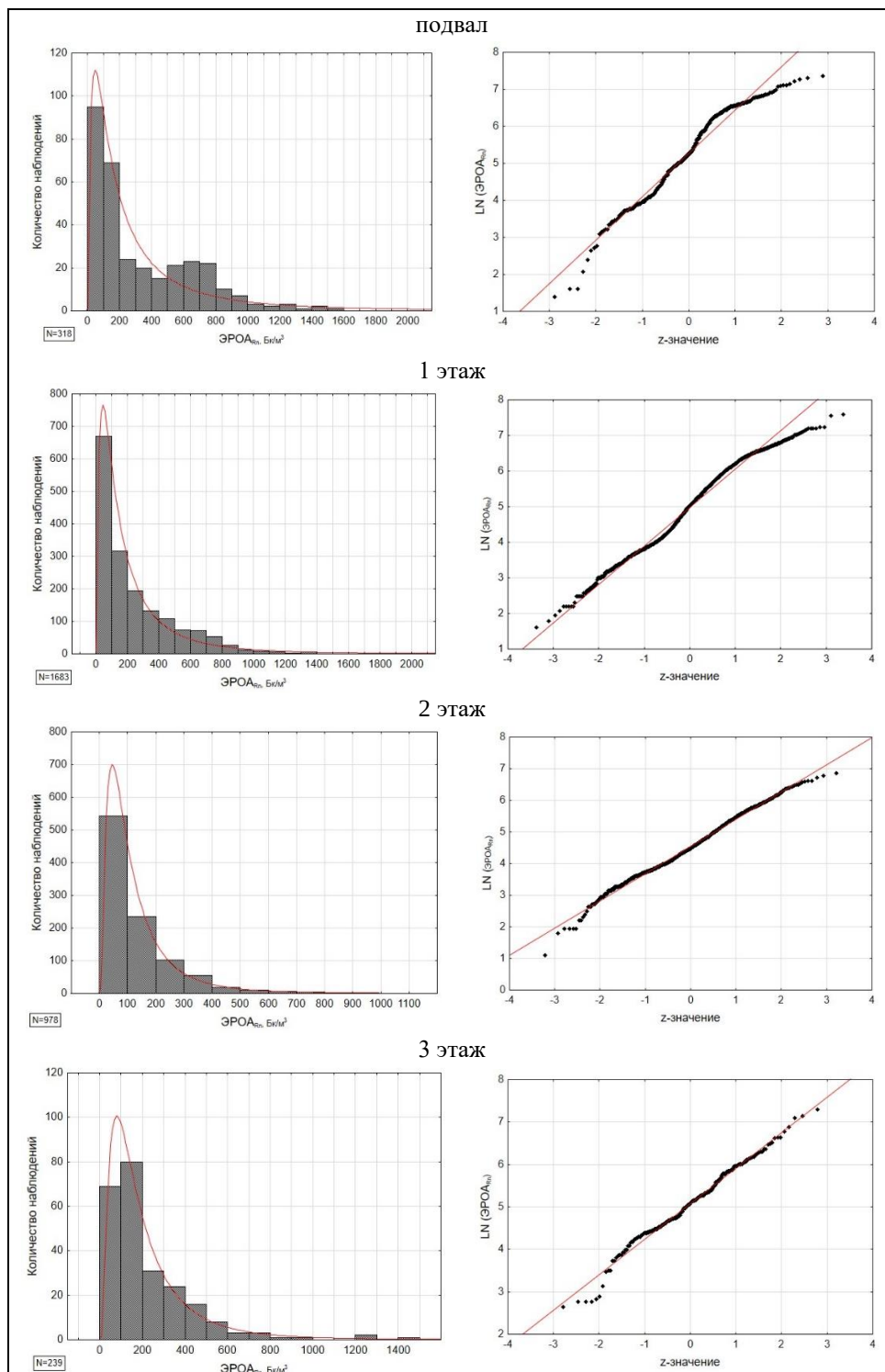
Далее изучим зависимость ЭРОА_{Rn} в помещениях жилых и общественных зданиях города Лермонтов в зависимости от разных факторов.

5.1.2. Закономерности распределения ЭРОА района в зданиях города Лермонтов

5.1.2.1. Зависимость объемной активности радона от этажа

Построили гистограммы распределения и Q-Q диаграммы для значений $\text{ЭРОА}_{\text{РН}}$ в зависимости от этажа здания, на котором проводилось измерение.

Гистограммы и Q-Q диаграммы представлены на рисунке 27.



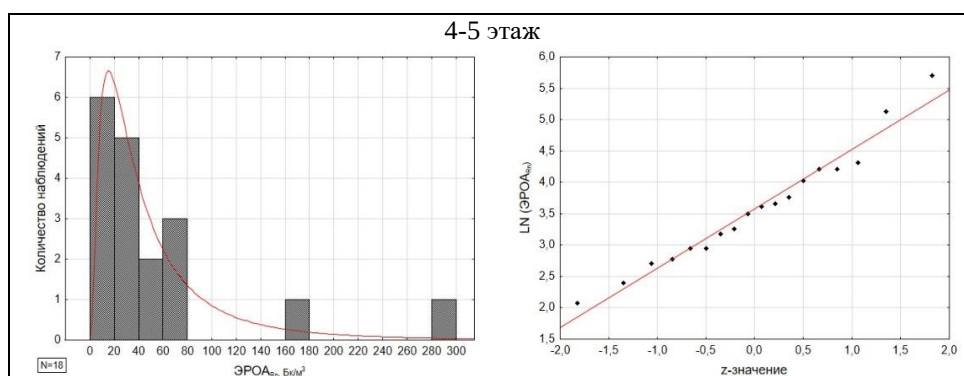


Рисунок 27 – Гистограмма частотного распределения и Q-Q диаграмма для значений ЭРОА_{Rn} в помещениях жилых и общественных зданий города Лермонтов в зависимости от этажа

Графики распределения значений ЭРОА_{Rn} на всех этажах соответствуют логнормальному распределению. Для изучения влияния этажа здания на содержание радона в помещении применили непараметрический дисперсионный анализ с использованием критерия Краскела-Уоллиса. Результаты расчета критерия показали, что достигнутый уровень статистической значимости (p) составил менее 0,001 ($H=193,95$; $N= 3236$; $df=4$), что говорит о статистически значимой разнице значений ЭРОА_{Rn} на разных этажах. Для попарной проверки различий между этажами рассчитали критерий Манна-Уитни, результаты попарных расчетов представлены в таблице 12.

Для оценки справедливости нулевой гипотезы при попарных сравнениях рассчитали новый критический уровень значимости p - для этого разделили 0,05 на число попарных сравнений (4), получили критический уровень значимости $p=0,0125$.

Таблице 12 – 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

Согласно таблице 12, достигнутые уровни значимости меньше критического в группах между подвалом и первым этажом, первым и вторым

этажом, а также вторым и третьим, а значит есть статистически значимое различие значений ЭРОА_{Rn} .

Для оценки различия ЭРОА_{Rn} между этажами построили диаграмму размаха (рисунок 27).

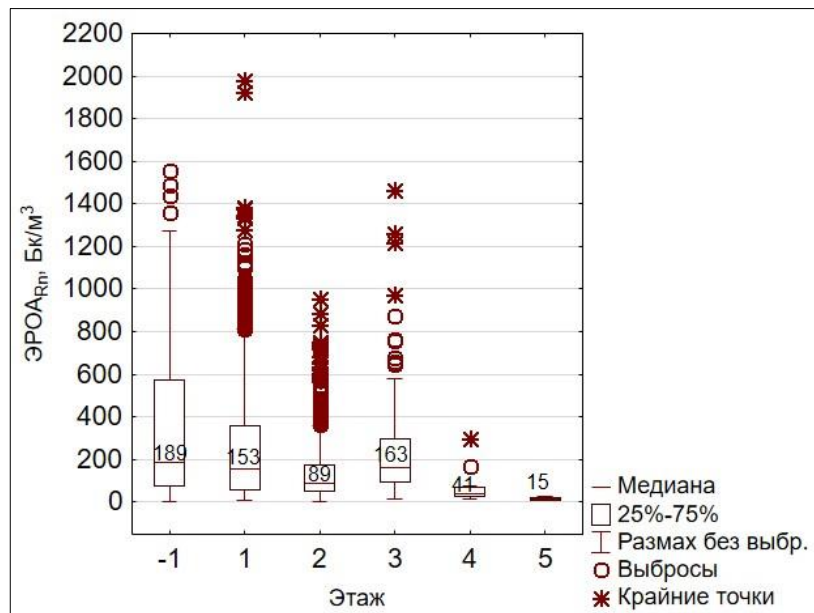


Рисунок 27 – Диаграмма размаха ЭРОА_{Rn} в зависимости от этажа в городе Лермонтов

Анализируя диаграмму, можно сделать вывод, что превышения ЭРОА_{Rn} зарегистрированы как в подвале, так и на 1,2,3,4 этажах. Наибольшее значение медианы ЭРОА_{Rn} в подвалах зданий, значения на первом и третьем этажах статистически не отличаются и составляют 153 и 163 Бк/м³ соответственно.

5.1.2.2. Зависимость объемной активности радона от строительного материала

На рисунке 28 представлена круговая диаграмма распределения обследованных зданий по строительному материалу.

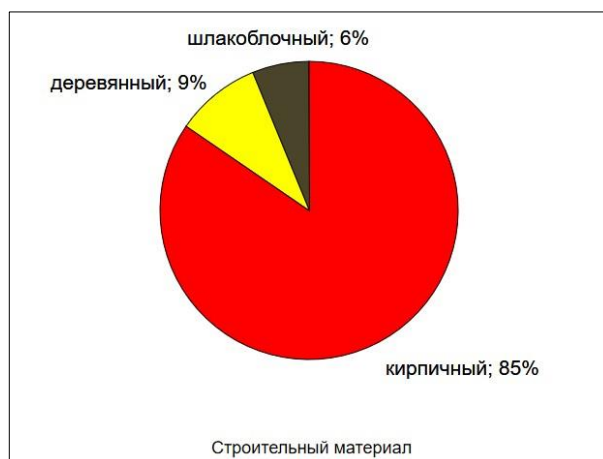
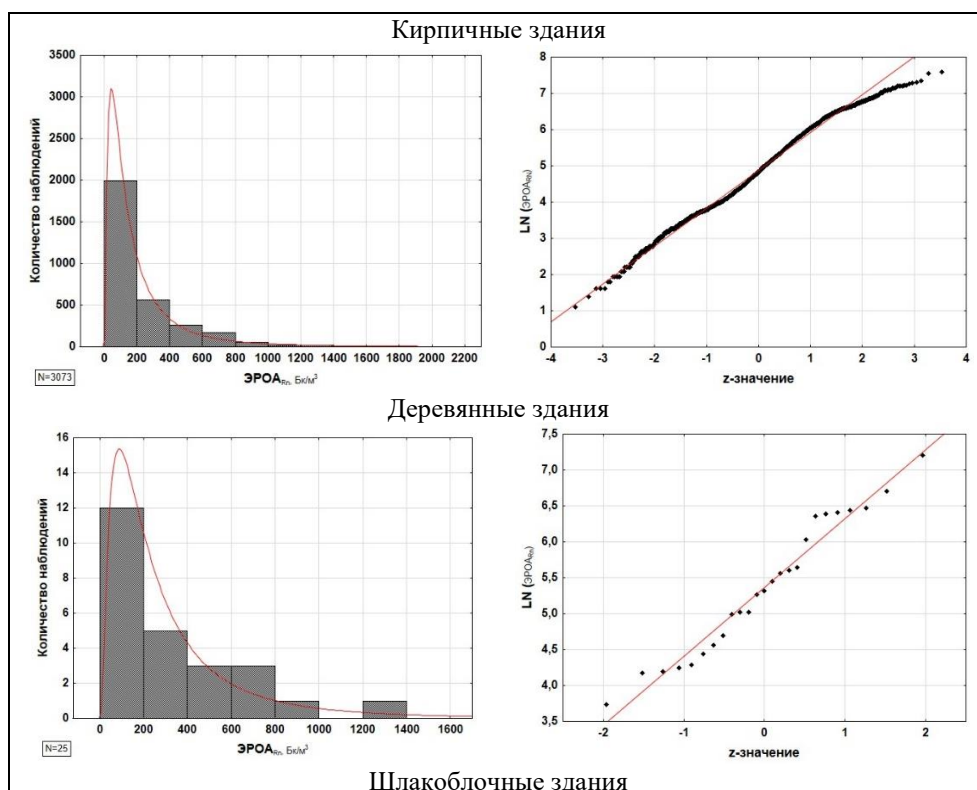


Рисунок 28– Диаграмма распределения обследованных зданий по строительному материалу в городе Лермонтов

Как видно на рисунке 28, большинство обследованных зданий – кирпичные (85% от всех обследованных зданий).

Построили гистограммы распределения и Q-Q диаграммы для значений ЭРОА_{Rn} в зависимости от материала, из которого построено здание.

Гистограммы и Q-Q диаграммы представлены на рисунке 29.



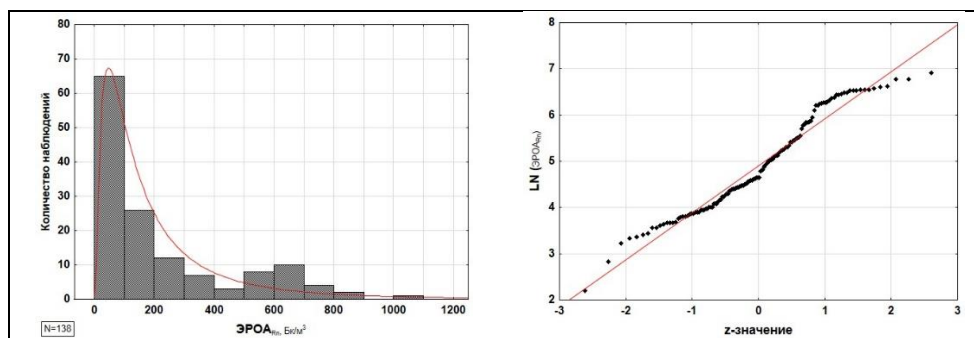


Рисунок 29 – Гистограмма частотного распределения и Q-Q диаграмма для значений ЭРОА_{Rn} в помещениях жилых и общественных зданий города Лермонтов в зависимости от строительного материала

Распределение значений ЭРОА_{Rn} в кирпичных, деревянных и шлакоблочных зданиях логнормальное.

Параметры распределения значений ЭРОА_{Rn} представлены в таблице 12.

Таблица 12 – Параметры распределения значений ЭРОА_{Rn} в помещениях общественных и жилых зданиях города Лермонтов в зависимости от строительного материала, $n = 3236$ шт.

Материал	Сезон	Параметры распределения значений ЭРОА _{Rn}								
		N	CA	CG	CO	Мин.	Макс.	Медиана*	Более 200Бк/м ³	
Ед. изм.		шт	Бк/м ³						шт	%
Кирпич	ОП	1488	250	146	247	<10	1980	166 (153-179)	654	44
	ТП	1585	190	117	223	<10	1555	104 (93-115)	434	27
	Всего	3073	219	130	237	<10	1980	126 (118-134)	1088	35
Дерево	ОП	14	366	281	246	65	812	276 (147-405)	9	64
	ТП	11	272	152	386	42	1345	147 (<10-375)	4	36
	Всего	25	325	214	312	42	1345	204 (82-326)	13	52
Шлакоблок	ОП	66	277	180	248	<10	882	161 (101-220)	28	42
	ТП	72	178	104	213	17	1007	78 (28-127)	19	26
	Всего	138	225	135	235	<10	1007	105 (65-144)	47	34

Примечание: ТП – теплый период; ОП – отопительный период; СА – среднее арифметическое; СГ – среднее геометрическое; СО – стандартное отклонение. * в скобках – 95% доверительный интервал.

Медиана ЭРОА_{Rn} в кирпичных зданиях равна 126 Бк/м^3 и колеблется в доверительном интервале (при $p=0,95$) от 118 до 134 Бк/м^3 , не превышает норматив 200 Бк/м^3 ;

Медиана ЭРОА_{Rn} в шлакоблочных зданиях составила 105 Бк/м³ в доверительном интервале от 65 до 144 Бк/м³, также не превышает нормируемый показатель;

В деревянных зданиях медиана ЭРОА_{Rn} составила 204 Бк/м³ и колеблется от 82 до 326 Бк/м³, что несколько выше нормируемого показателя 200 Бк/м³.

Отделили от общей выборки все значения, превышающие 200 Бк/м³ включительно. С помощью функции группировка в программе Statistica сгруппировали значения по адресу и этажу и выявили, в каких зданиях и на каких этажах зарегистрировано значение ЭРОА_{Rn} выше 200 Бк/м³.

В таблице 13 представлено распределение количества превышающих значений в зависимости от строительного материала, этажности и этажа здания.

Таблица 13 – ЭРОА_{Rn} в помещениях жилых и общественных зданий в г. Лермонтов в зависимости от строительного материала и этажности зданий

Строительный материал	Кол-во этажей в здании	Медиана ЭРОА _{Rn} , Бк/м ³		% помещений на первых этажах с ЭРОА _{Rn} более 200 Бк/м ³
		1 этаж	Верхние этажи	
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

Наибольший процент превышений на 1 этажах в одноэтажных кирпичных и шлакоблочных зданиях.

5.2. Сравнение объёмной активности радона в помещениях жилых и общественных зданий объектов мониторинга городов Балей и Лермонтов

Сравним основные полученные данные в главе 4 и 5 по Лермонтову и в г. Балей. В таблице 14 представлены параметры распределения значений ЭРОА_{Rn} в помещениях общественных и жилых зданий городов Балей и Лермонтов.

Таблица 14 – Параметры распределения значений ЭРОА_{Rn} в помещениях общественных и жилых зданий городов Балей и Лермонтов

Территория	N	СА	СГ	СО	Мин.	Макс.	Медиана*	Более 200Бк/м ³	
Ед. изм.	шт	Бк/м ³						шт	%
г.Балей	1296	194	116	246	<10	2087	107 (94-120)	380	29
г.Лермонтов	3236	220	131	238	<10	1980	126 (118-134)	1148	35

СА – среднее арифметическое; СГ – среднее геометрическое; СО – стандартное отклонение. * границы доверительного интервала- при p=0,95.

Из таблицы 14 видно, что объёмная активность радона для ЭРОА_{Rn} распределяется следующим образом:

- значения СГ и медианы не превышают норматив 200 Бк/м³ во всех городах;
- значения СА не превышают норматив 200 Бк/м³ в г. Балей;
- значение СА в г. Лермонтов превышает норматив 200 Бк/м³;
- максимальные значения ЭРОА_{Rn} превышают норматив 200 Бк/м³: в г. Балей в 10,4 раз, в г. Лермонтов в 9,9 раз;
- процент превышений норматива в г. Лермонтов – 35%, а в г. Балей – 29% от общего числа измерений;

5.2.1. Превышение объёмной активности радона ЭРОА_{Rn} выше 200 Бк/м³ в помещениях г. Балей и г. Лермонтов

Используя программу Excel, отделили данные по ЭРОА_{Rn}, превышающие нормативное значение 200 Бк/м³.

В таблице 15 представлены параметры распределения значений ЭРОА_{Rn} в помещениях г. Балей и г. Лермонтов, превышающие 200 Бк/м³.

Таблица 15 – Параметры распределения значений ЭРОА_{Rn}, превышающих 200 Бк/м³ в г. Балей и г. Лермонтов

Параметр распределения	г. Балей	г. Лермонтов
N	399	1148
СА, Бк/м ³	462	466
СГ, Бк/м ³	392	413
СГО	1,7	1,6
Мода, Бк/м ³	295	330
Медиана, Бк/м³	335	394
Макс, Бк/м ³	2087	1980
СА - среднее арифметическое значение; СГ – среднее геометрическое значение; СГО – стандартное геометрическое отклонение;		

Из таблицы 15 видно, что медиана для превышающих значений в г. Балей составляет 335 Бк/м³, в г. Лермонтов – 394 Бк/м³, при этом максимальное значение в г. Балей - 2087 Бк/м³, в г. Лермонтов – 1980 Бк/м³.

Отделили данные ЭРОА_{Rn}, превышающие нормативное значение, и далее провели исследования на этих значениях, какие факторы влияют на повышенное содержание ²²²Rn в помещениях.

5.2.2. Объёмная активность радона на первых этажах в г. Балей и г. Лермонтов с превышением ЭРОА_{Rn}

В результате обработки данных выявили помещения в г. Балей и г. Лермонтов, на первых этажах которых есть превышение нормируемого показателя ЭРОА_{Rn} выше 200 Бк/м³ (таблица 16). Согласно таблице 5.8, число помещений с превышениями на первых этажах: в г. Балей – 254 (64% от общего числа превышений), в г. Лермонтов – 694 (60% от общего числа превышений).

Медиана на первых этажах составляет: в г. Балей – 365 Бк/м³, в г. Лермонтов – 422 Бк/м³. Максимальные значения ЭРОА_{Rn} соответственно – 2087 Бк/м³ в г. Балей, и 1980 Бк/м³ в г. Лермонтов.

Таблица 16 – Параметры распределения превышающих значений ЭРОА_{Rn} в г. Балей и г. Лермонтов на первых этажах

Параметр распределения	г. Балей	г. Лермонтов
N	254	694
СА, Бк/м ³	505	479
СГ, Бк/м ³	421	427
СГО	1,8	1,6
Мода, Бк/м ³	305	342
Медиана, Бк/м ³	365	422
Макс, Бк/м ³	2087	1980
Превышения, % от общего числа превышений	64	60
СА - среднее арифметическое значение; СГ – среднее геометрическое значение; СГО – стандартное геометрическое отклонение;		

5.3. Выводы по главе 5

Средние значения ЭРОА_{Rn} в помещениях зданий г. Лермонтов составляют 111 - 127 (med=119) Бк/м³; ЭРОА_{Rn} снижается в помещениях по мере увеличения этажа здания: при среднем значении на 1 этажах – 153 Бк/м³, максимальное составляет 1980 Бк/м³ (что превышает норматив до 9,9 раз); на 2-ом этаже - 89 Бк/м³, на 3-ем этаже – 163 Бк/м³, на 4 и 5 этажах 35 Бк/м³.

ЭРОА_{Rn} на 1 этажах зданий статистически значимо отличаются ($p < 0,0125$) от значений на других этажах

Большинство обследованных зданий, где есть превышения на 1 этажах – Наибольший процент превышений на 1 этажах в одноэтажных кирпичных и шлакоблочных зданиях.

Провели типирование территории г. Лермонтов по степени потенциальной опасности по содержанию ²²⁶Ra, которая была предложена в Балее: $A_{уд}^{226}Ra < 36$ Бк/кг – 1 тип территории, $36 \text{ Бк/кг} < A_{уд}^{226}Ra < 85$ Бк/кг – 2 тип, $A_{уд}^{226}Ra > 85$ Бк/кг – 3 тип. Получили, что в целом территория по содержанию ²²⁶Ra 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.

ГЛАВА 6. ОЦЕНКА СТЕПЕНИ РАДИАЦИОННОЙ ОПАСНОСТИ ТЕРРИТОРИИ Г. ЛЕРМОНТОВ МЕТОДОМ КОРРЕЛЯЦИОННО-РЕГРЕССИОННОГО АНАЛИЗА

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

Далее изучили параметры радиационной обстановки на территории города Лермонтов. Получили большой массив данных по двум основным параметрам МАЭД ГИ и ППР, а также удельной активности природных радионуклидов, что с достаточной полнотой характеризует потенциальную опасность территории.

Провели радиационное обследование территории по показателю МАЭД ГИ. Гистограммы распределения значений МАЭД ГИ представлены на рисунке 30.

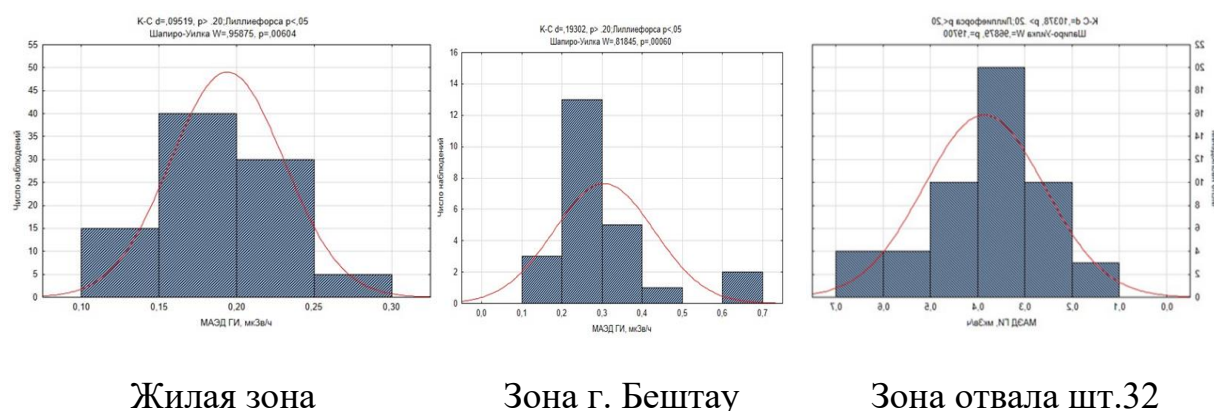


Рисунок 30- Гистограммы распределения значений МАЭД ГИ

На территории жилой зоны и г. Бештау значение МАЭД ГИ подчиняются нормальному закону распределения, а на территории отвала штольни 32 – логнормальному.

Параметры распределения значений МАЭД ГИ на территориях объекта исследования представлены в таблице 17. Как можно увидеть в таблице 17, средние значения МАЭД ГИ на территории жилой зоны и отвала шт 32 не превышают ограничение 0,3 мкЗв/ч, а на территории г. Бештау медиана

составляет 0,37 мкЗв/ч что несущественно превышает значение 0,3 мкЗв/ч.

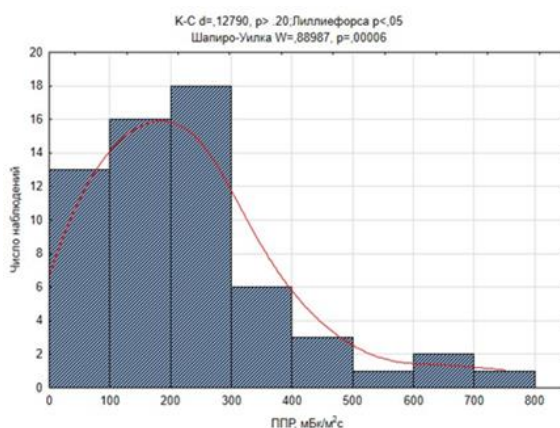
Максимальные значения на всех территориях превышают 0,3 мкЗв/ч.

Таблица 17 - Статистические параметры распределения значений МАЭД ГИ на территории объекта исследования, N = 165

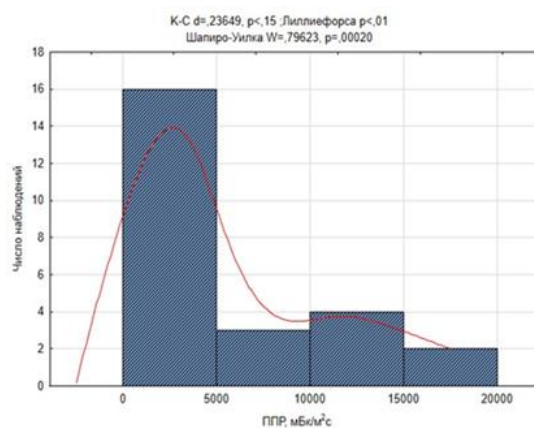
Территория	N	Мин.	Макс.	СА	СО	СГ	Медиана*	Превышение 0,3 мкЗв/ч	
Ед.изм.	шт.	мкЗв/ч						%	шт.
Жилая зона	90	0,13	0,30	0,19	0,04	0,19	0,20 (0,19–0,21)	2	2
Зона г. Бештау	51	0,12	0,69	0,39	0,13	0,36	0,37 (0,34–0,40)	78	40
Отвал штольни №32	24	0,15	0,67	0,31	0,12	0,29	0,27 (0,22 – 0,32)	42	10

СА – среднее арифметическое, СГ – среднее геометрическое, СО – стандартное отклонение;* в скобках 95% доверительный интервал; 0,3 мкЗв/ч – допустимое значение МАЭД ГИ для участков застройки [113]

Гистограммы распределения значений ППР представлены на рисунке 31.



Жилая зона



Зона г. Бештау

Рисунок 31 – Гистограммы распределения значений ППР

Статистическая обработка показала логнормальное распределение ППР на территории обследования. Параметры распределения значений ППР на территориях объекта исследования представлены в таблице 6.2. По значениям ППР с поверхности грунта практически вся территория города может быть отнесена к радоноопасной зоне. Значения ППР в среднем по территории города составляют 203 мБк/м²с, что в 2,5-3,0 раза превышают допустимые значения, установленные ОСПОРБ-99/2010 для территории жилой застройки.

Таблица 18 - Параметры распределения значений ППР на территориях объекта исследования

Территория	N	Мин.	Макс.	СА	СО	СТ	Медиана*	Превышение 80 мБк/м ² с	
Ед.изм.	шт.	мБк/м ² с						%	шт.
Жилая зона	60	25	725	224	156	174	203 (163-242)	78	47
Зона г. Бештау	56	24	19500	2911	4743	967	930	93	52
Отвал штольни №32	3	475	1280	922	335	850	1010	100	3

СА – среднее арифметическое, СТ – среднее геометрическое, СО – стандартное отклонение; *в скобках 95% доверительный интервал. 80 мБк/м²с – допустимое значение ППР для участков застройки

На отдельных участках в районе ТЦ «Радуга» и школы №1 значения ППР в отдельных точках достигали 1330 и даже 2370 мБк/м²с. Средние значения ППР с поверхности грунта на участках расположения школ, детских садов и других детских учреждений города (всего 17 объектов) составляют от 115±74 мБк/м²с до 368±306 мБк/м²с, то есть, во всех случаях допустимый уровень ППР рекомендуемый ОСПОРБ-99/2010 для строительных площадок жилых и общественных зданий. Источником повышенной эксхалляции радона в пределах городской территории являются приповерхностные грунты, представленные продуктами разрушения магматических пород, перекопанными делювиально-элювиальными суглинистыми отложениями с многочисленными обломками бештаунита. На рисунке 32 представлены гистограммы распределения удельной активности ²²⁶Ra, ²³²Th, ⁴⁰K на территории объекта исследования.

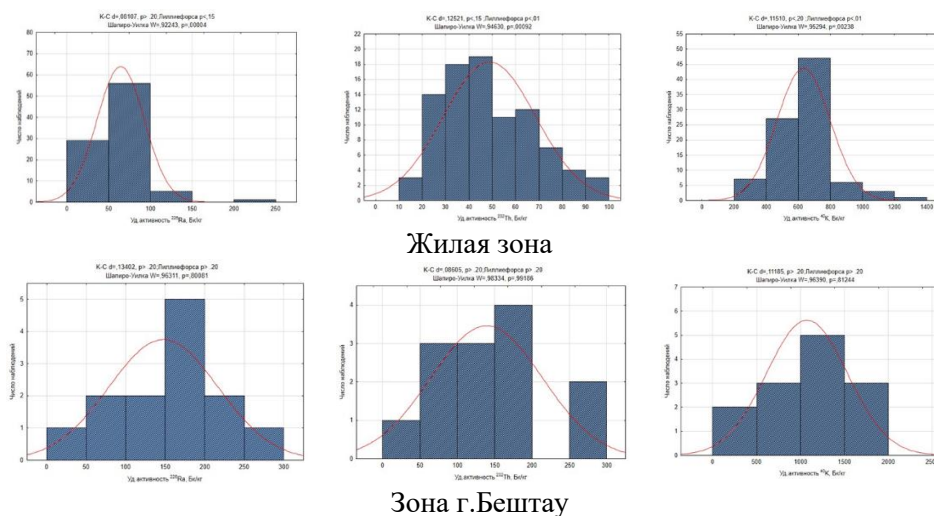


Рисунок 32 - Гистограммы распределения удельной активности ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K

Все значения удельной активности радионуклидов распределены логнормально. В таблице 6.3 представлены параметры распределения значений удельной активности природных радионуклидов в грунтах (почвах) на территории объекта исследования.

Таблица 19 - Параметры распределения значений удельной активности природных радионуклидов в грунтах (почвах) на территории объекта исследования, n = 120 проб

Параметр	Удельная активность радионуклидов в грунтах (почвах), Бк/кг			
	^{226}Ra	^{232}Th	^{40}K	$A_{\text{эфф}}$
Жилая зона				
N	91			
Медиана*	63 (57 – 69)	43 (39 - 47)	643 (609 – 677)	179 (169 – 189)
Мин. – Макс.	11-204	18 - 99	220 - 1273	66 - 345
Зона г. Бештау				
N	13			
Медиана*	156 (120 -192)	132 (93 -171)	1134 (893 – 1375)	490 (389 – 591)
Мин. – Макс.	44 -280	12 - 272	85 - 1725	67 - 789
Зона отвала штольни 32				
N	16			
Медиана*	117 (27 – 207)	63 (32 – 93)	791 (690 – 891)	369 (273 – 464)
Мин. – Макс.	46 - 789	26 - 243	504 - 1222	141 - 933
* в скобках 95% доверительный интервал				

В связи с тем, что нормирование по почве нет, оценку состояния почвенного покрова провели по показателю усредненной эффективной удельной активности. На всех территориях медианное распределение. Территорию можно отнести ко 2 классу (для материалов, используемых в дорожном строительстве в пределах территории населенных пунктов и зон перспективной застройки, а также при возведении производственных сооружений) при этом максимальные значения кроме жилой зоны, превышают от 2 до 2,5 раз.

Для выявления причинно-следственных связей использовали визуальный подход и построили диаграммы размаха зависимости удельного содержания природных радионуклидов, характеризующих территорию, и таких параметров контроля, как МАЭД ГИ и ППР, характеризующих пути воздействия на здоровье население (рисунок 33).

$A_{эфф}$ в жилой зоне менее 370 Бк/кг и подтверждается значениями МАЭД ГИ, которые менее 0,3 мкЗв/ч. На диаграмме размаха значений $A_{уд}^{226}Ra$ нанесли ту систему градации допустимых значений, которая была предложена в Бале: $A_{уд}^{226}Ra < 36$ Бк/кг – 1 тип территории, 36 Бк/кг $< A_{уд}^{226}Ra < 85$ Бк/кг – 2 тип, $A_{уд}^{226}Ra > 85$ Бк/кг – 3 тип.

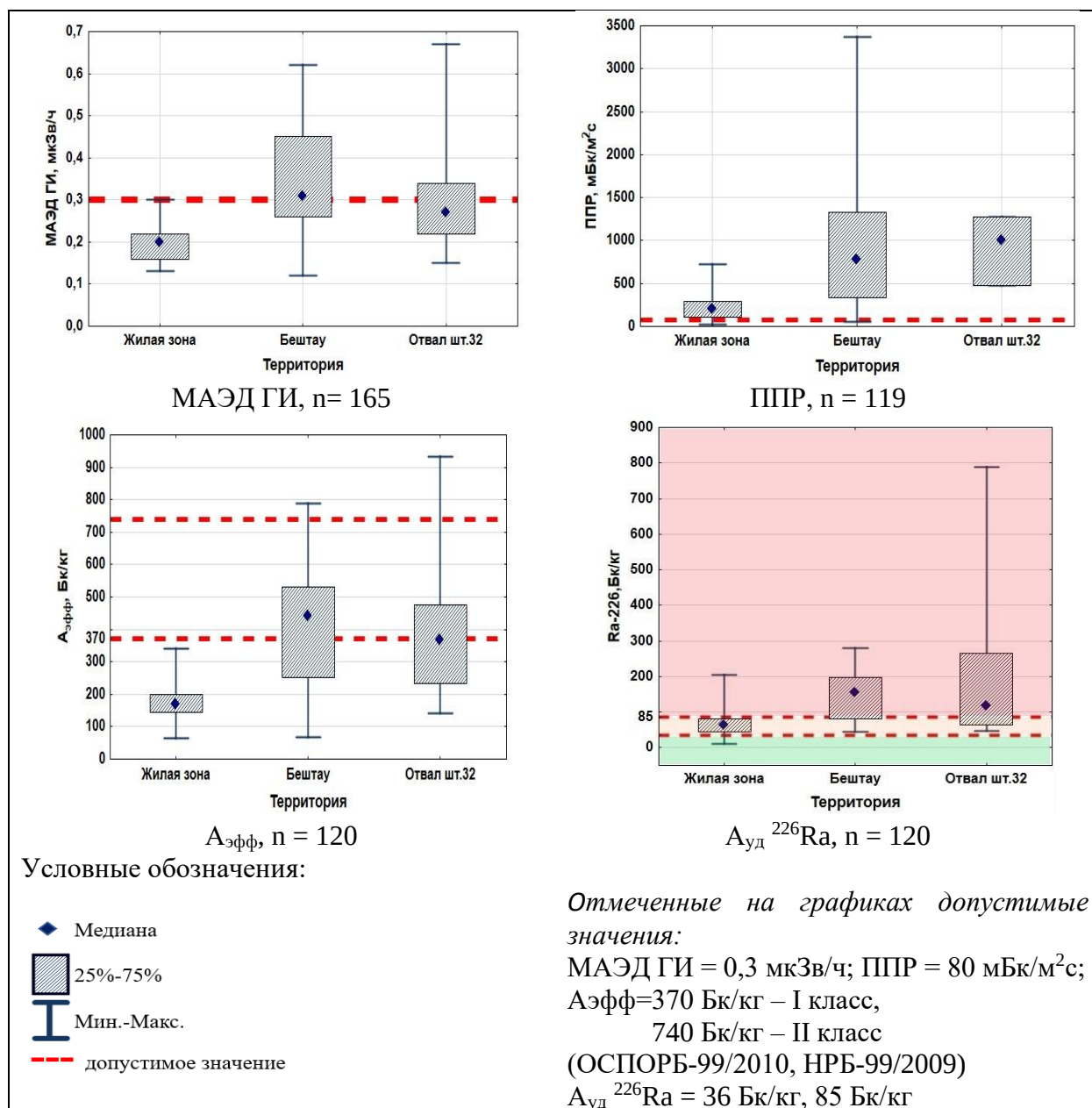


Рисунок 33 – Диаграммы размаха значений параметров радиационной обстановки на территории жилой зоны г. Лермонтов и в районе расположения объектов ЛПО «Алмаз»

Получили, что основные значения $A_{уд}^{226}Ra$ относятся к 2 типу, которая является повышенной, что подтверждается значением ППР, которые также выше нормативного значения 80 мБк/м²с. Значения $A_{уд}^{226}Ra$ в жилой зоне г.

Лермонтов лежат в тех же интервалах как и в г. Балей, следовательно предложенная нами система категорирования работает и в Лермонтове.

6.2. Корреляционно-регрессионный анализ

Провели оценку влияния показателей радиационной обстановки на содержания радона на 1 этажах с применением корреляционно-регрессионного (КР) анализа данных.

Оценка потенциальной радоноопасности территории предполагает прогноз наличия зданий на территории, в помещениях которых есть превышения ЭРОА_{Rn} нормируемого показателя. Так как содержание радона в помещениях зданий зависит от множества факторов, необходимо установить, какие влияют в большей, какие в меньшей степени. Для этого провели КР анализ полученных данных.

КР анализ позволяет установить тесноту, направление связи и форму связи между переменными, т.е. ее аналитическое выражение. Основная задача КР анализа состоит в количественном определении тесноты связи между двумя признаками при парной связи и между результативными и несколькими факторными признаками при многофакторной связи и статистической оценке надежности установленной связи [18]. КР анализ проводится в несколько этапов, рассмотренных ниже.

6.2.1. Выбор факторов

Первым этапом КР анализа является выбор факторов, влияющих на зависимую переменную (в нашем случае зависимая переменная – ЭРОА_{Rn} на первых этажах зданий). На рисунке 6.5 показана схема первого этапа КР анализа. Выбранные факторы: МАЭД ГИ, ППР, $A_{эфф}$, $A_{уд}$ ^{226}Ra вблизи здания, а также 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 (качественных) факторов применили метод фиктивных переменных (Dummy) [64], который

осуществляется путем кодирования качественных данных: если такие данные имеют k значений, то необходимо ввести $k - 1$ фиктивную переменную.



Рисунок 34 – Выбранные факторы и отклик КР анализа

В таблице 20 представлены закодированные выбранные номинальные факторы.

Таблица 20 – Кодирование номинальных данных

Фактор	Значение	Закодированное значение (фиктивная переменная)
Строительный материал	кирпич	100
	дерево	010
	шлакоблок	001
Состояние здания	без нарушений	10
	с нарушенными перекрытиями	01
Дочетвертичные отложения	мергели, глины, прослой известняков (75–184 м)	100
	мергели кофейно-бурые, тонкие прослой глин, известняков (22–105 м)	010
	майкопские глины, прослой мергелей, известняков	001
Четвертичные отложения	Аллювий бассейна р. Кума. Мелко-среднегалечниковые отложения, линзовидные прослой песка и глины (2 м)	100
	Делювий. Суглинки, супеси и глины с дресвой, включения порошкообразного гипса (0,5–20,2 м)	010
	Коллювий и делювий. Суглинки и супеси с дресвой и щебнем (0,5–3,5 м)	001

После замены данных на фиктивные переменные, КР проводили аналогично вместе с количественными факторами.

6.2.2. Поиск мультиколлинеарных факторов

На втором этапе КР анализа поочередно исключали мультиколлинеарные факторы. Для выявления корреляционных зависимостей между МАЭД ГИ и ППР с $A_{уд}^{226}\text{Ra}$ и соответственно $A_{эфф}$ построили диаграммы рассеяния – рисунок 35. Для установления статистически значимой корреляции между показателями, рассчитали непараметрический коэффициент корреляции Спирмена для логнормального распределения значений, приведенные в таблице 21.

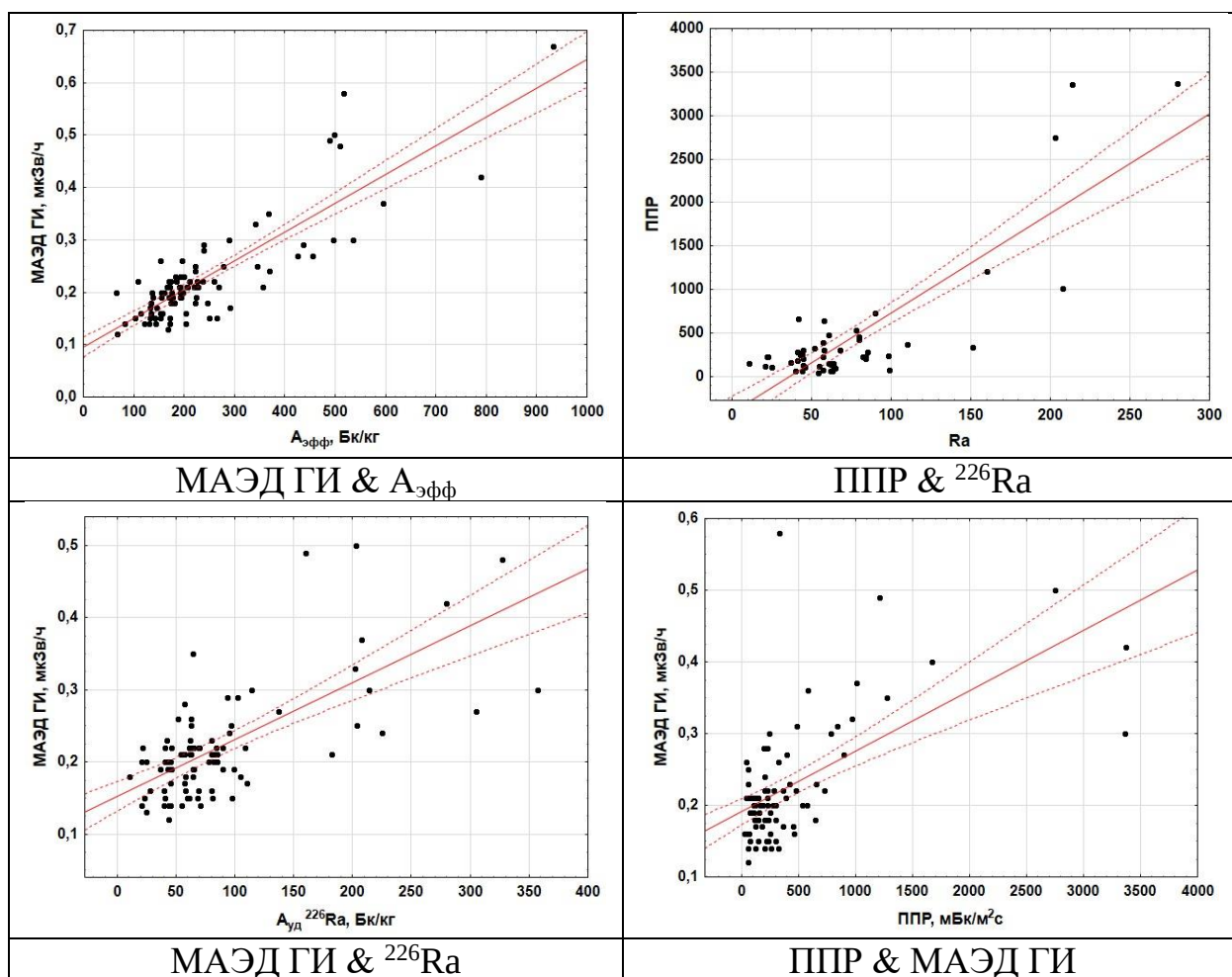


Рисунок 35 – Диаграммы рассеяния для значений: МАЭД ГИ - $A_{эфф}$, $A_{уд}^{226}\text{Ra}$; ППР - $A_{уд}^{226}\text{Ra}$, МАЭД ГИ

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).

Таблица 22 – 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 & $A_{эфф}$	100	0,7	<0,05
ППР & МАЭД ГИ	82	0,5	<0,05
r - коэффициент Спирмена; α -уровень значимости.			

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. В таблице 23 представлены результаты расчета коэффициента Спирмена для разных типов отложений. Как видно в таблице 23, 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:

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

Таблица 23 – Коэффициенты корреляции Спирмена для ППР и $A_{уд}^{226}\text{Ra}$ в зависимости от типа пород на территории г. Лермонтов

Индекс	Тип отложений	n	Коэффициент Спирмена – r	α^{**}
c,dH	Коллювий-делювий (осыпь г. Бештау): суглинки, супеси, дресва	50	0,4	0,001
dш-H	Делювий: суглинки, супеси, глины с дресвой	37	0,3	0,33
all ⁶	Аллювий: мелко-среднегалечниковые отложения, песок, глина	49	0,7	0,005
* α – уровень значимости				

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_{Рн} на 1 этаже. Исключили факторы, у которых уровень значимости $p > 0,05$. Итоги регрессии представили в таблице 24.

Таблица 24 – Итоги регрессии для зависимой переменной ЭРОА_{Рн} на 1 этаже от $A_{уд}^{226}\text{Ra}$, ППР, типа отложений (глина, пески), наличия нарушений в перекрытиях, n=51

Показатель	бета	CO	b	CO	t(48)	p-знач.
Свободный член			-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 24 остались факторы, статистически значимо влияющие на ОА_{Рн} 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).

6.2.3. Анализ регрессионного уравнения

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

$$Y = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + \dots + b_k X_k \quad (10)$$

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

Полученное уравнение имеет вид:

$$\begin{aligned} \text{ЭРОА}_{\text{Rn}} \text{ на 1 этаже} = & -382 + 5,9 \cdot A_{\text{уд}}^{226}\text{Ra} + 0,2 \cdot \text{ППР} + 133 \times Q^* + 70 \\ & \times C^{**} + 156 \times N^{***}, \end{aligned} \quad (11)$$

где $A_{\text{уд}}^{226}\text{Ra}$ – удельная активность радия вблизи расположения здания; ППР – плотность потока радона с поверхности грунта вблизи здания; * – если здание расположено на песчаных отложениях, то $Q = 1$, если нет – $Q=0$; C^{**} – если здание расположено на глинах, то $C=1$, нет – $C=0$; N^{***} – если здание старое, 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.

Подставив нормативные значения ЭРОА_{Rn} и ППР в полученное уравнение, получили следующее:

1. Для зданий с нарушениями в подпольных перекрытиях, расположенных на территории, представленной песками и глинами, при ЭРОА_{Rn} на 1 этажах до 200 Бк/м^3 и ППР до $80 \text{ мБк/м}^2\text{с}$: $A_{\text{уд}}^{226}\text{Ra}$ составляет до 35 Бк/кг ; на других территориях: $A_{\text{уд}}^{226}\text{Ra}$ до 70 Бк/кг ;

2. Для ненарушенных новых зданий, расположенных на территории, представленной песками и глинами, при ЭРОА_{Рп} до 200Бк/м³ и ППР до 80мБк/м²с: А_{уд}²²⁶Ra составляет до 62 Бк/кг; на других территориях: А_{уд}²²⁶Ra до 96 Бк/кг.

6.2.4. Оценка приемлемости модели

Четверым этапом проверили приемлемость полученной модели, для этого проанализировали остатки, оценили значение R², провели дисперсионный анализ и оценили прогноз по регрессионному уравнению.

6.2.4.1. Анализ остатков

Остатки – разности фактических значений отклика и значений, предсказанных по уравнению регрессии. Для правильной работы модели необходимо убедиться, что остатки нормально распределены и не зависят от предсказанных по уравнению регрессии значений отклика. На рисунке 6.7 представлена гистограмма и Q-Q диаграмма остатков, а также диаграмма рассеяния предсказанных значений и остатков.

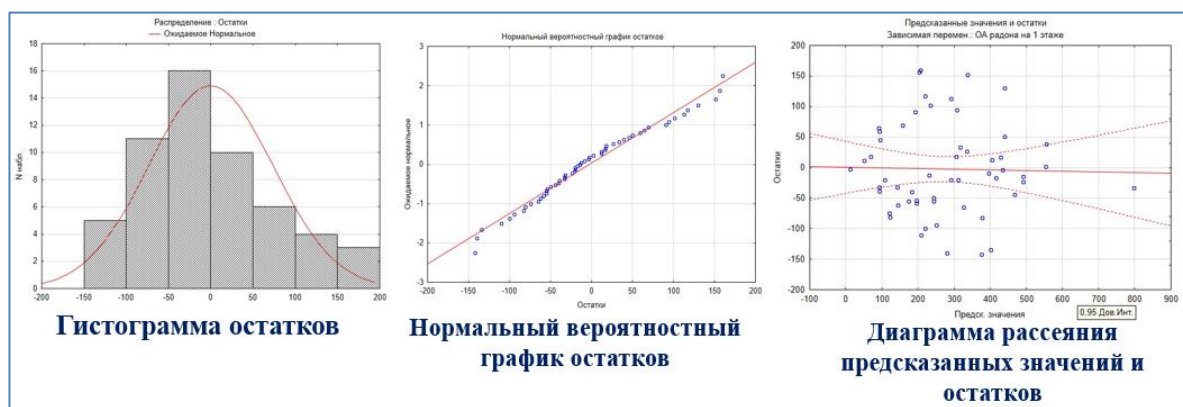


Рисунок 36 – Гистограмма и Q-Q диаграмма остатков, диаграмма рассеяния предсказанных значений и остатков

Визуальная оценка графиков показала: остатки распределены нормально, и от них не зависят предсказанные значения.

6.2.4.2. Дисперсионный анализ данных

Для проверки приемлемости модели провели дисперсионный анализ. В таблице 6.8 представлены полученные данные дисперсионного анализа.

Таблица 25 –Результаты дисперсионного анализа

	Сумма	сс	Среднее	F	р-знач.
Регресс.	1271888	5	254378	43	$1,63 \times 10^{-16}$
Остатки	286927	48	5978		
Итого	1558815				
Сс- степень свободы; F-критерий Фишера					

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.

6.2.4.3. Построение прогноза

Оценили R^2 – коэффициент детерминации, который показывает долю изменяемости отклика, происходящую под одновременным воздействием всех включенных в модель факторов. Чем ближе R^2 к 1, тем выше качество модели. Рассчитанный R^2 равен 0,8 (скорректированный) – модель работает приемлемо, 80% факторов, влияющих на ЭРОА_{Rn} учитываются в регрессионном уравнении.

Для построения прогноза соотнесли значения ЭРОА_{Rn} , рассчитанные с помощью уравнения с фактическими значениями, результаты представлены на рисунке 37.



Рисунок 37 – Линейный график фактических и предсказанных по уравнению регрессии значений ЭРОА_{Rn} на 1 этажах зданий

Как видно на рисунке 37, фактические и предсказанные значения соотносятся, что говорит о достаточно точном прогнозе в модели.

6.3. Стандартизированная оценка пространственного распределения радиационного обследования

Для оценки пространственного распределения провели радиационное обследование территории. Для выявления всех параметров контроля на территории и выявления аномальных участков для дальнейшего детального обследования провели стандартизированную оценку (z-анализ).

Рассчитали Z для полученных значений МАЭД ГИ, ППР, удельной активности ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K по формуле:

$$Z = \frac{x_i - \mu}{\sigma} \quad (9)$$

где x_i – значение, μ – среднее арифметическое; σ – стандартное отклонение.

Так как распределение полученных значений всех параметров контроля логнормальное, для расчета значения z использовали натуральные логарифмы вместо значений. В таблице 6.9 представлены результаты расчета значения z для всей обследованной территории.

Таблица 6.9 – Стандартизированная оценка параметров контроля на территории

Z	МАЭД ГИ, мкЗв/ч	ППР, мБк/м ² с	Удельная активность радионуклидов в грунтах (почвах), Бк/кг			
			^{226}Ra	^{232}Th	^{40}K	$A_{\text{эфф}}$
-3	-	-	11	12	220	-
-2	0,12 – 0,13	24 - 39	19 - 25	18 - 21	253 - 362	66 - 103
-1	0,14 – 0,20	44 - 185	28 - 48	22 - 39	381 - 543	108 - 164
0	0,21 – 0,30	193 - 844	52 - 98	40 - 68	558 - 795	167 - 265
+1	0,31 – 0,45	897 - 3740	99 - 182	71 - 121	813 - 1149	268 - 425
+2	0,48 – 0,67	3900-15000	190 - 357	132 - 196	1221-1725	437 - 625
+3	0,69	19500	-	243 - 272	-	789 - 933
+4	-	-	789	-	-	-

Пространственное распределение всех параметров контроля на территории и позволила выявить аномальные участки и территории с повышенным содержанием природных радионуклидов (рисунок 6.8).

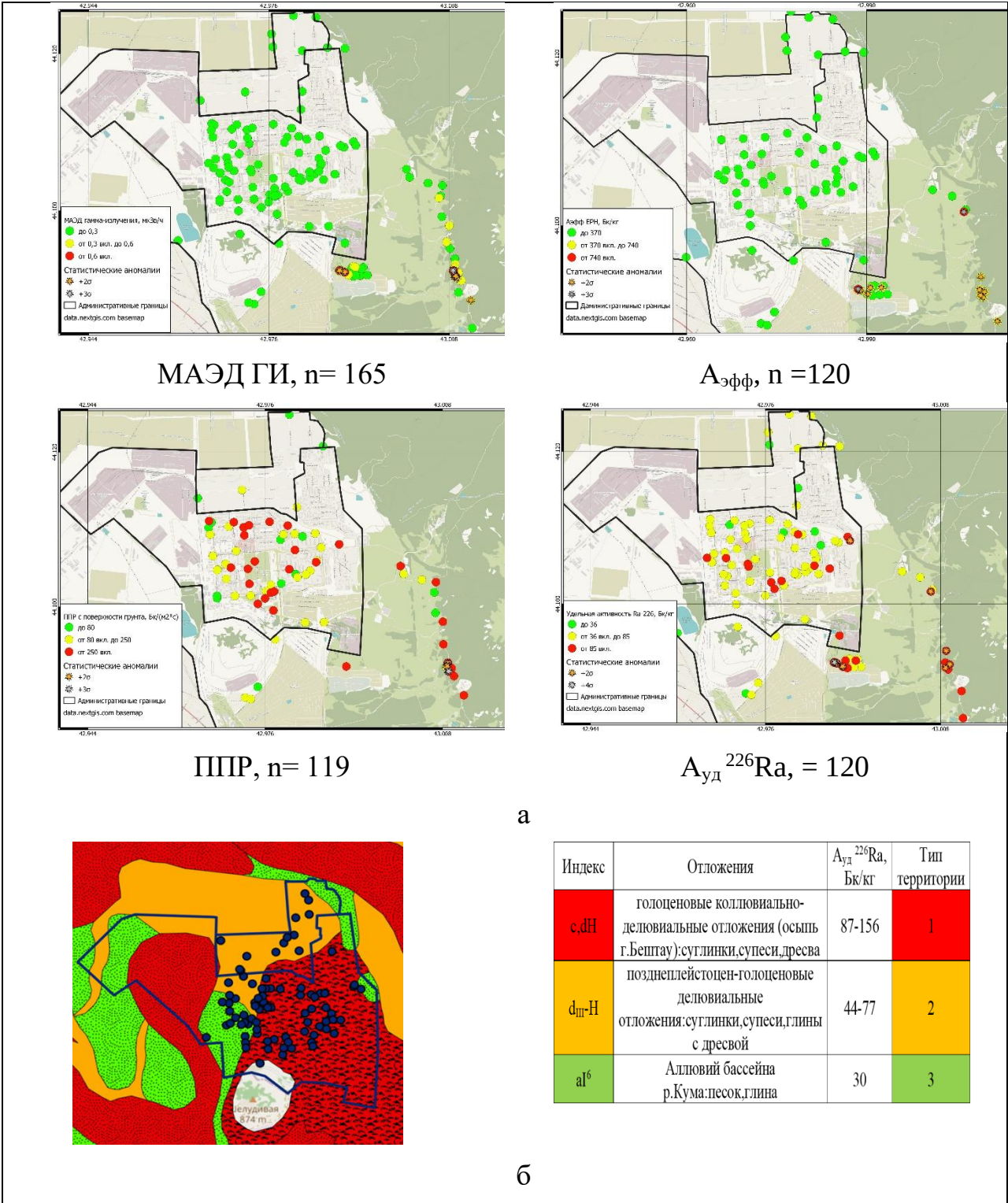


Рисунок 38 – Пространственное распределение параметров контроля (а) и категорирование жилой зоны г. Лермонтов по степени радоноопасности (б) в зависимости от $A_{уд}^{226Ra}$

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 подпольных перекрытиях при ЭРОА_{Rn} на 1 этажах до 200 Бк/м³ и ППР до 80 мБк/м²с теоретический расчёт дает содержание ²²⁶Ra: для аллювиальных песчаных отложений - до 47 Бк/кг, для глин - 58 Бк/кг; на иных территориях - до 70 Бк/кг. Далее оценили реальное содержание ²²⁶Ra 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 ²²⁶Ra 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 ²²⁶Ra. Рассчитали СГЭД_{Rn} в помещениях для каждой группы и далее индивидуальный пожизненный риск (ИПР) по МР 2.6.1.0145 – 19 [145]. Результаты такой оценки привели таблице 6.10. 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 6.10 – Оценка степени опасности жилой зоны г. Лермонтов в зависимости ЭРОА_{Rn} на 1 этажах ветхих зданиях и А_{уд} ²²⁶Ra в горных породах и отложениях

Тип территории	Медиана ЭРОА _{Rn}	А _{уд} ²²⁶ 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	2,5×10 ⁻³	Высокая
2	115 (90-140)	67(44-77)	7,4	1,3×10 ⁻³	Повышенная
3	68(43 – 93)	30(19-41)	4,4	7,8×10 ⁻⁴	Допустимая
* - среднегодовая эффективная доза за счет ²²² Rn и его ДПР; ** - индивидуальный пожизненный риск по ОСПОРБ-99/2010					

Анализ таблицы 6.10 выявил, что на территории с $A_{уд}^{226}\text{Ra}$ 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 $A_{уд}^{226}\text{Ra}$ 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. Сравнение допустимый уровень ОА_{Rn} в разных странах привели в таблице 6.11.

Таблица 6.11 – Сравнение нормативной базы России и других стран

Страна	Допустимый уровень ОА _{Rn} /ЭРОА _{Rn} *, Бк/м ³		СГЭД _{Rn} , мЗв/год	ИПР	Степень радоноопас ности
	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	Повышенная
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 ^{226}Ra 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 $A_{уд}^{226}\text{Ra}$, представленные в таблице 6.12.

Таблица 6.12 – Референтные показатели для оценки степени потенциальной радиоопасности территории

Классификация*	Нормируемые			Реальные	Референтные	
Параметр	$\text{ЭРОA}_{\text{Rn}}^*$	СГЭД**	ППР	$\text{СГЭД}_{\text{реал}}^{***}$	$A_{уд}^{226}\text{Ra}$	OA_{Rn}
Ед.изм.	Бк/м ³	мЗв/год	мБк/м ² с	мЗв/год	Бк/кг	Бк/м ³
Проектируемые	до 100	5	80	до 6,4	40	до 100
Эксплуатируемые	100-200	5-10	250	6,4 – 12,8	40-85	100-200
Аварийные	<200	<10	< 250	>12,8	> 85	>200
* НРБ-99/2009; ** - ОСПОРБ-99/2010; *** - СГЭД, реальная, рассчитанная МУ 2.4.1.1088-02						

6.1. Выводы по главе 6

На открытой местности в жилой зоне: медиана ППР ($n = 60$) лежит в 95% доверительном интервале от 163 до 242 и составила 203, превышает в 2,5 раза 80 мБк/м²с; медиана содержания ^{226}Ra в почве ($n=91$) находится в интервале от 57 до 69 и равна 63 Бк/кг, эффективная удельная активность для природных радионуклидов составила 179 Бк/кг и не превышает 370 Бк/кг; медиана МАЭД ГИ равна 0,2 и не превышает 0,3 мкЗв/ч.

Выявили, что при среднегодовой ЭРОA_{Rn} равной 108 Бк/м³, значения СЭГД составляет 6,9 мЗв/год. А при максимальных значения ЭРОA_{Rn} , доза составляет более 50 мЗв/год, что существенно превышает общее ограничение по природным радионуклидам (5 мЗв/год) только за счет радона

Выявленные высокие уровни концентраций природных радионуклидов в грунтах жилой зоны г. Лермонтов обусловлены исключительно естественными причинами, не связанными с деятельностью уранодобывающего предприятия. Высокая радиоактивность слагающих территорию пород обусловлена широким развитием кислых щелочных интрузивов и криптоэффузивных образований, обогащенных естественными радионуклидами, пронизывающих осадочный комплекс

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, для этого 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.

Далее рассмотрим конкретные примеры.

ГЛАВА 7. ПРОТИВОРАДОНОВАЯ ЗАЩИТА ДЕТСКИХ УЧРЕЖДЕНИЙ Г.ЛЕРМОНТОВ НА ОСНОВЕ УГЛУБЛЕННОГО ОБСЛЕДОВАНИЯ ЗДАНИЙ

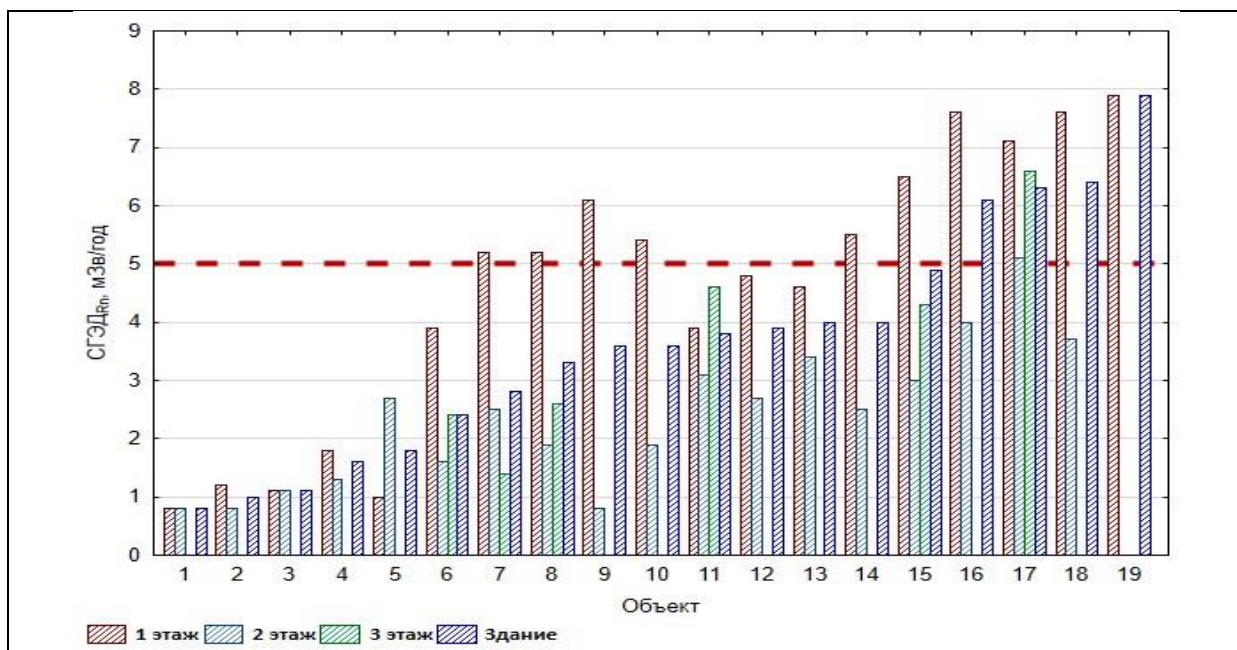
Критической группой населения при облучении радоном являются дети, поэтому провели углубленное обследование зданий детских учреждений г. Лермонтов на содержание и выявление источников радона (приложение 1), в результате которого для зданий, со СГЭД_{Rn} более 5мЗв/год (с учетом неполного пребывания - до 2400 часов в год) разработаны практические противорадоновые мероприятия, предложенные администрации этих учреждений.

Процесс измерения радона трековым методом достаточно трудоемкий. При передаче экспозиметров для измерения требуется внимание и вовлечение администрации учреждений и жильцов жилых домов для корректного занесения необходимой информации в паспорт измерений, а также соблюдения всех правил выбора мест для экспонирования экспозиметров, правильного хранения фоновых экспозиметров и тд. В связи с этим, для снижения трудозатрат и оптимизации процесса сбора и обработки трековых экспозиметров радона разработали специализированное программное обеспечение «Радон-Lab» (RU2021665443) (приложение 2, 3), позволяющее заносить всю необходимую для измерения информацию в облачный сервис с помощью мобильного устройства и QR-кода, а затем формировать паспорта и отчеты измерений. На рисунке показан пример работы программы, вид экспозиметра с QR-кодом.



Рисунок 39 - Специализированное программное обеспечение «Радон-Lab»: а - вид страницы для печати QR-кодов; б – экспозиметр с наклеенным QR-кодом; в – пример записи информации об измерении на мобильном устройстве

Использование автоматизированного ввода и создания паспорта в мониторинговых исследованиях измерений позволило снизить вклад «человеческого фактора» в неопределенность результатов, упростило процесс измерений радона в детских садах и школах и позволило набрать статистически значимую выборку. На рисунке 43 представлены среднегодовые значения $СГЭД_{Rn}$ в помещениях зданий детских учреждений, ранжированные от минимальной $СГЭД_{Rn}$ до максимальной.



1 – Детский сад №1; **2** - Детский сад №15; **3** - Детский сад №14; **4** - Детский сад №5; **5** - Детский сад №2; **6** – Музыкальная школа; **7** - Школа №5 Комсомольская 6; **8** - Школа №2; **9** - Детский сад №7; **10** - Детский сад №11; **11** - Школа №4; **12** - Детский сад №12; **13** – МБОУ ДОД ДШХ; **14** - Школа №5 Гагарина 12; **15** - Школа №1; **16** - Детский сад №8; **17** – Школа «Радуга»; **18** - Детский сад №13; **19** - Школа №5 Первомайская 9б

Рисунок 40 –СГЭД_{Rn} облучения детского населения в детских учреждениях г. Лермонтова

Наибольшие значения СГЭД_{Rn} в детских садах №8 и №13, школе «Радуга» и в школе №5 на Первомайской ул.,9б. Для этих зданий далее провели идентификацию всех источников поступления радона на основании среднегодовых значений ЭРОА_{Rn} и разработаны радонозащитные мероприятия (приложение 4).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе рассмотрена актуальная проблема облучения населения радоном и его ДПР в жилых и общественных зданиях. Существующая неопределенность в оценке радоноопасности территорий в реальных условиях проживания населения затрудняет проведение комплексной оценки современного состояния территорий, оценки потенциальной опасности для принятия решений для защиты населения.

В связи с этим, в данном диссертационном исследовании выявлены закономерности поступления радона в помещения жилых и общественных зданий на потенциально радоноопасных территориях в реальных условиях на большом массиве данных, которые достоверно позволили выявить корреляционные зависимости между объемной активностью радона в помещениях жилых и общественных зданий и радиационными показателями, и геологическими характеристиками территории. На основании корреляционного анализа данных разработаны критерии и систему оценки степени потенциальной радоноопасности территории.

Выявленные недостатки нормативно-правового обеспечения при существующей ситуации облучения населения на территориях с повышенной потенциальной радоноопасностью показали необходимость разработки предложений по совершенствованию регулирования в области защиты населения от облучения, создания национального радонового плана и ужесточения допустимых показателей, все эти аспекты отражены в данной работе и предложены соответствующие решения.

ВЫВОДЫ

1. Получили, что средние значения ЭРОА_{Rn} в помещениях зданий г. Балей составляют 94 - 120 (med=107) Бк/м³; ЭРОА_{Rn} снижается в помещениях по мере увеличения этажа здания: при среднем значении на 1 этажах – 123 Бк/м³, максимальное составляет 2087 Бк/м³ (что превышает норматив до 10 раз); на 2-ом этаже - 92 Бк/м³, на 3-ем этаже – 88 Бк/м³, на 4 этажах превышений нет; Средние значения ЭРОА_{Rn} в помещениях зданий г. Лермонтов составляют 111 - 127 (med=119) Бк/м³; ЭРОА_{Rn} снижается в помещениях по мере увеличения этажа здания: при среднем значении на 1 этажах – 153 Бк/м³, максимальное составляет 1980 Бк/м³ (что превышает норматив до 9,9 раз); на 2-ом этаже - 89 Бк/м³, на 3-ем этаже – 163 Бк/м³, на 4 и 5 этажах 35 Бк/м³.

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

3. Получили, что объемная активность ²²²Rn и его ДПР в помещениях на 1 этажах зданий с нарушениями в перекрытиях и плотностью потока радона зависит от содержания природных радионуклидов в горных породах вблизи здания, а также геологических характеристик территории

4. Получили, что в г. Балей ЭРОА_{Rn} на первых этажах характеризуют потенциальную радоноопасность территории: территория 1 наиболее потенциально радоноопасная, ЭРОА_{Rn} на первых этажах зданий на этой территории наибольшая – 198 Бк/м³; территория 2 – средней потенциальной радоноопасности - ЭРОА_{Rn} на первых этажах зданий на этой территории средняя – 111 Бк/м³; территория 3 – низкой потенциальной радоноопасности, ЭРОА_{Rn} на первых этажах зданий на этой территории наименьшая и составила 96 Бк/м³.

5. Территория г. Лермонтов по степени потенциальной опасности по содержанию ²²⁶Ra, которая была предложена в Бале: $A_{уд}^{226}\text{Ra} < 36 \text{ Бк/кг}$ –

1 тип территории, $36 \text{ Бк/кг} < A_{\text{уд}}^{226}\text{Ra} < 85 \text{ Бк/кг}$ – 2 тип, $A_{\text{уд}}^{226}\text{Ra} > 85 \text{ Бк/кг}$ – 3 тип.

6. Предложили референтные показатели по содержанию ^{226}Ra для проектируемых до 40, эксплуатируемых от 40 до 85, и для аварийных территорий выше 85 Бк/кг, которые будут формировать объёмную активность в помещениях 100, от 100 до 200, выше до 200 Бк/кг.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Adjusting lung cancer risks for temporal and spatial variations in radon concentration in dwellings in Gansu Province, China. Radiation research, / J. H. Lubin, Z. Y. Wang, L. D. Wang, J. D. Boice Jr, H. X. Cui, S. R. Zhang, R. A. Kleinerman // Radiation research. - Vol 163, nr 5. - 2005. - С. 571 - 579.
2. Åkerblom, G. The use of airborne radiometric and exploration survey data and techniques in radon risk mapping in Sweden / G. Åkerblom // Application of uranium exploration data and techniques in environmental studies: Proceedings of a Technical Committee meeting held in Vienna, 1993 November 9-12. - Vienna: IAEA-TECDOC-827, 1993. - P. 158-159.
3. Andersen, C.E. Mapping indoor radon-222 in Denmark: design and test of the statistical model used in the second nationwide survey / C.E. Andersen, K. Ulbak, A. Damkjaer, P. Kirkegaard, P. Gravesen // Science of the Total Environment. – 2001. – Vol. 272, nr 1-3. – P. 231–241.
4. Cohen, B.L. A national survey of ^{222}Rn in U.S. homes and correlating factors / B.L. Cohen // Health Physics. – 1986. – Vol. 51, nr 2. – P. 175–183
5. Cothorn, C.R. Environmental Radon / C.R. Cothorn, J.E. Jr. Smith. – New York: Springer Science+Business Media, LLC, 1987. – 363 p. – ISBN 978-1-4899-0473-7.
6. Darby, S. Radon in homes and risk of lung cancer: collaborative analysis of individual data from 13 European case-control studies / S. Darby, D. Hill, A. Auvinen, J.M. Barros-Dios, H. Baysson, F. Bochicchio, H. Deo, R. Falk, F. Forastiere, M. Hakama, I. Heid, L. Kreienbrock, M. Kreuzer, F. Lagarde, I. Mäkeläinen, C. Muirhead, W. Oberaigner, G. Pershagen, A. Ruano-Ravina, E. Ruosteenoja, A.S. Rosario, M. Tirmarche, L. Tomášek, E. Whitley, H.E. Wichmann, R. Doll // BMJ. – 2005. – Vol. 330, nr 7485. – P. 223–227.
7. Darby, S. Residential radon and lung cancer: detailed results of a collaborative analysis of individual data on 7148 subjects with lung cancer and 14208 subjects without lung cancer from 13 epidemiologic studies in Europe / S.

Darby, D. Hill, H. Deo, A. Auvinen, J.M. Barros-Dios, H. Baysson, F. Bochicchio, R. Falk, S. Farchi, A. Figueiras, M. Hakama, I. Heid, N. Hunter, L. Kreienbrock, M. Kreuzer, F. Lagarde, I. Mäkeläinen, C. Muirhead, W. Oberaigner, G. Pershagen, E. Ruosteenoja, A.S. Rosario, M. Tirmarche, L. Tomášek, E. Whitley, H.E. Wichmann, R. Doll // *Scandinavian Journal of Work Environment & Health*. – 2006. – Vol. 32, suppl 1. – P. 1–83.

8. Effects of Ionizing Radiation, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR) 2006 Report, Volume II. — DOI 10.18356/b71e3ca2-en // United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR) Reports. — 2009.

9. EPA Assessment of Risks from Radon in Homes. EPA 402-R-03-003. – Washington, D.C.: United States Environmental Protection Agency, 2003. – 98 p.

10. Fenton, D. Development of the Irish Radon Control Strategy // Environmental Protection Agency: ASN. HERCA Workshop, 2014 September 30, Paris, France., 2014. - Paris, 2014.

11. Gufo.me: Большая советская энциклопедия. Москва. URL: https://gufo.me/dict/bse/Радиоактивность_атмосферы. (дата обращения 21.04.2021)

12. Health Effects of Exposure to Radon / Committee on Health Risks of Exposure to Radon (BEIR VI), Commission on Life Sciences, Division on Earth and Life Studies, National Research Council. — Washington, D.C: National Academies Press, 1999. — ISBN 9780309523745.

13. Hůlka J. National radon programme: 20 years of experience in Czech Republic / Thomas J. - Madrid : IRPA Congress, 2004.

14. Indoor radon survey in Finland: methodology and applications. Radiation Protection Dosimetry / O. Castren, H. Arvela, I. Mäkeläinen, A. Voutilainen // *Radiation Protection Dosimetry*. - Vol. 45 № 1-4. - 1992. - С. 413 - 418.

15. Kreuzer, M. Cohort profile: the German uranium miners cohort study (WISMUT cohort), 1946-2003 / M. Kreuzer, M. Schnelzer, A. Tschense, L. Walsh,

B. Grosche // International Journal of Epidemiology. – 2010. – Vol. 39, nr 4. – P. 980–987.

16. Kreuzer, M. Factors Modifying the Radon-Related Lung Cancer Risk at Low Exposures and Exposure Rates among German Uranium Miners / M. Kreuzer, C. Sobotzki, M. Schnelzer, N. Fenske // Radiation Research. – 2018. – Vol. 189, nr 2. – P. 165–176.

17. Krewski, D. A combined analysis of North American case-control studies of residential radon and lung cancer / D. Krewski, J.H. Lubin, J.M. Zielinski, M. Alavanja, V.S. Catalan, R.W. Field, J.B. Klotz, E.G. Létourneau, C.F. Lynch, J.L. Lyon, D.P. Sandler, J.B. Schoenberg, D.J. Steck, J.A. Stolwijk, C. Weinberg, H.B. Wilcox // Journal of Toxicology and Environmental Health, Part A. – 2006. – Vol. 69, nr 7. – P. 533–597.

18. Lubin, J. H. Lung cancer risk from residential radon: meta-analysis of eight epidemiologic studies. Journal of the National Cancer Institute / J. H. Lubin, J. D Boice Jr // Journal of the National Cancer Institute. - Vol. 89, № 1. - 1997. - C. 49 - 57.

19. Lubin, J.H. Estimating lung cancer mortality from residential radon using data for low exposures of miners / J.H. Lubin, L. Tomásek, C. Edling, R.W. Hornung, G. Howe, E. Kunz, R.A. Kusiak, H.I. Morrison, E.P. Radford, J.M. Samet, M. Tirmarche, A. Woodward, S.X. Yao // Radiation Research. – 1997. – Vol. 147, nr 2. – P. 126–134.

20. Lubin, J.H. Risk of lung cancer and residential radon in China: pooled results of two studies / J.H. Lubin, Z.Y. Wang, J.D. Jr. Boice, Z.Y. Xu, W.J. Blot, L. De Wang, R.A. Kleinerman // International Journal of Cancer. – 2004. – Vol. 109, nr 1. – P. 132–137.

21. Lucas, H. F. Improved Low-Level Alpha-Scintillation Counter for Radon /H. F. Lucas // The Review of Scientific Instruments. – 1957. – V. 28, N. 9. – P. 680 – 683.

22. Mäkeläinen I. Indoor Radon and Construction Practices in Finnish homes from the 20th to the 21st century. / Valmari T.; Reisbacka He. et al.. - Third

European IRPA Congress 2010 June 14–16. - Helsinki, Finland, 2010.

23. Petrová K. Radon program of the Czech Republic / Pravdová E. - Radiation Protection Dosimetry. – 2014. – Vol. 160, № 1-3, 2014. - P. 27-29 c.

24. Protection of the public against exposure indoors due to radon and other natural sources of radiation. IAEA Safety Standards Series No. SSG-32. – Vienna: International Atomic Energy Agency, 2015. – 90 p. – ISBN 978-92-0-102514-2.

25. Radon in Dwellings in the Republic of Kalmykia. Results from the National Radon Survey 2006-2007 / G. Åkerblom, O. German, I. Stamat [et al.]. — 2009:4. — Stockholm: Swedish Radiation Safety Authority, 2009. — 44 p.

26. Radon in dwellings: the Irish National Radon Survey / S. G. Fennell, G. M. Mackin, J. S. Madden, J. A. McGarry, J. T. Duffy, M. O'Colmain, P. A. Colgan, T. Pollard: Radiological Protection Institute of Ireland, 2002. - 49 c. - <http://hdl.handle.net/10147/574170>.

27. Radon in dwellings: the Irish National Radon Survey Fennell, S. // EPA MAP of Radon Zones. - URL: <https://www.epa.gov/radon> (дата обращения: 26.03.2021).

28. Residential radon exposure and lung cancer in Sweden / G. Pershagen, G. Akerblom, O. Axelson [et al.] // New England journal of medicine. - Vol. 330, №3. - 1994. - C. 159 - 164. - DOI 10.1056/NEJM199401203300302.

29. Sainz, C. Comparative risk assessment of residential radon exposures in two radonprone areas, Stei (Romania) and Torrelodones (Spain) / C. Sainz, A. Dinu, T. Dicu, K. Szacsvai, C. Cosma, L.S. Quindós // Science of the Total Environment. – 2009. – Vol. 407, nr 15. – P. 4452–4460.

30. Shapiro, S. S. An analysis of variance test for normality (complete samples) / S. S. Shapiro, M. B. Wilk - Biometrika. – 1965. – V. 52. – №. 3/4, 1965. - P. 591-611c.

31. Skeppström, K. Existing strategy and challenges for a national action plan for radon in Sweden, Swedish Radiation Safety Authority. - ASN- №PA Workshop, 2014 October 14. - Paris, France, 2014.

32. Sources and Effects of Ionizing Radiation. UNSCEAR 2000 Report to the General Assembly, with Scientific Annexes. Volume I: Sources. Annex B: Exposures from natural radiation sources. – New York: United Nations, 2000. – 76 p. – ISBN 92- 1-142238-8.

33. Sources and Effects of Ionizing Radiation. UNSCEAR 2008 Report to the General Assembly United Nations. Volume I: Sources. Annex B: Exposures from natural radiation sources. – New York: United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, 2008.

34. Strand, T. Mapping of radon concentration in 44 Norwegian municipalities / T. Strand, C.L. Jensen, G.B. Ramberg et al. Strålevern Rapport 2003. – Vol. 9, №. 10, 2003.

35. Strategy for the reduction of radon exposure in Norway. Report I – 1144-E. Oslo, Norway: Norwegian Government Administration Services., 2010. 13 c. URL: https://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig_q=RN:4311913 (дата обращения 15.05.2021).

36. Studref.com: Экология.Биогеохимия радионуклидов. Москва. URL:https://studref.com/315165/ekologiya/biogeohimiya_radionuklidov. (дата обращения 22.04.2021)

37. Tollefsen T. From the European indoor radon map towards an Atlas of natural radiation / Cinelli G., Bossew P. et al. Radiation Protection Dosimetry – 2014. – Vol. 162, №. 1–2. P. 129-134. c. DOI 10.1093/rpd/ncu244.

38. Tomasek, L. Effect of Age at Exposure in 11 Underground Miners Studies / L. Tomasek // Radiation Protection Dosimetry. – 2014. – Vol. 160, nr 1-3. – P. 124– 127.

39. Turekian K.K. Distribution of the elements in some major unite of the Earth's crust / Wedepohl K.H. Bull. Geol. Soc. Amer V. 72. – № 2, 1961. P. 175-191. c.

40. Valmari, T. National measurement database in radon research in Finland / Mäkeläinen I., Arvela H. et al.. Third European IRPA Congress, 2010 June 14-18, 165 Helsinki, Finland. Helsinki : Nordic Society for Radiation

Protection, 2010. 71 p. c.

41. Valmari, T. Radon Atlas of Finland 2010. STUK-A245 / Mäkeläinen I., Reisbacka H., Arvela H.. ELOKUU 2010. Helsinki: Radiation and Nuclear Safety Authority, 2010b., 2010. 135 p. c. ISBN 978-952-478-537-2.

42. Weltner, A. Radon mapping strategy in Finland / A. Weltner, I. Mäkeläinen, H. Arvela. — DOI 10.1016/s0531-5131(01)00551-9 // International Congress Series. — 2002. — Vol. 1225. — P. 63-69.

43. WHO handbook on indoor radon: a public health perspective. — Geneva: WHO Press, 2009. — 110 p. — ISBN 978-92-4-154767-3.

44. Абрамов, Б. Н. Геоэкологические проблемы отработки рудных месторождений золота в Восточном Забайкалье / Б. Н. Абрамов, Е. С. Эпова, Д. В. Манзырев // География и природные ресурсы. - №2. - 2019. - С. 103-111.

45. Агапов, А. М. Проблемы ядерного наследия и пути их решения. Том 1 /А. М. Агапов, А. А. Абрамов, С. В. Дьяков [и др.]. — 2012: Энергопромалитика, 2012. — 356 с.

46. Алексахин, Р. М. Новейшие результаты исследований в области радиоэкологии / Р. М. Алексахин, С. А. Гераськин, А. А. Удалова. // Вестник Российской академии наук. — 2015. — Т. 85.— № 4. — С. 373-376.

47. Алексахин, Р. М. Учение о биосфере ВИ Вернадского и современные проблемы радиоэкологии / Р. М. Алексахин, А. А. Удалова, С. А. Гераськин // Радиационная биология. Радиоэкология. — 2014. — Т. 54. — № 4. — С. 432-439.

48. Арбузов, С. И. / С. И. Арбузов, Л. П. Рихванов. - Издание 3-е, испр. и доп. - Томск : ТПУ, 2009. - 315 с. - ISBN 978-5-98298-802-7.

49. Арбузов, С. И. Геохимия радиоактивных элементов: учебное пособие / С. И. Арбузов, Л. П. Рихванов. — 2-е изд. — Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 2010. — 300 с.

50. Астафуров, В. И. Актиниды в окружающей среде и биосубстратах. Методы аналитического контроля долгоживущих альфа-излучающих нуклидов / В. И. Астафуров, А. М. Маренный. — Москва : Изд-во «Перо»,

2021. — 197 с.

51. Афонин, А. А. Государственный реестр средств измерений РФ: приборы радиационного контроля. Часть 5. Средства измерения объёмной активности (ОА) и эквивалентной равновесной объёмной активности (ЭРОА) радона / А. А. Афонин, А. А. Котляров // АНРИ. — 2008. — № 3(54). — С. 2-7. — EDN JKGKVD.

52. Афонин, А. А. Методы и средства контроля объёмной активности изотопов радона в различных средах на основе камер с электроосаждением / А. А. Афонин, А. А. Котляров, А. Ю. Максимов // АНРИ. — 2008. — № 2(53). — С. 82-85. — EDN IRGHGF.

53. Баранов, В. И. Методическое руководство по исследованию радиоактивности подземных вод / В. И. Баранов, А. М. Овчинников. — Москва : Госгеолиздат, 1946. — 42 с.

54. Баранов, В. И. Радиогеология: Учебное пособие / В. И. Баранов, Н. А. Титаева. — Москва : МГУ, 1973. — 243 с.

55. Барковский, А.Н. Дозы облучения населения Российской Федерации в 2021 году: информационный сборник / А.Н. Барковский, Ахматдинов Руслан Р., Ахматдинов Рустам Р., Н.К. Барышков, А.М. Библин, А.А. Братилова, Т.А. Кормановская, И.К. Романович, Т.Н. Титова (ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева), В.Е. Журавлева, А.Г. Сивенков, А.Г. Цовьянов (ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России). — СПб., 2022. — 72 с.

56. Бердников, П. В. Изучение радоноопасности территории Санкт-Петербурга и Ленинградской области. / П. В. Бердников, А. В. Горький // АНРИ. — 2008. — № 2 (53). — С. 56-59.

57. Березина, Е. В. Приземные концентрации и потоки радона-222 на территории России, и оценки биогенных эмиссий углекислого газа, метана и сухого осаждения озона : специальность 25.00.29 «Физика атмосферы и гидросферы » : диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук / Березина Елена Викторовна; Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте физики

атмосферы им. А.М. Обухова Российской академии наук. — Москва, 2014. — 136 с.

58. Вернадский, В. И. Очерки геохимии / В. И. Вернадский. — Ленинград : Государственное издательство Москва, 1927. — 372 с.

59. Восстановление формы и параметров распределения объемной активности радона в жилищах России на основе данных 4-ДОЗ / И. В. Ярмошенко, Г. П. Малиновский, А. В. Васильев, М. В. Жуковский // АНРИ. — 2015. — № 3. — С. 41-46.

60. Гигиенические требования по ограничению облучения населения за счет природных источников ионизирующего излучения: Санитарные правила и нормативы СанПиН 2.6.1.2800-10. — М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2011. — 40 с.

61. ГИС-пакеты оперативной геологической информации // ГИС-пакеты оперативной геологической информации (Цифровой двойник недр России) : [сайт]. — URL: <https://atlaspacket.vsegei.ru/> (дата обращения: 26.02.2021).

62. Голованёв, С. М. Радон и канцерогенный риск в г. Москве / С. М. Голованёв // Радиационная гигиена . — 2015. — № 1. — С. 16-22.

63. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1: 200 000. Издание второе. Серия Приаргунская. Лист М-50-III – Бaley. Объяснительная записка / И. Г. Рутштейн, Г. И. Богач, Е. Л. Винниченко [и др.]. — Москва : МФ ВСЕГЕИ, 2015. — 245 с.

64. Гржибовский, А. М. Корреляционный анализ данных с использованием программного обеспечения Statistica и SPSS / А. М. Гржибовский, С. В. Иванов, М. А. Горбатова // Наука и здравоохранение. — 2017. — № 1. — С. 7-36.

65. Гулабянц, Л. А. Противорадоновая защита жилых и общественных зданий / Л. А. Гулабянц, А. В. Калайдо. — Москва-Берлин : ООО "Директмедиа Паблишинг", 2020. — 237 с.

66. Демин, В. Ф. Риск от воздействия радона на здоровье человека:

методы оценки и практическое применение / В. Ф. Демин, М. В. Жуковский, С. М. Киселев // Атомная энергия . — 2015. — № 1. — С. 42-46.

67. Дозы облучения населения / Э. М. Крисюк, Ю. О. Константинов, В. В. Никитин [и др.] // Гигиена и санитария. — 1985. — № 10. — С. 65-68.

68. Дозы облучения населения Российской Федерации в 2020 г. / Барковский, Н. А, Ахматдинов [и др.] // Радиационная гигиена. — 2021. — № 4. — С. 103-113.

69. Жуковский, М.В. Современные подходы к нормированию облучения радоном и анализ последствий их применения в России / М.В. Жуковский, И.В. Ярмошенко, С.М. Киселев // АНРИ. – 2011. – № 4 (67). – С. 18–25.

70. Заболеваемость взрослого населения, проживающего в районе «уранового наследия» в условиях воздействия радона / Петоян, М. И, Шандала [и др.] // Гигиена и санитария. — 2022. — № 3. — С. 281-287.

71. Заболеваемость детского населения г. Лермонтова, расположенного в районе "уранового наследия" / А. М. Лягинская, Н. К. Шандала, А. В. Титов [и др.] // Медицинская радиология и радиационная безопасность. — 2021. — № 5. — С. 78-84.

72. Закономерности формирования радонового поля в геологической среде / А. М. Маренный, А. А. Цапалов, П. С. Микляев, Т. Б. Петрова. — 2016 : Перо, Москва . — 394 с.

73. Замана, Л. В. Эколого-гидрогеохимическая характеристика водных объектов золотопромышленных разработок Балейско-Тасеевского рудного поля (восточное Забайкалье) / Л. В. Замана, М. Т. Усманов // Науки о Земле и недропользование. — 2009. — № 1. — С. 106-111.

74. Защита окружающей среды при эксплуатации и выводе из эксплуатации радиационно опасных объектов / И. П. Коренков, Т. Н. Лащенко, Н. К. Шандала, А. И. Соболев. – Москва : ООО "Издательство "БИНОМ. Лаборатория знаний", 2014. – 446 с. – ISBN 978-5-9518-0586-7. – EDN OVRQFD.

75. Защита от радона-222 в жилых зданиях и на рабочих местах. Публикация 65 МКРЗ / пер. с англ. М.В. Жуковского ; под ред. А.В. Кружалова. – М.: Энергоатомиздат, 1995. – 78 с. – 1000 экз.

76. Интегральные измерения средней объемной активности радона в помещениях населенных пунктов Челябинской области / А. М. Маренный, Н. М. Андреев, В. И. Астафуров [и др.] // Актуальные вопросы радиационной гигиены Сборник тезисов конференции. — Санкт-Петербург : Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева, 2010. — С. 98-99.

77. Исследование и разработка рецептуры и процесса изготовления нитроцеллюлозных пленок / Р. Н. Яруллин, А. В. Супырев, Г. П. Герцен, А. М. Маренный // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2021. – № 9. – С. 113-117. – DOI 10.17513/mjpf.13281. – EDN NFVKPN.

78. Исследование когнитивной сферы детей, проживающих в неблагоприятных экологических условиях / Н. М. Дьячкова, Т. И. Ежевская, Н. М. Сараева, А. А. Суханов // Психологическая наука и образование. — 2002. — № 1. — С. 73-78.

79. Исследование связи рака легкого с профессионально-бытовым облучением радоном в городе Лермонтов по принципу случай контроль / О. А. Пахолкина, М. В. Жуковский, И. В. Ярмошенко [и др.] // Радиационная биология. Радиоэкология. — 2011. — № 6. — С. 705.

80. Карамушка, В. П. Рекультивация объектов добычи и переработки урановых руд / В. П. Карамушка, Е. Н. Камнев, Р. Е. Кузин. — Москва : «Горная книга», 2014. — 183 с.

81. Карпенко, Е. И. Комплексная оценка радиационного воздействия объектов ядерной энергетики на окружающую среду и человека : специальность 03.01.01 "Радиобиология" : диссертация на соискание ученой степени доктора биологических наук / Карпенко Евгений Игоревич, 2020. — 317 с. – EDN PJLLVA.

82. Карпенко, Е. И. Оценка доз облучения населения в районе расположения предприятия по добыче и переработке урановых руд / Е. И. Карпенко, с. И. Спиридонов // Актуальные вопросы радиационной гигиены сборник тезисов международной научно-практической конференции. — Санкт-Петербург : Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева , 2012. — С. 72-75.

83. Кирдин, И. А. Радиационный риск при облучении радоном в жилищах : специальность 03.00.16 : диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук / Кирдин Иван Александрович. — Екатеринбург, 2003. — 115 с. — EDN QDWJFT.

84. Комплексный подход к оценке потенциальной опасности приповерхностных хранилищ радиоактивных отходов / И. П. Коренков, Т. Н. Лашенова, Н. К. Шандала, В. В. Романов // Гигиена и санитария. — 2016. — Т. 95, № 2. — С. 133-139. — DOI 10.18821/0016-99002016-95-2-133-139. — EDN VPESBP.

85. Кононенко, Д. В. Анализ распределений значений объемной активности радона в воздухе помещений в субъектах Российской Федерации / Д. В. Кононенко // Радиационная гигиена . — 2019. — № 1. — С. 85-103.

86. Кононенко, Д. В. Оценка радиационного риска для населения Санкт-Петербурга при облучении радоном / Д. В. Кононенко // Радиационная гигиена . — 2013. — № 1. — С. 31-37.

87. Кононенко, Д. В. Оценка риска при облучении радоном для населения субъектов Российской Федерации на основе данных радиационно-гигиенического паспорта территории / Д. В. Кононенко, Т. А. Кормановская // Радиационная гигиена . — 2015. — № 4. — С. 15-22.

88. Кононенко, Д. В. Системный подход к анализу массивов данных с результатами радоновых обследований / Д. В. Кононенко // Сборник тезисов VIII Съезда по радиационным исследованиям. — Москва : Дубна: ОИЯИ, 2021. — С. 393.

89. Коренков, И. П. Комплексная оценка состояния окружающей

среды в районе расположения радиационно опасных объектов / И. П. Коренков, Т. Н. Лащенко, А. И. Соболев // Гигиена и санитария. – 2009. – № 5. – С. 45-51. – EDN KYVTGT.

90. Коренков, И. П. Контрольные уровни обеспечения радиоэкологической безопасности населения города Москвы (руководящий документ) / И. П. Коренков, О. Г. Польский, А. И. Соболев. – Москва : Правительство Москвы, 2008. – 20 с

91. Коренков, И. П. Радон в коммунальных и промышленных сферах, проблемы нормирования, биологические действия, методики измерения / И. П. Коренков, О. Г. Польский, А. И. Соболев. - М. : Центральный институт усовершенствования врачей, 1993. - 252 с.

92. Корольков, А. Т. Монацитовая проблема города Баля / А. Т. Корольков. — Текст : непосредственный // Науки о Земле и недропользование. — 2016. — № 1. — С. 96-103.

93. Кулиева, Г. А. Радиоэкологическая экспертиза и радиационные измерения : в 2 частях / Г. А. Кулиева, Т. Н. Лащенко. Том Часть 1. – Москва : Российский университет дружбы народов (РУДН), 2016. – 252 с. – ISBN 978-5-209-07073-3. – EDN WUUIRH.

94. Лащенко, Т. Н. Комплексная оценка состояния окружающей среды по радиационным и химическим факторам при эксплуатации и выводе из эксплуатации радиационно-опасных объектов : специальность 03.00.1605.26.02 "Безопасность в чрезвычайных ситуациях (по отраслям)" : диссертация на соискание ученой степени доктора биологических наук / Лащенко Татьяна Николаевна. – Москва, 2008. – 324 с. – EDN QENUZH.

95. Лащенко, Т. Н. Радиационно-гигиенический мониторинг на потенциально радоноопасных территориях / Т. Н. Лащенко, Л. Э. Карл, А. М. Маренный // Медицинская радиология и радиационная безопасность. – 2021. – Т. 66, № 4. – С. 42-50. – DOI 10.12737/1024-6177-2021-66-4-42-50. – EDN UOYMTY.

96. Маренный, А. М. Задачи и методы оценки потенциальной

радоноопасности селитебных территорий / А. М. Маренный, С. Е. Охрименко, И. В. Павлов // АНРИ. — 2006. — № 2 (45). — С. 25-30.

97. Маренный, А. М. О проблеме обеспечения защиты населения России от природных источников ионизирующего излучения. Часть 1. Природные источники и их нормирование / А. М. Маренный, С. М. Киселёв, С. Ю. Семёнов // Медицина экстремальных ситуаций. — 2019. — № 3. — С. 371-382.

98. Маренный, А. М. О проблеме обеспечения защиты населения России от природных источников ионизирующего излучения. Часть 2. Развитие подходов и практические мероприятия / А. М. Маренный, С. М. Киселёв, С. Ю. Семёнов // Медицина экстремальных ситуаций. — 2019. — № 4. — С. 527-539.

99. Маренный, А. М. Радоновое обследование в Челябинской области в 2008–2011 гг. Анализ территориальной вариабельности объемной активности радона / А. М. Маренный, Д. В. Кононенко, А. Е. Труфанова // Радиационная гигиена . — 2020. — № 3. — С. 51-67.

100. Маренный, А.М. Задачи и методы оценки потенциальной радоноопасности селитебных территорий / А.М. Маренный, С.Е. Охрименко, И.В. Павлов // АНРИ. – 2006. – № 2 (45). – С. 25–29.

101. Маренный, А.М. Измерение объемной активности радона трековым методом / А.М. Маренный // АНРИ. – 1995. – № 3/4. – С. 79–84.

102. Маркин, Н. С. Геохимическая характеристика почв наиболее загрязненной части Балея (Забайкальский край) / Н. С. Маркин, А. Т. Корольков // Известия Иркутского государственного университета. Серия: Науки о Земле.. — 2021. — № 35. — С. 71-83.

103. Маркин, Н. С. Оценка радиэкологической обстановки на объектах бывшего новотроицкого рудоуправления, г. Балея (Забайкальский край). / Н. С. Маркин, С. И. Иванников, А. М. Егорин // Экология и промышленность России.. — 2022. — № 5. — С. 37-43.

104. Маркин, Н. С. Радиэкологическая обстановка на территории

бывшего новотроицкого рудоуправления, г. Балей / Н. С. Маркин, С. И. Иванников, А. В. Милосердова. — Текст : непосредственный // Экологобезопасные и ресурсосберегающие технологии и материалы. — 2020. — № . — С. 131-133.

105. Маркин, Н. С. Экологическая ситуация города Балей (Забайкальский край) / Н. С. Маркин, С. И. Иванников, А. В. Милосердова // Актуальные проблемы геоэкологии и природопользования. — 2020. — № . — С. 116-119.

106. Механизмы формирования потока радона с поверхности почв и подходы к оценке радоноопасности селитебных территорий / П. С. Микляев, Т. Б. Петрова, А. М. Маренный [и др.] // АНРИ. — 2007. — № 2. — С. 2-16.

107. Микляев, П. С. Научные основы оценки потенциальной радоноопасности на платформенных территориях : специальность 25.00.36 «геоэкология » : диссертация на соискание ученой степени доктора геолого-минералогических наук / Микляев Петр Сергеевич ; Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН. — Москва , 2015. — 307 с.

108. Михнев, И. П. Эксхалиция радона из поверхности почвы и критерии потенциальной опасности участков под застройку Нижневолжского региона / И. П. Михнев, С. В. Михнева // Интерактивная наука. — 2018. — № 3(25). — С. 66-70. — DOI 10.21661/r-469340. — EDN YSWUAN.

109. Мостафа, М. Ю. А. Средства воспроизведения единиц объемной и эквивалентной равновесной объемной активности радона : специальность 01.04.01 "Приборы и методы экспериментальной физики" : диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук / Мостафа Мостафа Юнесс Абдельфатах, 2019. — 145 с. — EDN SAOCBN.

110. Невзгодина, Л. В. Действие тяжелых ионов на биологические объекты / Л. В. Невзгодина, Ю. Г. Григорьев, А. М. Маренный. — Москва : Энергоатомиздат, 1990. — 215 с.

111. Новиков, Г. Ф. Радиометрическая разведка / Г. Ф. Новиков. —

Москва : Недра, 1989. — 407 с.

112. Нормы безопасности МАГАТЭ. Радиационная защита и безопасность источников излучения: Международные основные нормы безопасности. Общие требования безопасности, часть 3. – Вена: Международное агентство по атомной энергии, 2015. – 477 с. – ISBN 978-92-0-409915-7.

113. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009): Санитарные правила и нормативы СанПиН 2.6.1.2523-09. – М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2009. – 100 с.

114. О состоянии санитарно-эпидемиологического благополучия населения в Российской Федерации в 2013 году: Государственный доклад.— М.: Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, 2014.—191 с.

115. Обеспечение защиты населения от облучения радоном. Проблемы и пути решения / С. М. Киселев, И. П. Стамат, А. М. Маренный, Л. А. Ильин. // Гигиена и санитария. — 2018. — № 2. — С. 101-110.

116. Обеспечение защиты населения от облучения радоном. Проблемы и пути решения/ С. М. Киселёв, И. П. Стамат, А. М. Маренный, Л. А. Ильин // Гигиена и санитария. — 2018. — Т. 97. — С. 101–110.

117. Обеспечение требований радиационной безопасности при выводе из эксплуатации радиационно опасных объектов // Гигиена и санитария. – 2017. – Т. 96, № 9. – С. 818-821. – DOI 10.18821/0016-9900-2017-96-9-818-821. – EDN ZSSBEN.

118. Обследование города краснокаменск на содержание радона в помещениях / А. М. Маренный, С. М. Киселёв, А. В. Титов [и др.] // Радиационная гигиена . — 2013. — № 3. — С. 47-52.

119. Обследование зданий города Лесной на содержание радона в помещениях / А. М. Маренный, М. Е. Киселева, Н. А. Нефёдов [и др.] // Радиационная гигиена . — 2018. — № 3. — С. 92-106.

120. Обследование территорий, обслуживаемых ФМБА России, на

содержание радона в помещениях / Губин АТ, Маренный АМ, Сакович ВА [и др.] // Медицина экстремальных ситуаций. — 2012. — № 4. — С. 77-88.

121. Онищенко, А.Д. Роль искажающих факторов в радоновом эпидемиологическом исследовании / А.Д. Онищенко, М.В. Жуковский // Радиационная гигиена. — 2017. — Т. 10, № 1. — С. 65–75.

122. Онищенко, Г. Г. Основные направления обеспечения радиационной безопасности населения Российской Федерации на современном этапе / Г. Г. Онищенко, И. К. Романович // Радиационная гигиена. — 2014. — Т. 7, № 4. — С. 5-22. — EDN TOBXOX.

123. Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ 99/2010): Санитарные правила и нормативы СП 2.6.1.2612-10. — М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2010. — 83 с.

124. Основные черты геохимии урана / В. Л. Барсуков, В. И. Герасимовский, А. И. Германов [и др.]. — 2-е изд. — Томск : СТТ (Издательство "STT"), 2013. — 374 с. — Текст : непосредственный.

125. Основы радиоэкологического и гигиенического мониторинга окружающей среды / И. П. Коренков, Т. Н. Лашенкова, Н. К. Шандала, С. М. Киселев. — Москва : Общество с ограниченной ответственностью Издательская группа "ГЭОТАР-Медиа", 2021. — 400 с. — ISBN 978-5-9704-6198-3. — EDN HCONPA.

126. Оценка влияния последствий ливневых дождей на радиационную обстановку в районе расположения штольни № 16 бывшего предприятия ЛПО "Алмаз" / Н. К. Шандала, А. В. Титов, Д. В. Исаев [и др.] // Медицина экстремальных ситуаций. — 2017. — № 2. — С. 202-207.

127. Оценка воздействия на окружающую среду (ОВОС) мероприятий по рекультивации хвостохранилища обогатительной фабрики бывшего Новотроицкого рудоуправления и территории (пос. Новотроицк, Забайкальский край) / Д. Е. Ткаченко, Е. М. Шатилова, И. М. Таракина, В. А. Чопорова, А. В. Кононова, В. Д. Аникин, Н. П. Никиш, Д. М. Опарин. -

Владимирская область, г.Ковров : ОАО «КОВРОВМАШПРОЕКТ», 2012. - 111 с.

128. Оценка доз облучения групп населения, подвергающихся повышенному облучению за счет природных источников ионизирующего излучения: Методические указания МУ 2.6.1.2397-08. – М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2008. – 18 с.

129. Оценка доз облучения жителей Республики Алтай за счет содержания радона в воздухе зданий / в. А. Венков, а. В. Световидов, И. П. Стамат [и др.] // гигиенические аспекты обеспечения радиационной безопасности населения на территориях с повышенным уровнем радиации Сборник тезисов Международной научно-практической конференции. — Санкт-Петербург : Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева, 2008. — С. 30-32.

130. Оценка индивидуальных эффективных доз облучения населения за счет природных источников ионизирующего излучения: Методические указания МУ 2.6.1.1088-02. – М.: Федеральный центр госсанэпиднадзора Минздрава России, 2002. – 22 с.

131. Оценка радиационного риска для здоровья населения за счет внутреннего облучения радоном и его дочурными продуктами распада: Методические рекомендации МР 2.6.1.0172-20.—М.: Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, 2020.— 24 с.

132. Оценка уровней содержания радона в многоэтажных зданиях на примере восьми крупных городов России / М. В. Жуковский, И. В. Ярмошенко, А. Д. Онищенко [и др.] // Радиационная гигиена . — 2022. — № 1. — С. 47-58.

133. Панов, А. В. Радиоэкологические проблемы в районе размещения Лермонтовского предприятия" Алмаз" по добыче и переработке урановой руды. Обзор / А. В. Панов // Радиация и риск (Бюллетень Национального радиационно-эпидемиологического регистра). — 2023. — № 1. — С. 131-153.

134. Петрухин, Н. П. История уранодобычи / Н. П. Петрухин. — Москва : Горнорудный дивизион Госкорпорации «Росатом», Урановый холдинг «АРМЗ», 2020. — 438 с.

135. Петрухин, Н. П. Уранодобывающие предприятия отечественной атомной отрасли. / Н. П. Петрухин, Е. П. Славский. — Москва : АО «Атомредметзолото», 2018. — 286 с.

136. Постановление Администрации городского поселения "Город Балей" // Администрация городского поселения «город Балей». - URL: <https://городбалей.рф/dokumenty/postanovleniya-za-2017-god/> (дата обращения: 26.03.2022).

137. Прогностическая оценка риска рака легкого при сочетанном действии радона и курения с использованием аддитивно-мультипликативной модели риска / М. В. Жуковский, И. В. Ярмошенко, А. Д. Онищенко, Г. П. Малиновский // Радиационная гигиена . — 2021. — № 3. — С. 41-55.

138. Радиационный контроль и санитарно-эпидемиологическая оценка жилых, общественных и производственных зданий и сооружений после окончания их строительства, капитального ремонта, реконструкции по показателям радиационной безопасности: Методические указания МУ 2.6.1.2838-11. — М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2011. — 26 с.

139. Радиационный контроль и санитарно-эпидемиологическая оценка жилых, общественных и производственных зданий и сооружений после окончания их строительства, капитального ремонта, реконструкции по показателям радиационной безопасности: Методические указания МУ 2.6.1.2838-11. — М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2011. — 26 с.

140. Радиационный контроль и санитарно-эпидемиологическая оценка земельных участков под строительство жилых домов, зданий и сооружений общественного и производственного назначения в части обеспечения радиационной безопасности: Методические указания МУ 2.6.1.2398-08. — М.:

Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2009. – 27 с.

141. Радиоактивные элементы в окружающей среде / Л. П. Рихванов, С. И. Арбузов, Н. В. Барановская [и др.] // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов.. — 2007. — № 1. — С. 128-136.

142. Радиологическая защита от облучения радоном. Перевод публикации 126 МКРЗ / под ред. М.В. Жуковского, И.В. Ярмошенко, С.М. Киселева. – М.: Изд-во «ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России», 2015. – 92 с. – 600 экз. – ISBN 978-5-9035926-06-8.

143. Радон: От фундаментальных исследований к практике регулирования / С. М. Киселев, М. В. Жуковский, И. П. Стамат, И. В. Ярмошенко. — Москва : ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России, 2016. — 434 с.

144. Радоновые исследования и обследования в России: методология, результаты и рекомендации. / А. М. Маренный, П. С. Микляев, С. М. Киселёв [и др.]. — 2022 : , Москва . — 1118 с.

145. Расчет показателей радиационного риска по данным, содержащимся в радиационно-гигиенических паспортах территорий, для обеспечения комплексной сравнительной оценки состояния радиационной безопасности населения субъектов Российской Федерации: Методические рекомендации МР 2.6.1.0145-19.—М.: Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, 2019.— 14 с.

146. Рекомендации 2007 года Международной комиссии по радиационной защите. Публикация 103 МКРЗ / пер. с англ. И.А. Гусева ; под общ. ред. М.Ф. Киселева и Н.К. Шандалы. – М.: Изд. ООО ПКФ «Алана», 2009. – 344 с. – 1000 экз. – ISBN 978-5-9900350-6-5. 107.

147. Рекомендации Международной комиссии по радиологической защите 1990 года. Пределы годового поступления радионуклидов в организм работающих, основанные на рекомендациях 1990 года. Публикации 60, часть 1, 61 МКРЗ / пер. с англ. Т.Д. Кузьминой ; под ред. И.Б. Кеирим-Маркуса. – М.: Энергоатомиздат, 1994. – 192 с. – 2000 экз. – ISBN 5-283-031-61-6. 108.

148. Рекомендации Международной комиссии по радиологической защите 1990 года. Публикация 60 МКРЗ, часть 2 / пер. с англ. Т.Д. Кузьминой ; под ред. И.Б. Кеирим-Маркуса. – М.: Энергоатомиздат, 1994. – 208 с. – 1030 экз. – ISBN 5-283-031-62-4.

149. Риск возникновения рака легкого при облучении радоном и продуктами его распада. Заявление по радону. Перевод публикации 115 МКРЗ / под ред. М.В. Жуковского, С.М. Киселева, А.Т. Губина. – М.: Изд-во «ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России», 2013. – 92 с. – 600 экз. – ISBN 978-5-905926-01-3.

150. Риск заболевания раком легких в связи с облучением дочерними продуктами распада радона внутри помещений: Публикация 50 МКРЗ / пер. с англ. Л.В. Коломиец ; под ред. чл. МКРЗ д.ф.-м.н. проф. И.А. Лихтарева. – М.: Энергоатомиздат, 1992. – 112 с. – 250 экз. – ISBN 5-283-03120-9.

151. Руководство по радиационно-гигиеническому мониторингу окружающей среды / И. П. Коренков, Т. Н. Лашенова, Н. К. Шандала, С. М. Киселев. – Москва : Общество с ограниченной ответственностью Издательская группа "ГЭОТАР-Медиа", 2018. – 464 с. – ISBN 978-5-9704-4574-7. – EDN YXILCR.

152. Семченко, М. И. Оценка радиационной опасности среды помещений от радонового облучения на примере г. Владимира : специальность 03.02.08 «Экология (биология)» : диссертация на соискание ученой степени кандидата биологических наук / Семченко Максим Игоревич ; Федерально государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых». — Владимир , 2019. — 167 с.

153. Середкина, О. М. ГИС-технологии в изучении распределения радона на территории города Иркутска : специальность 25.00.35 «геоинформатика » : диссертация на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук / Середкина, Ольга Максимовна ; ФГБОУ

ВПО «Иркутский государственный технический университет». — Иркутск, 2012. — 136 с.

154. Смыслов, А. А. Уран и торий в земной коре / А. А. Смыслов. — Ленинград : Недра, 1974. — 231 с.

155. Стамат, И. П. Радиационная безопасность населения России при облучении природными источниками ионизирующего излучения: современное состояние, направления развития и оптимизации / И. П. Стамат, Т. А. Кормановская, Г. А. Горский // Радиационная гигиена . — 2014. — № 1. — С. 54-62.

156. Стамат, И. П. Система гигиенических требований по ограничению облучения населения Российской Федерации природными источниками излучения : специальность 05.26.02 «Безопасность в чрезвычайных ситуациях» : диссертация на соискание ученой степени доктора биологических наук / Стамат Иван Павлович ; Федеральное государственное бюджетное учреждение «Всероссийский центр экстренной и радиационной медицины имени А.М.Никифорова» МЧС России. — Санкт-Петербург , 2012. — 435 с.

157. Стамат, И.П. Радиационная безопасность населения России при облучении природными источниками ионизирующего излучения: современное состояние, направления развития и оптимизации / И.П. Стамат, Т.А. Кормановская, Г.А. Горский // Радиационная гигиена. – 2014. – Т. 7, № 1. – С. 54–62.

158. Таусон, Л. В. Геохимические типы и потенциальная рудоносность гранитоидов / Л. В. Таусон. — Москва : Наука, 1977. — 280 с.

159. Титаева, Н. А. Ядерная геохимия / Н. А. Титаева. — Москва : МГУ, 1992. — 271 с.

160. Унгурияну, Т. Н. Краткие рекомендации по описанию, статистическому анализу и представлению данных в научных публикациях / Т. Н. Унгурияну, А. М. Гржибовский // Экология человека. — 2011. — № 5. — С. 55-60.

161. Уровни эксхалации радона на западном склоне горы Бештау, Кавказские Минеральные Воды / П. С. Микляев, Т. Б. Петрова, А. М. Маренный [и др.] // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. — 2018. — № 5. — С. 20-30.

162. Форма федерального статистического наблюдения № 4-ДОЗ. Сведения о дозах облучения населения за счет естественного и техногенно измененного радиационного фона: Методические рекомендации МР 2.6.1.0088-14. – М.: Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, 2014. – 39 с.

163. Чжун, Л. С. Гидродинамическая модель конвекции радона / Л. С. Чжун // Записки Горного института. — 1987. — № Т.111. — С. 81-84.

164. Шандала, Н. К. Научно-практический опыт надзорной деятельности в области обеспечения защиты населения и окружающей среды на объектах ядерного наследия России / Н. К. Шандала, С. М. Киселев, А. В. Титов // Радиационная гигиена . — 2019. — № 2. — С. 83-96.

165. Яковенко, А. А. Прогноз и нормализация радиационной обстановки при освоении подземного пространства в условиях повышенной радоноопасности горных пород : специальность 05.26.01 «Охрана труда (в горной промышленности)» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Яковенко Алексей Александрович ; Национальном минерально-сырьевом университете «Горный». — Санкт-Петербург , 2014. — 134 с.

166. Яρμοшенко, И.В. Проблемы оптимизации защиты от радона и введения референтного уровня в Российской Федерации / И.В. Яρμοшенко, А.Д. Онищенко, М.В. Жуковский // Радиационная гигиена. – 2014. – Т. 7, № 4. – С. 67–69.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Средние значения ЭРОА_{Rn} в помещениях зданий детских учреждений
города Лермонтов

Название объекта	Этаж	Значения ЭРОА _{Rn} , Бк/м ³			СГЭД _{Rn} ^{***} , мЗв/год	ИПР ^{***}
		ОП*	ТП**	Ср.год		
Детский сад №1	подвал	59	50	54	-	-
	1этаж	43	44	44	0,8	1,39E-04
	2этаж	44	45	45	0,8	1,42E-04
	здание без подвала	44	45	45	0,8	1,42E-04
Детский сад №2	подвал	590	811	693	-	-
	1этаж	42	79	55	1,0	1,73E-04
	2этаж	182	117	152	2,7	4,71E-04
	здание без подвала	109	96	101	1,8	3,14E-04
Детский сад №5	подвал	536	472	521	-	-
	1этаж	146	61	105	1,8	3,26E-04
	2этаж	92	53	74	1,3	2,31E-04
	здание без подвала	125	58	93	1,6	2,90E-04
Детский сад №7	1этаж	453	253	350	6,1	1,08E-03
	2этаж	50	33	43	0,8	1,36E-04
	здание	266	148	204	3,6	6,31E-04
Детский сад №8	1этаж	541	329	439	7,6	1,35E-03
	2этаж	379	75	228	4,0	7,04E-04
	здание	468	223	351	6,1	1,08E-03
Детский сад №11	подвал	98	248	176	-	-
	1этаж	316	305	311	5,4	9,59E-04
	2этаж	104	115	109	1,9	3,39E-04
	здание без подвала	207	208	207	3,6	6,40E-04
Детский сад №12	подвал	118	520	190	-	-
	1этаж	266	281	275	4,8	8,49E-04
	2этаж	167	157	157	2,7	4,86E-04
	здание без подвала	223	232	226	3,9	6,98E-04
Детский сад №13	подвал	13	140	74	-	-
	1этаж	445	433	439	7,6	1,35E-03
	2этаж	339	120	212	3,7	6,55E-04
	здание без подвала	408	329	367	6,4	1,13E-03
Детский сад	1этаж	61	63	63	1,1	1,97E-04

№14	2этаж	61	64	62	1,1	1,94E-04
	здание	61	63	63	1,1	1,97E-04
Детский сад №15	1этаж	51	92	69	1,2	2,16E-04
	2этаж	32	55	43	0,8	1,36E-04
	здание	42	77	58	1,0	1,82E-04
МБОУ ДОД ДШХ	1этаж	365	161	262	4,6	8,09E-04
	2этаж	310	76	198	3,4	6,12E-04
	здание	335	119	231	4,0	7,13E-04
Музыкальная школа	подвал	162	1184	653	-	-
	1этаж	217	282	224	3,9	6,92E-04
	2этаж	84	118	90	1,6	2,80E-04
	3этаж	125	172	137	2,4	4,25E-04
	здание без подвала	144	172	138	2,4	4,28E-04
Радуга	подвал	607	275	442	-	-
	1этаж	487	298	410	7,1	1,26E-03
	2этаж	416	188	293	5,1	9,04E-04
	3этаж	464	302	378	6,6	1,17E-03
	здание без подвала	458	264	363	6,3	1,12E-03
Школа №1	подвал	377	800	580	-	-
	1этаж	383	366	377	6,5	1,16E-03
	2этаж	200	135	173	3,0	5,35E-04
	3этаж	261	209	248	4,3	7,66E-04
	здание без подвала	288	248	280	4,9	8,64E-04
Школа №2	подвал	606	643	623	-	-
	1этаж	335	236	300	5,2	9,25E-04
	2этаж	135	85	110	1,9	3,42E-04
	3этаж	197	97	149	2,6	4,62E-04
	здание без подвала	232	146	192	3,3	5,94E-04
Школа №4	1этаж	308	137	222	3,9	6,86E-04
	2этаж	274	81	180	3,1	5,57E-04
	3этаж	390	123	265	4,6	8,18E-04
	здание	307	120	216	3,8	6,67E-04
Школа №5 Гагарина 12	подвал	131	326	259	-	-
	1этаж	420	240	317	5,5	9,78E-04
	2этаж	224	55	143	2,5	4,43E-04
	здание без подвала	322	148	230	4,0	7,10E-04
Школа №5 Первомайская	1этаж	532	371	455	7,9	1,40E-03

96	здание	532	371	455	7,9	1,40E-03
Школа №5 Комсомольская 6	подвал	226	427	298	-	-
	1этаж	318	239	301	5,2	9,29E-04
	2этаж	159	107	141	2,5	4,37E-04
	3этаж	81	76	78	1,4	2,43E-04
	здание без подвала	179	134	163	2,8	5,05E-04
*ОП-отопительный период; **ТП – теплый период; ***СГЭД _{Rn} и ИПР рассчитаны исходя из времени пребывания детей 2400ч. в год.						

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ «Радон-lab»

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



RU2021665443

**ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ
ГОСУДАРСТВЕННАЯ РЕГИСТРАЦИЯ ПРОГРАММЫ ДЛЯ ЭВМ**

Номер регистрации (свидетельства):
2021665443

Дата регистрации: **27.09.2021**

Номер и дата поступления заявки:
2021664655 20.09.2021

Дата публикации и номер бюллетеня:
27.09.2021 Бюл. № 10

Контактные реквизиты:
radprog@rambler.ru

Автор(ы):

Маренный Альберт Михайлович (RU),

Антропов Сергей Юрьевич (RU),

Карл Лидия (KZ)

Правообладатель(и):

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ

УНИТАРНОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЦЕНТР

РАДИАЦИОННО-ХИМИЧЕСКОЙ

БЕЗОПАСНОСТИ И ГИГИЕНЫ

ФЕДЕРАЛЬНОГО

МЕДИКО-БИОЛОГИЧЕСКОГО

АГЕНТСТВА (RU)

Название программы для ЭВМ:

Специализированное программное обеспечение «Радон-Lab»

Реферат:

Программа создана для автоматизации процесса ведения локальной базы данных «Локальная ИАС» в части измерений объемной активности радона трековым методом. Программа позволяет разным сотрудникам, разделенным временем и расстоянием, готовить "паспорт измерений" - документ, содержащий характеристики партии детекторов, условия их экспозиции и результаты измерений обследования данного объекта или населенного пункта. Режим ввода информации осуществляется автоматически при сканировании QR-кода на корпусе детектора камерой мобильного телефона. Область применения: радиационная безопасность человека и окружающей среды, радонобезопасное строительство. Тип ЭВМ: IBM PC-совмест. ПК; ОС: Linux, Windows 7/10, Widows Server.

Язык программирования: JavaScript

Объем программы для ЭВМ: 105 КБ

ПРИЛОЖЕНИЕ 3

Справка о внедрении результатов диссертационного исследования

ФЕДЕРАЛЬНОЕ
МЕДИКО-БИОЛОГИЧЕСКОЕ АГЕНТСТВО
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
УНИТАРНОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ
**НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЦЕНТР
РАДИАЦИОННО-ХИМИЧЕСКОЙ
БЕЗОПАСНОСТИ И ГИГИЕНЫ**
(ФГУП НТЦ РХБГ ФМБА России)
123182, г. Москва, Щукинская ул., 40
тел. (499) 190-51-31, факс (499) 193-80-60
ntc_rhbg@fmba@mail.ru

Председателю диссертационного
совета на соискание степени кандидата
наук
ПДС 0800.002 на базе РУДН им.
Патриса Лумумбы
доктору биологических наук
Киричуку Анатолию Александровичу

На № 04.04.2022 № 129/1
от _____
г. _____

СПРАВКА

о внедрении результатов диссертационного исследования
Карл Лидии Эдуардовны
«Радиоэкологическая защита населения на потенциально радоноопасных
территориях»
представленного на соискание ученой степени кандидата биологических наук
по специальности 1.5.15 - Экология

Результаты диссертационного исследования Карл Лидии Эдуардовны
используются в научно-практической деятельности лаборатории природных
источников ионизирующего излучения Федерального государственного
унитарного предприятия Научно-технический центр радиационно-
химической безопасности и гигиены Федерального медико-биологического
агентства.

С участием Карл Л.Э. разработаны утвержденные ФМБА России
методические указания МУ 2.6.062 - 2017 «Углубленное обследование
объектов с высокими уровнями содержания радона в помещениях». МУ
предназначены для использования ЦГиЭ ФМБА России, осуществляющими
радиационное обследование жилых домов, общественных и
производственных зданий.

Также с участием Карл Л.Э. разработана и зарегистрирована программа
для ЭВМ: Специализированное программное обеспечение «Радон-Lab»
(RU2021665443). Программа позволила оптимизировать процесс сбора
информации о содержании радона в жилых и общественных зданиях.

И.о. директора
ФГУП НТЦ РХБГ ФМБА России



Новиков С.В.

ПРИЛОЖЕНИЕ 4

Рекомендации по проектированию противорадоновой защиты зданий детских учреждений г. Лермонтов

Объект	$A_{уд} 226Ra$ ППР вблизи здания, Бк/кг $\frac{мБк}{м^2с}$	$A_{эфф}$ в строительных материалах, Бк/кг	Ср.год. $ЭРОA_{Rn}$ в помещениях зданий, Бк/м ³	Основной источник поступления радона	Рекомендуемые действия
Детский сад №8	65 ± 16 207 ± 40	173 ± 34	351	грунт под зданием через пол в помещениях первого этажа	Так как основным источником поступления радона в помещения является грунт под зданием, перенос радона из грунта внутрь здания, очевидно, осуществляется через ограждающие конструкции, главным образом пол, первого этажа, граничащие с грунтом. Поскольку между этими помещениями и грунтом имеется лишь небольшой слой, толщиной не более 0,5 м, скорее всего, заполненный щебнем, то наиболее эффективным способом защиты здания от радона является вентилирование воздуха в этом слое, которое приводило бы к отводу (выбросу) радона, мигрирующего из грунта в наружный (атмосферный) воздух. Наибольший эффект будет достигаться в том случае, если давление воздуха в этом слое будет ниже, чем в помещениях первого этажа, а откачиваемый из слоя воздух будет восполняться за счет его притока через пол первого этажа (разного рода щели, отверстия, дефекты и т.п.). Одним из

					наиболее эффективных способов защиты здания от радона является изоляция помещений подвала от грунта и герметизация вводов коммуникаций. В случае недостаточности этих мер рекомендуется депрессия подпольного пространства подвала, представляющего собой создание зоны пониженного давления (депрессии) на пути движения радона из грунта в здание.
Детский сад №13	$\frac{98 \pm 21}{234}$	142± 23	367	грунт под зданием	Наиболее эффективным способом защиты здания от радона является вентилирование воздуха в этом слое, которое приводило бы к отводу (выбросу) мигрирующего из грунта радона в наружный (атмосферный) воздух. Наибольший эффект будет достигаться в том случае, если давление воздуха в этом слое будет ниже, чем в помещениях первого этажа, а откачиваемый из слоя воздух будет восполняться за счет его притока через пол первого этажа (разного рода щели, отверстия, дефекты и т.п.).