

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
АЭРОКОСМИЧЕСКОГО ПРИБОРОСТРОЕНИЯ»

На правах рукописи



Калашникова Мария Владимировна

**МЕТОДИКА АВТОМАТИЗАЦИИ КОНТРОЛЯ РАДОНООПАСНОСТИ
В ТЕХНОГЕННОЙ СРЕДЕ УРБАНИЗИРОВАННЫХ ТЕРРИТОРИЙ**

Специальность: 2.2.8. – «Методы и приборы контроля и диагностики материалов,
изделий, веществ и природной среды»

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
кандидат технических наук, доцент
Колобашкина Татьяна Владимировна

Санкт-Петербург – 2026

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	5
Раздел 1. Обзор зарубежных и отечественных методик контроля радона для техногенных объектов (жилые постройки)	12
1.1. Исследование радоноопасности на урбанизированной территории: экологическая значимость и историко-научный контекст	13
1.2. Сравнительный анализ систем оценки радоноопасности в Российской Федерации и за рубежом	19
1.3. Научное обоснование совершенствования существующих методов оценки потенциальной радоноопасности на урбанизированной территории	29
Выводы по первому разделу	35
Раздел 2. Выявление ключевых факторов при оценке радоноопасности в техногенной среде урбанизированных территорий	36
2.1. Влияние факторов среды на радоноопасность территории	37
2.2. Влияние геологических и географических факторов среды на радоноопасность территории	40
2.3. Влияние метеорологических факторов среды на радоноопасность территории	42
2.4. Влияние конструктивных особенностей зданий на радоноопасность урбанизированной территории	45
2.5. Важность факторов при оценке радоноопасности в техногенной среде урбанизированных территорий	48
Выводы по второму разделу	51
Раздел 3. Разработка математических моделей и алгоритма автоматизации контроля радоноопасности урбанизированных территорий	52
3.1. Разработка математической модели и структурной схемы процесса оценки вклада конструктивных особенностей зданий на урбанизированных территориях в формирование эквивалентной равновесной объёмной активности изотопов радона в жилых зданиях.	53
3.2. Разработка математической модели алгоритма автоматизации контроля радоноопасности урбанизированных территорий	62

3.3. Разработка структурной схемы алгоритма автоматизации контроля радоноопасности урбанизированных территорий	77
3.4. Результаты реализации алгоритма автоматизации контроля радоноопасности урбанизированных территорий	79
3.5. Разработка математической модели и структурной схемы контроля канцерогенного риска облучения радоном	96
3.6. Результаты реализации математической модели контроля канцерогенного риска облучения радоном	100
Выводы по третьему разделу	105
Раздел 4. Методика автоматизации контроля радоноопасности урбанизированных территорий.	106
4.1. Разработка методики автоматизации контроля радоноопасности урбанизированных территорий	107
4.2. Результаты методики автоматизации контроля радоноопасности урбанизированных территорий.	110
4.3. Разработка структурной схемы методики автоматизации контроля радоноопасности урбанизированных территорий в системе оценки радоноопасности в Российской Федерации.	115
4.4. Мероприятия по уменьшению содержания радона в воздухе помещений	121
Выводы по четвёртому разделу	126
Заключение	127
Список использованных источников	128
Приложение А. Характеристика среды	152
Приложение Б. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025618097	155
Приложение В. Результаты измерений и расчётов	156
Приложение Г. Визуализация карт и гистограмм пар точек для каждого бина.	160
Приложение Д. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025680594	166
Приложение Е. Данные о результатах кластеризации и эффективной дозы внутреннего облучения	167

Приложение Ж. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025680593	171
Приложение И. Акт о внедрении результатов диссертационной работы в ФГАОУ ВО «СПб ГУАП»	172
Приложение К. Акт о внедрении результатов диссертационной работы в «Ленгипротранспуть» – филиала АО «Росжелдорпроект»	174
Приложение Л. Акт о внедрении результатов диссертационной работы в ООО «НТЦ ЭкологджиксЛаб»	176
Приложение М. Акт о внедрении результатов диссертационной работы в СПб НИИИ «ЭИЗ»	178

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Согласно «Прогнозу научно-технологического развития РФ 2030» и Указу Президента РФ от 7 мая 2024 года № 309 «О национальных целях развития Российской Федерации», цель которых – обеспечение технологического суверенитета и развитие высокотехнологичных решений, разработка методики автоматизации контроля радоноопасности в техногенной среде урбанизированных территорий позволит перейти от эпизодического к непрерывному контролю, а также минимизировать затраты на измерения и снизить канцерогенный риск для здоровья населения за счёт своевременного выявления и устранения превышений референтного уровня эквивалентной равновесной объёмной активности изотопов радона.

Международная комиссия по радиологической защите в Публикации № 126 «Радиологическая защита от облучения радоном» указывает, что актуальность контроля радона обусловлена его вкладом в суммарную дозу облучения населения, который составляет более 50 % от природных источников ионизирующего излучения. В Публикации № 115 «Риск возникновения рака лёгкого при облучении радоном и продуктами его распада. Заявление по радону» указано, что верхняя граница референтного уровня объёмной активности радона в жилых помещениях составляет 300 Бк/м³. Эта концентрация соответствует приблизительно 10 мЗв годовой эффективной дозы, что находится в середине диапазона от 1 до 20 мЗв, рекомендуемого Международной комиссией по радиологической защите. При этом Международная комиссия по радиологической защите рекомендует установить национальный референтный уровень в диапазоне от 100 до 300 Бк/м³ с учётом основных социально-экономических факторов.

В соответствии с системой радиологической защиты, принятой в Публикации № 103 «Рекомендации Международной комиссии по радиационной защите от 2007 года», ситуация облучения населения радоном относится к ситуации существующего облучения. По мнению Международной комиссии по радиологической защите и Всемирной организации здравоохранения, подход, при котором меры по снижению радона в помещениях ранее рекомендовались только в

случае превышения уровней действия (Публикация № 65 «Защита от радона-222 в жилых зданиях и на рабочих местах»), создавал неверное представление, что воздействие ниже этого уровня является безопасным. Вместе с тем, результаты анализа объединённых эпидемиологических исследований в жилых помещениях доказали, что канцерогенный риск статистически значимо возрастает даже при умеренных и низких концентрациях радона (50–100 Бк/м³). Безопасного порога, ниже которого риска не существует, выявлено не было.

Согласно Федеральному закону № 3-ФЗ, облучение населения радоном и продуктами его распада в жилых и производственных помещениях не должно превышать установленные нормативы, что обеспечивается комплексом защитных мер на этапах выбора земельного участка, проектирования, строительства и эксплуатации зданий. Однако в Федеральном законе № 384-ФЗ вопрос о периодичности контрольных измерений радона остаётся законодательно не регламентированным. СанПиН 2.6.1.4115-25, п. 299 обязывают организацию, осуществляющую ввод в эксплуатацию жилых зданий, проводить контроль соблюдения нормативных уровней и мероприятия по их снижению, но не устанавливают чёткого механизма его реализации для уже эксплуатируемых зданий. Данное противоречие усугубляется тем, что система государственного статистического наблюдения за дозами облучения, осуществляемая в соответствии с Постановлением Правительства РФ № 718 и регламентированная формами № 1-4-ДОЗ, по своей сути, является системой учёта и мониторинга, но не заменяет собой отсутствующий прямой и обязательный для всех собственников и ответственных лиц механизм регулярного инструментального контроля радона в каждом конкретном эксплуатируемом здании.

Анализ нормативной базы выявляет системное противоречие между законодательно установленной обязанностью контроля объёмной активности изотопов радона в жилых помещениях и отсутствием методики контроля радоноопасности территорий для непрерывной оценки объёмной активности изотопов радона.

Степень научной разработанности темы исследования. Вклад в изучение проблемы контроля и диагностики облучения населения радоном внесли отечественные учёные: Тихонов М. Н., Нешто К. Я., Историк О.А., Романович И. К., Еремина Л. А., Киселев, С. М., Жуковский, М. В., Стамат, И. П., Репин В. С., Барышков Н. К., Братилова А. А., Барковский А. Н. и др.

Среди зарубежных авторов следует отметить работы, выполненные авторами: Haquin G., Zafrir H., Ilzyer D., Weisbrod N., Panahi M., Yariyan P., Rezaie F., Kim S., Sharifi A., Alesheikh A., Lee J., Lee J., Kim S., Yoo J., Lee S., Gruber V., Baumann S., Alber O., Laubbichler C., Bossew P., Petermann E., Ciotoli G., Pereira A., Domingos F., Tondeur F., Cinelli G., Fernandez A. и др.

Несмотря на различные направления исследований, мировые учёные приходят к общему выводу о серьёзности проблемы облучения населения изотопами радона. Поэтому необходимо совершенствование системы контроля и диагностики радоноопасности в техногенной среде урбанизированных территорий.

Целью данной диссертации является снижение трудоемкости, повышение оперативности и достоверности оценки потенциальной радоноопасности урбанизированной территории путем автоматизации контроля эквивалентной равновесной объемной активности радона.

Объектом исследования является контроль радоноопасности урбанизированных территорий.

Предметом исследования являются методики контроля радоноопасности урбанизированных территорий.

Указанная цель определила постановку и решение следующих задач:

1. Разработка математической модели процесса оценки вклада конструктивных особенностей зданий в формирование эквивалентной равновесной объёмной активности изотопов радона в жилых зданиях, характеризующей радоноопасность урбанизированных территорий (соответствует п. 7 паспорта специальности 2.2.8).

2. Разработка алгоритма автоматизации контроля радоноопасности урбанизированных территорий, способствующей снижению трудоёмкости,

повышению оперативности и достоверности оценки потенциальной радоноопасности (соответствует п. 6 паспорта специальности 2.2.8).

3. Разработка методики автоматизации контроля радоноопасности урбанизированных территорий, способствующей снижению трудоёмкости, повышению оперативности и экологической безопасности окружающей среды (соответствует п. 1 паспорта специальности 2.2.8).

Методы исследований. В работе применялись теоретические (анализ литературных источников, описание, сравнение, синтез, дедукция и моделирование) и эмпирические (наблюдение и измерение) методы исследования.

Программные средства реализации диссертационного исследования: Microsoft Office, Python.

Область исследования: соответствует п.п. 1, 6, 7 паспорта специальности: 2.2.8 – «Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды».

Положения, выносимые на защиту:

1. Математическая модель процесса оценки вклада конструктивных особенностей зданий на урбанизированных территориях в формирование эквивалентной равновесной объёмной активности изотопов радона в жилых зданиях, что способствует повышению достоверности контроля потенциальной радоноопасности в техногенной среде.

2. Алгоритм автоматизации контроля радоноопасности урбанизированных территорий способствует снижению трудоёмкости, повышению оперативности и достоверности оценки потенциальной радоноопасности территории за счёт учёта конструктивных особенностей зданий, географических и геологических факторов среды и автоматизации контроля эквивалентной равновесной объёмной активности изотопов радона.

3. Методика автоматизации контроля радоноопасности урбанизированных территорий способствует снижению трудоёмкости, повышению оперативности и экологической безопасности окружающей среды.

Научная новизна:

1. Разработана математическая модель процесса оценки вклада конструктивных особенностей зданий, отличающаяся тем, что использован метод машинного обучения (градиентный бустинг), что позволяет оценить вклад конструктивных особенностей зданий в формирование дисперсии эквивалентной равновесной объёмной активности изотопов радона в жилых зданиях и способствует повышению достоверности оценки потенциальной радоноопасности территории.

2. Разработан алгоритм автоматизации контроля радоноопасности урбанизированных территорий, отличающийся тем, что учитывает конструктивные особенности зданий, географические и геологические факторы среды, что позволяет выявлять зоны с превышением референтного уровня эквивалентной равновесной объёмной активности изотопов радона при ограниченном количестве измерений и способствует снижению трудоёмкости, обеспечению оперативности контроля и повышению достоверности результатов оценки.

3. Разработана методика автоматизации контроля радоноопасности урбанизированных территорий, отличающаяся тем, что использование ограниченной репрезентативной выборки измерений даёт возможность оценить радоноопасность урбанизированной территории и обосновать выбор технических решений по противорадоновой защите для снижения концентрации радона до установленного референтного уровня и способствует снижению трудоёмкости, повышению оперативности и экологической безопасности окружающей среды.

Практическая значимость:

1. Разработанная математическая модель процесса оценки вклада конструктивных особенностей зданий позволяет оценить вклад конструктивных особенностей зданий в формирование дисперсии эквивалентной равновесной объёмной активности изотопов радона в жилых зданиях и повысить достоверность оценки на 27 % и сокращению времени на 34 %.

2. Внедрение алгоритма автоматизации контроля радоноопасности урбанизированных территорий позволяет сократить время на оценку радоноопасности урбанизированных территорий на 90–95 %, а также снизить затраты на проведение полевых измерений на 80–90 %.

3. Внедрение методики автоматизации контроля радоноопасности урбанизированных территорий позволяет повысить достоверность оценки на 12 %, а также сократить время принятия решений по снижению объёмной активности изотопов радона при выявлении зон с превышением референтного уровня с 4 месяцев до 2 месяцев, тем самым повысить уровень экологической безопасности урбанизированной территории.

Теоретическая значимость:

1. Формализация иерархии факторов влияния дополняет теорию миграции радона в урбанизированной среде.

2. Разработка алгоритма автоматизации, сочетающего методы геостатистики (кригинг) и машинного обучения (градиентный бустинг), вносит вклад в теорию пространственного прогнозирования распределения изотопов радона на урбанизированных территориях с учётом нелинейных закономерностей техногенных процессов.

3. Разработанная методики автоматизации контроля радоноопасности урбанизированных территорий формирует научную основу для перехода от сплошного радиационного контроля к прогнозно-адаптивным системам оценки радоноопасности урбанизированных территорий.

Степень достоверности результатов диссертационной работы обеспечивается корректностью применяемого математического аппарата, алгоритмов, анализа данных с использованием федеральных нормативно-правовых и нормативно-технических документов, подтверждается результатами практической апробации.

Личный вклад автора заключается в непосредственной разработке основных положений, выносимых на защиту.

Реализация работы. Результаты диссертационного исследования внедрены в деятельность ООО «НТЦ ЭколоджиксЛаб», «Ленгипротранспуть» – филиала АО «Росжелдорпроект», СПб НИИИ «ЭИЗ», что подтверждено соответствующими актами. Результаты диссертационного исследования использованы в учебном процессе ФГАОУ ВО «ГУАП» по дисциплинам: «Интеллектуальная обработка и анализ экспериментальных результатов», «Цифровые методы и средства измерений», «Безопасность жизнедеятельности», «Законодательная метрология в области обороны и безопасности Российской Федерации», «Автоматизированная обработка экспериментальных данных».

Апробация работы. Основные результаты исследования доказывались и обсуждались на международном форуме «Метрологическое обеспечение инновационных технологий» в 2026 г., 2025 г., 2024 г., 2021 г., международном форуме «Математические методы и модели в высокотехнологичном производстве» в 2025 г., 2024 г., 2023 г., на всероссийской научно-практической конференции «Охрана труда в организациях, подведомственных Минобрнауки России» в 2022 г., на всероссийской научно-практической конференции «Биотехнологии и безопасность в техносфере» в 2023 г., 2021 г.

По результатам диссертационного исследования опубликовано 30 научных работ, в том числе: 9 работ в рецензируемых научных изданиях ВАК (9 без соавторов), 18 работ в других изданиях, а также получено 3 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 4 разделов, заключения, списка используемых источников и приложений. Основной текст диссертации представлен на 151 страницах, включая 43 рисунка и 11 таблиц. Список используемых источников содержит 156 наименований. Общий объем диссертационной работы с учетом приложений составляет 179 страниц.

РАЗДЕЛ 1. ОБЗОР ЗАРУБЕЖНЫХ И ОТЕЧЕСТВЕННЫХ МЕТОДИК КОНТРОЛЯ РАДОНА ДЛЯ ТЕХНОГЕННЫХ ОБЪЕКТОВ (ЖИЛЫЕ ПОСТРОЙКИ)

В разделе исследуется проблема радоноопасности, что обусловлено необходимостью формирования системного понимания экологической значимости данного вопроса, его историко-научного контекста и современных подходов к оценке.

Целью первого раздела является оценка степени изученности проблемы радоноопасности территории. При этом рассматриваются вопросы оценки радоноопасности в Российской Федерации и зарубежных странах, а также теоретически и практически решённые задачи по совершенствованию существующих методик.

Для достижения поставленной цели необходимо рассмотреть экологическую роль радона, уделив особое внимание анализу и адаптации методик контроля его содержания в жилых зданиях. Далее следует провести сравнение систем оценки радоноопасности, действующих в Российской Федерации и ряде зарубежных стран, таких как США, Канада, Южная Корея, Великобритания и Чехия. Такой анализ необходим для выявления общих тенденций, лучших практик и методологических пробелов.

Заключительная часть первого раздела посвящена научному обоснованию необходимости модернизации существующих методов оценки, для чего требуется проанализировать ограничения традиционных подходов.

1.1. Исследование радоноопасности на урбанизированной территории: экологическая значимость и историко-научный контекст

Природные источники ионизирующего излучения вносят значительный вклад в дозовую нагрузку на население, и проблема превышения естественного фонового уровня облучения в ряде регионов является общепризнанной [1–3]. Радиоактивные элементы, включая радон, естественным образом присутствуют в земной коре с момента её формирования, задолго до начала технологического прогресса и антропогенного использования радиоактивных материалов. Радон, как инертный газ природного происхождения, накапливается в горных породах, почвах, подземных и поверхностных водах. По данным Международной комиссии по радиологической защите и Научного комитета по действию атомной радиации Организации Объединённых Наций (ООН), наибольшая часть дозы облучения – более 80 % от общей, получаемой населением в обычных условиях, связана именно с природными источниками радиации [4].

Первые научные сведения о радоне были получены в 1899 г. в Университете Макгилла (Монреаль), где Эрнест Резерфорд и Роберт Б. Оуэнс идентифицировали его как пятый радиоактивный элемент [5]. В том же году Пьер и Мария Кюри зафиксировали газообразную эманацию радия, сохраняющую радиоактивность. В 1900 г. Фридрих Эрнст Дорн ввёл термин «эманация радия» для описания данного явления [6]. К 1920 г. были систематизированы три изотопные формы эманации: радон (^{222}Rn), торон (^{220}Rn) и актион (^{219}Rn) [7], а в 1923 г. Международный союз теоретической и прикладной химии (IUPAC) закрепил название «радон» за наиболее стабильным изотопом [8]. Первые данные о присутствии радона в воздухе помещений появились в 1950-х годах. А к 1970-м годам, в связи с доказанным канцерогенным действием радона (на основе эпидемиологических исследований среди шахтёров), начались активные исследования его воздействия в жилых зданиях, что стимулировало разработку мер по снижению концентрации и официальных рекомендаций Агентства по охране окружающей среды США (EPA) [9].

Радон образуется в результате радиоактивного распада урана-238, урана-235 и тория-232, присутствующих в магматических породах (гранит, базальт) и рудных месторождениях. Наибольшую значимость имеет изотоп ^{222}Rn с периодом полураспада 3,8 суток, являющийся источником вторичных α - и β -излучений [2, 10]. Доказано, что ингалируемый радон (преимущественно ^{222}Rn) и его дочерние продукты распадаются в лёгких, испуская высокоэнергетические α -частицы, которые повреждают эпителий дыхательных путей и являются значимым фактором канцерогенеза, ответственным за существенную долю случаев рака лёгкого [11, 12]. Низкая проникающая способность альфа-излучения является причиной пренебрежимо малого уровня внешнего облучения от радона. В 1979 г. Всемирная организация здравоохранения (ВОЗ) инициировала системное изучение миграции и аккумуляции радона в помещениях, что положило начало международным исследованиям радоноопасности [12]. Под потенциально радоноопасным участком понимают территорию, на которой строительство здания без противорадоновой защиты в силу неблагоприятного сочетания геологических, геодинамических, гидрогеологических условий и радиационно-физических свойств грунтов, может привести к сверхнормативной концентрации радона в воздухе помещений [13].

В рамках программы ЕС «Горизонт EURATOM» реализуется проект RadoNorm, направленный на управление рисками, связанными с облучением радоном. Проект RadoNorm представляет собой пятилетнюю (60 месяцев) международную инициативу, объединяющую 57 научных организаций из 22 стран. Его ключевая задача – это интеграция всех этапов управления радиационными рисками, включая совершенствование методологий оценки, разработку защитных стратегий и внедрение инновационных технологий [14]. Экологическая значимость исследований радоноопасности: оценка и минимизация рисков, стратегии радиационной защиты, управление территориальным развитием, повышение общественной осведомлённости, научно-нормативное регулирование, динамический мониторинг [15].

Систематический контроль радиационной обстановки в Российской Федерации осуществляется Санкт-Петербургским научно-исследовательским

институтом радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева совместно [16] с Федеральной службой по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека (Роспотребнадзор). На рисунке 1.1 представлен вклад различных источников в годовую эффективную дозу облучения населения Российской Федерации с 2014 года по 2023 год, % [10, 17–25].

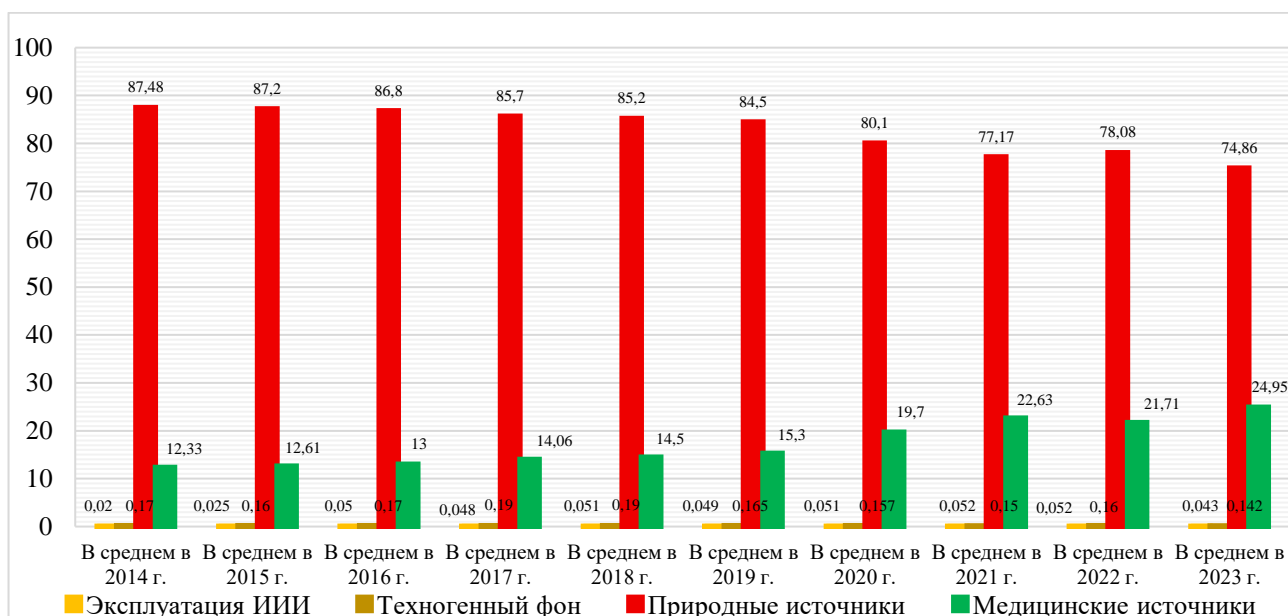


Рисунок 1.1 – Вклад различных источников в годовую эффективную дозу облучения населения Российской Федерации [10] с 2014 года по 2023 год

Согласно данным, представленным на рисунке 1.1, основной вклад в эффективную дозу облучения населения вносят природные источники излучения. При этом к 2020 году их доля несколько снизилась, тогда как вклад медицинских источников ионизирующего излучения в период с 2020 по 2023 год существенно возрос. Данная динамика обусловлена пандемией COVID-19, вызвавшей увеличение применения радиологических методов диагностики и лечения [22–25].

В соответствии с приложением к СП 2.6.1.2612-10 «Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ-99/2010)» степень радиационной безопасности населения характеризуют следующие значения эффективных доз облучения от всех основных природных источников излучения:

– менее 5 мЗв/год – приемлемый уровень облучения населения от природных источников излучения;

- свыше 5 до 10 мЗв/год – облучение населения является повышенным;
- более 10 мЗв/год – облучение населения является высоким.

Мероприятия по радиационной защите в приоритетном порядке реализуются для групп населения с дозами, превышающими 10 мЗв/год [26]. Учитывая, что радон (^{222}Rn и ^{220}Rn) и его дочерние продукты формируют 59,2 % суммарной дозы природного облучения населения России (по данным 2023 г.), для оценки влияния радона на эффективную дозу облучения населения применена адаптированная методика. В её основу положен пропорциональный вклад радона в общую дозу 60 % от нормативов, установленных СП 2.6.1.2612-10:

- менее 3 мЗв/год (рассчитан как 60 % от 5 мЗв/год) – приемлемый уровень облучения населения от радона;
- свыше 3 до 6 мЗв/год (соответствует 60 % от диапазона 5–10 мЗв/год) облучение населения от радона является повышенным;
- более 6 мЗв/год (отражает 60 % от значения > 10 мЗв/год) облучение населения радоном является высоким.

Визуализация результатов представлена на рисунке 1.2 в виде карты приемлемого уровня облучения населения от радона с выделением субъектов, имеющих [10] годовую эффективную дозу облучения населения за счёт радона (средние значения по данным измерений за период с 2001 по 2023 гг.) менее 3 мЗв/год.



Рисунок 1.2 – Карта субъектов Российской Федерации с приемлемым уровнем облучения населения от радона по статистическим данным за 2001–2023 гг.

На рисунке 1.3 представлена карта субъектов, имеющих годовую эффективную дозу облучения населения за счёт радона (средние значения по данным измерений за период с 2001 по 2023 гг.) в диапазоне от 3 до 6 мЗв/год.



Рисунок 1.3 – Карта субъектов Российской Федерации с повышенным уровнем облучения населения от радона по статистическим данным за 2001–2023 гг.

На рисунке 1.4 представлена карта с субъектами, которые имеют высокий уровень облучения населения радоном (более 6 мЗв/год).



Рисунок 1.4 – Карта субъектов Российской Федерации с высоким уровнем облучения населения от радона по статистическим данным за 2001–2023 гг.

Объединив полученные карты, была разработана карта субъектов Российской Федерации с уровнем облучения населения от радона по статистическим данным за 2001–2023 гг. (рис. 1.5).



Рисунок 1.5 – Карта субъектов Российской Федерации с уровнем облучения населения от радона по статистическим данным за 2001–2023 гг.

Пространственный анализ данных по Российской Федерации за 2001–2023 гг. выявил зональное распределение радоноопасности: 76 регионов соответствуют [10] приемлемому уровню облучения населения за счёт радона (менее 3 мЗв/год), 7 регионов характеризуются повышенным уровнем облучения населения за счёт радона (3–6 мЗв/год), 2 региона (Забайкальский край и Республика Алтай) – высоким уровнем облучения населения за счёт радона (свыше 6 мЗв/год), в 4 субъектах Российской Федерации оценка не проводилась. Реализация проекта RadoNorm (ЕС) способствовала актуализации методов снижения концентрации радона посредством оптимизации мониторинга [14, 15]. Данные 2023 г. подтверждают необходимость учёта региональных особенностей при оценке рисков радонового облучения, демонстрируя особую актуальность данной проблемы для Забайкалья, где в деревянных домах отмечены концентрации радона 249 Бк/м³ [25]. Одновременно наблюдался рост вклада медицинских источников облучения в годовую эффективную дозу облучения населения (до 23,6 % к 2023 г.), обусловленный пандемией COVID-19 [27]. Полученные результаты обосновывают целесообразность модернизации системы радиационного контроля путём внедрения диагностики среды с применением геоинформационных технологий (ГИС) для динамического мониторинга [27].

1.2. Сравнительный анализ систем оценки радоноопасности в Российской Федерации и за рубежом

Регулирование радоноопасности в Российской Федерации базируется на комплексе нормативно-правовых документов обеспечивающих основу для контроля радиационных рисков. СанПиН 2.6.1.2523-09 (НРБ-99/2009) формирует основу государственной системы гигиенического нормирования радиационной безопасности населения Российской Федерации, реализуя положения Федерального закона от 30.03.1999 № 52-ФЗ «О санитарно-эпидемиологическом благополучии населения» и Федерального закона от 09.01.1996 № 3-ФЗ «О радиационной безопасности населения». НРБ-99/2009 устанавливает гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности при воздействии источников ионизирующего излучения, включая природные радионуклиды [16].

Ключевым параметром оценки рисков, связанных с радоном и торонем, является [28] среднегодовая эквивалентная равновесная объёмная активность (ЭРОА) изотопов радона в воздухе помещений. Для проектируемых зданий жилищного и общественного назначения допустимое значение среднегодовой ЭРОА изотопов радона [29] не должно превышать 100 Бк/м³, а в эксплуатируемых зданиях – не должно превышать 200 Бк/м³. Для производственных объектов на этапе проектирования допустимая среднегодовая ЭРОА изотопов радона составляет 150 Бк/м³, а для эксплуатируемых зданий – 300 Бк/м³ [30].

СП 2.6.1.2612-10 (ОСПОРБ-99/2010) регламентирует практическую реализацию требований радиационной безопасности, установленных НРБ-99/2009, для защиты населения от негативного воздействия ионизирующего излучения. ОСПОРБ-99/2010 обязывает осуществлять радиационный контроль на всех этапах жизненного цикла объектов (строительство, реконструкция, капитальный ремонт, эксплуатация) для подтверждения соответствия гигиеническим нормативам. При превышении допустимых значений требуется анализ причин и внедрение защитных мер, включая снижение мощности дозы гамма-излучения и/или концентрации радона [26].

Документ СанПиН 2.6.4115-25, утверждённый Постановлением Главного государственного санитарного врача РФ №6 от 27 марта 2025 года, устанавливает комплекс требований в области радиационной безопасности населения при обращении источников ионизирующего излучения. В контексте требования по ограничению облучения за счёт радона в жилых и производственных помещениях СанПиН 2.6.4115-25 дублирует информацию, прописанную в НРБ-99/2009 и ОСПОРБ-99/2010 [31].

МУ 2.6.1.037-2015 конкретизирует процедуры радонового контроля. В документе детализированы условия измерений, алгоритм расчёта среднегодового значения ЭРОА изотопов радона с учётом неопределённости оценки, а также требования к продолжительности и методам мониторинга [32].

Методические рекомендации МР 2.6.1.0333-23, утверждённые Роспотребнадзором, описывают алгоритм проведения и минимальный объём радиационного контроля и санитарно-эпидемиологической оценки жилых, общественных и производственных зданий и сооружений на различных этапах их жизненного цикла, начиная с ввода в эксплуатацию и заканчивая сносом. Документ устанавливает порядок контроля среднегодовой ЭРОА изотопов радона в воздухе помещений, а также плотности потока радона (ППР) с поверхности грунта [33].

Измерения ППР с поверхности грунта проводятся в случае отсутствия закрытого контура здания или сооружения. Измерения проводятся в контрольных точках, расположенных по периметру здания или сооружения с шагом 10 метров на грунтовых участках без покрытий (кроме газонного материала). ППР с поверхности грунта в пределах контура застройки здания или сооружения принимается как среднее арифметическое значение результатов измерений во всех контрольных точках [33].

Система оценки радоноопасности включает совокупность методов, направленных на определение уровня радиационной опасности, обусловленной накоплением радона на конкретной территории. Также стоит отметить, что в Российской Федерации критерии потенциальной радоноопасности базируются на количественных и качественных показателях геологической среды участка. Для

обеспечения достоверности оценки радоноопасности территории применяется комбинирование методов, что позволяет получить верифицированные выводы о степени радиационного риска и обосновать необходимость защитных мероприятий [13]. Существующая система оценки потенциальной радоноопасности территорий, основанная на прямых измерениях, характеризуется рядом существенных недостатков: устарелостью методологии, высокой ресурсоёмкостью (финансовые, временные и трудовые затраты) и низкой репрезентативностью в отношении общей картины радоноопасности на государственном уровне [34].

Для оценки систем радоноопасности территории в зарубежных странах был проведён анализ зарубежных нормативно правовых актов Канады, Чешской Республики, Соединённых Штатов Америки, Южной Кореи, Великобритании. Рассмотрим системы оценки радоноопасности для перечисленных стран отдельно.

В Соединённых Штатах Америки уполномоченным органом по внедрению протоколов по измерению, оценке и нормированию радона является «Агентство по охране окружающей среды» (EPA). Управление разработало ряд национальных программ и нормативных актов для контроля загрязнения воздуха и радиационного воздействия, основными из которых являются протоколы измерений радона в помещениях и продуктов его распада (EPA 402-R-92-004) [35], протоколы для измерения содержания радона и продуктов его распада в домашних условиях (EPA 402-R-93-003) [36].

В Соединённых Штатах Америки уровень радона принято измерять в пикокюри на литр (пКи/л). Один пКи/л равен 37 Бк/м^3 . Для измерения воздействия радиоактивного излучения на человека также используют параметр рабочий уровень (WL). Один рабочий уровень равен любой комбинации короткоживущих дочерних элементов ^{222}Rn (^{218}Po , ^{214}Pb , ^{214}Bi и ^{214}Po) в 1 литре воздуха, при котором выделяется $1,3 \times 10^5 \text{ МэВ}$ потенциальной альфа-энергии. Это эквивалентно $2,08 \times 10^{-5} \text{ Дж/м}^3$ или $\approx 130 \text{ Бк/м}^3$. В Соединённых Штатах Америки используют 3 варианта измерения радона.

Агентство по охране окружающей среды (EPA) разработало карту радоновых зон. Данная карта позволяет выявлять территории с потенциально повышенным

уровнем радона в помещениях [37]. Карта предназначена для содействия органам власти в реализации строительных нормативно-правовых актов, направленных на противодействие проникновению радона. В основу разработки карты лёг анализ данных по радону в помещениях. Дополнительными факторами выступали геологические характеристики, уровень радиоактивности воздуха, параметры почвы и типы фундаментов [37, 38]. По результатам комплексной оценки территории США разделены на три зоны:

зона 1 (красная) – наивысший потенциал (средний уровень радона в помещениях может превышать 4 пКи/л);

зона 2 (оранжевая) – умеренный потенциал (2–4 пКи/л);

зона 3 (желтая) – низкий потенциал (менее 2 пКи/л).

Агентство по охране окружающей среды подчеркивает, что карта не заменяет тестирование отдельных зданий. Дома с повышенным радоном встречаются во всех зонах, поэтому ЕРА рекомендует тестировать каждый дом независимо от зоны. При уровне радона ≥ 4 пКи/л требуется устранение проблемы, при 2–4 пКи/л рассмотрение такой необходимости [37].

В Канаде регулирование вопросов, связанных с радоноопасностью, осуществляет Министерство здравоохранения (Health Canada). Основным нормативным документом в данной сфере является «Руководство по измерению радона в жилых помещениях» [39]. Руководство предназначено для лиц и организаций, проводящих тестирование на содержание радона в жилых домах. Тестирование жилых зданий на радон необходимо для решения вопроса о проведении защитных мероприятий [16]. В данном документе изложены рекомендации по проведению таких измерений: выбор приборов, их размещение, продолжительность замеров и обработка результатов. Хотя обязательных законодательных норм в Канаде нет, Министерство здравоохранения совместно с регионами выпустило руководство, где в качестве допустимого уровня содержания радона в воздухе жилых помещений указано 200 Бк/м³ [40].

В Южной Корее контроль радона осуществляется в рамках национального Закона о качестве воздуха в объектах общественного пользования при координации

местных органов власти. В Южной Корее для радона не установлен обязательный норматив (он относится к веществам с добровольными рекомендациями). Чтобы защитить здоровье граждан, регулярно измеряется уровень радона на станциях метро. Кроме того, станции с высоким уровнем радона относят к зонам особого внимания. В соответствии с Законом о контроле качества воздуха в помещениях Министерство окружающей среды Кореи установило рекомендательный контрольный уровень в 148 Бк/м^3 во многих объектах общественного назначения [41].

В Великобритании общественное здравоохранение Англии занимается вопросами регулирования радоноопасности территории. Основным документом, который регламентирует процесс измерения радона на территории, является «Схема проверки организаций, проводящих измерения уровня радона в зданиях Великобритании: обновлённая версия 2018 года» [42]. В Великобритании для оценки радоноопасности используют исключительно долгосрочные измерения, так как краткосрочные обычно не считаются надёжным методом.

На основе многолетнего анализа, объединяющего геологические данные с измерениями объёмной активности радона, Агентство по безопасности здравоохранения Великобритании (UKHSA) разработало карту потенциальной радоноопасности территории [43]. Данная карта классифицирует районы на шесть зон в соответствии с процентом жилых помещений, где превышен допустимый уровень радона и требуются защитные мероприятия: зона 1 (0-1 %), зона 2 (1-3 %), зона 3 (3-5 %), зона 4 (5-10 %), зона 5 (10-30 %), зона 6 (> 30 %).

В Чешской Республике полномочия по оценке радоноопасности территорий осуществляет Государственное управление по ядерной безопасности (SUJB). Нормирование уровня радона в помещениях осуществляется в рамках национальной политики. Оно включает измерения природной радиации в жилых зданиях, а также определение радонового индекса земельного участка. Основой этих требований служит Национальный план действий по контролю радиационного воздействия радона на население (RANAP) [44, 45].

В Чешской Республике методы измерения радона подразделяются на долгосрочные (≥ 2 месяца) и краткосрочные (7–60 дней, обычно 7 дней).

В Чешской Республике для оценки радоноопасности территории используют радоновый индекс (RI), характеризующий риск миграции радона из геологической среды. Радоновый индекс имеет три качественных уровня: низкий, средний и высокий [44]. Его количественной основой служит радоновый потенциал (RP), определяемый по измерениям объёмной активности радона в почвенном воздухе и коэффициента газопроницаемости грунтов (k) на глубине 0,8 м. Значения RP классифицируются как: низкий ($RP < 10$), средний ($10 \leq RP \leq 35$) и высокий ($RP > 35$) [44]. Для очень плотных грунтов, где измерение проницаемости затруднено, оценка проводится исключительно по объёмной активности радона в почвенном воздухе [45]. В таблице 1.1. представлен обобщенный анализ оценки радоноопасности в Российской Федерации и за рубежом.

Таблица 1.1 – Системы оценки радоноопасности в Российской Федерации и за рубежом [46]

Страна	Показатели оценки радоноопасности техногенной территории	Факторы, учитываемые при оценке радоноопасности техногенной территории	Недостатки систем оценки радоноопасности	Нормы/рекомендации
1	2	3	4	5
Российская Федерация	ППР (плотность потока радона)	Температурные колебания, промерзание и проницаемость грунта, активность радия, геодинамические зоны, геология, тип почвы, влияние этапов строительства на герметичность	Показатель требует трудоёмких полевых измерений на открытой местности, не учитывает конструктивные особенности здания, поэтому недостаточен для достоверной оценки радоноопасности внутри помещений и не позволяет определить канцерогенный риск для находящихся в них людей.	Производственные здания ≤ 250 мБк/(м ² с); Жилые и общественные ≤ 80 мБк/(м ² с).
	ЭРОА (эквивалентная равновесная объёмная активность)	Сезонность (учитывается частично в долгосрочных измерениях), вентиляция, изоляция фундаментов	Необходимость долгосрочных измерений (2–12 месяцев) для обеспечения достоверности существенно снижает оперативность оценки, а формальный учёт сезонных и конструктивных факторов всё равно не гарантирует её полноты.	Новые жилые здания ≤ 100 Бк/м ³ ; Эксплуатируемые жилые ≤ 200 Бк/м ³ ; Производственные ≤ 150 Бк/м ³ (новые), ≤ 300 Бк/м ³ (эксплуатируемые).
	МАЭД (мощность амбиентной эквивалентной дозы)	Мощность дозы гамма-излучения природных радионуклидов в почве и строительных материалах	Не отражает риск от ингаляции радона и его дочерних продуктов, который является основным путём облучения, что делает показатель малоинформативным для прямой оценки канцерогенного риска	Жилые помещения ≤ 0.3 мкЗв/ч; Производственные ≤ 0.6 мкЗв/ч.

1	2	3	4	5
США	Концентрация радона (пКи/л)	Геологические характеристики, уровень радиоактивности воздуха, параметры почвы и типы фундаментов.	Естественная изменчивость делает единичный замер недостоверным, а повышение достоверности через длительный мониторинг снижает оперативность и повышает трудоёмкость, не гарантируя полной точности из-за неконтролируемых факторов эксплуатации здания.	4 пКи/л (≈ 148 Бк/м ³). Рекомендация ЕРА
	Рабочий уровень (WL)	Вентиляция	Показатель требует трудоёмкого измерения дочерних продуктов радона (²¹⁸ Po, ²¹⁴ Pb, ²¹⁴ Bi, ²¹⁴ Po), что снижает оперативность, а игнорирование конструктивных особенностей здания делает его недостоверным для конкретного помещения.	1 WL = 2.08×10^{-5} Дж/м ³ \approx 130 Бк/м ³
Канада	Объёмная активность радона	Сезонные колебания (холодный период), геология (граниты, урановые руды), обязательная вентиляция в новых домах (с 2020 г.)	Требует долгосрочных (3–12 месяцев) измерений внутри помещений, что резко снижает оперативность и увеличивает трудоёмкость оценки. Учёт фактора сезонности (измерения зимой) повышает достоверность среднегодового значения, но делает процесс крайне затратным по времени.	200 Бк/м ³ (рекомендация Health Canada)
Южная Корея	Объёмная активность радона	—	Измеряется внутри помещений объектов общественного назначения (станций метро, административных зданий). Норматив носит добровольный характер, что снижает достоверность общенациональной оценки, не обеспечивая системный контроль.	—

1	2	3	4	5
Великобритания	Карта радоновых зон	Геологические карты, база данных домов, режим использования зданий	Обеспечивает оперативность оценки, но обладает низкой достоверностью для конкретных зданий так как карта не учитывает локальные геологические неоднородности и конструктивные особенности объекта	6 категорий по % домов > 200 Бк/м ³ : 1 (< 1%), 2 (1-3%), 3 (3-5%), 4 (5-10%), 5 (10-30%), 6 (> 30%).
	Объёмная активность радона	Связь с геологией региона, учёт функционального назначения помещений	Требует длительного (от 3 месяцев) и трудоёмкого мониторинга в разных комнатах, что снижает оперативность, однако его достоверность остаётся ограниченной, поскольку не учитывает конструктивные особенности здания, влияющие на инфильтрацию радона.	200 Бк/м ³ (для жилых помещений)
Чешская Республика	Радоновый индекс (RI)	Запрет летних замеров, температурная коррекция, проницаемость грунтов, активность в почвенном воздухе, вентиляция, проектирование зданий	Определяется по замерам в грунте, что трудоёмко и снижает оперативность. Его достоверность для помещений ограничена.	Классификация: RI ≤ 3: низкий риск; 3 < RI ≤ 10: умеренный риск; RI > 10: высокий риск.
	Радоновый потенциал (RP)	Учёт сезонных изменений, глубинные пробы грунта (0,8 м), режим эксплуатации зданий		Классификация: Низкий: RP < 10; Средний: 10 ≤ RP ≤ 35; Высокий: RP > 35.

Анализ зарубежных нормативно-правовых актов в области оценки радоноопасности территорий выявил как общие тенденции, так и существенные различия в подходах стран. Несмотря на повсеместное использование как краткосрочных, так и долгосрочных методов измерения содержания радона, требования к их применению и допустимости для принятия решений значительно варьируются. Анализ выявил различия в параметрах и подходах к оценке радоноопасности территорий. США применяют трёхуровневое зонирование (зоны 1–3), основанное на вероятности превышения концентрации радона 4 пКи/л (≈ 148 Бк/м³) в помещениях с учётом данных измерений (включая радиоактивность воздуха), геологического строения, свойств грунтов и типа фундаментов [37, 38]. Чешская Республика применяет систему радонового индекса (RI) и радонового потенциала (RP) участка [44, 45]. Великобритания опирается на карту радоноопасности, отображающую процент домов с прогнозируемым превышением национального уровня действия и основанную на геологических данных и обширных измерениях в помещениях [43]. В Южной Корее акцент смещён на мониторинг объектов общественного назначения [41]. Наблюдается глобальная тенденция к унификации нормативов: Всемирная организация здравоохранения (ВОЗ) рекомендует контрольный уровень радона 100 Бк/м³ для минимизации рисков для здоровья. При невозможности достижения этого уровня разрешается предельное значение до 300 Бк/м³, что соответствует ≈ 10 мЗв/год по оценкам МКРЗ [47–49].

1.3. Научное обоснование совершенствования существующих методов оценки потенциальной радоноопасности на урбанизированной территории

На сегодняшний день в Российской Федерации существующие подходы оценки потенциальной радоноопасности, основаны на измерении ППР с поверхности грунта [50]. Специалисты Российского геоэкологического центра (филиала ФГУГП «Урангеологоразведка») в период с 1991 по 2007 год провели исследование на территории Санкт-Петербурга и Ленинградской области по заказу региональных правительств в рамках программы «Радон – Санкт-Петербург», реализуемой с 1996 года, целью которого было создание карт прогнозной радоноопасности на основе анализа геологических данных и полевых измерений. Методология включала два вида измерений: определение объёмной активности радона (ОАР) в почвенном воздухе (шпуров 0,5–0,8 м, радиометр РГА-500) и ППР с поверхности грунта (метод «глухой камеры», установка РГГ-01) [51]. Согласно статье Бердникова П.В. и Горького А.В., построение карт прогнозной радоноопасности Санкт-Петербурга выполнялось по алгоритму, представленному на рисунке 1.6.

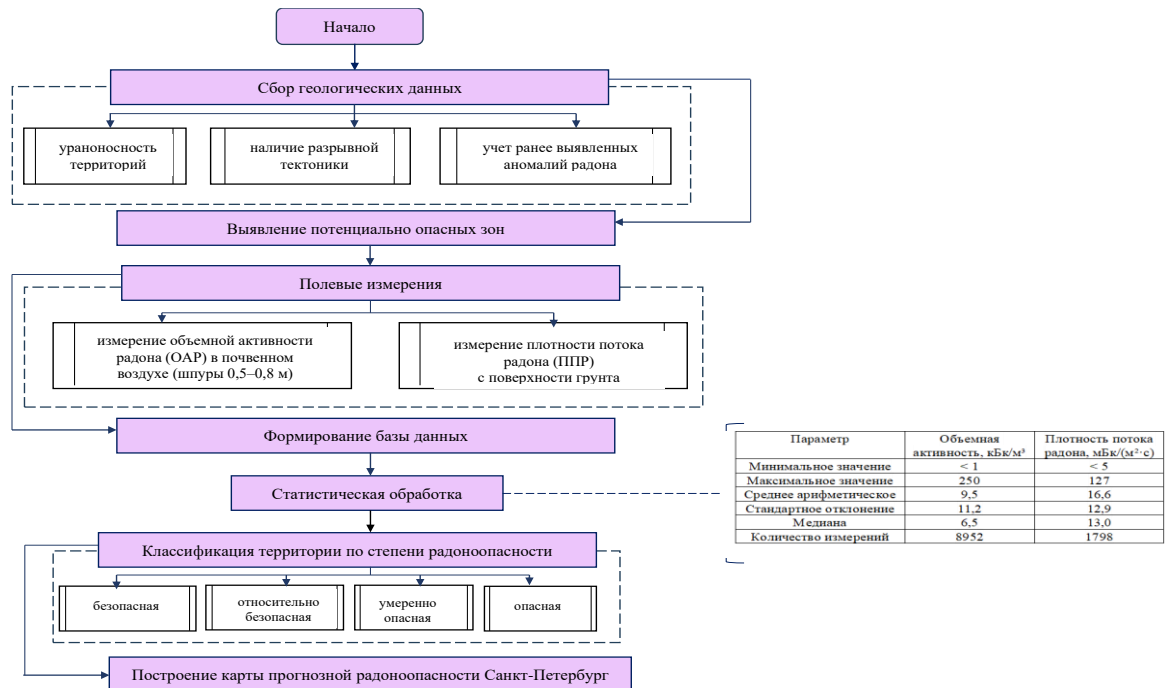


Рисунок 1.6 – Структурная схема алгоритма построения карт прогнозной радоноопасности Санкт-Петербурга

На рисунке 1.7. представлена карта прогнозной радоноопасности Санкт-Петербурга [52].

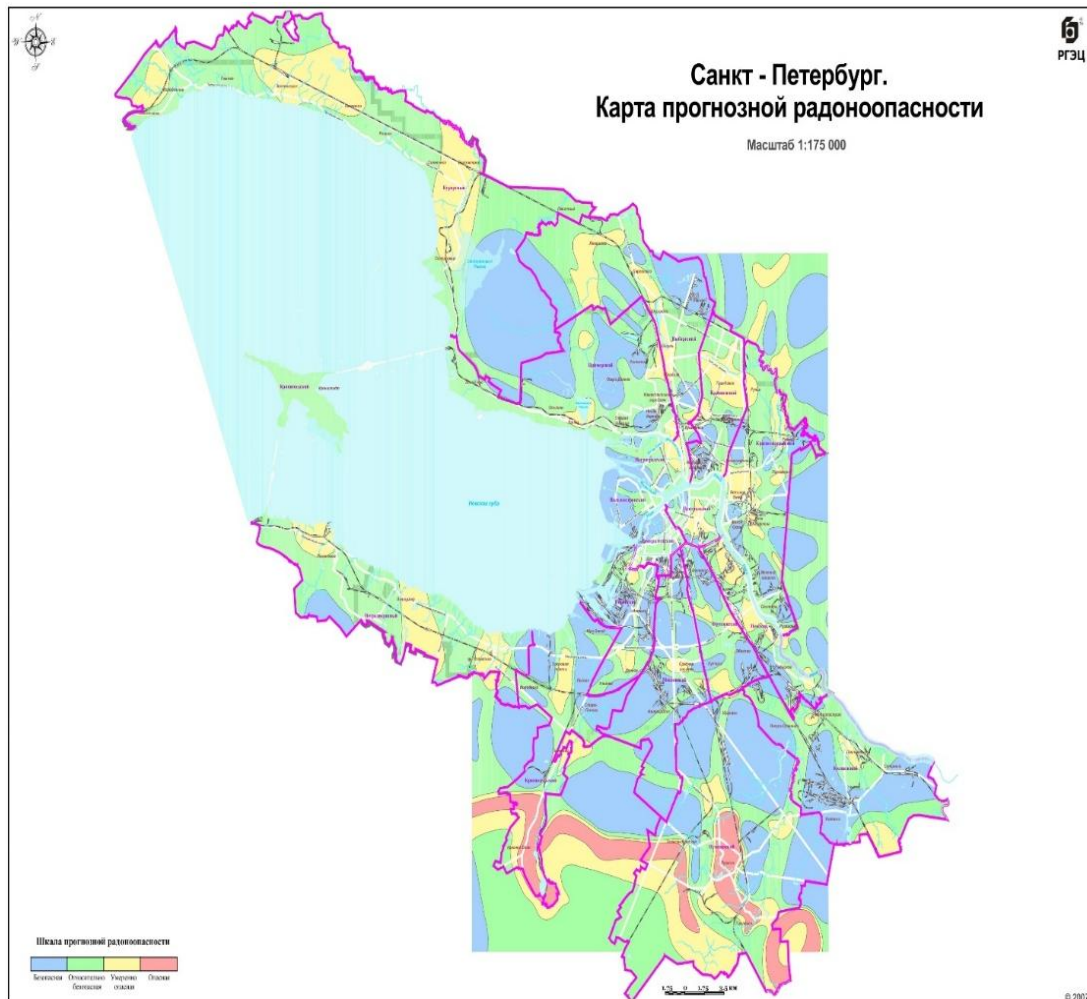


Рисунок 1.7 – Карта прогнозной радоноопасности Санкт-Петербурга [52]

Представленная методика основана на анализе геологических факторов и полевых измерениях ОАР в почвенном воздухе и ППР с поверхности грунта. На основе статистической обработки данных территория классифицируется по четырём категориям опасности и строится прогнозная карта. Однако применительно к эксплуатируемым жилым зданиям методика имеет существенные ограничения. Она ориентирована на измерения в грунте, тогда как содержание радона в помещениях определяется также конструктивными особенностями зданий, которые не включены в прогнозную модель.

Перспективным направлением представляется внедрение геоинформационных технологий, примером чего служит разработка платформы на основе WebGIS исследователями из Политехнического института Кавадо и Аве [53]. Основные ограничения метода связаны с его косвенностью и упрощением модели. Он опирается на корреляцию гамма-излучения и радона, требующую валидации, использует агрегацию данных по максимальному значению и не полностью учитывает характеристики зданий [53]. Это приводит к потенциальной неточности на уровне отдельных зданий и указывает на необходимость дальнейшей калибровки модели на реальных данных.

Исследователи из Польши и Великобритании в 2021 году предложили подход, сочетающий байесовский анализ, рандомизированный биннинг данных и метод максимальной энтропии для преодоления ограничений традиционных методов оценки радоноопасности [54].

Картографирование геогенного радонового потенциала (GRP), являющееся ключевым инструментом оценки радиационных рисков в европейской практике, сталкивается со значительными методологическими вызовами, включая отсутствие консенсуса в определении индикатора геогенного радонового потенциала и неоднородность подходов к его расчёту [55]. Эта проблема подтверждается сравнительным анализом трёх алгоритмов машинного обучения (случайный лес, метод опорных векторов, многомерные адаптивные регрессионные сплайны), демонстрирующих различную прогностическую эффективность [55].

Перспективным направлением выступает интеграция методов машинного обучения в картографические платформы. Алгоритмы ансамблевого обучения (случайный лес) демонстрируют способность выявлять сложные паттерны в данных за счёт параллельного анализа множества параметров [56]. А глубокие нейронные сети показывают высокую эффективность в задачах локализации источников и идентификации радионуклидов [57]. Принцип бутстрэп-агрегирования, лежащий в основе метода случайного леса, обеспечивает устойчивость модели к шумам и выбросам, критически важную для работы с зашумлёнными полевыми измерениями [58]. В условиях малых выборок и

случайных вариаций признаков результаты кластеризации (или классификации) становятся статистически нестабильными, а также теряют практическую значимость [59, 60]. Это особенно критично, когда пороговые значения попадают в зону неопределённости данных [59, 60].

Глубокие нейронные сети (DNN), включая свёрточные нейронные сети (CNN) и сети с долговременной кратковременной памятью (LSTM) теоретически способны преодолеть эти ограничения за счёт автоматического извлечения скрытых признаков и моделирования нелинейных взаимодействий высокой размерности [61]. В условиях ограниченных данных многослойные архитектуры склонны к запоминанию шумовых артефактов, что проявляется в генерации физически некорректных прогнозов с аномальными градиентами концентраций [61]. Дополнительным барьером выступает вычислительная ресурсоёмкость, требующая использования специализированных графических процессоров (GPU) и тензорных процессоров (TPU), что ограничивает возможность оперативного обновления карт в полевых условиях [61]. Для оценки потенциальных уровней содержания радона в помещениях были разработаны автоматические модели, классифицирующие здания по степени риска на основе соответствующих характеристик [62]. Системный анализ и одномерные математические модели, описывающие генерацию и перенос радона в пористых строительных материалах [63]. Эти модели учитывают различные механизмы миграции (диффузионный или диффузионно-адвективный), а также наличие внутренних источников радона [63].

Также исследована взаимосвязь концентрации радона на трёх геофизических станциях Азербайджана (Шеки, Шамахи, Кюрдемир) с метеорологическими параметрами на основе 13152 часовых измерений с апреля 2016 по сентябрь 2017 года [64]. При анализе всего массива суточных данных выявлена слабая корреляция, однако среднемесячные значения показали статистически значимую положительную зависимость радона от влажности на всех станциях [64]. На станциях Шамахи и Шеки также обнаружена отрицательная связь с атмосферным давлением и положительная с температурой воздуха, что авторы интерпретируют через локальные геологические условия и конструктивные особенности зданий

[64].

Моделирование пространственно-временной динамики концентрации радона требует интеграции методов, учитывающих временные флуктуации и пространственную неоднородность среды [65]. При этом применение моделей авторегрессионной дробно интегрированной скользящей средней (ARFIMA) демонстрирует преимущество перед классической моделью ARIMA [65]. Это преимущество обусловлено учётом дробных порядков дифференцирования, что позволяет эффективно описывать долгосрочную память и сезонные колебания в нестационарных временных рядах [65].

Недостаточная согласованность методологий верификации карт потоков радона усугубляется ограниченной доступностью систематических измерений потоков и связанных параметров (физико-химических свойств почв, влажности). Существующий дисбаланс между пространственно-локальными измерениями потоков (необходимыми для калибровки региональных моделей) и разреженными долгосрочными наблюдениями атмосферных концентраций (критичными для оценки репрезентативности карт) отражает фундаментальную методологическую дилемму. Разработка адаптивных схем верификации, сочетающих высокочастотный мониторинг атмосферных концентраций с модельно-обусловленной коррекцией потоков на основе характеристик подстилающей поверхности, может частично нивелировать эти ограничения, но требует динамической калибровки порогов чувствительности к пространственно-временным неоднородностям [66].

Классические статистические методы, такие как линейная регрессия, демонстрируют принципиальную неадекватность в описании сложных нелинейных взаимодействий, определяющих распределение радона [67, 68]. Ограниченность разработанного метода проявляется в игнорировании пространственной неоднородности объёмной активности торона внутри помещений (обусловленной близостью к строительным конструкциям) и вариабельности коэффициента равновесия торона с дочерними продуктами, зависящей от режима вентиляции. Эти факторы препятствуют корректной

экстраполяции точечных измерений на среднегодовые значения без учёта пространственно-временной динамики [69].

Современные подходы к оценке радоноопасности территорий сталкиваются с системными ограничениями, обусловленными сложностью взаимодействия геологических, метеорологических факторов и конструктивных особенностей здания. Ключевым вызовом остаётся интеграция пространственно-временного анализа с учётом динамики техногенных и микроклиматических параметров, что требует декомпозиции задачи на взаимодополняющие компоненты [70].

ВЫВОДЫ ПО ПЕРВОМУ РАЗДЕЛУ

Из анализа зарубежных и отечественных источников можно сделать вывод о важности исследований потенциальной радоноопасности территории для обеспечения безопасности и здоровья населения. Основная задача исследований заключается в оперативном выявлении радона и его дочерних продуктов, а также в разработке эффективных мер по предотвращению рисков для здоровья людей.

Сравнительный анализ существующих подходов к оценке радоноопасности помещений выявил значительную методологическую фрагментарность, являющуюся существенным препятствием для разработки универсальных стандартизированных решений в данной области. В качестве методологического ориентира в исследовании использована модель Агентства по охране окружающей среды США (EPA). Она системно интегрирует пять ключевых детерминант радоновой опасности: уровень радона в помещениях, геологию территории, радиоактивность почв, проницаемость грунтов и тип фундамента зданий. Данная карта была выбрана исходя из её уникальной способности сочетать законодательную базу, комплексный мультифакторный анализ и стандартизированную количественную оценку, что превосходит другие подходы в преодолении существующей фрагментации и создании универсальных решений.

Научное обоснование совершенствования методов оценки связано с внедрением гибридных моделей, комбинирующих машинное обучение (градиентный бустинг, случайный лес) и геостатистику (кригинг). Такие подходы позволяют декомпозировать задачу на пространственные и регрессионные компоненты: кригинг эффективно интерполирует региональные тренды, а алгоритмы машинного обучения моделируют влияние конструктивных особенностей здания.

Результаты главы формируют теоретическую основу для разработки методики автоматизации контроля радоноопасности урбанизированных территорий, способствующей снижению трудоёмкости, повышению оперативности и экологической безопасности окружающей среды.

РАЗДЕЛ 2. ВЫЯВЛЕНИЕ КЛЮЧЕВЫХ ФАКТОРОВ ПРИ ОЦЕНКЕ РАДОНООПАСНОСТИ В ТЕХНОГЕННОЙ СРЕДЕ УРБАНИЗИРОВАННЫХ ТЕРРИТОРИЙ

В данном разделе проводится комплексное исследование ключевых факторов, обуславливающих радоноопасность техногенных объектов, преимущественно жилых зданий, на примере Санкт-Петербурга.

Целью является системный анализ взаимосвязей между геолого-географическими условиями, метеорологическими параметрами и конструктивными особенностями зданий, которые в совокупности определяют интенсивность процессов эманации и миграции радона.

Реализация исследовательской задачи требует комплексного подхода, объединяющего анализ геолого-географических факторов (тектоники и гидрогеологии региона), изучение метеорологической обусловленности пространственно-временной вариабельности радона, а также оценку техногенных факторов (физико-химических свойств материалов и архитектурных особенностей зданий), модифицирующих пути проникновения газа в помещения.

Результаты проведённого анализа позволят определить значимость каждого из факторов в формировании радоноопасности урбанизированной территории, что создаст научную основу для последующей разработки математической модели оценки вклада факторов в радоноопасность урбанизированных территорий.

2.1. Влияние факторов среды на радоноопасность территории

Для всесторонней оценки воздействия факторов окружающей среды на уровень радона в жилых помещениях необходимо рассмотреть комплексное взаимодействие геологических, географических, метеорологических факторов, определяющих его накопление, а также конструктивных особенностей здания.

Радон поступает в здания из нескольких источников: из недр Земли (естественная миграция), из стройматериалов с повышенной радиоактивностью и с грунтовыми водами. Проникновение газа внутрь помещений происходит через трещины в фундаментах, дефекты стен и перекрытий, а также по шахтам для прокладки коммуникаций [71]. Указанные каналы инфильтрации схематически изображены на рисунке 2.1 [72].

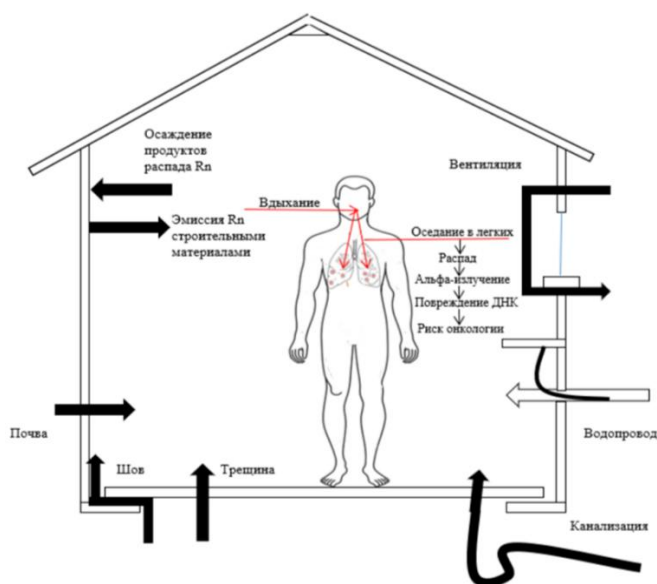


Рисунок 2.1 – Пути поступления радона в жилые постройки

Влияние факторов среды на примере Санкт-Петербурга характеризуется активной ролью тектонических разломов на границе Балтийского щита и Русской плиты, функционирующих как естественные проводники для миграции глубинных газов (включая радон) к поверхности. Грунтовые воды, насыщенные радоном, обеспечивают его транспортировку через водоносные горизонты. Расположение города в зоне сочленения двух крупных структур создаёт условия геодинамической нестабильности, усиливающей газовую эмиссию на глубинах до 100 метров.

Низменный рельеф с близким залеганием грунтовых вод и обилием торфяников способствует формированию восстановительных условий и активизации биохимических процессов (генерация метана, сероводорода), что в сочетании с техногенным загрязнением (утечки канализации, свалки) приводит к развитию агрессивной подземной среды и биокоррозии строительных материалов [71–75].

Метеорологические условия оказывают влияние на динамику концентрации радона и торона в приземном слое атмосферы. Сезонные вариации связаны с увеличением проницаемости грунта и интенсификацией конвективного переноса в пограничном слое, а также с годовым циклом температуры почвы и атмосферы [76, 77]. При этом отмечается, что эксплуатационные факторы, такие как кратность воздухообмена, связанная с режимом проветривания или отопления (печное отопление увеличивает воздухообмен), способны модулировать итоговую концентрацию в помещении, но не устраняют фундаментальную зависимость от радиационных характеристик подстилающих грунтов [78, 79].

Основной вклад в формирование радиационного фона городской среды Санкт-Петербурга обусловлен природными источниками ионизирующего излучения. На рисунке 2.2 представлен вклад (%) в эффективную дозу облучения населения Санкт-Петербурга от природных источников облучения за 2015–2023 гг. [17–25].

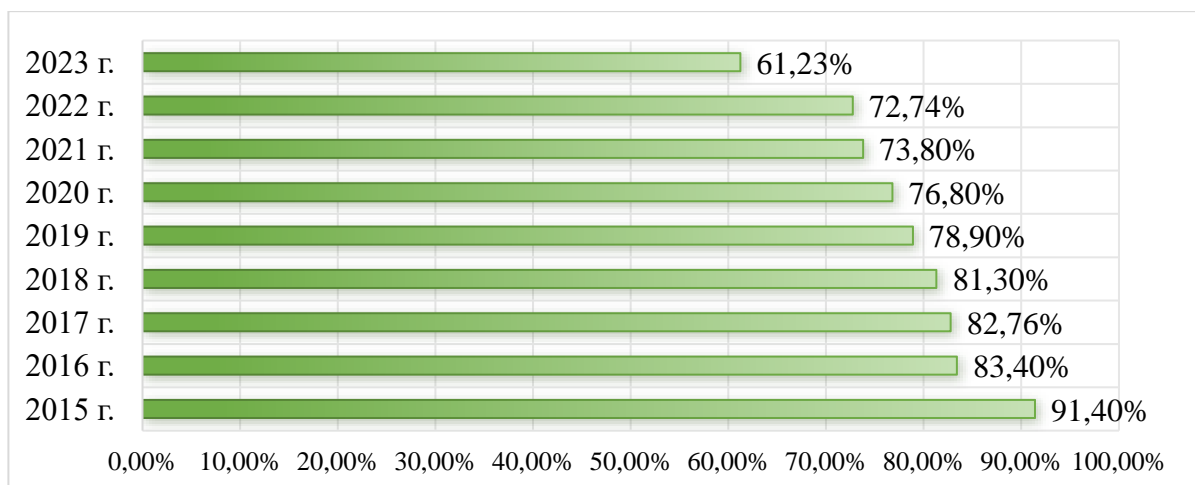


Рисунок 2.2 – Вклад (%) в эффективную дозу облучения населения Санкт-Петербурга от природных источников облучения

В Санкт-Петербурге на радиационную обстановку влияют техногенные источники, такие как ядерное оружие, промышленные отходы и атомные электростанции, на территории города и области расположено 13 объектов повышенного радиационного риска [80]. На рисунке 2.3 представлены данные о вкладе техногенных источников облучения в эффективную дозу облучения населения на территории Санкт-Петербурга за 2015–2023 гг. [17–25, 72].

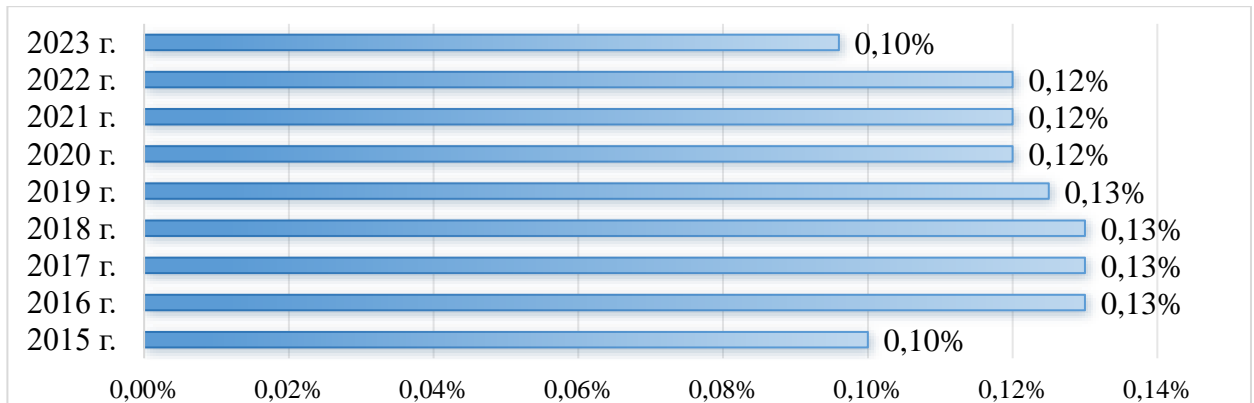


Рисунок 2.3 – Вклад (%) в эффективную дозу облучения населения Санкт-Петербурга от техногенных источников облучения [72]

Проведённый анализ радиационной обстановки в Санкт-Петербурге демонстрирует, что доминирующий вклад в формирование эффективной дозы облучения населения связан с природными источниками, главным образом радоном. Тектонические разломы на границе Русской плиты и Балтийского щита, а также миграция радона через грунтовые воды формируют базовый радоноопасный фон. Низменный рельеф, высокая влажность и сезонные метеорологические колебания модулируют пространственно-временное распределение газа, усиливая его инфильтрацию в здания через дефекты строительных конструкций [72, 81].

2.2. Влияние геологических и географических факторов среды на радоноопасность территории

Влияние геологических и географических факторов среды на радоноопасность территории также были рассмотрены на примере Санкт-Петербурга. Геологические особенности строения Санкт-Петербурга, включая разломы тектонических плит и активность тектонических зон, также способствуют усилению радоноопасности в данном регионе. Активность тектонических зон представляет собой процессы деформации Земной коры, которые происходят в результате перемещения тектонических плит. Геологическое строение подземных горных пород и изменения в расположении тектонических линий оказывают значительное влияние на активность тектонических зон [72]. На рисунке 2.4 представлена карта разломов на территории г. Санкт-Петербурга [82].

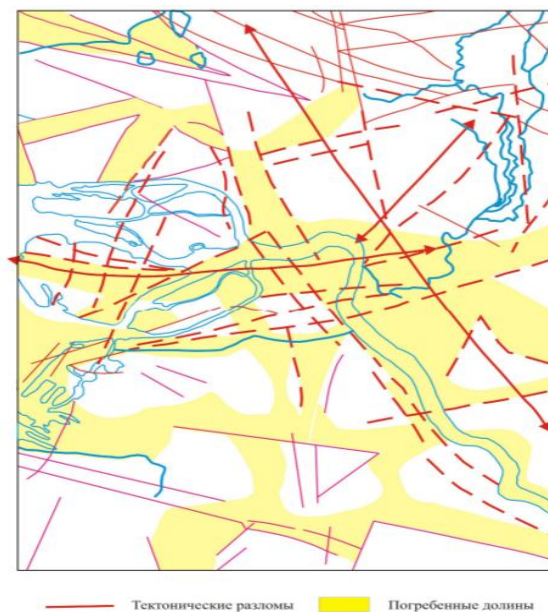


Рисунок 2.4 – Карта разломов на территории Санкт-Петербурга

Исходя из особенностей геологического расположения города, находящегося в районе геологических разломов, образовавшихся вследствие контакта Балтийского щита и Русской платформы, необходимо учитывать указанные факторы при планировании мероприятий по контролю и прогнозированию потенциальной радоноопасности Санкт-Петербурга.

В геологическом отношении Санкт-Петербург находится на северной части Восточно-Европейской платформы, где преобладают древние осадочные породы, образовавшиеся в процессе различных геологических эпох. Наличие в регионе древних разломов и зон деформации способно влиять на активность современных тектонических зон [83]. Активность тектонических плит связана с перемещением земной коры [72], что может вызывать различные проявления в геодинамике региона [84–86]. На рисунке 2.5 представлена карта зон тектонической активности [87, 88].

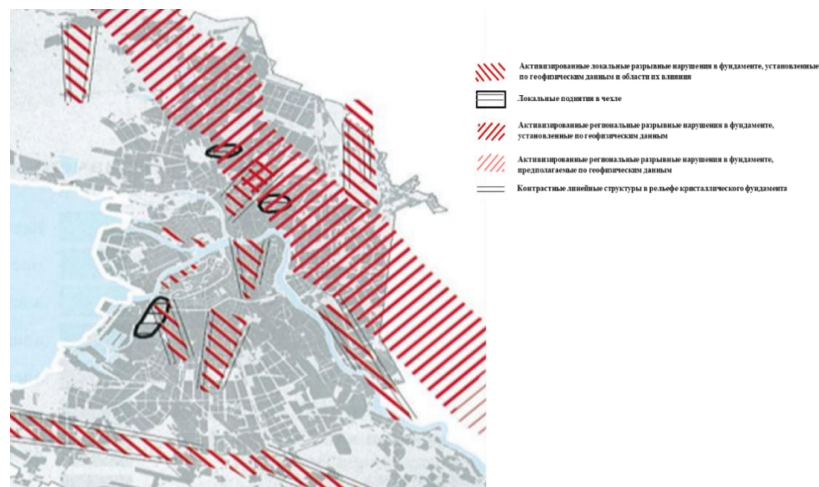


Рисунок 2.5 – Зоны тектонической активности

Грунтовые воды также играют важную роль в процессе миграции радона, выступая одним из факторов радоноопасности региона. Город расположен на Балтийской приморской равнине, что обуславливает низменный характер рельефа. Глубина залегания грунтовых вод варьируется от 0,5–1,5 до 5–10 метров, а мощность горизонта от 0,5 до 7–8 метров, изредка достигая 15–20 метров [89]. Это создаёт условия для взаимодействия подземных водоносных горизонтов с ураноносными породами, преимущественно диктионемовыми сланцами, а также зонами тектонических нарушений, характеризующихся повышенной трещиноватостью. Инфильтрация атмосферных осадков и поверхностных вод через геологические структуры приводит к растворению радона в подземных водах [89, 90]. Гидрогеологические условия региона, включая высокую проницаемость аллювиальных отложений, распространённых в поймах рек Невы и Ижоры, а также

торфяников, типичных для заболоченных участков [89], способствуют активной миграции радона в направлении земной поверхности. В зонах пересечения тектонических разломов радон, растворённый в грунтовых водах, транспортируется по системам трещин и разрывов, достигая приповерхностных слоёв грунта.

Выводы проведённого анализа свидетельствуют о том, что радоноопасность Санкт-Петербурга формируется под комплексным воздействием геологических и географических факторов. Грунтовые воды, взаимодействующие с обогащёнными ураном породами, усиливают транспортировку радона через трещиноватые зоны и аллювиальные отложения. Географическое положение города в зоне контакта платформ, низменный рельеф и высокий уровень подземных вод способствуют аккумуляции газа в приповерхностных слоях и его проникновению в сооружения [91].

2.3. Влияние метеорологических факторов среды на радоноопасность территории

Влияние метеорологических факторов среды на радоноопасность территории также рассмотрены в контексте влияния на территории Санкт-Петербурга. Метеорологические условия, такие как температурный режим, влажность, осадки, снежный покров, ледовый режим, ветер и скорость переноса воздушных масс, играют важную роль в оценке радоноопасности территорий. Санкт-Петербург, находящийся в атлантико-континентальной области умеренного пояса, имеет климат, сочетающий черты морского и континентального. Среднегодовая температура в городе составляет 5,6 °С [72], однако за последние 30 лет отмечается повышение температуры на 3,5 °С зимой и 1,5 °С летом [92, 93].

Метеорологические условия вносят свой вклад в формировании пространственно-временных паттернов концентрации радона в приземном слое атмосферы, воздействуя на процессы вертикального перемешивания и горизонтального переноса воздушных масс. Ключевым фактором, обуславливающим радоноопасность в Санкт-Петербурге, выступают характерные

для холодного периода температурные инверсии. В условиях инверсии подавление вертикального турбулентного обмена и снижение скоростей ветра существенно ограничивают дисперсию радона и его дочерних продуктов, приводя к их аккумуляции в приземном слое атмосферы. В такие периоды радон, эманлирующий из почв и геологических разломов, концентрируется в нижних слоях атмосферы, повышая радиационные риски для населения. Напротив, усиление конвекции и турбулентности в дневное время или при сильных ветрах способствует перемешиванию воздушных масс, снижая приземные концентрации радона за счёт его разбавления в высотных слоях [94]. Однако спектральный анализ данных по радону, температуре, влажности и атмосферному давлению выявил отсутствие значимой корреляции между метеорологическими параметрами и сезонной динамикой радона [95].

Суточные вариации концентрации радона обусловлены циклическими изменениями в структуре глобального пограничного слоя. В ночные часы формируется устойчивый ночной пограничный слой, который ограничивает вертикальный обмен и способствует накоплению радона в приземном слое. После восхода солнца прогревание поверхности усиливает конвекцию, разрушающую ночной пограничный слой и распределяющую радон в слое высотой до 2 километров, что приводит к снижению его концентрации у поверхности [94]. В замкнутых пространствах, таких как туннели или скважины, суточные колебания радона отражают влияние внешних температурных градиентов [96].

Осадки, характерные для климата Санкт-Петербурга, играют двойственную роль. С одной стороны, дожди вымывают радон и его дочерние продукты из атмосферы, особенно заметно снижая концентрации в тёплые сезоны. С другой стороны, в периоды без осадков суточные колебания радона становятся более выраженными: максимум наблюдается в предрассветные часы при минимальной турбулентности, а минимум днём [97].

Региональные метеорологические особенности, такие как частота инверсий, мощность снежного покрова и преобладающие ветровые режимы, формируют специфику сезонных паттернов. Так, для Санкт-Петербурга климат аналогичный

стране Финляндии: зимние максимумы радона выражены сильнее, чем в Польше, что связано с устойчивостью снежного покрова, снижающего эмиссию радона из почвы, но усиливающего его накопление в приземном слое [97].

Атмосферное давление модулирует миграцию радона в открытых системах, таких как неглубокие скважины. В долине Геваним (Израиль) зафиксирована антикорреляция между внутрисезонными колебаниями давления и концентрацией радона в воздушном пространстве скважин: повышение давления подавляет эманацію газа из пород, а его снижение – усиливает. На глубине 80 метров в открытых скважинах долины Геваним внутрисезонные волны атмосферного давления вызывают антикоррелированные многодневные изменения концентрации радона в воздушном пространстве скважины, подавляя при этом выраженные суточные колебания [96]. Роль солнечной активности в распределении радона остаётся малоизученной, однако длительные наблюдения в Горном Алтае выявили антикорреляцию между солнечным потоком F10.7 и среднегодовой объёмной активностью радона [98]. Предполагается, что модуляция ионосферных потенциалов под воздействием солнечной радиации может влиять на миграцию радона через изменение электрохимических свойств почв. Вклад радона в глобальную электрическую цепь также требует уточнения: моделирование с использованием химико-климатической модели SOCOLv3 показало, что ионизация от радона создаёт локальные аномалии в проводимости атмосферы [98].

Ключевым фактором радоноопасности, особенно в холодный период, являются температурные инверсии, подавляющие вертикальный обмен и приводящие к накоплению радона. Суточные вариации концентрации преимущественно обусловлены циклическим формированием и разрушением ночного приземного инверсионного слоя под влиянием термической конвекции [99].

2.4. Влияние конструктивных особенностей зданий на радоноопасность урбанизированной территории

В мегаполисах техногенные вибрации от транспортной инфраструктуры служат дополнительным фактором, усиливающим выделение природных газов. Исследования в центре Москвы (1998 г.) показали, что водород (который по своим миграционным свойствам аналогичен радону) выделяется в дневное время втрое интенсивнее, чем ночью после остановки движения поездов метро. Динамика эмиссии газа чётко коррелировала с уровнем сейсмоакустических колебаний [100]. Влияние конструктивных особенностей зданий на радоноопасность территории также были рассмотрены на примере Санкт-Петербурга. Основанный в 1703 году город по указу Петра Великого, Санкт-Петербург изначально располагался на заболоченной дельте Невы. Одним из старейших сохранившихся зданий является Летний дворец Петра I, строительство которого началось в 1710 году [101]. Первые здания в Санкт-Петербурге были деревянными. Массовое строительство стало возможным после указа 1713 года об организации кирпичных заводов, предписывавшего производить не менее миллиона кирпичей в год. К 1730-му году каменные здания уже определяли облик центра города, а к началу XIX века значительная часть застройки была выполнена из камня [102]. Основные материалы исторической застройки и их радиационные характеристики:

— путиловская плита (известняк). Широко использовалась для фундаментов, цоколей и лестниц. Известняк добывался в карьерах у Ладожского озера. Благодаря своим особенностям структуры эти плиты образуют щели, через которые радон может проникать во внутреннее пространство здания, увеличивая уровень радиационного загрязнения в помещении;

— гранит. Применялся для облицовки фасадов (напр., Петровские ворота Петропавловской крепости). Граниты могут содержать природные радионуклиды (^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K). Как отмечено в исследованиях строительных материалов, розовые и серые граниты демонстрируют повышенную активность, что потенциально увеличивает уровня радона;

— пудостский камень (травертин). Пористый известняк из села Пудость использовался в декоративных элементах (напр., Петергоф). В источниках отсутствуют данные о его радиоактивности;

— кирпич. Основной материал стен петровского периода. Это малоопасный материал с минимальным вкладом в радоновую нагрузку;

— песок. Использовался в кладочных растворах. Как и кирпич, относится к категории безопасных материалов [102–105].

Современные строительные практики, предполагающие использование бетона с гранитным щебнем, содержащим примеси радия, урана и тория, вносят дополнительный вклад в радиационный баланс помещений. Однако исследования показывают, что вклад стройматериалов в общее поступление радона (2 Бк/м^3 в час) существенно ниже почвенной эмиссии (20 Бк/м^3 в час для одноэтажных зданий) [100]. Особую опасность представляют материалы, произведённые с применением фосфогипса и отходов обогатительных фабрик, обладающих высокой удельной активностью из-за концентрации радия-226 и тория-232. В 1980-х годах произошёл отказ от применения фосфогипса в производстве газобетона [100].

Согласно стандарту ГОСТ 30108-94 «Материалы и изделия строительные» материалы подразделяются на классы в соответствии с их удельной эффективной активностью естественных радионуклидов [72]. В таблице 2.1 представлены критерии для принятия решения о приемлемости использования строительных материалов в соответствии с гигиеническими нормами.

Таблица 2.1 – Критерии для принятия решения об использовании строительных материалов согласно гигиеническим нормативам [106]

Удельная эффективная активность, Бк/кг	Класс материала	Область применения
До 370	I	Все виды строительства
Св. 370 до 740	II	Дорожное строительство в пределах населённых пунктов и зон перспективной застройки, строительство производственных сооружений
От 740 до 1500	III	Дорожное строительство вне населённых пунктов
Св. 1500 до 4000	IV	Вопрос об использовании материала решается по согласованию с Госкомсанэпиднадзором

Радон может проникать в помещения сквозь трещины и отверстия в фундаменте, щели в стенах и кровле, окна, водостоки и пространство вокруг труб. Это особенно распространено в регионах с умеренным и холодным климатом из-за тяги, возникающей вследствие разницы температур, в силу которой давление воздуха в зданиях обычно немного ниже, чем под зданием. Исследования, проведённые во многих странах, показывают, что максимальная концентрация радона фиксируется в отопительный сезон, а минимальная в летнее время [109]. Нормирование пористости строительных материалов осуществляется по-разному в зависимости от их типа. Для керамических материалов (кирпич, камень) в соответствии с ГОСТ 530-2012 «Кирпич и камень керамические» ключевым нормируемым параметром, характеризующим долю пустот в объёме изделия, является пустотность. Для тяжёлых и мелкозернистых бетонов ситуация иная: согласно ГОСТ 12730.4-2020 «Бетоны. Методы определения параметров пористости» показатель пористости не относится к нормируемым характеристикам. Данный стандарт регламентирует исключительно методики лабораторного определения параметров пористости (общей, открытой, условно-закрытой), основанные на обязательных испытаниях по определению плотности, водопоглощения и сорбционной влажности [107, 108]. Внутри помещений радон не выветривается так же быстро, как снаружи, и накапливается в замкнутых пространствах. Поэтому плохая вентиляция может приводить к повышению концентрации радона в помещениях [109]. В зданиях без принудительной вентиляции воздухообмен с атмосферой поддерживается за счёт ветра и теплового напора. Возникающая циркуляция выглядит так: тёплый внутренний воздух выходит наружу сквозь неплотности в стенах, окнах и дверях, а уличный воздух, наоборот, затягивается внутрь через ограждающие конструкции, лестничные клетки и смежные помещения [2, 109].

Техногенные вибрации от транспорта увеличили его эмиссию из почвы, а недостаточная вентиляция привела к накоплению радона в помещениях, особенно зимой [110].

2.5. Важность факторов при оценке радоноопасности в техногенной среде урбанизированных территорий

На основании проведённого в предыдущих параграфах анализа географических, геологических, метеорологических факторов среды и конструктивных особенностей здания, формирующих радоноопасность на примере Санкт-Петербурга, была осуществлена комплексная оценка и систематизация их значимости.

Ключевым результатом данного синтеза является структурирование факторов согласно их функциональной роли в единой миграционной цепи «источник – путь поступления – накопление». Такой подход обеспечивает переход от описательного рассмотрения к прикладной оценке, где каждый элемент получает качественную характеристику степени своего влияния на радоноопасность территории.

Для визуализации и практического применения полученных результатов разработана таблица 2.2 «Важность факторов при оценке радоноопасности в техногенной среде урбанизированных территорий», представляющая собой систематизированное ранжирование факторов по их важности для оценки радоноопасности урбанизированных территорий.

Представленная систематизация служит непосредственным теоретико-методологическим фундаментом для последующего этапа исследования. Выделенные группы ключевых факторов и оценка их относительной значимости задают структуру и определяют приоритеты входных параметров для разработки математической модели контроля радоноопасности урбанизированных территорий.

Таблица 2.2 – Важность факторов при оценке радоноопасности в техногенной среде урбанизированных территорий [111]

Группа факторов	Фактор	Степень влияния на радон	Важность фактора при оценке радоноопасности в техногенной среде урбанизированных территорий
1	2	3	4
Геологические (источник)	Тектонические разломы и активность	Высокая	Естественные проводники для миграции, усиливают газовую эмиссию
	Грунтовые воды	Высокая	Транспортировка радона через водоносные горизонты
	Наличие ураноносных пород (диктионемовые сланцы)	Высокая	Первичный источник радона
Географические	Низменный рельеф	Высокая	Способствует аккумуляции газа в приповерхностных слоях, близость грунтовых вод
	Зона сочленения крупных тектонических структур (платформ)	Высокая	Создает условия геодинамической нестабильности, усиливающей эмиссию
Метеорологические	Температурная стратификация (инверсии)	Вторичная	Влияет на суточные колебания (цикл инверсия-конвекция)
	Ветер и турбулентность	Вторичная	Влияет на суточные колебания
	Атмосферное давление	Вторичная	Влияет на многодневное колебания, модулируя поток радона из грунта.
	Осадки	Вторичная	Вымывание из атмосферы и влияние на суточные колебания
	Облачность	Вторичная	Влияет на интенсивность ночных инверсий, косвенно влияет на суточные максимумы

1	2	3	4
Конструктивные особенности зданий (путь поступления)	Тип фундамента, трещины, дефекты стен и перекрытий	Высокая	Основные каналы инфильтрации радона из грунта
	Пористость и материал строительных конструкций (например, путиловская плита)	Высокая	Пористые материалы могут служить проводником для радона
Эксплуатационные (накопление)	Система вентиляции / воздухообмен	Заметная	Плохая вентиляция приводит к накоплению радона в помещении
	Сезон (отопительный период)	Вторичная	Максимальная концентрация зимой из-за меньшего воздухообмена и усиления «эффекта трубы»
Техногенные	Техногенные вибрации (транспорт)	Заметная	Дополнительный фактор, усиливающий естественную эмиссию в урбанизированной среде
Строительные материалы (источник)	Материалы с высокой удельной активностью (некоторые граниты, бетон с гранитным щебнем)	Низкая	Вклад существенно ниже, чем из грунта: 2 Бк/м ³ против 20 Бк/м ³

ВЫВОДЫ ПО ВТОРОМУ РАЗДЕЛУ

Проведённый анализ факторов среды, определяющих радоноопасность территории Санкт-Петербурга, позволяет констатировать, что формирование радиационного риска для населения является следствием сложного взаимодействия факторов среды и конструктивных особенностей зданий.

Геологическое строение территории выступает фундаментальной основой радоноопасности. Существенную роль в перемещении газа играют грунтовые воды, залегающие на небольшой глубине (0,5–10 метров) и характеризующиеся значительной мощностью горизонта (0,5–8 метров, редко до 15–20 метров).

Метеорологические условия Санкт-Петербурга модулируют пространственно-временное распределение радона и влияют на интенсивность его миграции в помещения.

Антропогенная деятельность не создаёт значимых новых источников радона в масштабах города, но существенно усиливает риски экспозиции населения через модификацию путей миграции и накопления газа. Техногенные вибрации, генерируемые транспортной инфраструктурой (особенно метрополитеном), усиливают эмиссию радона из геологической среды [100]. Недостаточный воздухообмен в помещениях, особенно в отопительный сезон из-за теплового напора и снижения проветривания, является решающим фактором накопления радона до уровней, представляющих радиационный риск. Пористость строительных материалов, опосредованно регулируемая через параметры плотности и водопоглощения, существенно влияет на диффузионный перенос газа [100, 106–109]. Исходя из всего вышесказанного, эффективное управление радиационными рисками, обусловленными радоном на территории Санкт-Петербурга, требует комплексного учёта выявленных факторов среды, а также конструктивных особенностей здания в условиях урбанизированной территории. Особое внимание должно быть уделено конструктивным особенностям зданий, включая параметры фундаментов, герметичность конструкций и характеристики строительных материалов, поскольку именно эти элементы определяют интенсивность инфильтрации и накопления радона в помещениях.

РАЗДЕЛ 3. РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ И АЛГОРИТМА АВТОМАТИЗАЦИИ КОНТРОЛЯ РАДОНООПАСНОСТИ УРБАНИЗИРОВАННЫХ ТЕРРИТОРИЙ

В разделе представлен комплексный подход к автоматизации контроля радоноопасности урбанизированных территорий, включающий структурные схемы, математические модели, алгоритм и программно-техническое обеспечение.

Целью третьего раздела является разработка и верификация гибридной вычислительной архитектуры, синтезирующей методы машинного обучения и пространственной геостатистики для преодоления методологических ограничений традиционных геостатистических подходов, а также разработка математической модели оценки канцерогенного риска.

Для достижения поставленной цели необходимо рассмотреть принципы декомпозиции пространственной изменчивости уровня радона на детерминированную и стохастическую компоненты, реализовать комбинацию алгоритма градиентного бустинга для регрессионного анализа нелинейных взаимосвязей и ординарного кригинга для пространственной интерполяции остатков, провести валидацию модели на выборке измерений ЭРОА изотопов радона, разработать модель для оценки канцерогенного риска согласно публикациям международной комиссии по радиационной защите.

Алгоритм автоматизации контроля радоноопасности территорий позволит учесть географические, геологические и конструктивные особенности зданий и доказать эффективность гибридной модели.

Математическая модель контроля канцерогенного риска облучения радоном позволит проводить количественную оценку канцерогенных рисков, адаптированную к региональным особенностям путём динамической адаптации глобальных эпидемиологических коэффициентов.

3.1. Разработка математической модели и структурной схемы процесса оценки вклада конструктивных особенностей зданий на урбанизированных территориях в формирование эквивалентной равновесной объёмной активности изотопов радона в жилых зданиях

Первый этап. В МР 2.6.1.0333-23 «Радиационный контроль и санитарно-эпидемиологическая оценка жилых, общественных и производственных зданий и сооружений по показателям радиационной безопасности» представлены формулы для расчёта среднегодовой ЭРОА изотопов радона в воздухе помещения, неопределённости оценки среднегодовой ЭРОА изотопов радона, а также их суммы для эксплуатируемых зданий с круглосуточным пребыванием людей с применением экспрессного метода оценки [16].

Расчёт среднегодовой ЭРОА изотопов радона 3.1 [33, 112, 113]:

$$C = C_{Rn} + 4,6 \times C_{Tn}, \quad (3.1)$$

где C – среднегодовая ЭРОА изотопов радона в воздухе в Бк/м³;

C_{Rn} – измеренное значение ЭРОА радона в Бк/м³;

C_{Tn} – измеренное значение ЭРОА торона в Бк/м³.

Суммарная неопределённость оценки среднегодовой ЭРОА изотопов радона (Бк/м³) рассчитывают по формуле 3.2 [33, 112, 113]:

$$U(C) = \sqrt{U(C_{Rn})^2 + 21,16 \times U(C_{Tn})^2}, \quad (3.2)$$

где $U(C)$ – суммарная неопределённость оценки среднегодовой ЭРОА изотопов радона в Бк/м³;

$U(C_{Rn})$ – абсолютные расширенные неопределённости результатов измерения ЭРОА радона в воздухе помещений соответственно, определяемые в соответствии с методикой измерений или руководством по эксплуатации средства измерений в Бк/м³;

$U(C_{Tn})$ – абсолютные расширенные неопределённости результатов измерения ЭРОА торона в воздухе помещений соответственно, определяемые в соответствии с методикой измерений или руководством по эксплуатации средства измерений в Бк/м³.

Далее определим среднегодовую ЭРОА изотопов радона в воздухе исследуемых зданий с учётом неопределённости измерений 3.3 [33, 112, 113].

$$C + U(C) < 200 \text{ Бк/м}^3, \quad (3.3)$$

Второй этап: обнаружение и обработка выбросов в исходных данных. Выбросы определяются как статистически значимые аномалии, существенно отклоняющиеся от основного распределения. Их присутствие искажает результаты анализа и снижает достоверность выводов, что требует применения устойчивых методов идентификации. Для их выявления применялись метод межквартильного размаха (IQR) и метод k ближайших соседей (k -NN).

Для выявления аномальных наблюдений используется метод k ближайших соседей, основанный на анализе расстояний между точками. Параметр k , определяющий количество учитываемых соседей, выбирается равным 5, что обеспечивает баланс между устойчивостью к случайному шуму и чувствительностью к локальным отклонениям: при меньших значениях (например, $k=3$) возрастает риск ложного обнаружения выбросов из-за локальных флуктуаций, тогда как увеличение k до 10 приводит к сглаживанию индивидуальных особенностей данных и снижает способность выявлять изолированные точки [114].

Для каждой точки x_i определяются индексы её k ближайших соседей $N_k(x_i)$ через алгоритм k -NN. Среднее расстояние вычисляется как представлено в формуле 3.4:

$$\bar{d}_i = \frac{1}{k} \sum_{j \in N_k(x_i)} d_{\text{hav}}(x_i, x_j), \quad (3.4)$$

где d_i – среднее расстояние от объекта x_i до его k ближайших соседей;

k – количество соседей, учитываемых в расчёте;

$d_{\text{hav}}(x_i, x_j)$ – гаверсинусное расстояние между точками x_i и x_j ;

$N_k(x_i)$ – множество индексов k ближайших соседей точки x_i ;

\bar{d}_i интерпретируются как выбросы в областях с низкой локальной плотностью. Порог τ задаётся через $(1-\alpha)$ перцентиль распределения $\{\bar{d}_i\}$ по формуле 3.5:

$$\tau = Q_{1-\alpha}(\{\bar{d}_i\}), \quad (3.5)$$

где τ – порог (для определения того, что считать выбросом);

Q_{1-a} – квантильная функция;

$\alpha \in [0,1]$ – $a = 0,05$ для 95-го перцентиля.

Точка x_i классифицируется как выброс, если: $\bar{d}_i > \tau$ [115, 116].

Согласно национальному стандарту Российской Федерации ГОСТ Р ИСО 16269-4-2017 межквартильный размах (IQR) вычисляется по формуле 3.6:

$$IQR = Q_3 - Q_1, \quad (3.6)$$

где IQR – межквартильный размах;

Q_3 – третий квартиль, верхний выборочный квартиль;

Q_1 – первый квартиль, нижний выборочный квартиль [117, 118];

В специализированных пакетах программ статистической обработки данных внутреннюю верхнюю границу вычисляют по формуле 3.7:

$$\text{upper fence} = Q_3 + k \times (Q_3 - Q_1), \quad (3.7)$$

где upper fence – внутренняя верхняя граница;

$k = 1,5$.

В классическом подходе при $k = 1,5$ верхнюю границу называют «внутренней верхней границей», а при $k = 3$ верхнюю границу называют «внешней нижней границей» [117, 118].

Внутреннюю нижнюю границу вычисляют по формуле 3.8:

$$\text{lower fence} = Q_1 - k \times (Q_3 - Q_1), \quad (3.8)$$

где lower fence – внутренняя нижняя граница.

Метод межквартильного размаха (IQR) применяли, чтобы найти статистические выбросы [118].

Третий этап: преобразование номинальных признаков (тип фундамента здания) в числовое представление, пригодное для статистического анализа и машинного обучения. Для переменных без естественного порядка применяется бинарное кодирование. Этот метод преобразует каждую категорию в отдельный бинарный признак (0/1), исключая ложные порядковые зависимости и обеспечивая интерпретируемость [119]. Математическое представление бинарного кодирования включает определение уникального вектора v_i для каждой уникальной

категории i в категориальной переменной с N различными категориями. Каждый вектор v_i имеет длину N , и его элементы задаются по формуле 3.9:

$$v_i[j] = \begin{cases} 1, & \text{если } j=i \\ 0, & \text{иначе} \end{cases} \quad (3.9)$$

где v_i – уникальный вектор;

i – i -тая категория;

j – индекс категории.

Вектор с бинарным кодированием для категории i имеет «1» в индексе, соответствующем i , и 0 в остальных. Этот метод обеспечивает однозначное числовое представление каждой категории в наборе данных. Для N наблюдений и K категорий результирующая матрица имеет размер $N \times K$, где каждая строка содержит ровно одну единицу [120].

Четвёртый этап: преобразование Бокса-Кокса для целевой переменной с целью коррекции асимметрии распределения. Оно стабилизирует дисперсию и приближает распределение данных к нормальному. Преобразование методом Бокса-Кокса в общем виде можно представить по формуле 3.10:

$$\begin{cases} x_i' = \frac{x_i^\lambda - 1}{\lambda}, & \lambda \neq 0 \\ x_i' = \ln(x), & \lambda = 0 \end{cases} \quad (3.10)$$

где x_i' – преобразованное значение;

λ – параметр преобразования, который выбирается для оптимизации нормальности распределения после преобразования;

x_i – исходное значение (должно быть положительным) [121].

Оптимальный параметр λ в преобразовании методом Бокса-Кокса подбирается для максимального приближения распределения преобразованной последовательности к нормальному путём максимизации логарифма функции правдоподобия (формула 3.12):

$$f(x, \lambda) = -\frac{N}{2} \ln \left[\sum_{i=0}^{N-1} \frac{(x_i(\lambda) - \bar{x}(\lambda))^2}{N} \right] + (\lambda - 1) \times \sum_{i=0}^{N-1} \ln(x_i), \quad (3.12)$$

где $f(x, \lambda)$ – функции правдоподобия;

N – количество наблюдений;

$\bar{x}(\lambda)$ – среднее преобразованных данных;

x_i – исходное значение;

$\ln x_i$ – натуральный логарифм исходных значений (учитывает влияние масштаба).

$$\bar{x}(\lambda) = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} x_i(\lambda), \quad (3.13)$$

То есть необходимо выбрать такое значение параметра лямбда, при котором данная функция принимает максимальное значение [122]. Преобразование методом Бокса-Кокса имеет важное ограничение: исходные данные должны быть строго положительными ($x > 0$). Это связано с тем, что преобразование включает логарифмирование при $\lambda = 0$.

Пятый этап: нормализация числовых признаков, включая целевую переменную, путём масштабирования значений к диапазону $[0, 1]$ по формуле 3.14:

$$x_{\text{norm}} = \frac{x - \min(x)}{\max(x) - \min(x)}, \quad (3.14)$$

где x_{norm} – нормализованная среднегодовая ЭРОА изотопов радона в жилых зданиях с учётом неопределённости оценки;

x – среднегодовая ЭРОА изотопов радона в жилых зданиях с учётом неопределённости оценки в Бк/м³ [16];

$\max(x)$ – максимальное значение из выборки среднегодовой ЭРОА изотопов радона в жилых зданиях с учётом неопределённости оценки в Бк/м³;

$\min(x)$ – минимальное значение из выборки среднегодовой ЭРОА изотопов радона в жилых зданиях с учётом неопределённости оценки в Бк/м³.

Данная процедура устраняет влияние разнородных масштабов измерений, обеспечивает сопоставимость вклада признаков в модель [123].

Шестой этап: корреляционный анализ для количественной оценки силы и направления линейных взаимосвязей между переменными. Для этого применяется коэффициент корреляции Пирсона, рассчитываемый через ковариацию и стандартные отклонения признаков. Выборочной ковариацией $\text{cov}(X, Y)$ рассчитываем по формуле 3.15:

$$\text{cov}(X, Y) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}), \quad (3.15)$$

где $\text{cov}(X, Y)$ – ковариация случайной величины X и Y ;

где \bar{x} – среднее значение выборки X ;

\bar{y} – среднее значение выборки Y ;

n – объем выборки;

x_j – j -тый элемент выборки X ;

y_i – k -тый элемент выборки Y .

Ковариация характеризует рассеивание значений выборок X и Y , а также линейную связь между ними. Выборочная ковариационная матрица имеет вид, представленный в формуле 3.16:

$$\begin{pmatrix} \text{cov}(X;X) & \text{cov}(X;Y) \\ \text{cov}(Y;X) & \text{cov}(Y;Y) \end{pmatrix}, \quad (3.16)$$

Качественная оценка тесноты связи между величинами выявляется по шкале Чеддока таблица 3.1.

Таблица 3.1 – Шкала Чеддока

Связь	Значение коэффициента корреляции при наличии	
	прямая связь	обратная связь
Слабая	0,1 – 0,3	(-0,1) – (-0,3)
Умеренная	0,3 – 0,5	(-0,3) – (-0,5)
Заметная	0,5 – 0,7	(-0,5) – (-0,7)
Высокая	0,7 – 0,9	(-0,7) – (-0,9)
Весьма высокая	0,9 – 0,99	(-0,9) – (-0,99)

Выборочной корреляционной матрицей называется матрица вида (формула 3.17):

$$\begin{pmatrix} 1 & r_{xy} \\ r_{yx} & 1 \end{pmatrix}, \quad (3.17)$$

Коэффициент корреляции Пирсона для двух переменных x_j и y_k представлен в формуле 3.18:

$$r_{XY} = \frac{\text{cov}(X;Y)}{\sigma_X \times \sigma_Y} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \times \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}, \quad (3.18)$$

где r_{XY} – коэффициент корреляции Пирсона;

σ – стандартное отклонение [124].

Седьмой этап: процесс оценки вклада конструктивных особенностей зданий на урбанизированных территориях. Для заданного набора данных D определены n точек данных, в котором каждая точка данных – это набор из объясняемой (зависимой) переменной y_i и множества из m независимых факторов X_i (формула 3.19):

$$D = \{(y_i, X_i)\} \quad (|D| = n, X_i \in \mathbb{R}^m, y_i \in \mathbb{R}), \quad (3.19)$$

где D – набор данных;

\mathbb{R} – стандартное обозначение для множества действительных чисел;

y_i – зависимая переменная;

n – количество точек;

$X_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{im})$ – вектор из m независимых факторов [125].

В данной работе поставлена задача идентификации наиболее значимых предикторов из множества независимых факторов $X_i \in \mathbb{R}^m$, существенно влияющих [125] на целевую переменную $y_i \in \mathbb{R}$. Математически проблема формулируется как поиск оптимального подмножества признаков, максимизирующего объяснительную способность модели относительно y_i [125].

Применяется аддитивное моделирование, в котором предсказание \hat{y}_i для i -го наблюдения представляется суммой K функций по формуле 3.20:

$$\hat{y}_i = \sum_{k=1}^K f_k(X_i), \quad (3.20)$$

где \hat{y}_i – предсказанное значение для i -й точки;

$f_k(X_i)$ – функция, которая принадлежит к подмножеству классификационных и регрессионных деревьев (CART);

k – количество деревьев (итераций бустинга) [125].

Класс CART описывается формулой 3.21:

$$\text{CART} = \{f(X) = w_{q(x)}\} \quad (q: \mathbb{R}^m \rightarrow T, w \in \mathbb{R}^T), \quad (3.21)$$

где CART – деревья классификации и регрессии;

$f(X)$ – предсказывает значение (класс или число) для входного вектора X ;

$q(X)$ – описывает дерево, вершинами которого являются правила относительно значений X ;

$f(X) = w_{q(x)}$ – выход дерева для объекта X ;

$q: R^m \rightarrow T$ – функция q отображает вектор признаков $w \in R^T$ в лист дерева T ;

R^m – пространство признаков;

T – множество листьев дерева (терминальных узлов);

$w \in R^T$ – вектор весов всех листьев дерева [125, 126].

Обучение модели сводится к минимизации регуляризованного функционала L , который объединяет функцию потерь (отклонение предсказаний от фактических значений) и штраф за сложность дерева (глубину, число узлов). Минимизация выполняется итеративным градиентным спуском: на каждом шаге вычисляется антиградиент ∇L , и параметры (q, w) корректируются так, чтобы уменьшить ошибку, не допуская переобучения. Регуляризация обеспечивает отбор наиболее информативных признаков и построение компактных деревьев, сохраняя баланс между точностью и интерпретируемостью [126].

На рисунке 3.1 представлена математическая модель и структурная схема процесса оценки вклада конструктивных особенностей зданий на урбанизированных территориях.

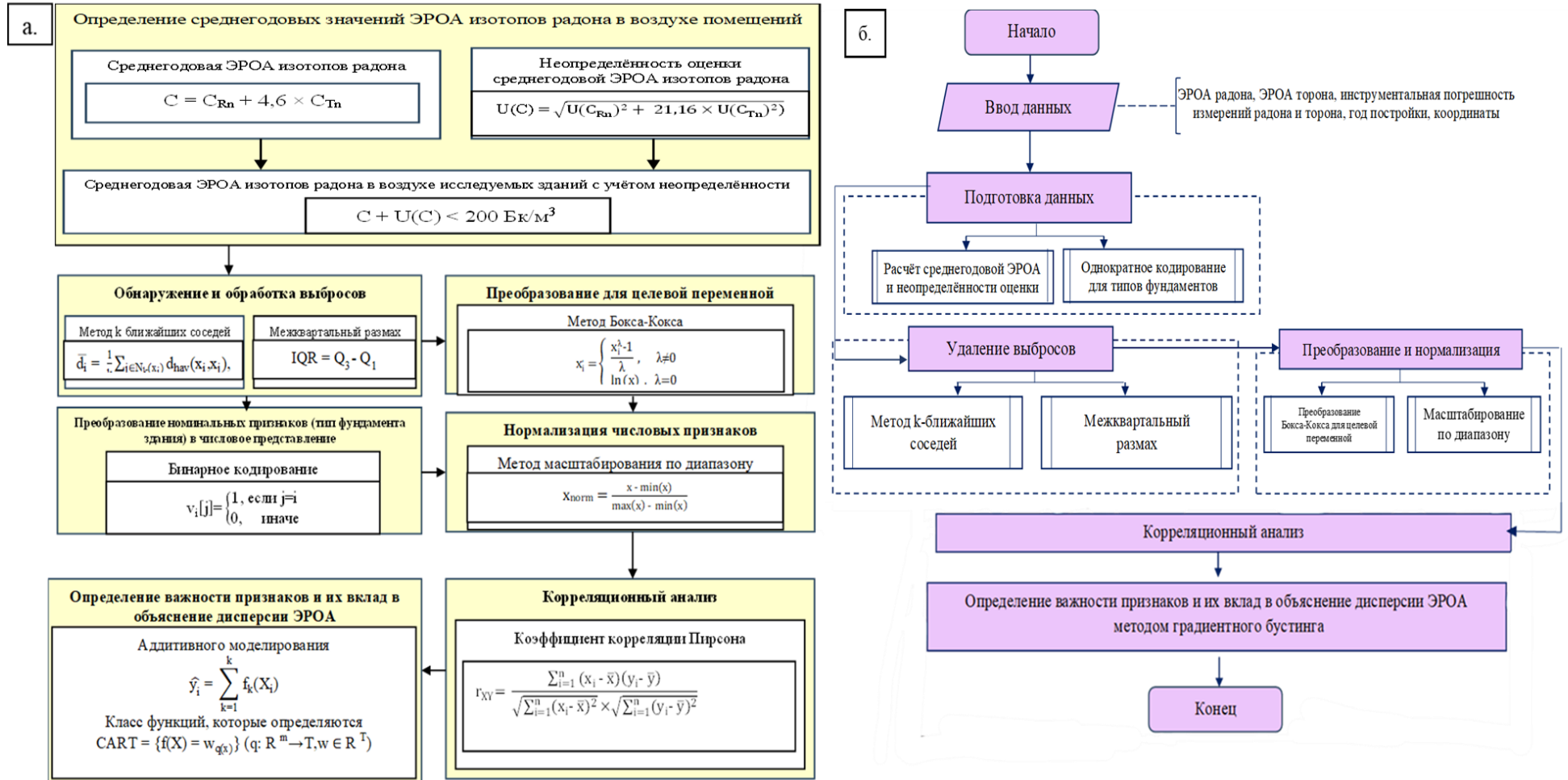


Рисунок 3.1 – Процесс оценки вклада конструктивных особенностей зданий на урбанизированных территориях а. – математическая модель; б. – структурная схема

3.2. Разработка математической модели алгоритма автоматизации контроля радоноопасности урбанизированных территорий

Разработка математической модели алгоритма автоматизации контроля радоноопасности урбанизированных территорий представляет собой создание комплексного прогнозно-аналитического инструмента, который, интегрируя математическую модель оценки вклада конструктивных особенностей зданий, осуществляет количественную оценку и пространственное картирование радоноопасности с учётом совокупного влияния конструктивных особенностей здания, географических и геологических факторов [127, 128]. Математическая модель оценки вклада конструктивных особенностей зданий, разработанная в подразделе 3.1, встраивается в общую структуру математической модели алгоритма автоматизации контроля радоноопасности урбанизированных территорий. Расчёт математической модели алгоритма автоматизации контроля радоноопасности территорий начинается с реализации первых пяти этапов модели оценки вклада конструктивных особенностей зданий (см. подраздел 3.1), выполняемых в соответствии с формулами 3.1–3.14.

Шестой этап математической модели алгоритма автоматизации контроля радоноопасности урбанизированных территорий: предварительный статистический анализ данных. Подэтапом которого является статистическая оценка данных, обеспечивающая верификацию исходных предпосылок и формирование основы для дальнейшего моделирования.

Медиана характеризует типичное значение среднегодовой ЭРОА изотопов радона в жилых зданиях с учётом неопределённости оценки. В отличие от медианы, среднее арифметическое (\bar{x}) чувствительно к экстремальным значениям, что искажает оценку центральной тенденции для асимметричных распределений. Различие между медианой и средним может выступать индикатором асимметрии: если $\bar{x} >$ медианы, распределение имеет положительную асимметрию, и наоборот.

Среднее арифметическое находится по формуле 3.22:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \quad (3.22)$$

где \bar{x} – среднее значение выборки X;

$x(i)$ – i -й элемент выборки x [129].

Стандартное отклонение количественно оценивает разброс данных относительно среднего. Высокое значение s указывает на значительную вариативность наблюдений, что может быть связано с гетерогенностью выборки или наличием скрытых факторов. Стандартное отклонение вычисляется по формуле 3.23 [128]:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}, \quad (3.23)$$

где σ – стандартное отклонение [129].

Эксцесс измеряет остроту пика и тяжесть хвостов распределения относительно нормального. Положительный эксцесс ($E > 0$) указывает на островершинность (лептокуртичность) и наличие тяжёлых хвостов, что характерно для данных с кластеризацией значений вокруг среднего и редкими, но экстремальными отклонениями. Отрицательный эксцесс ($E < 0$) соответствует плосковершинному распределению (платикуртичность) с укороченными хвостами, что типично для равномерно распределённых данных. Эксцесс вычисляется по формуле 3.24:

$$E = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^4}{\sigma^4} - 3, \quad (3.24)$$

где E – эксцесс [129].

Асимметрия характеризует степень отклонения распределения от симметрии. Положительная асимметрия ($A > 0$) отражает наличие протяжённого правого хвоста, тогда как отрицательная ($A < 0$) – левого. Асимметрия вычисляется по формуле 3.25 [129]:

$$A = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^3}{\sigma^3}, \quad (3.25)$$

где A – асимметрия [128].

Следующим шагом является проверка нормальности распределения с использованием теста Шапиро-Уилка. Его цель – оценить соответствие данных предположению о нормальности, необходимой для корректного построения

вариограммной модели. Тестовая статистика W вычисляется по формуле 3.26 [130]:

$$W = \frac{(\sum_{i=1}^n a_i x_{(i)})^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \hat{x})^2}, \quad (3.26)$$

где W – критерий Шапиро-Уилка;

$x_{(i)}$ – i -й элемент выборки x ;

\hat{x} – является выборочным средним значением [130];

a_i – коэффициенты, зависящие от математического ожидания порядковых статистик нормального распределения.

Принимает значения в диапазоне $0 < W \leq 1$. Чем ближе W к 1, тем больше данных соответствует нормальному распределению. В качестве нулевой гипотезы (H_0) принимается предположение о нормальности распределения генеральной совокупности. Если рассчитанное p -значение оказывается меньше выбранного уровня значимости (α), то гипотеза H_0 отвергается. Это является статистически значимым свидетельством того, что анализируемые данные отклоняются от нормального распределения. Само p -значение интерпретируется как вероятность получения такого же или более экстремального значения тестовой статистики при условии, что нулевая гипотеза верна [130].

Как и в случае с большинством тестов на статистическую значимость, если размер выборки достаточно велик, этот тест может выявить даже незначительные отклонения от нулевой гипотезы (т. е. несмотря на то, что может быть некоторый статистически значимый эффект, он может быть слишком мал, чтобы иметь какое – либо практическое значение), поэтому обычно рекомендуется дополнительно изучить размер эффекта, например, с помощью Q-Q графика [131].

Далее выполняется подэтап проверки стационарности пространственных данных с помощью теста Дики-Фуллера. Это необходимо, чтобы убедиться в отсутствии систематического пространственного тренда (важного условия применимости ординарного кригинга). Если стационарность не выполняется, требуется использовать другие методы интерполяции.

Рассматривается простейшая модель авторегрессии первого порядка (формула 3.27) [132]:

$$y_t = \theta y_{t-1} + \theta_2 y_{t-2} + \dots + \theta_p y_{t-p} + \varepsilon_t, \quad (3.27)$$

где y_t – значение временного ряда в момент t ;

$\theta, \theta_2, \theta_p$ – параметры авторегрессии (коэффициенты при лагированных значениях ряда);

$y_{t-1}, y_{t-2}, \dots, y_{t-p}$ – лагированные значения временного ряда;

p – порядок авторегрессионной модели (количество учитываемых лагов);

ε_t – случайная ошибка [132].

Ряд считается стационарным (не содержит единичного корня), если $|\theta| < 1$ при $\theta = 1$ процесс нестационарен и представляет собой случайное блуждание.

Вычитая из обеих частей уравнения (3.27) значение y_{t-1} и перегруппировывая слагаемые, получаем (3.28) [132]:

$$\Delta y_t = b y_{t-1} + c_1 \Delta y_{t-2} + \dots + c_p \Delta y_{t-p} + \varepsilon_t, \quad (3.28)$$

где b – коэффициент при лагированном уровне ряда y_{t-1} , тестируемый на единичный корень;

c_1, c_2, \dots, c_p – коэффициенты при лагированных первых разностях ряда;

Δ – оператор разности;

ε_t – случайная ошибка.

Уравнение оценивается методом наименьших квадратов. Нулевая гипотеза $H_0: b = 0$ (ряд нестационарен) проверяется против альтернативы $H_1: b < 0$ (ряд стационарен). Расчётная t -статистика имеет распределение Дики-Фуллера (формула 3.29) [132]:

$$\hat{t} = \frac{\hat{b}}{se(\hat{b})} \sim DF_1, \quad (3.29)$$

где \hat{t} – расчетное значение t -статистики теста Дики-Фуллера;

\hat{b} – оценка коэффициента b ;

$se(\hat{b})$ – стандартная ошибка оценки коэффициента b ;

DF_1 – специального распределения Дики-Фуллер.

Если \hat{t} оказывается отрицательным и меньше критического значения, нулевая гипотеза отвергается – ряд признаётся стационарным [132].

Далее выполняется подэтап оценки пространственной автокорреляции с использованием глобального индекса Морана. Его цель – выявить и количественно оценить степень пространственной зависимости данных, что является ключевым условием для обоснованного применения ординарного кригинга. Индекс Морана вычисляется по формуле 3.30 [133]:

$$I_G = \frac{N}{\sum_i \sum_j w_{ij}} \times \frac{\sum_i \sum_j w_{ij} (X_i - \mu)(X_j - \mu)}{\sum_i (X_i - \mu)^2}, \quad (3.30)$$

где I_G – глобальный индекс Морана;

N – число регионов;

w_{ij} – элемент матрицы пространственных весов для регионов i и j ;

μ – среднее значение показателя;

x – анализируемый показатель.

При $I_G > E(I)$ имеется положительная пространственная автокорреляция, т. е. в целом значения наблюдений в соседних территориях являются подобными.

При $I_G < E(I)$ – отрицательная автокорреляция, т. е. в целом значения наблюдений в соседних территориях отличаются.

При $I_G = E(I)$ значения наблюдений в соседних территориях расположены случайным образом [133].

Седьмой этап математической модели алгоритма автоматизации контроля радоноопасности урбанизированных территорий: реализация корреляционного анализа в соответствии с шестым этапом модели оценки вклада конструктивных особенностей зданий (см. подраздел 3.1). Данный этап выполняется согласно формулам 3.15–3.18 и направлен на выявление и количественную оценку линейных взаимосвязей между всеми рассматриваемыми переменными.

Восьмой этап: расчёт максимального и минимального расстояний. Цель метода – точный расчёт геодезических расстояний между географическими точками для дальнейшего применения в геоинформационной системе; вычисление производится по формуле 3.31:

$$\text{hav} \left(\frac{d}{r} \right) = \text{hav}(\varphi_2 - \varphi_1) + \cos(\varphi_1) \times \cos(\varphi_2) \times \text{hav}(\lambda_2 - \lambda_1), \quad (3.31)$$

где d – центральный угол между двумя точками, лежащими на большом круге;

r – радиус сферы;

φ_1 и φ_2 – широта первой и второй точек в радианах;

λ_2 и λ_1 – долгота первой и второй точек в радианах;

Обозначим временно гаверсинус отношения длины к радиусу как переменную h : $\text{hav} \left(\frac{d}{r} \right) = h$, тогда длину d можно вынести за знак равенства: $d = r \text{hav}^{-1}(h)$, выразим гаверсинус через арксинус: $d = 2r \times \arcsin(\sqrt{h})$. Затем раскроем переменную h (формула 3.32) [134, 135]:

$$d = 2r \times \arcsin \left(\sqrt{\sin^2 \left(\frac{\varphi_2 - \varphi_1}{2} \right) + \cos(\varphi_1) \times \cos(\varphi_2) \times \sin^2 \left(\frac{\lambda_2 - \lambda_1}{2} \right)} \right), \quad (3.32)$$

Также необходимо вычислить максимальное и минимальное расстояния по формулам 3.33, 3.34:

$$d_{\max} \begin{cases} 0, & \text{если } n < 2 \\ \max_{1 \leq i < j \leq n} \text{hav}(P_i, P_j), & \text{иначе} \end{cases}, \quad (3.33)$$

где d_{\max} – максимальное расстояние выражается в километрах;

n – количество точек в очищенном наборе $S = \{P_1, P_2, \dots, P_n\}$;

$P_i = (\varphi_i, \lambda_i)$ – широта φ_i и долгота λ_i i -й точки.

$\text{hav}(P_i, P_j)$ – геодезическое расстояние между точками P_i и P_j на эллипсоиде (в км).

d_{\max} – максимальное расстояние выражается в километрах.

$$d_{\min} \begin{cases} 0, & \text{если } n < 2 \\ \min_{1 \leq i < j \leq n} \text{hav}(P_i, P_j), & \text{иначе} \end{cases}, \quad (3.34)$$

где d_{\min} – минимальное расстояние выражается в километрах.

Максимальное расстояние d_{\max} определяется как наибольшее геодезическое расстояние между всеми парами точек в очищенном наборе данных, что задаёт верхнюю границу анализа пространственной автокорреляции, минимальное расстояния d_{\min} аналогично, но как наименьшее.

Оптимизация пространственного анализа достигается корректным разбиением диапазона расстояний на бины, где ключевым параметром выступает количество бинов, рассчитываемое как квадратный корень из объёма выборки, что минимизирует риски переусложнения модели (избыточное число бинов приводит к фрагментации данных и усилению шума) или её излишнего упрощения (недостаток бинов маскирует структурные особенности распределения). Данный эмпирический подход адаптирует детализацию разбиения к размеру выборки, обеспечивая баланс между риском усиления шума при избытке бинов и маскировкой структурных закономерностей при их недостатке, что повышает репрезентативность эмпирических вариограмм и статистических оценок [136].

Девятый этап: подготовка бинов для вариограммы. Шаг в вариограмма необходим для равномерного распределения данные по интервалам, чтобы оценить, как вариация меняется с расстоянием. Для расчёта шага разбиения, используемого при построении вариограммы, применяется формула 3.35:

$$h_{\text{ш}} = \frac{d_{\text{max}} - d_{\text{min}}}{n}, \quad (3.35)$$

где $h_{\text{ш}}$ – шаг (ширина каждого интервала) (км);

n – количество бинов, полученное из правила квадратного корня.

Десятый этап: определение границ бинов и их центров. Границы бинов b_i вычисляются от d_{min} с шагом $h_{\text{ш}}$, чтобы обеспечить равномерное покрытие интервала $[d_{\text{min}}, d_{\text{max}}]$, вычисления проводятся по формуле 3.36:

$$b_i = d_{\text{min}} + i \times h_{\text{ш}}, \text{ где } i = 0, 1, \dots, n, \quad (3.36)$$

где b_i – граница i -го интервала;

i – индекс границы (начинается с 0);

n – количество интервалов (бинов).

Центры интервалов c_i вычисляются как среднее арифметическое смежных границ по формуле 3.37:

$$c_i = \frac{b_i + b_{i+1}}{2}, \text{ где } i = 0, 1, \dots, n-1, \quad (3.37)$$

где c_i – центр i -го интервала;

$b_i + b_{i+1}$ – левая и правая границы интервала;

i – индекс центра (начинается с 0 и заканчивается на $k-1$, так как центров на 1 меньше, чем границ).

Границы бинов и их центр необходим для того, чтобы агрегировать пары точек в интервалы для вычисления полувариации. Метод направлен на структурирование данных в пространственном контексте, обеспечивая основу для вычисления эмпирической вариограммы. Равномерное разбиение гарантирует сопоставимость результатов между различными наборами данных. Корректное определение числа бинов и шага разбиения критически важно для минимизации систематических ошибок при интерполяции и моделировании пространственного распределения.

Одиннадцатый этап. Вариограмма – статистический момент второго порядка, использующийся в геостатистике для анализа и моделирования пространственной корреляции [137]. Является графическим представлением пространственной зависимости между парами точек. Показывает значения вариограммы как функцию разделения точек выборки. В случае эмпирической вариограммы используются ячейки разделяющих расстояний, а не точные расстояния. Эмпирическая вариограмма $\gamma(h)$ может быть рассчитана для каждой ячейки по формуле 3.38:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2|N(h)|} \times \sum_{(i,j) \in N(h)} |z_i - z_j|^2, \quad (3.38)$$

где $\gamma(h)$ – значение полувариограммы для расстояния h (км);

z_i, z_j – значения переменной в точках i и j ;

$N(h)$ – множество уникальных пар точек, расстояние между которыми попадает в интервал (h) [138].

Двенадцатый этап. Детрендрование – критический этап подготовки данных для вариограммного анализа, устраняющий детерминированные тренды, обусловленные конструктивными особенностями зданий (тип фундамента, год постройки, пористость материалов). Их наличие нарушает предположение о внутренней стационарности, требующее, чтобы пространственная зависимость определялась лишь расстоянием между точками, а не их абсолютным положением. Удаление таких трендов обеспечивает сепарацию систематической компоненты от

пространственно коррелированных остатков, предотвращая смещение вариограммы (искусственное завышение на больших лагах). Для выделения остатков применён градиентный бустинг. Этот метод оптимизирует произвольную дифференцируемую функцию потерь через итеративное построение ансамбля слабых моделей (обычно неглубоких деревьев), предсказывающих псевдоостатки (отрицательный градиент функции потерь) на каждом шаге. Ключевыми преимуществами градиентного бустинга для детрендрования являются: гибкость (адаптивность к сложным нелинейным трендам за счёт аддитивной природы модели) и универсальность (возможность выбора функции потерь, соответствующей требованиям к свойствам случайного поля остатков для вариограммного анализа). Частью одиннадцатого этапа математической модели алгоритма автоматизации контроля радоноопасности урбанизированных территорий является непосредственная реализация седьмого этапа модели оценки вклада конструктивных особенностей зданий (см. подраздел 3.1). Данный этап подразумевает применение метода градиентного бустинга для регрессионного анализа (формулы 3.19–3.21) с целью моделирования детерминированной компоненты пространственной изменчивости концентрации радона. Далее проводим детрендрование и получение остатков для вариограммы по формуле 3.39:

$$\epsilon_i = y_i - \hat{y}_i, \quad (3.39)$$

где ϵ_i – остаток в точке i (разница между реальным и предсказанным значением);

y_i – наблюдаемое значение зависимой переменной в точке i ;

\hat{y}_i – предсказанное значение моделью градиентного бустинга в точке i .

Тринадцатый этап. Коэффициент детерминации (R^2), характеризующий долю дисперсии зависимой переменной, объяснённой предикторами, рассчитывается по формуле 3.40:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2}{\sum_{i=1}^n (\bar{y}_i - y_i)^2}, \quad (3.40)$$

где R^2 – коэффициент детерминации;

\hat{y}_i – предсказанное моделью значение;

n – количество точек;

\bar{y}_i – выборочное среднее y [139].

Средняя абсолютная ошибка (MAE) является одной из ключевых метрик, используемых для оценки точности прогностических моделей в задачах регрессии. В отличие от квадратичных ошибок, средняя абсолютная ошибка не возводит отклонения в квадрат, что исключает чрезмерное влияние выбросов на итоговую оценку. Также средняя абсолютная ошибка обладает свойством робастности, то есть устойчивости к нестандартным распределениям ошибок. Средняя абсолютная ошибка (MAE) вычисляется по формуле 3.41:

$$\text{MAE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i|, \quad (3.41)$$

где MAE – средняя абсолютная ошибка [140].

Кросс-валидация представляет собой строгий статистический метод оценки производительности аналитических моделей и их способности к генерализации на независимых данных. Метод обеспечивает максимально эффективное использование ограниченных выборок за счёт циклического переиспользования данных в различных комбинациях «обучение-валидация» (формула 3.42).

$$E = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k E_i, \quad (3.42)$$

где E – итоговая кросс-валидационная оценка;

k – количество фолдов;

i -й фолд – подмножество данных;

E_i – ошибка на i -м фолде [141].

Четырнадцатый этап. Данный этап включает последовательное применение трёх диагностических процедур: проверку нормальности распределения данных с использованием теста Шапиро-Уилка (формула 3.26), оценку стационарности временных рядов с помощью теста Дики-Фуллера (формулы 3.27–3.29) и анализ

пространственной автокорреляции путём расчёта глобального индекса Морана (формула 3.30).

Пятнадцатый этап. На этом этапе оценивается структура пространственной зависимости остаточной компоненты с использованием формулы 3.38.

Шестнадцатый этап: выбор теоретической модели вариограммы. Ключевым аспектом данного этапа является применение теоретической вариограммы не к исходным данным, а к остаткам регрессионной модели.

Сферическая модель лучше отражает резкие изменения, характерные для помещений. Четкий радиус влияния помогает выделить зоны с максимальным воздействием радона. Для данных по радону сферическая модель предпочтительнее из-за соответствия физике распространения и наличия чёткого радиуса влияния. Гауссова и экспоненциальная модель разумная альтернатива, если распределение более плавное. Линейные/степенные модели, дают физически нереалистичную картину [142].

Сферическая модель рассчитывается по формуле 3.43:

$$\gamma(h;\theta)^* = \begin{cases} c_0 + c_1 \cdot \left(1,5 \times \frac{h}{a} - 0,5 \times \left(\frac{h}{a} \right)^3 \right), & 0 < h \leq a \\ c_0 + c_1, & h \geq a \\ 0, & h = 0 \end{cases}, \quad (3.43)$$

$\theta = (c_0, c_1, a)$, где $c_0 > 0$, $c_1 > 0$, и $a > 0$.

где $\gamma(h;\theta)^*$ – значение теоретической вариограммы на расстоянии (h) с параметрами модели θ ;

c_0 – случайная микромасштабная вариация (шум);

c_1 – структурированная пространственная изменчивость;

a – масштаб пространственной корреляции;

h – расстояние между точками выборки.

Для модели $\gamma(0) = 0$ (по определению), $c_0 + c_1$ – порог [138].

Семнадцатый этап. Необходимо провести оптимизацию параметров теоретической вариограммы для точной аппроксимации эмпирических данных, обеспечивающей адекватное описание пространственной зависимости. Для

эмпирической вариограммы $\gamma(h)$, рассчитанной на расстояния (лагах) $h_i = (i = 1, \dots, n)$, требуется найти параметры $\theta = [c_0, c, a]$ теоретической модели $\gamma(h; \theta)^*$. Для подгонки параметров с целью определения наилучших параметров (порога, частичного порога, эффекта самородка, диапазона влияния) теоретической вариограммы используем метод наименьших квадратов [139, 140]. Формализуя задачу оптимизации, получаем следующую целевую функцию метода наименьших квадратов (формула 3.44):

$$SSE(\theta) = \sum_{i=1}^n (\gamma_{hi} - \gamma_{hi}^*)^2 \rightarrow \min, \quad (3.44)$$

где SSE – метод наименьших квадратов;

γ_{hi} – значение экспериментальной вариограммы для i лага;

γ_{hi}^* – значение теоретической вариограммы для i лага;

n – количество измерений расстояний [143, 144].

При ограничениях $c_0 \geq 0, c \geq 0, a > 0$, ограничение параметров $c_0 \in [0, +\infty), c \in [0, +\infty), a \in (0, +\infty)$.

Восемнадцатый этап. Обычный (ординарный) кригинг ослабляет требование простого кригинга об априорно известном математическом ожидании, предполагая локально постоянное (но неизвестное) среднее в окрестности точки оценивания x_0 . Это соответствует гипотезе локальной стационарности первого порядка и повышает реалистичность модели, ограничивая зону влияния среднего. Оценка строится как линейная комбинация наблюдений (формула 3.45) [137]:

$$Z^*(x) = \sum_{j=1}^{n(x)} \lambda_j(x) \times Z(x_j), \quad (3.45)$$

где $Z^*(x)$ – оценка значения переменной в точке x ;

$\lambda_j(x)$ – весовой коэффициент для точки x_j при оценке в точке x ;

$Z(x_j)$ – измеренное значение переменной в точке x_j ;

$n(x)$ – количество точек измерения, используемых для оценки в точке x .

Система уравнений кригинга ординарного при этом имеет вид, представленный в формуле 3.46 [137]:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^{n(x)} \lambda_j(x) C_{ij} + \mu(x) = C_{i0}, j = 1, \dots, n(x) \\ \sum_{i=1}^{n(x)} \lambda_i(x) = 1, \end{cases}, \quad (3.46)$$

где C_{ij} – ковариации случайных переменных;

$\mu(x)$ – множитель Лагранжа;

Вариация ординарного кригинга также может быть переписана в терминах вариограммы (формула 3.47) [137]:

$$\sigma_{OK}^2 = \sigma_z^2 - \sum_{i=1}^{n(x)} \lambda_i(x) C_{i0} + \mu(x), \quad (3.47)$$

где σ_{OK}^2 – вариация ординарного кригинга [137].

Девятнадцатый этап. Качество построенной модели оценивается с помощью кросс-валидации, которая позволяет проверить точность прогноза в необследованных точках. Этот метод даёт возможность оценить надёжность модели интерполяции и её способность корректно прогнозировать значения в новых, неизмеренных точках. Алгоритм включает:

1. Итеративное исключение точки x_i из набора данных с последующей оценкой $Z^*(x)$ по оставшимся точкам.

2. Расчёт невязки по формуле 3.48[137]:

$$\Delta Z(x) = Z(x) - Z^*(x), \quad (3.48)$$

где $\Delta Z(x)$ – невязка (разница между измеренным и оцененным значением) в точке x ;

$Z(x)$ – измеренное (реальное) значение переменной в точке x ;

$Z^*(x)$ – оценённое значение переменной в точке x , полученное после исключения x из обучающей выборки [137].

Метод обеспечивает количественную верификацию адекватности модели через анализ распределения ошибок. Процедура кросс-валидации последовательно применяется ко всем точкам выборки. В качестве альтернативы используется картографическое представление относительных ошибок, определяемых по формуле 3.49 [137]:

$$\text{relative error } (x_i) = \frac{Z(x_i) - Z^*(x_i)}{Z(x_i)}, \quad (3.49)$$

где $\text{relative error } (x_i)$ – относительная ошибка оценки в точке x_i .

Кросс-валидация типа «перекрёстная проверка с исключением одного наблюдения» (leave-one-out) является частным случаем метода скользящего контроля, основанного на последовательном исключении единичного наблюдения из выборки [137].

Двадцатый этап: последовательное восстановление исходной физической метрики целевой переменной. Этот процесс включает два ключевых преобразования: во-первых, обратное преобразование Бокса-Кокса, а во-вторых, денормализацию методом обратного масштабирования по диапазону.

Двадцать первый этап: расчёт модели вместе с трендом и после оценки остатков ординарным кригинг проводим по формуле 3.50:

$$\hat{Z}(x_0) = \hat{m}(x_0) + \sum \lambda_i \epsilon_i \quad (3.50)$$

где $\hat{Z}(x_0)$ – итоговый прогноз в точке x_0 ;

$\hat{m}(x_0)$ – оценка тренда в точке x_0 ;

λ_i – весовые коэффициенты кригинга;

ϵ_i – остатки после удаления тренда.

Двадцать второй этап также рассчитываем по формуле 3.40 и 3.41 абсолютную ошибку и коэффициент детерминации.

На рисунке 3.2 представлена математическая модель алгоритма автоматизации контроля радоноопасности урбанизированных территорий.

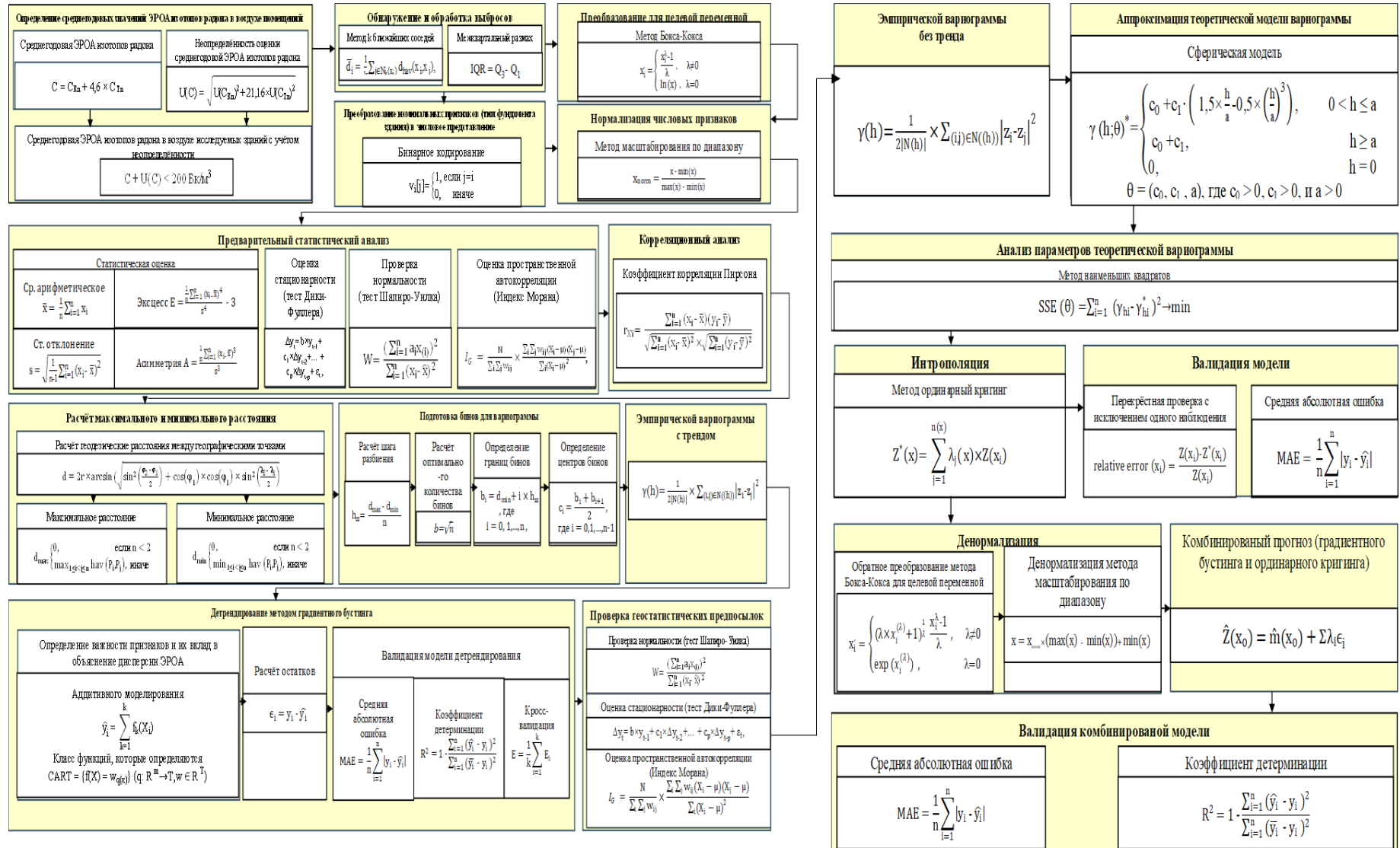


Рисунок 3.2 – Математическая модель алгоритма автоматизации контроля радионепасности урбанизированных территорий

3.3. Разработка структурной схемы алгоритма автоматизации контроля радоноопасности урбанизированных территорий

Данная структурная схема алгоритма автоматизации позволит осуществлять прогнозирование пространственного распределения среднегодовой ЭРОА изотопов радона с учётом неопределённости исходных данных и динамики техногенных процессов.

Разработанная структурная схема представляет собой универсальный инструмент для создания комплексной системы управления радиационными рисками на урбанизированных территориях.

На рисунке 3.3 представлена структурная схема алгоритма автоматизации контроля радоноопасности урбанизированных территорий

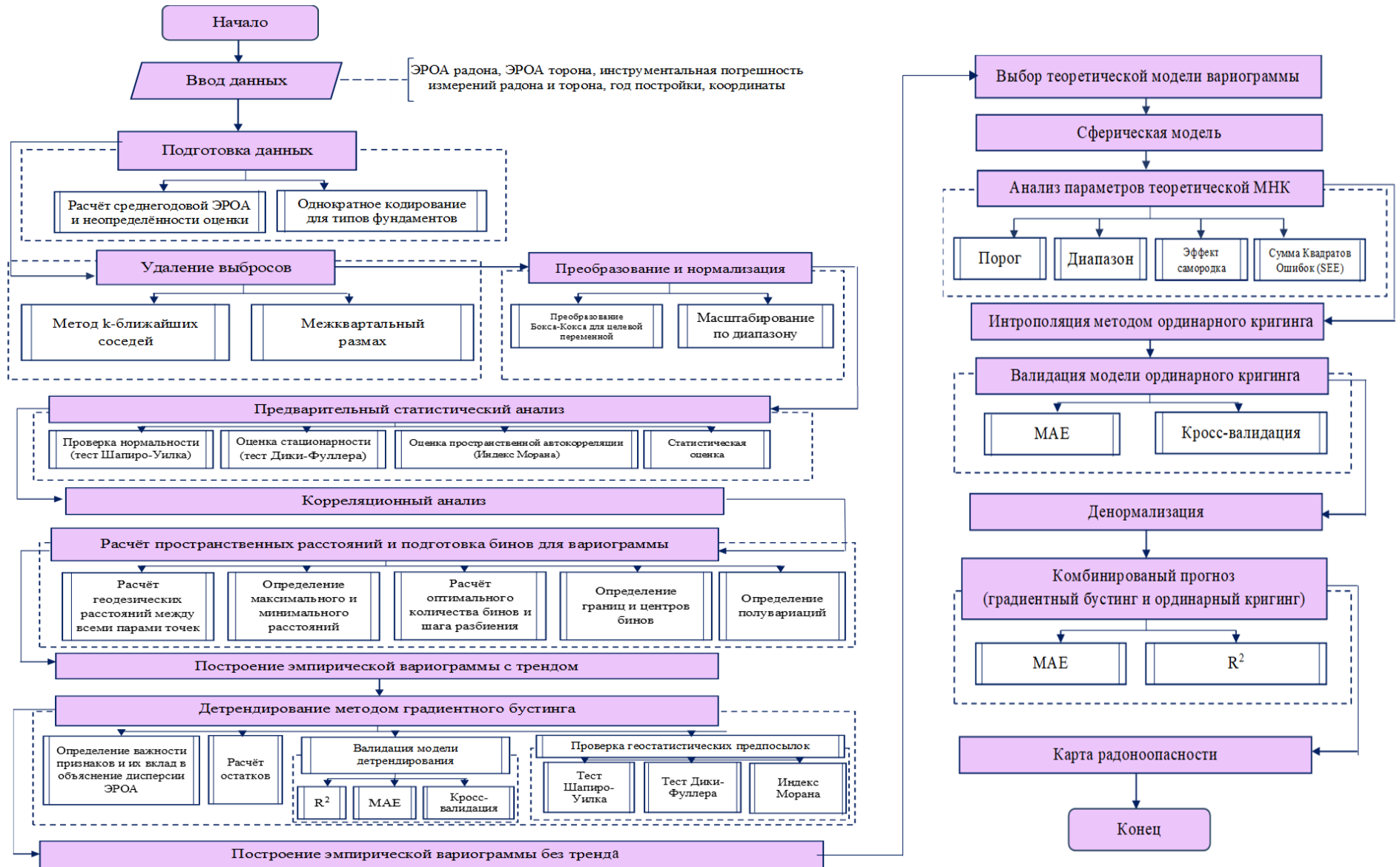


Рисунок 3.3 – Структурная схема алгоритма автоматизации контроля радоноопасности урбанизированных территорий

3.4. Результаты реализации алгоритма автоматизации контроля радоноопасности урбанизированных территорий

В 2021-2023 гг. на территории Санкт-Петербурга проведены измерения ЭРОА изотопов радона в воздухе жилых помещений. Объём выборки составил 127 измерений, выполненных с помощью радиометров РАА-3-01 «АльфаАЭРО» и РАА-20П2 [145]. На рисунке 3.4 представлена карта полевых измерений ЭРОА изотопов радона в воздухе жилых помещений.

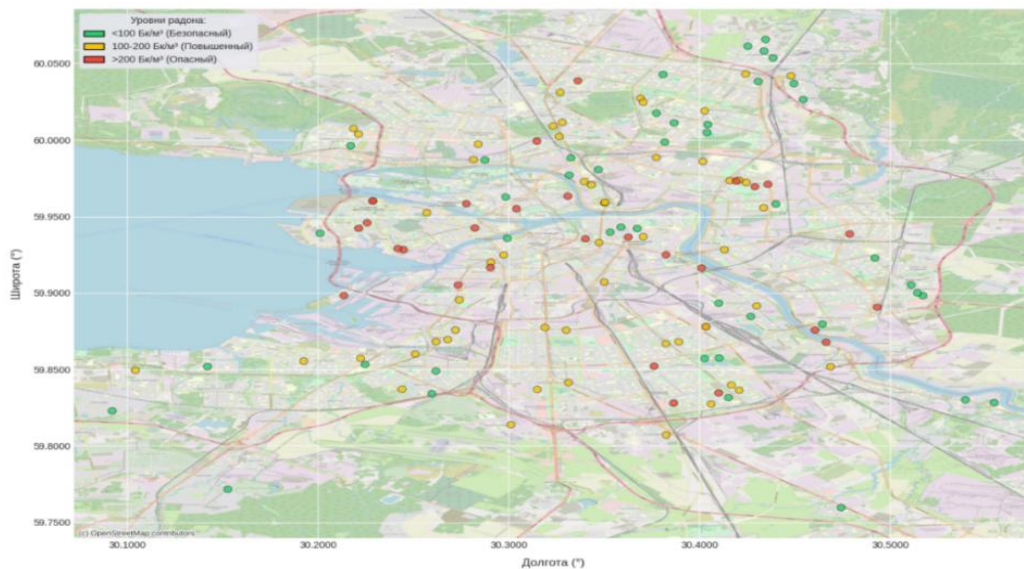


Рисунок 3.4 – Карта полевых измерений ЭРОА изотопов радона жилых помещений

Для анализа жилых зданий, в которых проводился полевой эксперимент, были установлены конструктивные особенности здания: год постройки, тип фундамента, пористость строительных материалов [125, 146]. Характеристики жилых зданий приведены в Приложении А. Среднегодовая ЭРОА изотопов радона в воздухе жилых помещений определялась по формуле 3.1. Неопределённость оценки среднегодовой ЭРОА изотопов радона вычислялась по формуле 3.2, а их сумма была рассчитана по формуле 3.3. Результаты расчётов представлены в Приложении В. На подготовленных данных инициируется метод к ближайшим соседям и межквартального размаха (формулы 3.4–3.8) [125, 146]. Процедура очистки согласованно применяется ко всем переменным (среднегодовая ЭРОА

изотопов радона, пористость материалов, год постройки, тип фундамента), обеспечивая целостность данных. Результаты визуализированы на Рисунке 3.5.

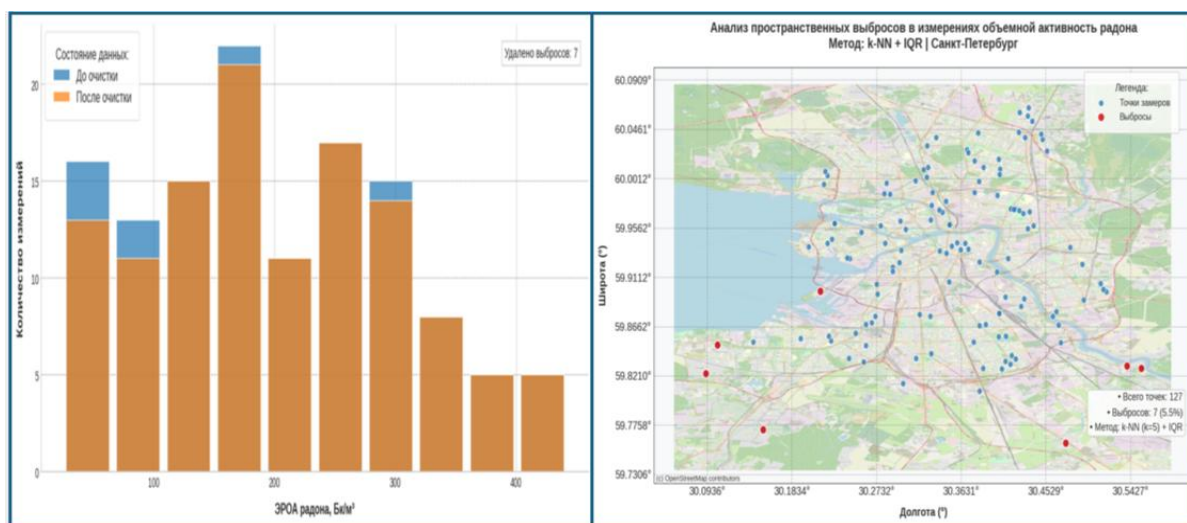


Рисунок 3.5 – Результаты удаления выбросов из данных

Совместное применение k -ближайших соседей и межквартильного размаха позволило исключить 7 аномальных наблюдений, что составило 5,5 % от исходного объёма выборки [125, 146]. Данная операция минимизировала искажающее влияние экстремальных значений на последующий анализ пространственного распределения, оставив репрезентативную выборку из 120 точек [125, 146].

На этапе подготовки признаков категориальная переменная «тип фундамента» подверглась бинарному кодированию (One-Hot Encoding). Это преобразование сгенерировало три ортогональных бинарных вектора, соответствующих категориям «ленточный», «свайный» и «сплошной» [125, 146].

Для коррекции правосторонней асимметрии распределения целевой переменной было выполнено преобразование Бокса-Кокса. Параметр λ был автоматически оптимизирован и его численное значение составило 0,66, что позволило стабилизировать дисперсию наблюдений и повысить соответствие распределения нормальному закону. Все числовые признаки, включая трансформированные значения среднегодовой ЭРОА изотопов радона в воздухе жилых зданий с учётом неопределённости оценки, год постройки зданий, пористость материалов и бинарные индикаторы типов фундаментов, были

нормализованы в диапазон [0, 1] методом масштабирования по диапазону [125, 146].

Далее была построена корреляционная матрица для системного выявления линейных взаимосвязей между признаками. Визуализация в виде тепловой карты с цветовой кодировкой и числовыми аннотациями коэффициентов Пирсона обеспечила наглядную репрезентацию силы и направленности статистических связей. Результирующая корреляционная матрица представлена на рисунке 3.6. [125].

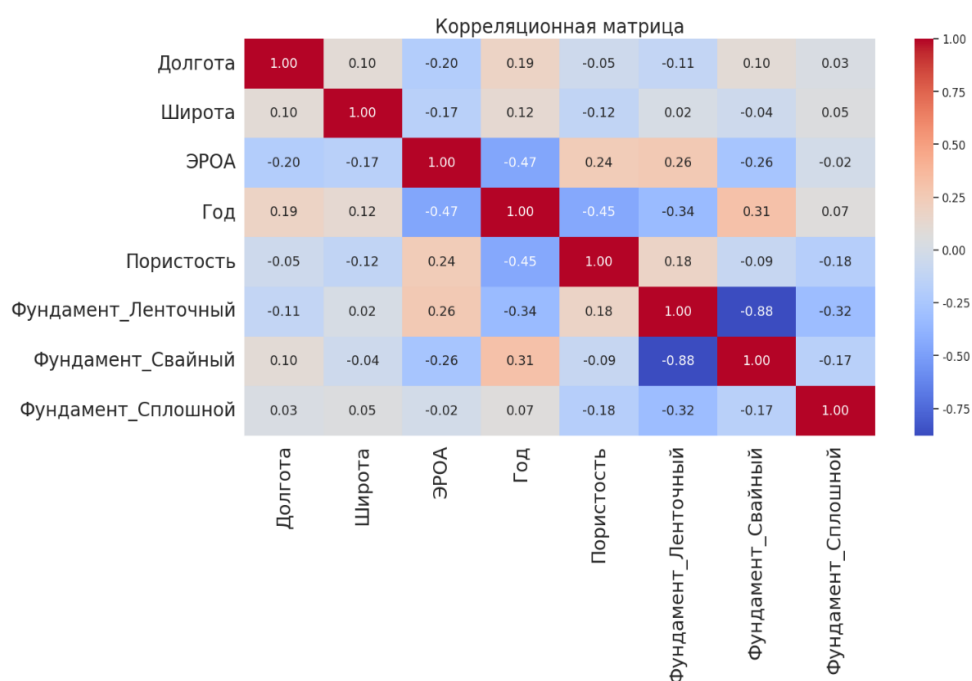


Рисунок 3.6 – Корреляционная матрица Пирсона

Географические координаты (широта и долгота) продемонстрировали статистически незначимую корреляцию с целевой переменной ($r = -0,20$ и $r = -0,17$ соответственно), что свидетельствует об отсутствии выраженных макропространственных закономерностей. Ключевым детерминирующим фактором выступил год постройки зданий, показавший умеренную отрицательную корреляцию с целевой переменной ($r = -0,47$) [125]. Установленная зависимость указывает на систематическое повышение среднегодовой ЭРОА изотопов радона в воздухе жилых зданий с учётом неопределённости оценки в старых постройках,

обусловленное деградацией материалов и недостаточной эффективностью противорадоновых мероприятий в зданиях ранних периодов эксплуатации [125].

Анализ пористости строительных материалов выявил слабую положительную корреляцию с целевой переменной ($r = 0,24$), соответствующую физическим моделям миграции радона [125]. Параллельно обнаружена умеренная отрицательная взаимосвязь между годом постройки и пористостью ($r = -0,45$), отражающая технологическую эволюцию: современные здания характеризуются меньшей пористостью материалов по сравнению с историческими постройками [125].

Анализ влияния типа фундамента показывает следующие закономерности. Ленточные фундаменты связаны со слабым ростом радоновой активности ($r = 0,26$), что объясняется повышенным риском деформаций конструкций и недостаточной вентиляцией подпольного пространства [125]. Напротив, свайные фундаменты демонстрируют выраженный защитный эффект ($r = -0,26$), обусловленный эффективной естественной аэрацией. Влияние сплошных (плитных) фундаментов статистически незначимо ($r = -0,02$) [125].

Выявленная сильная отрицательная корреляция между бинарными индикаторами типов фундамента ($r = -0,88$) является ожидаемой и соответствует логике однократного кодирования, при котором реализация одной категории автоматически исключает другие [125].

Статистический анализ выявил правостороннюю асимметрию исходного распределения данных, характеризующуюся коэффициентом асимметрии с численным значением 1,82 и эксцессом 4,05. Применение преобразования Бокса-Кокса привело к статистически значимому улучшению формы распределения: численное значение асимметрии снизилось до 0,31, а эксцесса – до -0,17. Эффективность преобразования дополнительно подтверждается значительным повышением согласия с нормальным распределением на Q-Q графике, где численное значение коэффициента детерминации увеличился с 0,86 до 0,97. Результаты Q-Q анализа представлены на рисунке 3.7 [146].

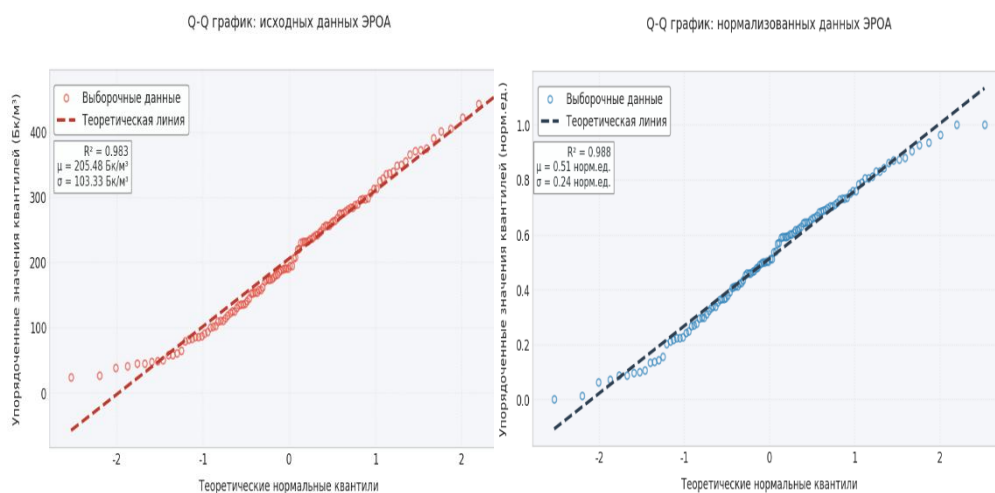


Рисунок 3.7 – Результаты Q-Q анализа

При расчёте пространственных метрик сформировали матрицу геодезических расстояний между всеми парами точек [146]. Определили экстремальные значения дистанций с фильтрацией незначительных расстояний (менее 1 метра). Расчёт производился по формулам 3.33, 3.34. В результате расчёта получили: максимальное расстояние (29,04 км), минимальное расстояние (54,3 м). На рисунке 3.8 представлена графическая реализация расчётов максимального и минимального расстояния [146, 147].

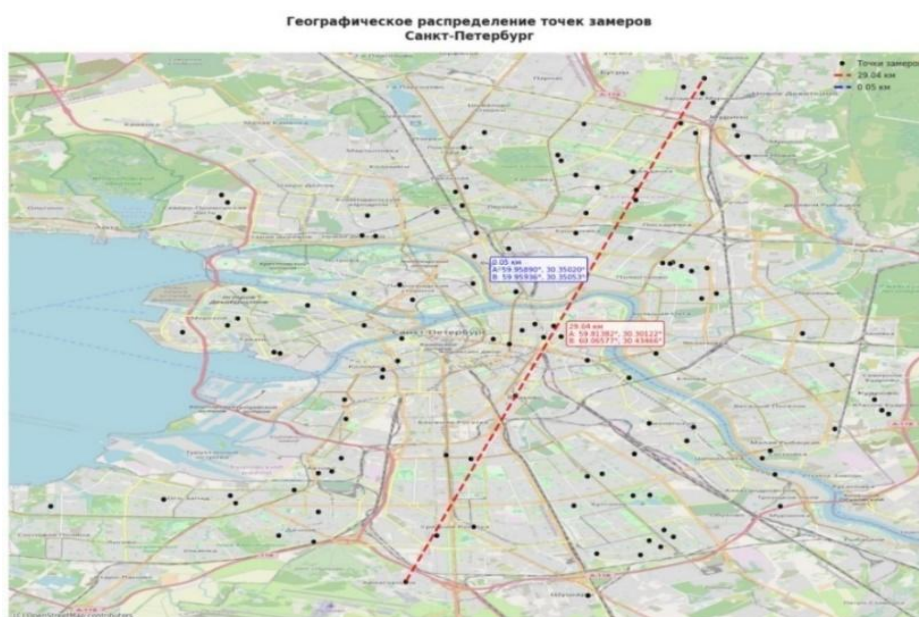


Рисунок 3.8 – Результаты расчётов максимального и минимального расстояния

Определения оптимального числа интервалов послужило эвристическое правило квадратного корня [146, 147]. Из общего количества пространственных точек наблюдения, обеспечивающее баланс между детализацией и статистической устойчивостью. На последующем этапе для каждой уникальной пары измеренных точек был выполнен расчёт квадрата разности значений целевой переменной. Полученные пары значений расстояний и квадратов разностей были сгруппированы по предварительно определённым бинам расстояний. Для каждого лага (интервала расстояний) произведён расчёт среднего значения полувариации. Параллельно зафиксировано количество пар наблюдений, попавших в каждый бин, что служит индикатором репрезентативности и статистической значимости оценки для соответствующего лага [146, 147]. Дополнительно рассчитаны интегральные метрики процесса бинирования: суммарное количество пар по всем бинам, медианное число пар на один интервал расстояний и величина шага бинирования (ширина интервала). В таблице 3.2. представлены результаты расчётов [147].

Таблица 3.2 – Результаты расчётов

Бин	Диапазон (км)	Центр бина (км)	Пар	Полувариации (норм.ед.) ²
1	0,05-2,69	1,37	337	$5,04 \times 10^{-2}$
2	2,69-5,32	4,01	911	$5,02 \times 10^{-2}$
3	5,32-7,96	6,64	1108	$5,25 \times 10^{-2}$
4	7,96-10,60	9,28	1183	$6,03 \times 10^{-2}$
5	10,60-13,23	11,91	1094	$5,98 \times 10^{-2}$
6	13,23-15,87	14,55	869	$6,63 \times 10^{-2}$
7	15,87-18,50	17,18	668	$6,44 \times 10^{-2}$
8	18,50-21,14	19,82	381	$5,65 \times 10^{-2}$
9	21,14-23,77	22,46	219	$5,98 \times 10^{-2}$
10	23,77-26,41	25,09	102	$7,47 \times 10^{-2}$
11	26,41-29,04	27,73	31	$7,66 \times 10^{-2}$
Итого				
Всего пар:				6903
Эффективных бинов:				11/11
Медианное число пар на бин:				668,0
Шаг (км):				2,64
Минимальное расстояние (км):				0,05
Максимальное расстояние (км):				29,04

В приложении Г представлено детализированное графическое отображение пространственных пар точек, входящих в каждый бин эмпирической вариограммы [146]. Для дальнейшего исследования требовалось построить эмпирическую вариограмму. На рисунке 3.9 представлена эмпирическая вариограмма [147].

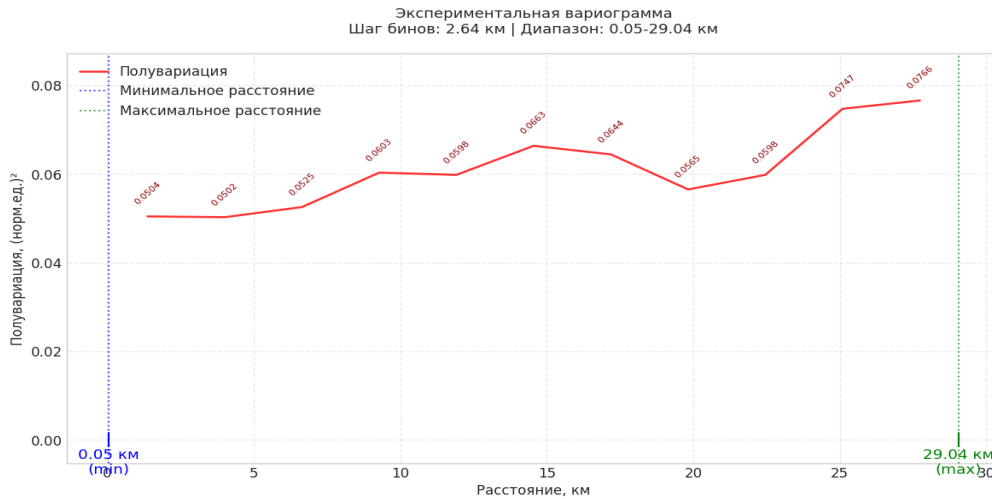


Рисунок 3.9 – Эмпирическая вариограмма

Монотонное возрастание эмпирической вариограммы без стабилизации свидетельствует о значимом пространственном тренде, нарушающем условие стационарности, необходимое для ординарного кригинга [146, 147]. Это приводит к систематическому смещению оценок и недооценке дисперсии. Нестационарность подтверждена тестом Дики-Фуллера (p -значение = 0,68) и положительной пространственной автокорреляцией (индекс Морана $I = 0,15$, p -значение = 1×10^{-3}). При сохранении нормальности распределения (Шапиро-Уилк p -значение = 0,12) обязательным этапом становится детрендирование для устранения детерминированной пространственной компоненты. Для детрендирования была применена модель градиентного бустинга [125, 146, 147]. В результате обучения получены следующие показатели: численное значение коэффициента детерминации R^2 составило 0,51, что указывает на объяснение моделью 51,52 % дисперсии целевой переменной. Численное значение средней абсолютной ошибки (MAE) достигло 0,13 нормированных единиц, демонстрируя отклонения предсказаний от фактических значений. Фактическое количество сформированных

деревьев 11 (оказалось ниже установленного лимита, что свидетельствует о срабатывании механизма ранней остановки и эффективной регуляризации модели). На рисунке 3.10 представлен анализ остатков [146].

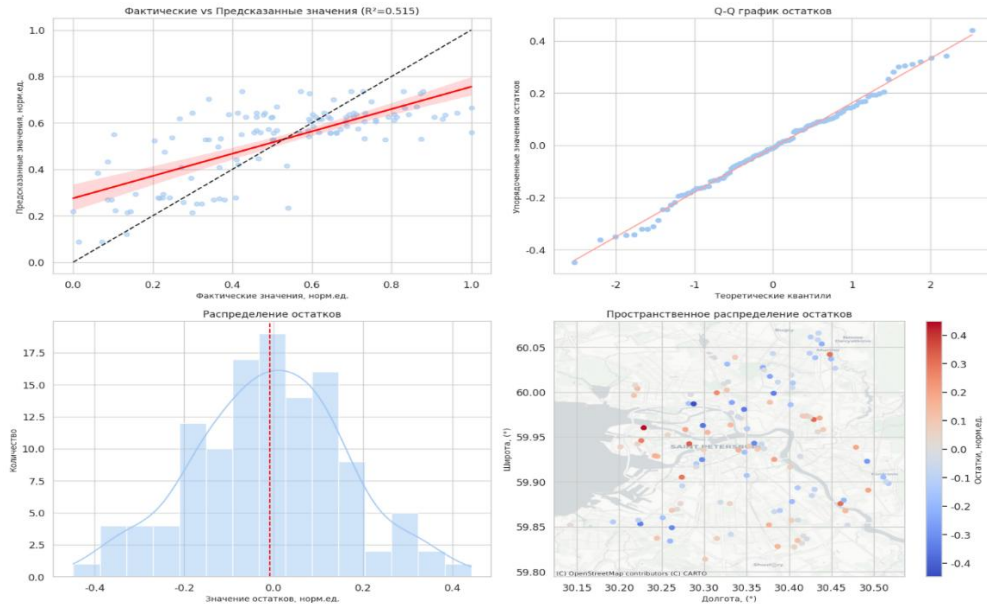


Рисунок 3.10 – Анализ остатков

Определение относительного вклада факторов в прогнозирование целевой переменной осуществлялось методом анализа важности признаков, реализованным в рамках алгоритма градиентного бустинга [125, 146, 147]. Полученные абсолютные значения важности подвергались процедуре относительной нормализации и были преобразованы в процентные доли по отношению к суммарному вкладу всех признаков, что позволило получить сопоставимую оценку вклада каждого фактора [125, 146, 147].

Расчётная процедура предполагала последовательное ранжирование предикторов по степени их влияния на минимизацию функции потерь модели, где доминирующими признавались факторы, вносящие максимальный вклад в снижение неопределённости прогноза [125, 146, 147]. Ключевым методологическим преимуществом данного подхода является его инвариантность к масштабу измерений переменных и способность учитывать сложные нелинейные взаимодействия между факторами. Важно отметить, что оценка вклада корректируется в условиях мультиколлинеарности, распределяя значимость между

коррелированными предикторами пропорционально их индивидуальной объяснительной силе [125]. На рисунке 3.11 представлена важность вклада предикторов в объяснение вариативности целевой переменной.

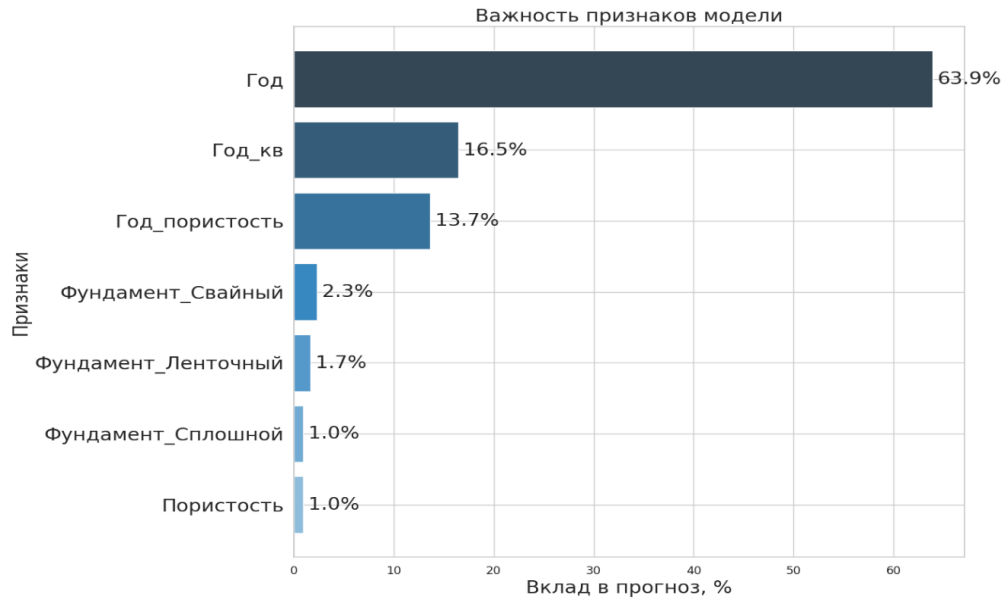


Рисунок 3.11 – Важность признаков модели

Анализ важности предикторов в модели градиентного бустинга выявил доминирование временных факторов: признак «Год постройки» (63,9 %), его квадратичная компонента (16,5 %) и взаимодействие с пористостью (13,7 %) кумулятивно объясняют > 90 % дисперсии. Категориальные переменные (типы фундамента: 1,0–2,3 %; пористость: 1,0 %) демонстрируют статистически незначимый вклад, подтверждая приоритет временной динамики [125].

Остатки модели обладают нормальным распределением (Шапиро-Уилк p -значение = 0,85) и стационарностью (p -значение = 0,04). Значимая пространственная кластеризация (индекс Морана $I=0,08$, p -значение = 0,01) обосновывает применение пространственного моделирования. Обнаруженная пространственная зависимость (индекс Морана $I > 0$) не является недостатком модели, а напротив, подтверждает наличие географически структурированного сигнала в остатках, что соответствует ожиданиям при переходе к пространственному анализу. На рисунке 3.12 представлена экспериментальная вариограмма после удаления тренда из данных [146, 147].

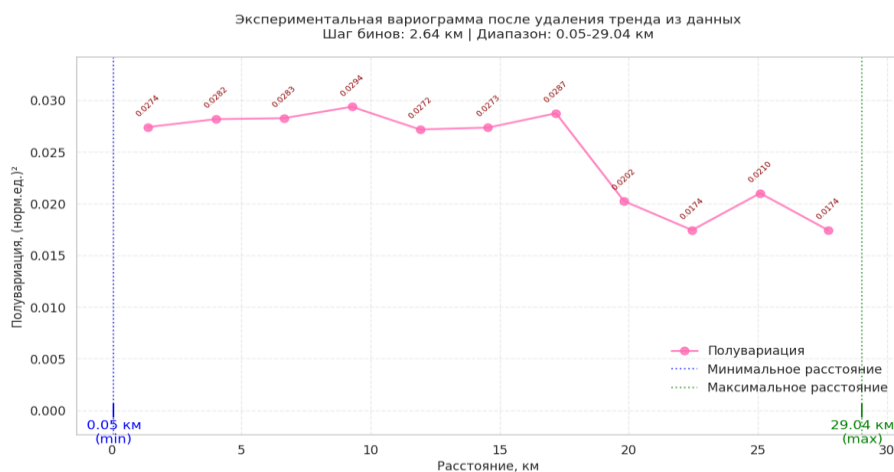


Рисунок 3.12 – Экспериментальная вариограмма после удаления тренда из данных

Оптимизация параметров теоретической сферической модели для ординарного кригинга выполнялась методом наименьших квадратов (МНК). В рамках этого метода были получены ключевые параметры: эффект самородка, порог и диапазон влияния – путём минимизации взвешенной суммы квадратов отклонений теоретической кривой от эмпирических точек вариограммы [146, 147]. Качество аппроксимации оценивалось с помощью стандартной ошибки оценки (SEE), вычисляемой как корень из среднего квадрата невязок. На рисунке 3.13 представлена аппроксимация эмпирической вариограммы теоретической кривой [146, 147].

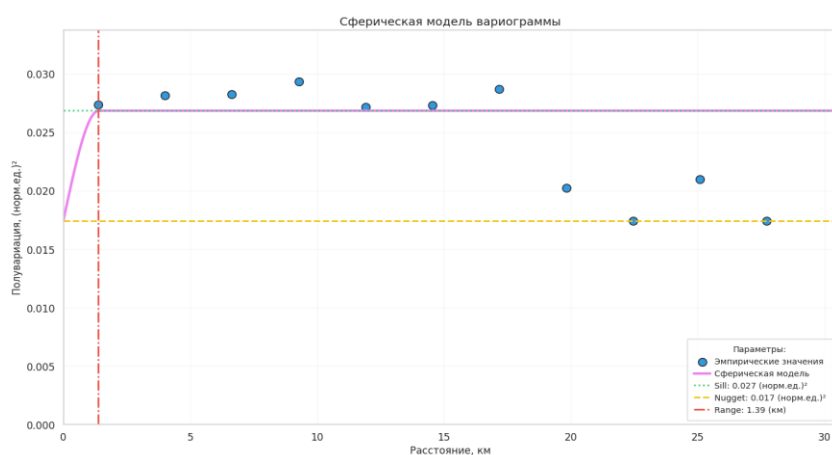


Рисунок 3.13 – Аппроксимация эмпирической вариограммы теоретической кривой

Полученные численные значения параметров сферической модели: порог = $2,7 \times 10^{-2}$ (норм.ед.)², эффект самородка = $1,7 \times 10^{-2}$ (норм.ед.)², диапазон влияния = 1,39 км демонстрируют статистическую согласованность с эмпирической структурой пространственной изменчивости среднегодовой ЭРОА изотопов радона в воздухе жилых зданий с учётом неопределённости оценки [146, 147]. Расчёт структурной дисперсии показывает, что лишь 35,3 % общей изменчивости обусловлено пространственной автокорреляцией, тогда как 64,7 % связано со случайными факторами [146, 147]. Максимальное значение эмпирической полувариации не использовалось в качестве порога вследствие оптимизационного компромисса, где алгоритм минимизировал взвешенную сумму квадратов отклонений, целенаправленно снижая влияние локальных аномалий на малых расстояниях. Низкая стандартная ошибка оценки (SEE) 5×10^{-3} (норм.ед.)², составляющая 18,6 % от величины порога и соответствующая средней ошибке предсказания полувариации $\pm 0,07$ норм.ед., подтверждает адекватность модели [146, 147].

Для пространственной интерполяции остатков модели был применён метод ординарного кригинга. На рисунке 3.14 представлена карта пространственного распределения интерполированных остатков, выполненная с применением ординарного кригинга, а также фрагмент кода, иллюстрирующий реализацию интерполяции [146].

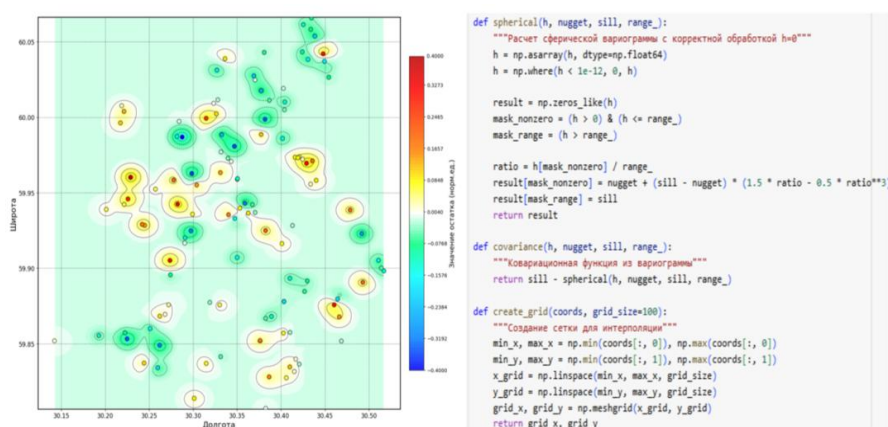


Рисунок 3.14 – Карта пространственного распределения интерполированных остатков с применением ординарного кригинга и фрагмент кода реализации интерполяции

Для оценки точности модели ординарного кригинга, применённой для интерполяции пространственных остатков, была проведена процедура кросс-валидации типа «перекрёстная проверка с исключением одного наблюдения» [146]. В её рамках каждое наблюдение поочерёдно исключалось из набора данных, а по оставшимся точкам строилась и решалась система уравнений кригинга для предсказания значения в исключённой точке. Система уравнений формировалась на основе ковариационной матрицы, учитывающей попарные расстояния между точками и параметры теоретической вариограммы, и дополнялась условием универсальности через множитель Лагранжа [137]. Для каждой точки по полученным весовым коэффициентам рассчитывалось прогнозное значение [137]. По завершении итерационного процесса для всего массива данных были вычислены метрики ошибки прогноза: средняя абсолютная ошибка (MAE) и среднеквадратичная ошибка (RMSE) [146, 147]. На рисунке 3.15 представлен график применения ключевых метрик точности прогноза с применением ординарного кригинга к остаткам [146].

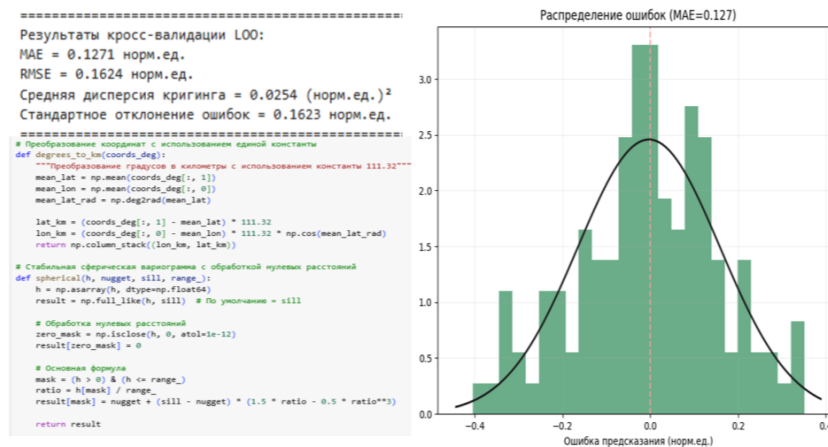


Рисунок 3.15 – Фрагмент программы реализации ординарного кригинга и результаты оценки точности прогноза

Результаты кросс-валидации типа «перекрёстная проверка с исключением одного наблюдения» для модели ординарного кригинга пространственных остатков свидетельствуют о приемлемой прогностической точности. Численное значение средней абсолютной ошибки (MAE) составило 0,13 норм.ед., что

соответствует 12,71 % от диапазона нормированной целевой переменной и отражает типичную величину отклонения интерполированных остатков от наблюдаемых [146, 147]. Окончательный прогноз среднегодовой ЭРОА изотопов радона территории формируется путём аддитивного комбинирования двух принципиально различных компонентов:

во-первых, оценки градиентного бустинга, отражающей непространственные зависимости «параметры здания → среднегодовое ЭРОА изотопов радона» на основе 120 точек измерений;

во-вторых, пространственной поправки кригинга, которая строго основана на фактических остатках модели именно в этих 120 точках замеров.

Критически важно, что интерполяция осуществляется исключительно на фундаменте реальных измерений, где кригинговая поправка рассчитывается на основе эмпирических пространственных отклонений, зафиксированных в опорных точках, а не на усреднённых параметрах зданий [146, 147]. Финальное значение среднегодовой ЭРОА получается суммированием компонент с последующим преобразованием в физические единицы. На рисунке 3.16 представлено пространственное распределение среднегодовой ЭРОА изотопов радона в воздухе жилых зданий с учётом неопределённости оценки с применением гибридной модели [146, 147].

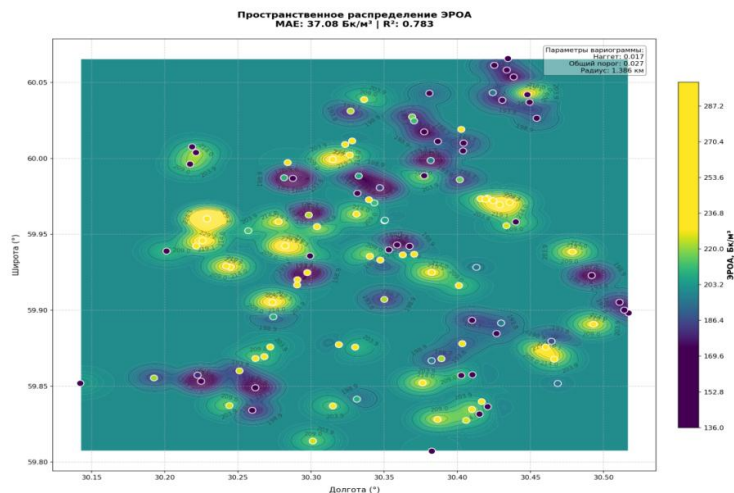


Рисунок 3.16 – Пространственное распределение среднегодовой ЭРОА изотопов радона в воздухе жилых зданий с учётом неопределённости оценки с применением гибридной модели

Коэффициент детерминации определялся через отношение необъясненной дисперсии к общей дисперсии целевой переменной, количественно оценивая долю вариабельности исходных данных, воспроизводимую моделью. Коэффициент детерминации отражает общую адекватность модели эмпирическим закономерностям, демонстрируя её способность воспроизводить пространственную изменчивость целевого параметра [146, 147]. Значение средней абсолютной ошибки (MAE) характеризует среднюю величину ошибки предсказания в физических единицах, что особенно значимо для прикладной интерпретации результатов.

Результаты валидации были интегрированы в финальную картографическую визуализацию, обеспечивая прозрачную оценку качества модели. Численное значение коэффициента детерминации $R^2 = 0,78$ свидетельствует о том, что предложенная гибридная модель объясняет 78,32 % общей вариабельности среднегодовой ЭРОА изотопов радона в воздухе жилых зданий с учётом неопределённости оценки, что является высоким показателем для задач пространственного прогнозирования [146, 147]. На рисунке 3.17 представлены соотношения фактических и предсказанных значений среднегодовой ЭРОА изотопов радона в воздухе жилых зданий с учётом неопределённости оценки [146].

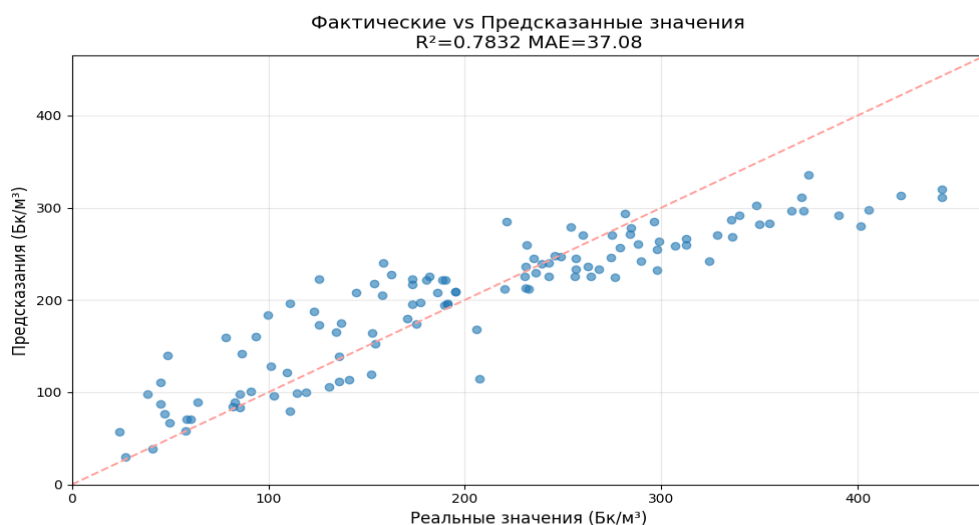


Рисунок 3.17 – График соотношения фактических и предсказанных значений ЭРОА изотопов радона

Численное значение средней абсолютной ошибки прогноза составляет 37,08 Бк/м³, что количественно характеризует точность модели в естественных единицах измерения. Наибольшая плотность точек наблюдается в диапазоне 100–300 Бк/м³, где модель демонстрирует максимальную точность, в то время как в области экстремально высоких концентраций (свыше 300 Бк/м³) отмечается некоторое рассеивание точек. Отсутствие систематического смещения точек относительно диагонали свидетельствует о несмещённости оценок, а равномерное распределение ошибок по всему диапазону концентраций подтверждает корректность применённых преобразований данных.

Полученные результаты валидации подтверждают адекватность методологии, сочетающей градиентный бустинг для учёта конструктивных особенностей зданий и ординарный кригинг для пространственной коррекции, обеспечивая научную основу для принятия решений в области радиационной безопасности. На рисунке 3.18 представлен график кумулятивного распределения ошибок модели.



Рисунок 3.18 – График кумулятивного распределения абсолютных ошибок модели

Кумулятивное распределение ошибок предоставляет важные квантильные оценки точности модели:

– численное значение медианной ошибки (50-й процентиль) составляет 29,9 Бк/м³, что означает, что половина всех прогнозов отклоняется от фактических значений не более чем на эту величину;

– численное значение 75-го перцентиля соответствует 55,6 Бк/м³, демонстрируя, что три четверти прогнозов имеют ошибку в пределах этого значения;

– численное значение 90-го перцентиля отражает, что 10 % всех прогнозов отклоняется от фактических значений не более чем на 82,0 Бк/м³;

– численное значение 95-го перцентиля достигает 97,5 Бк/м³, определяя порог, за пределами которого находятся лишь 5 % наибольших ошибок.

На финальной визуализации реализовано контурное отображение интерполированных значений среднегодовой ЭРОА изотопов радона в воздухе жилых зданий с учётом неопределённости оценки. Для цветовой шкалы использовалась непрерывная градация от 5-го до 95-го перцентиля распределения, дополненная изолиниями с равномерным шагом для количественной оценки пространственных закономерностей [147]. На рисунке 3.19 представлено пространственное распределение среднегодовой ЭРОА изотопов радона в воздухе жилых зданий Санкт-Петербурга с учётом неопределённости оценки [146].

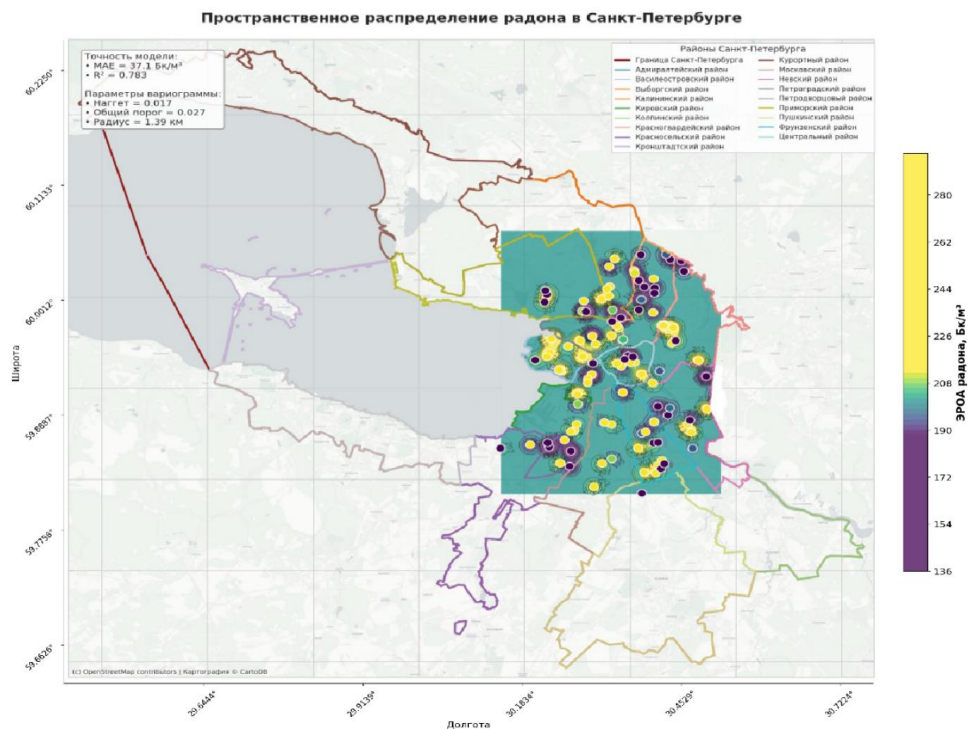


Рисунок 3.19 – Пространственное распределение среднегодовой ЭРОА изотопов радона в воздухе жилых зданий Санкт-Петербурга с учётом неопределённости оценки

В рамках исследования сформированы два ключевых массива прогнозных данных, обеспечивающих комплексный анализ пространственного распределения среднегодовой ЭРОА изотопов радона в воздухе жилых зданий Санкт-Петербурга с учётом неопределённости оценки.

Первый массив охватывает точки фактических измерений и интегрирует географические координаты, конструктивные особенности исследуемых зданий (год постройки, пористость материалов, тип фундамента), а также квадратичный член года постройки и взаимодействие года постройки с пористостью материалов.

Для узлов интерполяционной сетки разрешением 200×200 (40000 точек) с координатами в градусах и километровой проекции со сферическими поправками, в модели использовано «усреднённое здание» (год постройки 1971 год, смешанный материал стен (кирпич и бетон), с доминирующим типом фундамента), что позволило получить прогнозные значения среднегодовой ЭРОА изотопов радона в воздухе жилых зданий Санкт-Петербурга с учётом неопределённости.

Полученные прогнозные данные служат научной основой для выявления зон с повышенными значениями среднегодовой ЭРОА изотопов радона при реновации исторической застройки [125, 146, 147].

3.5. Разработка математической модели и структурной схемы контроля канцерогенного риска облучения радоном

Оптимальной спецификацией, удовлетворявшей критериям адекватности данным, биологической интерпретируемости и практической реализуемости, была признана квадратичная регрессионная модель, включавшая член взаимодействия между дозой и статусом курения представленная в формуле 3.51 [148, 149]:

$$\text{Риск} = \beta_0 + \beta_1 \times \text{Курение} + \beta_2 \times (A_{\text{экв.зд}} \times t) + \beta_3 \times (A_{\text{экв.зд}} \times t)^2 + \beta_4 \times (\text{Курение} \times (A_{\text{экв.зд}} \times t)) + \beta_5 \times (\text{Курение} \times (A_{\text{экв.зд}} \times t)^2), \quad (3.51)$$

где риск – канцерогенный риск последствий облучения радоном в %;

курение – бинарная переменная (1 – курящий, 0 – некурящий);

$A_{\text{экв.зд}}$ – среднее значение ЭРОА изотопов радона в воздухе здания (Бк/м³);

t – время воздействия (лет);

β_0 – риск рака для некурящих без облучения в %;

β_1 – дополнительный риск от курения (без облучения) в %;

β_2 – линейный рост риска на 1 Бк × год/м³ для некурящих в %/(Бк×год/м³);

β_3 – сублинейный рост риска на высоких дозах для некурящих в %/(Бк × год/м³)²;

β_4 – усиление линейного эффекта дозы для курящих в %/(Бк × год/м³);

β_5 – дополнительный сублинейный рост риска на высоких дозах для курящих в %/(Бк×год/м³)².

Эта модель обеспечила точное соответствие наблюдаемым закономерностям: линейно-квадратичный рост риска у некурящих в зависимости от кумулятивной экспозиции ($A_{\text{экв.зд}} \times t$), синергическое усиление эффекта воздействия радона при курении (увеличение градиента риска от уровня объёмной активности), и эффект насыщения (сублинейность) на высоких уровнях экспозиции в группе курящих за счёт взаимодействия квадратичного члена экспозиции с ковариатом курения [148]. Используя предоставленные эпидемиологические данные, коэффициенты модели рассчитываются отдельно для курящих и некурящих, после чего интегрируются в общую параметризацию.

Для не курящих (курение =0) расчёт риска представлен в формуле 3.52 [148,

149]:

$$\text{Риск} = \beta_0 + \beta_2 \times (A_{\text{экв.зд}} \times t) + \beta_3 \times (A_{\text{экв.зд}} \times t)^2, \quad (3.52)$$

Для курящих (курение = 1) расчёт риска представлен в формуле 3.53 [148, 149]:

$$\text{Риск} = (\beta_0 + \beta_1) + (\beta_2 + \beta_4) \times (A_{\text{экв.зд}} \times t) + (\beta_3 + \beta_5) \times (A_{\text{экв.зд}} \times t)^2, \quad (3.53)$$

Значение индивидуальной годовой эффективной дозы внутреннего облучения взрослых жителей населённого пункта (района и т. п.) за счёт короткоживущих дочерних продуктов изотопов радона в воздухе рассчитывается по формуле 3.54 (методических рекомендаций МУ 2.6.1.1088-02) [10, 150].

$$\begin{aligned} E_{\text{вн.,Rn}} &= 9,0 \times 10^{-6} \times 8800 \times (0,2 \times A_{\text{экв.ул}} + 0,8 \times A_{\text{экв.зд}}) = \\ &= 0,01584 \times (A_{\text{экв.ул}} + 4 \times A_{\text{экв.зд}}), \end{aligned} \quad (3.54)$$

где $E_{\text{вн.,Rn}}$ – индивидуальная годовая эффективная доза внутреннего облучения взрослых жителей за счёт короткоживущих дочерних продуктов изотопов радона в воздухе (мЗв/год);

$9,0 \times 10^{-6}$ – дозовый коэффициент, принимаемый в соответствии с докладом Научного комитета Организации Объединённых Наций по действию атомной радиации (НКДАР ООН) за 2000 г. $\left[\frac{\text{мЗв}}{\text{час} \times \frac{\text{Бк}}{\text{м}^3}} \right]$;

8800 – часов в году (час.);

$A_{\text{экв.ул}}$ – среднее значение ЭРОА изотопов радона в воздухе на открытой территории населённого пункта (если нет данных принимать, как $6,5 \text{ Бк/м}^3$);

$A_{\text{экв.зд}}$ – среднее значение ЭРОА изотопов радона в воздухе здания (Бк/м^3).

Делаем допущения, что индивидуальная годовая эффективная доза внутреннего облучения взрослых жителей за счёт короткоживущих дочерних продуктов изотопов радона в воздухе со временем остается постоянной, тогда доза эффективная ожидаемая внутреннего облучения взрослых жителей за счёт короткоживущих дочерних продуктов изотопов радона в воздухе рассчитывается по формуле 3.55:

$$E(\tau) = E_{\text{вн.,Rn}} \times t \quad (3.55)$$

где $E(\tau)$ – доза эффективная ожидаемая внутреннего облучения взрослых

жителей за счёт короткоживущих дочерних продуктов изотопов радона в воздухе в мЗв;

t – время экспозиции в годах.

Тогда, риск необходимо рассчитать по формуле 3.56 [148, 149, 151].

$$\begin{aligned} \text{Риск} = & \beta_0 + \beta_1 \times \text{Курение} + \gamma_2 \times (E(\tau)) + \gamma_3 \times (E(\tau))^2 + \gamma_4 \times \\ & \times (\text{Курение} \times (E(\tau))) + \gamma_5 \times (\text{Курение} \times (E(\tau))^2), \end{aligned} \quad (3.56)$$

где γ_2 – линейный рост риска на 1 мЗв×год для некурящих в %/(мЗв);

γ_3 – сублинейный рост риска на высоких дозах для некурящих в %/(мЗв×год)²;

γ_4 – усиление линейного эффекта дозы для курящих в %/(мЗв);

γ_5 – дополнительный сублинейный рост риска на высоких дозах для курящих в %/(мЗв)².

Коэффициент конверсии рассчитывается по формуле 3.57 [148, 149, 151].

$$K = \frac{E(\tau)}{A_{\text{ЭКВ.ЗД}} \times t} = \frac{E_{\text{ВН}} \times t}{A_{\text{ЭКВ.ЗД}} \times t} = \frac{0,01584 \times (A_{\text{ЭКВ.УЛ}} + 4 \times A_{\text{ЭКВ.ЗД}}) \times t}{A_{\text{ЭКВ.ЗД}} \times t}, \quad (3.57)$$

где K – коэффициент конверсии в (мЗв/Бк×год/м³).

Для территориальной адаптации модели требуется корректировка параметров γ_2 , γ_3 , γ_4 и γ_5 на основе функциональной зависимости между дозой эффективной ожидаемой и средним значением ЭРОА изотопов радона в воздухе здания за исследуемый период [33], реализуемой в соответствии с аналитическими соотношениями (3.58)–(3.61).

$$\gamma_2 = \frac{\beta_2}{K}, \quad (3.58)$$

$$\gamma_3 = \frac{\beta_3}{K^2}, \quad (3.59)$$

$$\gamma_4 = \frac{\beta_4}{K}, \quad (3.60)$$

$$\gamma_5 = \frac{\beta_5}{K^2}, \quad (3.61)$$

На рисунке 3.20. представлена математическая модель и структурная схема процесса контроля канцерогенного риска облучения радоном.

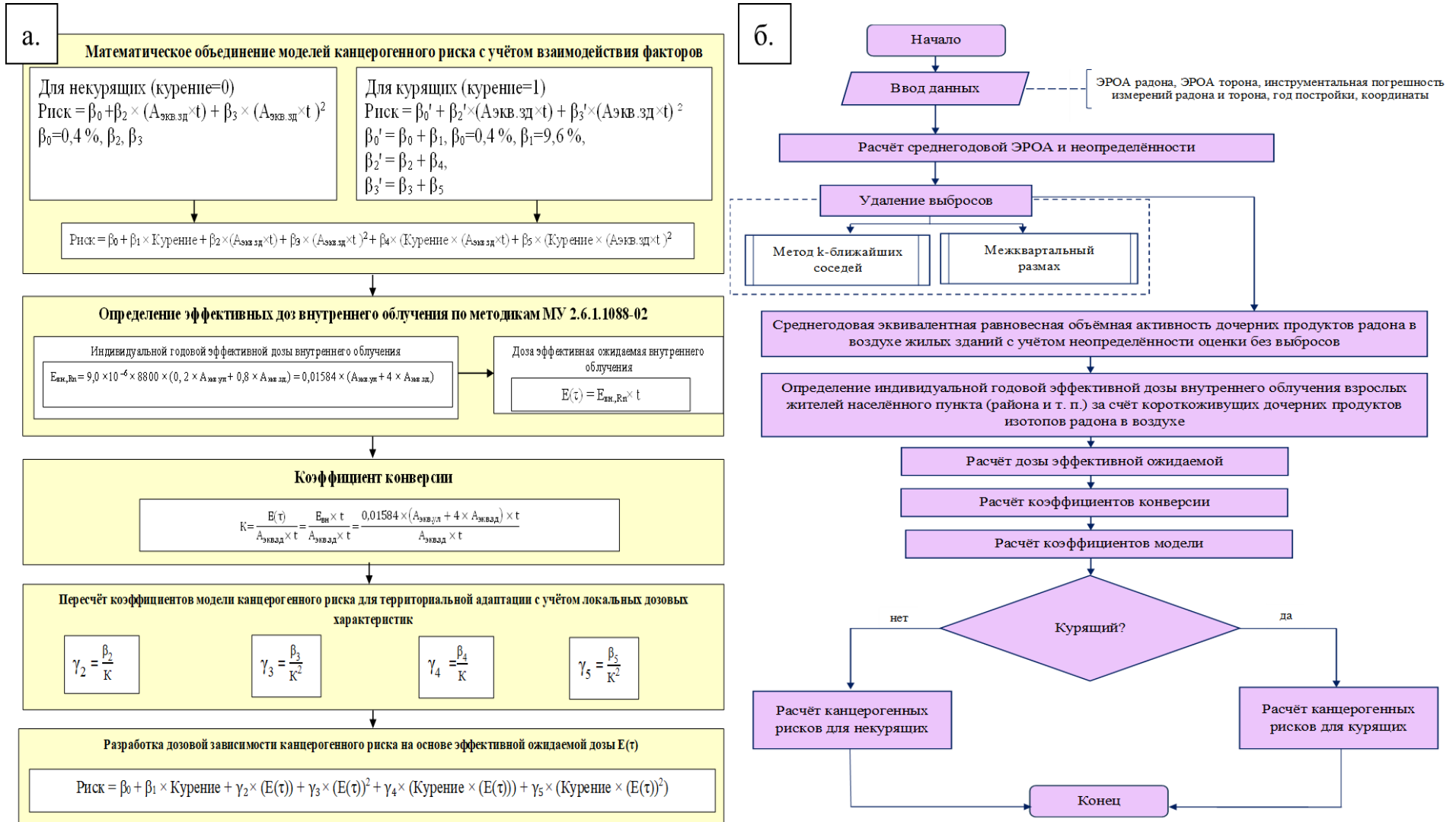


Рисунок 3.20 – Процесс контроля канцерогенного риска облучения радоном а. – математическая модель; б. – структурная схема [148, 149]

3.6. Результаты реализации математической модели контроля канцерогенного риска облучения радоном

Первый этап: формирование массива исходных параметров, необходимых для последующего моделирования. Ключевыми входными переменными выступают: ЭРОА изотопов радона в воздухе помещений, инструментальная погрешность измерения ЭРОА изотопов радона, географические координаты точек, а также временной интервал экспозиции (лет), среднее значение ЭРОА радона изотопов радона в воздухе на открытой территории населённого пункта, принимаемое равным $6,5 \text{ Бк/м}^3$ [148]. Далее рассчитали среднегодовую ЭРОА изотопов радона в воздухе жилых зданий с учётом неопределённости оценки по формуле 3.1–3.3, результаты расчётов представлены в приложении В [151].

Второй этап: идентификация и коррекция статистических выбросов в массивах среднегодовой ЭРОА изотопов радона [16] в воздухе жилых зданий с учётом неопределённости оценки посредством применения двух взаимодополняющих методов: анализа межквартильного размаха (IQR) и k -ближайших соседей (k -NN).

Третий этап: определение индивидуальной годовой эффективной дозы внутреннего облучения взрослых жителей населённого пункта (района и т. п.) за счёт короткоживущих дочерних продуктов изотопов радона в воздухе по формуле 3.54. Результаты расчётов представлены в приложении Е.

Четвёртый этап: расчёт эффективной ожидаемой дозы по формуле 3.55. Накопленная доза вычисляется интегрированием в заданном временном интервале от начального момента $t_0 = 0$ лет (условное начало экспозиции) до $t = 75$ лет с дискретным шагом, равным 5 годам. Пользователь может произвольно задавать начальный (t_0) и конечный (t) моменты времени в диапазоне от 0 до 75 лет, а также регулировать шаг дискретизации [148].

Пятый этап: калибровка коэффициентов квадратичной регрессионной модели. Модель строится на основе референтных эпидемиологических данных (МКРЗ, публикация № 115), а именно – значений абсолютного канцерогенного риска для трёх фиксированных уровней объёмной активности радона (0, 100 и 400

Бк/м³) при экспозиции в 75 лет. Процедура калибровки проводится отдельно для курящих и некурящих [148, 149, 151, 152].

Математическая формализация предполагает отдельное моделирование прироста риска в подгруппах. Для некурящих риск аппроксимируется функцией, включающей линейный (β_2) и квадратичный (β_3) члены кумулятивной экспозиции, определяемые решением системы линейных уравнений [148, 149]. В подгруппе курящих сначала выделяется базовый вклад табакокурения (β_1) как разность констант, после чего регрессионный анализ отклонений от данного базового уровня позволяет оценить модифицирующие эффекты воздействия: коэффициент усиления линейного тренда (β_4) и дополнительный квадратичный вклад (β_5), отражающие синергическое взаимодействие факторов [148, 149]. Путём сопоставления расчётных значений модели с исходными эпидемиологическими данными для ключевых уровней экспозиции была выполнена верификация, подтвердившая адекватность модели. Результаты расчётов коэффициентов представлены в таблице 3.3 [148].

Таблица 3.3 – Результаты расчётов коэффициентов $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4, \beta_5$

Название	Обозначение	Значение	Единицы измерения
Риск рака для некурящих без облучения	β_0	0,4	%
Дополнительный риск от курения (без облучения)	β_1	9,6	%
Линейный рост риска на 1 Бк×год/м ³ для некурящих	β_2	$1,44 \times 10^{-5}$	%/(Бк×год/м ³)
Сублинейный рост риска на высоких дозах для некурящих	β_3	$- 1,48 \times 10^{-10}$	%/(Бк×год/м ³) ²
Усиление линейного эффекта дозы для курящих	β_4	$2,74 \times 10^{-4}$	%/(Бк×год/м ³)
Дополнительный сублинейный рост риска на высоких дозах для курящих	β_5	$- 2,81 \times 10^{-9}$	%/(Бк×год/м ³) ²

Шестой этап: расчёт коэффициентов конверсии (К) между дозой эффективной ожидаемой и среднегодовой ЭРОА изотопов радона в воздухе [10]

жилых зданий с учётом неопределённости за исследуемый период. Итоговые результаты представляются в виде структурированной таблицы, включающей как районные, так и общегородские интегральные показатели [148]. Результаты расчётов представлены на в таблице 3.4 [148].

Таблица 3.4 – Результаты расчёта коэффициентов конверсии (К)

Район	Среднегодовая ЭРОА (Бк/м ³)	Коэффициент К, мЗв/(Бк·год/м ³)
Невский	199,55	$6,39 \times 10^{-2}$
Красносельский	173,4	$6,40 \times 10^{-2}$
Адмиралтейский	260	$6,38 \times 10^{-2}$
Выборгский	183	$6,39 \times 10^{-2}$
Калининский	198,14	$6,39 \times 10^{-2}$
Кировский	179,16	$6,39 \times 10^{-2}$
Другой	105	$6,43 \times 10^{-2}$
Василеостровский	318,5	$6,37 \times 10^{-2}$
Центральный	168,15	$6,40 \times 10^{-2}$
Московский	249,73	$6,38 \times 10^{-2}$
Пушкинский	154,54	$6,40 \times 10^{-2}$
Среднее по городу	205,48	$6,39 \times 10^{-2}$

Седьмой этап: валидация модели пространственного анализа. Был разработан автоматизированный верификационный модуль, генерирующий синтетические тестовые наборы данных [151]. Модуль создаёт точки с заданными координатами в границах административных районов и известными значениями среднегодовой ЭРОА изотопов радона в воздухе жилых зданий с учётом неопределённости, а также ожидаемой эффективной дозы за исследуемый период [148, 149, 151]. На основе этих данных рассчитываются теоретические коэффициенты конверсии (К), которые затем сравниваются со значениями, полученными из модели. Алгоритм идентифицирует все отклонения, превышающие порог точности в 10^{-4} , и формирует детализированный диагностический протокол расхождений для выявления и анализа ошибок [148].

Восьмой этап: пересчёт глобальных коэффициентов регрессионной модели ($\beta_2, \beta_3, \beta_4, \beta_5$) в адаптированные внутрирайонные параметры (γ). Масштабирование осуществляется с учётом нелинейной природы дозовой зависимости: линейные

компоненты модели (γ_2 , γ_4) корректируются пропорционально районному коэффициенту K , в то время как квадратичные компоненты (γ_3 , γ_5) – пропорционально K^2 [148, 149]. Результаты расчётов программы коэффициентов модели для районов Санкт-Петербурга представлены в таблице 3.5.

Таблица 3.5 – Результаты расчёта коэффициентов модели для районов Санкт-Петербурга [148]

Район	K , мЗв/(Бк·год/м ³)	γ_2 , %/мЗв	γ_3 , %/мЗв ²	γ_4 , %/мЗв	γ_5 , %/мЗв ²
Невский	$6,39 \times 10^{-2}$	$2,26 \times 10^{-4}$	$-3,63 \times 10^{-8}$	$4,30 \times 10^{-3}$	$-6,90 \times 10^{-7}$
Красногвардейский	$6,40 \times 10^{-2}$	$2,26 \times 10^{-4}$	$-3,62 \times 10^{-8}$	$4,29 \times 10^{-3}$	$-6,88 \times 10^{-7}$
Адмиралтейский	$6,38 \times 10^{-2}$	$2,27 \times 10^{-4}$	$-3,64 \times 10^{-8}$	$4,30 \times 10^{-3}$	$-6,92 \times 10^{-7}$
Выборгский	$6,39 \times 10^{-2}$	$2,26 \times 10^{-4}$	$-3,63 \times 10^{-8}$	$4,29 \times 10^{-3}$	$-6,89 \times 10^{-7}$
Калининский	$6,39 \times 10^{-2}$	$2,26 \times 10^{-4}$	$-3,63 \times 10^{-8}$	$4,30 \times 10^{-3}$	$-6,90 \times 10^{-7}$
Кировский	$6,39 \times 10^{-2}$	$2,26 \times 10^{-4}$	$-3,62 \times 10^{-8}$	$4,29 \times 10^{-3}$	$-6,89 \times 10^{-7}$
Другой	$6,43 \times 10^{-2}$	$2,25 \times 10^{-4}$	$-3,58 \times 10^{-8}$	$4,27 \times 10^{-3}$	$-6,80 \times 10^{-7}$
Василеостровский	$6,37 \times 10^{-2}$	$2,27 \times 10^{-4}$	$-3,65 \times 10^{-8}$	$4,31 \times 10^{-3}$	$-6,94 \times 10^{-7}$
Центральный	$6,40 \times 10^{-2}$	$2,26 \times 10^{-4}$	$-3,62 \times 10^{-8}$	$4,29 \times 10^{-3}$	$-6,88 \times 10^{-7}$
Московский	$6,38 \times 10^{-2}$	$2,27 \times 10^{-4}$	$-3,64 \times 10^{-8}$	$4,30 \times 10^{-3}$	$-6,92 \times 10^{-7}$
Пушкинский	$6,40 \times 10^{-2}$	$2,26 \times 10^{-4}$	$-3,61 \times 10^{-8}$	$4,29 \times 10^{-3}$	$-6,87 \times 10^{-7}$
Среднее по городу	$6,39 \times 10^{-2}$	$2,26 \times 10^{-4}$	$-3,63 \times 10^{-8}$	$4,30 \times 10^{-3}$	$-6,90 \times 10^{-7}$

Девятый этап: расчёт среднего индивидуального канцерогенного риска для административных районов с дифференциацией по статусу курения. Для некурящих применяется квадратичная модель, объединяющая базовый риск (β_0), линейный (γ_2) и квадратичный (γ_3) дозовые компоненты. Результаты расчётов для некурящих представлены в таблице 3.6 [148].

Таблица 3.6 – Результаты расчётов для некурящих жителей районов Санкт-Петербурга

Район	Евн, R _n (мЗв/год)	Доза эффективная ожидаемая (мЗв)	Риск (доли ед.)
1	2	3	4
Невский	12,75	955,96	$5,83 \times 10^{-3}$
Красногвардейский	11,09	831,71	$5,63 \times 10^{-3}$
Адмиралтейский	16,59	1244,09	$6,25 \times 10^{-3}$
Выборгский	11,70	877,44	$5,70 \times 10^{-3}$
Калининский	12,66	949,30	$5,82 \times 10^{-3}$
Кировский	11,45	858,82	$5,67 \times 10^{-3}$
Другой	6,76	506,87	$5,05 \times 10^{-3}$

Окончание таблицы 3.6

1	2	3	4
Василеостровский	20,28	1521,17	$6,60 \times 10^{-3}$
Центральный	10,76	806,76	$5,58 \times 10^{-3}$
Московский	15,93	1194,44	$6,18 \times 10^{-3}$
Пушкинский	9,89	742,12	$5,48 \times 10^{-3}$
Среднее по городу	13,12	984,16	$5,87 \times 10^{-3}$

Аналогичная процедура выполняется для курящей подгруппы с использованием расширенной модели, включающей дополнительные коэффициенты синергизма (γ_4, γ_5) и повышенный базовый риск ($\beta_0 + \beta_1$). Результаты расчётов для курящих представлены в таблице 3.7 [148].

Таблица 3.7 – Результаты расчётов для курящих жителей районов Санкт-Петербурга

Район	Евн, Rn (мЗв/год)	Доза эффективная ожидаемая (мЗв)	Риск для курящих (доли ед.)
Невский	12,75	955,96	$1,37 \times 10^{-1}$
Красногвардейский	11,09	831,71	$1,33 \times 10^{-1}$
Адмиралтейский	16,59	1244,09	$1,45 \times 10^{-1}$
Выборгский	11,70	877,44	$1,34 \times 10^{-1}$
Калининский	12,66	949,30	$1,36 \times 10^{-1}$
Кировский	11,45	858,82	$1,33 \times 10^{-1}$
Другой	6,76	506,87	$1,21 \times 10^{-1}$
Василеостровский	20,28	1521,17	$1,52 \times 10^{-1}$
Центральный	10,76	806,76	$1,32 \times 10^{-1}$
Московский	15,93	1194,44	$1,44 \times 10^{-1}$
Пушкинский	9,89	742,12	$1,30 \times 10^{-1}$
Среднее по городу	13,12	984,16	$1,37 \times 10^{-1}$

В ходе исследования разработана и реализована многоэтапная методика количественной оценки канцерогенного риска воздействия радона, учитывающая неопределённость измерений, пространственное распределение и статус курения. [148, 149].

ВЫВОДЫ ПО ТРЕТЬЕМУ РАЗДЕЛУ

Разработанная информационная модель принципиально преодолевает методологические ограничения статической карты радоновых зон Агентства по охране окружающей среды США (EPA), обеспечивая качественно новый уровень прогнозирования. В отличие от модели EPA, в гибридной модели критическое превосходство реализовано по трём направлениям.

Во-первых, система интегрирует динамический учёт конструктивного старения зданий [125].

Во-вторых, гибридная модель сочетает нелинейное моделирование конструктивных параметров методами машинного обучения с пространственной интерполяцией остатков ординарным кригингом [146].

В-третьих, система обеспечивает полную автоматизацию процесса от расчёта среднегодовой ЭРОА изотопов радона до генерации карты, что сокращает трудоёмкость анализа и исключает субъективизм ручной классификации.

Экспериментальная верификация на данных Санкт-Петербурга подтвердила превосходство гибридного подхода ($R^2 = 0,78$, MAE = 37,08 Бк/м³) [146, 147].

Однако модель обладает существенными ограничениями, требующими дальнейшей разработки. Высокая вычислительная сложность алгоритмов кригинга, особенно при решении систем уравнений для больших ковариационных матриц, затрудняет обработку массивов данных свыше 10^4 точек. Значительный эффект самородка в вариограмме (64,7 %) свидетельствует о неучтённых факторов. Несмотря на указанные ограничения, разработанный подход создаёт методологический базис для цифровизации радиационно-экологического мониторинга в урбанизированных экосистемах.

Параллельно с пространственным моделированием в работе разработана математическая модель оценки канцерогенного риска, адаптированная к региональным условиям [148, 148, 151]. Разработанный подход, представляет собой комплексную аналитическую основу для научно обоснованного стратегического планирования защитных мероприятий [153, 154].

РАЗДЕЛ 4. МЕТОДИКА АВТОМАТИЗАЦИИ КОНТРОЛЯ РАДОНООПАСНОСТИ УРБАНИЗИРОВАННЫХ ТЕРРИТОРИЙ

В четвертом разделе решается задача разработки методики автоматизации контроля радоноопасности урбанизированных территорий, основанный на интеграции методов математического моделирования: геостатистического анализа и машинного обучения для прогнозирования ЭРОА изотопов радона в воздухе эксплуатируемых жилых зданий.

Целью четвертого раздела является разработка методики автоматизации контроля радоноопасности, обеспечивающей переход от разрозненных выборочных измерений к пространственному прогнозированию на основе математических моделей и алгоритма автоматизации разработанных ранее с последующей интеграцией методики автоматизации контроля радоноопасности урбанизированных территорий в действующую систему радиационного контроля Российской Федерации.

Для достижения поставленной цели необходимо обосновать концепцию автоматизированного подхода к контролю радоноопасности, обеспечить согласование разработанной методики с требованиями действующих нормативных документов (МР 2.6.1.0333-23, МУ 2.6.1.037-2015, СП 321.1325800.2017) и её интеграцию в систему оценки радоноопасности урбанизированных территорий в Российской Федерации. Дополнительно требуется систематизировать мероприятия по противорадоновой защите и разработать матрицу применения инженерных решений для проектируемых и эксплуатируемых зданий.

Реализация методики автоматизации контроля радоноопасности урбанизированной территории, обеспечивает повышение оперативности и снижение трудоемкости за счёт автоматизации обработки пространственно-распределённых данных, формирования адресных прогнозных оценок с идентификацией зон потенциального превышения нормативов, а также научно обоснованного планирования противорадоновых мероприятий с учётом конструктивных особенностей зданий и территориальной специфики.

4.1. Разработка методики автоматизации контроля радоноопасности урбанизированных территорий

Методика автоматизации контроля радоноопасности урбанизированных территорий была реализована на основе разработанных в третьем разделе математических моделей и алгоритма автоматизации контроля радоноопасности урбанизированной территории.

Данная методика представляет собой комплексный аналитический инструмент, предназначенный для количественной оценки и пространственного прогнозирования потенциальной радоноопасности урбанизированных территорий.

Целью методики является снижение трудоемкости, повышение оперативности и достоверности оценки потенциальной радоноопасности урбанизированной территории путем автоматизации контроля ЭРОА изотопов радона.

Основное преимущество разработанной методики автоматизации контроля радоноопасности урбанизированных территорий заключается в том, что методика позволяет на основе ограниченной репрезентативной выборки полевых измерений получить достоверную информацию о радоноопасности всей исследуемой территории. Тем самым устраняется необходимость проведения массовых сплошных измерений во всех зданиях, что значительно сокращает временные и материальные затраты. Также методика автоматизации контроля радоноопасности урбанизированных территорий:

- сокращает время на сбор данных и их обработку;
- позволяет быстро выявлять зоны риска и переходить к детальному обследованию только в необходимых случаях;
- позволяет обосновать технические решения по противорадоновой защите для снижения концентрации радона до установленного референтного уровня.

На рисунке 4.1 представлена структурная схема методики автоматизации контроля радоноопасности урбанизированных территорий.

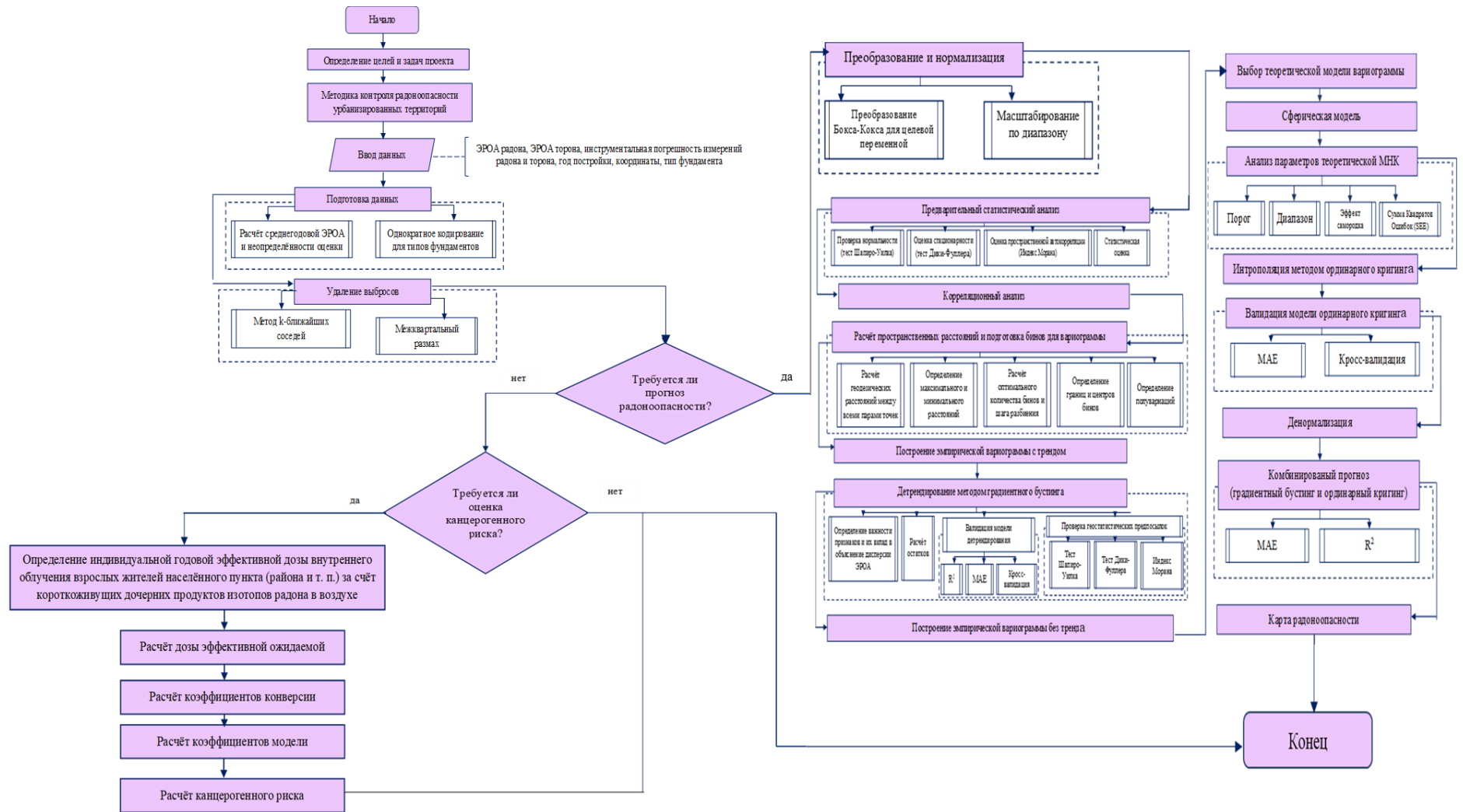


Рисунок 4.1 – Структурная схема методики автоматизации контроля радоноопасности урбанизированных территорий

В соответствии с МР 2.6.1.0333-23 «Радиационный контроль и санитарно-эпидемиологическая оценка жилых, общественных и производственных зданий и сооружений по показателям радиационной безопасности» и дополняющей её МУ 2.6.1.037-2015 «Определение среднегодовых значений ЭРОА изотопов радона в воздухе помещений по результатам измерений разной длительности», основаниями для проведения контроля радона являются: проверка по обращениям граждан, паспортизация территории, наличие данных о высокой потенциальной радоноопасности участка, после проведения противорадоновых мероприятий для оценки их эффективности, при изменении условий эксплуатации здания, при обнаружении локальных радиационных аномалий или участков загрязнения в строительных конструкциях [32, 33].

Предложенная методика меняет подход к контролю, используя вместо простого накопления измерений математическое моделирование для построения непрерывных карт распределения радона. В основе методики лежит гибридная вычислительная модель, объединяющая методы машинного обучения (градиентный бустинг) и геостатистики (ординарный кригинг). Учёт конструктивных особенностей зданий (год постройки, тип фундамента) и пространственных факторов (географические и геологические условия) повышает достоверность оценки потенциальной радоноопасности в эксплуатируемых жилых зданиях. Снижение трудоёмкости и повышение оперативности контроля достигается за счёт автоматизации ключевых этапов обработки данных и принципиального изменения процедуры обследования. Разработанный алгоритм, реализованный в виде компьютерной программы, выполняет все сложные вычисления автоматически.

Методика предусматривает проведение краткосрочных измерений на ограниченной репрезентативной выборке, построение на их основе прогнозной карты и выполнение подтверждающих измерений только в тех зданиях, где прогнозируются превышения референтного уровня. Такой подход вместо сплошного обследования всей территории позволяет эффективно использовать ресурсы, направляя их на критические участки.

4.2. Результаты методики автоматизации контроля радоноопасности урбанизированных территорий

Первый этап. Пользователь открывает приложение и переходит к вкладке «Калькулятор ЭРОА», которая предназначена для ввода исходных параметров. На рисунке 4.2 представлен интерфейс модуля ввода данных для прогнозирования радоноопасности.

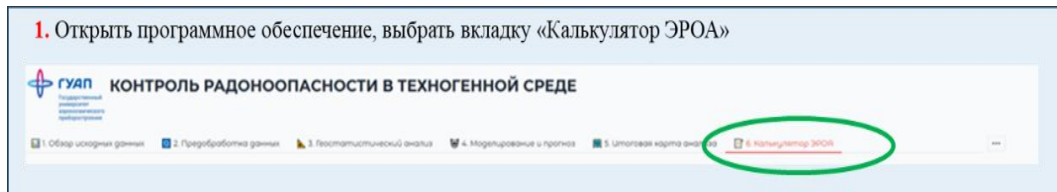


Рисунок 4.2 – Интерфейс модуля ввода данных для прогнозирования радоноопасности

Второй этап. Формируется исходный массив данных, необходимый для моделирования и прогнозирования. В него включаются результаты измерений ЭРОА изотопов радона и торона в воздухе жилых помещений с соответствующими значениями абсолютной расширенной неопределённости, характеристики зданий (год постройки, тип фундамента, пористость материалов), а также географические координаты точек измерений. На рисунке 4.3 представлен интерфейс ввода исходных параметров для прогнозирования ЭРОА радона и торона.

2. Необходимо ввести данные для прогноза по всем точкам и нажать «рассчитать»

Погрешность торона (Бк/м³)
1,14

Год постройки здания
1938

Пористость материала (%)
 Ленточный
 Свайный
 Сплошной
 Ленточный

Долгота (°)
30,401109

Широта (°)
59,916302

Рассчитать ЭРОА

Рисунок 4.3 – Интерфейс ввода исходных параметров для прогнозирования ЭРОА радона и торона

Третий этап. Автоматический расчёт и визуализация результатов на основе введённых исходных данных. На рисунке 4.4 представлены результаты расчёта среднегодовой ЭРОА изотопов радона с учётом неопределённости оценки.



Рисунок 4.4 – Результаты расчёта среднегодовой ЭРОА изотопов радона с учётом неопределённости оценки

После завершения расчёта среднегодовой ЭРОА изотопов радона с учётом неопределённости во вкладке «Предобработка данных» автоматически выводятся результаты предобработки массива измерений.

На рисунке 4.5 представлен интерфейс вкладки «Предобработка данных» с отображением полученных результатов.



Рисунок 4.5 – Интерфейс вкладки «Предобработка данных» с выводом результатов

Во вкладке «Геостатистический анализ» отображаются результаты построения и подбора вариограммной модели. Центральный элемент – график эмпирической вариограммы (без тренда), показывающий зависимость пространственной полувариации от расстояния между точками наблюдений. На нём одновременно представлены эмпирическая и подобранная теоретическая кривая, что позволяет визуально оценить качество аппроксимации. Справа приведены численные параметры модели: эффект самородка (наггет), общий порог (общий силл) и диапазон влияния (радиус). Дополнительно указывается стандартная ошибка оценки (SEE), характеризующая точность подбора модели. На рисунке 4.6 представлен интерфейс вкладки «Геостатистический анализ» с отображением полученных результатов.



Рисунок 4.6 – Интерфейс вкладки «Геостатистический анализ» с выводом результатов

Во вкладке «Моделирование и прогноз» пользователю представлены диаграмма важности признаков, демонстрирующая вклад каждого фактора в формирование среднегодовой ЭРОА изотопов радона, и таблица результатов прогнозирования. На рисунке 4.7 представлен интерфейс вкладки «Моделирование и прогноз» с отображением полученных результатов.

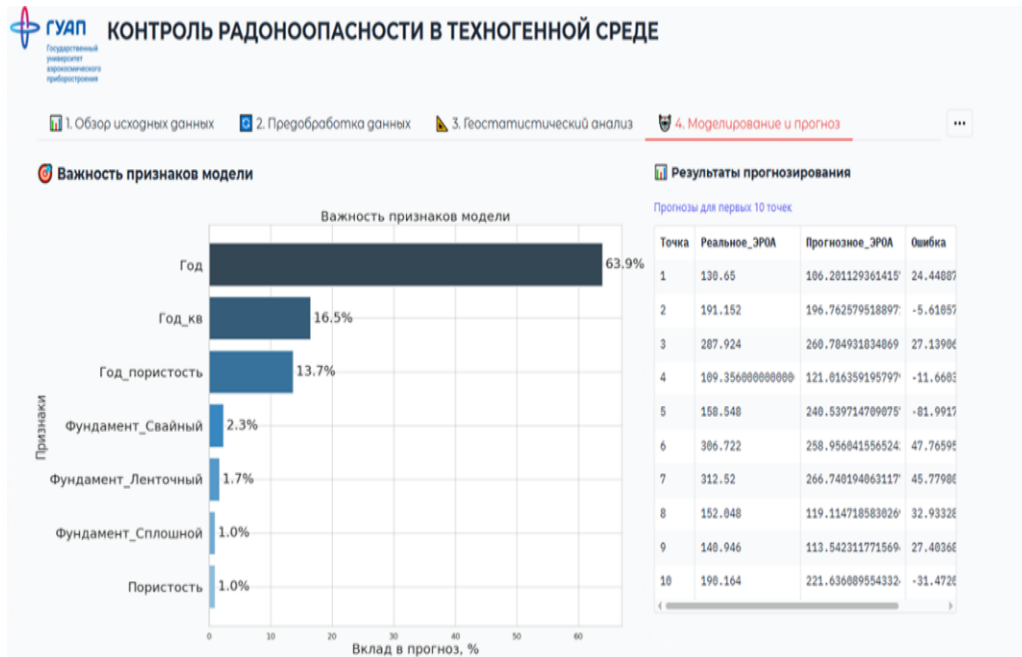


Рисунок 4.7 – Интерфейс вкладки «Моделирование и прогноз» с выводом результатов

Во вкладке «Итоговая карта анализа» визуализируется результат пространственного моделирования. На рисунке 4.8 представлен интерфейс вкладки «Итоговая карта анализа» с отображением полученных результатов.

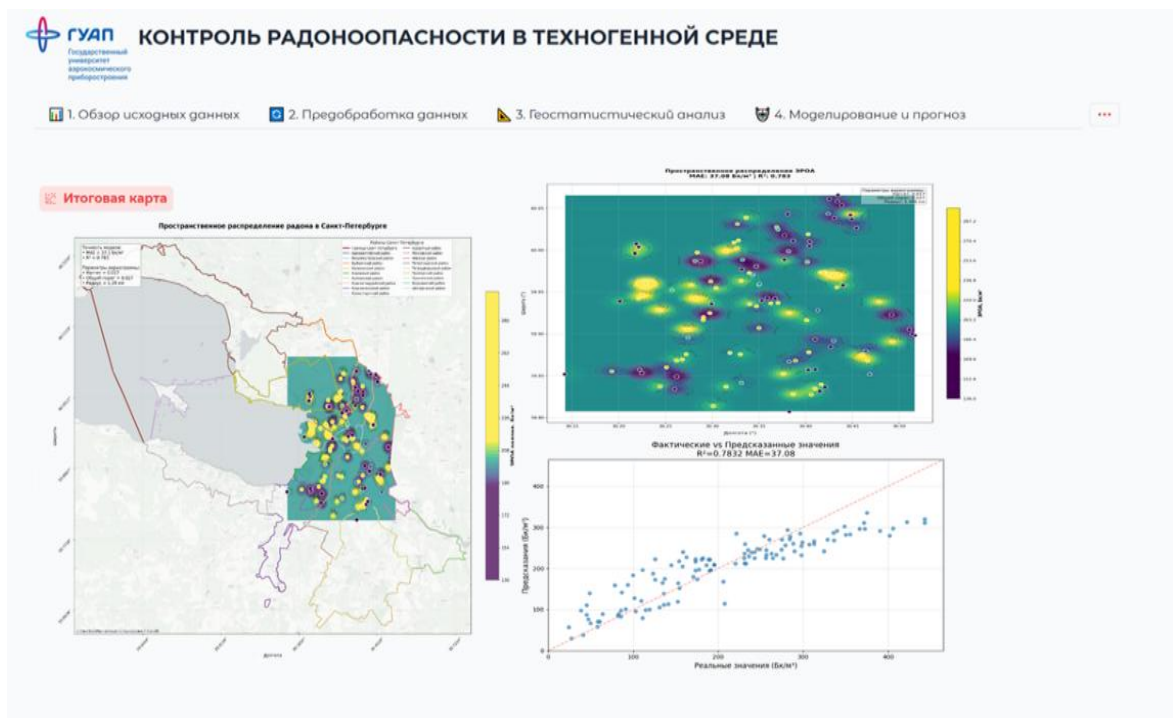


Рисунок 4.8 – Интерфейс вкладки «Итоговая карта анализа» с выводом результатов

Четвертый этап. Во вкладке «Скачать результаты», предназначенной для экспорта всех полученных данных, предусмотрена возможность выгрузки прогнозных значений среднегодовой ЭРОА изотопов радона в двух форматах: для точек фактических измерений и для узлов интерполяционной сетки, покрывающей всю исследуемую территорию. Дополнительно доступен для скачивания сводный отчёт, содержащий обобщённые результаты анализа и ключевые метрики качества модели. Вкладка «Скачать результаты» обеспечивает удобный доступ к результатам автоматизированного контроля для их последующего использования при подготовке отчётной документации, планировании защитных мероприятий и принятии управленческих решений. На рисунке 4.9 представлен интерфейс вкладки «Скачать результаты».

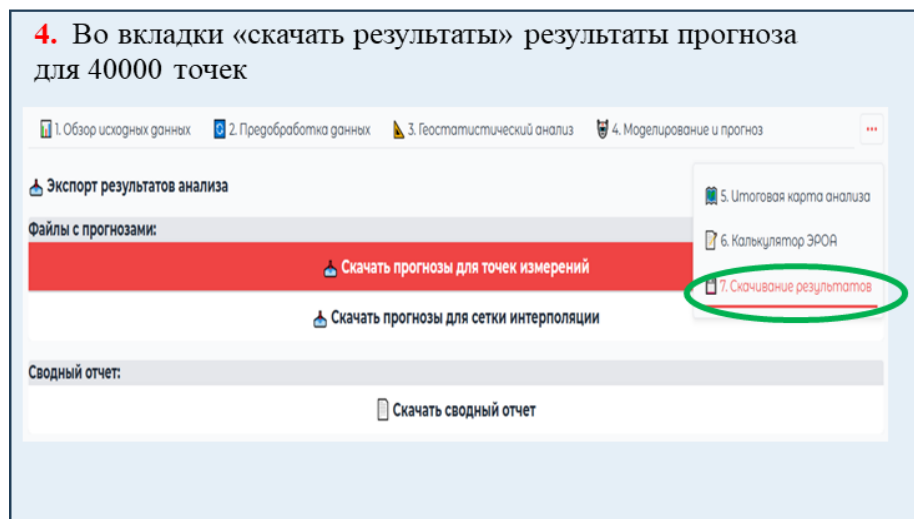


Рисунок 4.9 – Интерфейс вкладки «Скачать результаты»

Практическая значимость разработанной методики заключается в автоматизации процессов обработки и анализа пространственно-распределённых данных о радоноопасности, что позволяет существенно повысить эффективность радиационного контроля эксплуатируемых жилых зданий. Учёт конструктивных особенностей зданий в сочетании с пространственным моделированием даёт возможность получать обоснованные и интерпретируемые результаты, необходимые для планирования противорадоновых мероприятий и принятия управленческих решений в области обеспечения радиационной безопасности

населения. При этом формирование таблиц с конкретными координатами точек, в которых прогнозируется превышение среднегодовой ЭРОА радона с учётом неопределённости оценки [28], позволяет проводить адресный дополнительный контроль исключительно в тех зданиях, где предполагается повышенный уровень радоноопасности, оптимизируя использование ресурсов и исключая необходимость сплошных повторных обследований на заведомо благополучных эксплуатируемых жилых зданиях.

4.3. Разработка структурной схемы методики автоматизации контроля радоноопасности урбанизированных территорий в системе оценки радоноопасности в Российской Федерации

Нормативно-правовой основой организации радиационного контроля и санитарно-эпидемиологической оценки объектов строительства служат МР 2.6.1.0333-23 «Радиационный контроль и санитарно-эпидемиологическая оценка жилых, общественных и производственных зданий и сооружений по показателям радиационной безопасности» [33]. Согласно данному документу, жилые здания классифицируются как объекты с круглосуточным пребыванием людей, что обуславливает повышенные требования к достоверности и репрезентативности результатов измерений [16]. На начальном этапе обследования осуществляется анализ поэтажных планов здания для определения общего количества квартир, что необходимо для установления минимального объема выборочного контроля в соответствии с таблицей 1 МР 2.6.1.0333-23 [33].

Ключевым элементом структурной схемы обследования является модуль предварительной оценки радиационного фона подземных конструкций. В соответствии с пунктом 4.24 МР 2.6.1.0333-23, в зданиях, имеющих подвальный или цокольный этаж, проводятся измерения ЭРОА изотопов радона в воздухе данных помещений [33]. В зависимости от наличия подвала алгоритм обследования дифференцируется: при его наличии производится краткосрочная экспрессная оценка продолжительностью не более одного часа с последующим расчетом среднегодовой ЭРОА изотопов радона [16] и оценкой неопределенности

полученных значений. В случае если результаты превышают установленные нормы, все квартиры первых этажей как наиболее уязвимая зона подлежат обязательному включению в программу контроля радоноопасности.

С учетом временных ограничений, характерных для обследований урбанизированных территорий, целесообразно применение однократного экспресс-метода, результаты которого, согласно [16] пункту 5.8. МР 2.6.1.0333-23, интерпретируются как оценочные значения среднегодовой ЭРОА изотопов радона.

По завершении полевого этапа формируется структурированный массив данных, включающий результаты измерений ЭРОА изотопов радона и торона с указанием абсолютной расширенной неопределенности, характеристики обследованных зданий (год постройки, тип фундамента, пористость материалов), а также географические координаты точек измерений. Указанный массив служит информационной базой для последующего применения методики автоматизации контроля радоноопасности урбанизированных территорий, описанной в параграфе 4.1.

По результатам применения методики визуализируется результат пространственного моделирования и формируются прогнозные значения среднегодовой ЭРОА изотопов радона в воздухе жилых зданий с учётом неопределённости оценки для узлов сетки.

Уточнение прогноза в точках с выявленными превышениями выполняется согласно методическим указаниям МУ 2.6.1.037-2015 «Определение среднегодовых значений ЭРОА изотопов радона в воздухе помещений по результатам измерений разной длительности» [32], определяющим порядок установления среднегодовых значений ЭРОА изотопов радона в воздухе помещений по результатам измерений разной длительности.

Для эксплуатируемых жилых зданий данная процедура реализуется в соответствии с регламентом, установленным для помещений группы «С», поскольку их вентиляционный режим (естественная или периодически действующая механическая вентиляция) и условия эксплуатации (неограниченное проветривание, присутствие жильцов) полностью соответствуют

идентификационным признакам данной группы согласно таблице 2 и пункту 5.5.3 документа. Также в пункте 5.2.5 МУ 2.6.1.037-2015 устанавливает общее правило: в случаях, когда идентификация помещения затруднена, его рекомендуется относить к группе «С», что подтверждает статус данной группы как наиболее консервативной.

Перед измерениями в помещениях группы «С» проверяют соответствие микроклимата требованиям МУ 2.6.1.037-2015: температура воздуха от +6 до +32 °С, относительная влажность воздуха от 15 до 90 %. При соблюдении параметров проводят инструментальные исследования по регламенту для данной группы [32].

Согласно пункту 6.1.4 МУ 2.6.1.037-2015, при проведении исследований в помещениях группы «С» выполняются повторные краткосрочные измерения ЭРОА торона. Измерения проводятся дважды: на начальном этапе перед основным циклом измерений радона и по завершении всего периода контроля. Полученные результаты обоих краткосрочных измерений впоследствии усредняются путем расчета среднего арифметического значения. Для каждого из однократных измерений регистрируется инструментальная погрешность, при этом результирующая погрешность усредненного значения принимается равной максимальному значению из инструментальных погрешностей, полученных по результатам этих измерений.

Измерения объемной активности или ЭРОА радона проводятся в среднесрочном режиме непрерывно с периодом регистрации 1–3 часа. Если полученные результаты среднегодовой ЭРОА изотопов радона с учётом неопределенности оценки больше 200 Бк/м³, но при этом снижение неопределенности оценки может привести к его выполнению, то измерения продолжают в долгосрочном режиме. По завершении измерений производится расчет среднегодового значения ЭРОА изотопов радона с его абсолютной неопределенностью, после чего рассчитанная величина сопоставляется с нормативным значением 200 Бк/м³ [32]. На рисунке 4.10 приведена структурная схема организации радонового контроля и принятия решений согласно МУ 2.6.1.037-2015 «Определение среднегодовых значений ЭРОА изотопов радона в

воздухе помещений по результатам измерений разной длительности».

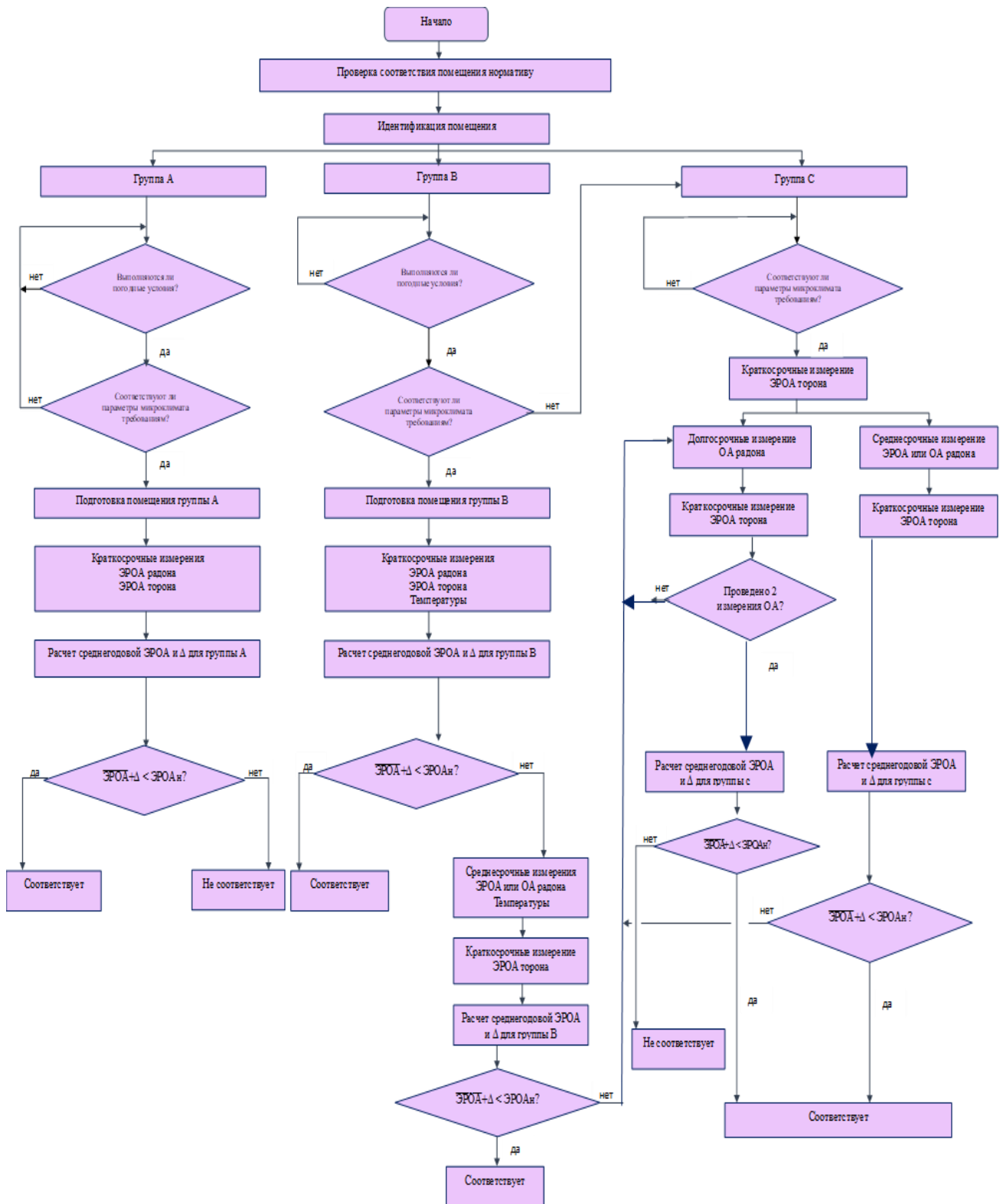


Рисунок 4.10 – Структурная схема организации радонового контроля и принятия решений согласно МУ 2.6.1.037-2015 «Определение среднегодовых значений ЭРОА изотопов радона в воздухе помещений по результатам измерений разной длительности»

В случае если после выполнения измерений установлено превышение установленного норматива, применяются технические решения по противорадоновой защите, регламентированные СП 321.1325800.2017 «Здания жилые и общественные. Правила проектирования противорадоновой защиты» [155].

На рисунке 4.11 представлена структурная схема методики автоматизации контроля радоноопасности урбанизированных территорий в системе оценки радоноопасности в Российской Федерации.

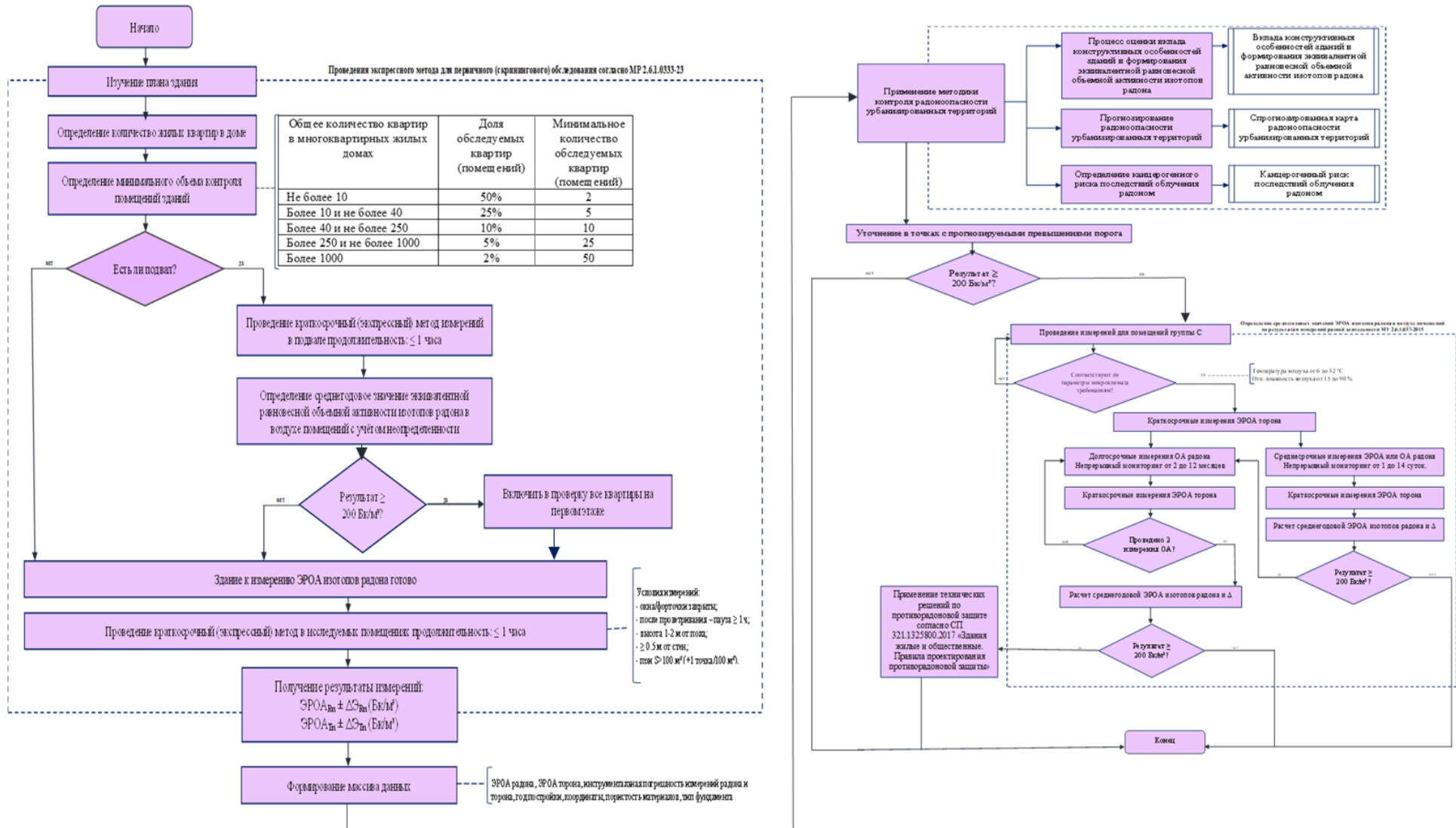


Рисунок 4.11 – Структурная схема методики автоматизации контроля радионуклидности урбанизированных территорий в системе оценки радионуклидности в Российской Федерации

4.4. Мероприятия по уменьшению содержания радона в воздухе помещений

СП 321.1325800.2017 «Здания жилые и общественные. Правила проектирования противорадоновой защиты» документ является ключевым инструментом для практической реализации радоновой безопасности, детально регламентируя проектирование защитных мер для новых жилых и общественных зданий. Согласно пункту 1.1 допускается ограниченно применять также при разработке мероприятий, направленных на нормализацию радоновой обстановки в существующих зданиях в ходе их реконструкции, реставрации или капитального ремонта. Свод правил обеспечивает преемственность требований на всех этапах жизненного цикла зданий – от проектирования до их реконструкции, реставрации или капитального ремонта [155]. Мероприятия по противорадоновой защите систематизируются по нескольким ключевым критериям, отражённым в структуре и содержании документа:

1. По стадии жизненного цикла здания (основной принцип):

1.1. Профилактические (превентивные) мероприятия для проектируемых и строящихся зданий. Они закладываются в проект на основе расчётов и изысканий и реализуются в процессе строительства. Их цель – не допустить проникновения радона в здание «с нуля».

1.2. Защитные (корректирующие) мероприятия для эксплуатируемых зданий. Они применяются при выявлении превышения нормативов (уровня вмешательства – значение нормированного параметра, превышение которого не допускается.) и направлены на нормализацию радиационной обстановки. Осуществляются в ходе реконструкции, реставрации или капитального ремонта.

2. По объекту воздействия:

2.1. Воздействие на источник радона (в первую очередь, грунтовое основание). К ним относятся: устройство барьеров, мембран, покрытий, систем депрессии подполья, реконструкция грунтового основания, пропитка конструкций и уплотнение швов.

2.2. Воздействие на атмосферу помещений. Основное мероприятие – организация и оптимизация вентиляции для снижения концентрации радона в воздухе.

3. По типу технического решения приведено восемь типов решений:

3.1. Барьер представляет собой сплошную конструкцию, выполняемую из материала с низкой проницаемостью для радона, основная функция которого – предотвращение проникновения почвенного газа. В качестве такого барьера наиболее часто применяется монолитная железобетонная плита (фундаментная или плита пола подвала), толщина которой определяется проектным расчетом и обычно находится в диапазоне от 0,2 до 2,0 метров [155].

3.2. Мембрана представляет собой сплошной слой рулонного или листового материала с низкой проницаемостью для радона, укладываемый в пределах всей площади здания. Её основная функция – повышение общего сопротивления радонопроницанию ограждающей конструкции и предотвращение проникновения грунтового радона через поры, трещины и стыки в элементах конструкции [155].

3.3. Покрытие. Тонкий сплошной слой из жидкого состава, обладающего низкой проницаемостью [156] для радона, который наносится на твёрдую основу и отвердевает на воздухе. Для создания радонозащитных бесшовных покрытий применяют гидроизоляционные и антикоррозионные материалы на основе полимерных и битумно-полимерных композиций [155].

3.4. Пропитка. Жидкий состав на цементной, битумной, латексной или полимерной основе, который наносится методом механического распыления для заполнения пор и микротрещин строительных материалов. Глубоко проникая в структуру бетона, кирпичной кладки, штукатурки или уплотнённого грунта (глина, песок) в подпольях зданий [155].

3.5. Уплотнение швов. Герметизация стыков и щелей конструкций с помощью герметиков для предотвращения конвективного переноса радона. Работы выполняются с учётом возможных деформаций (вибрация, осадка, перепады температур) [155].

3.6. Вентиляция снижает концентрацию радона за счёт замещения воздуха помещений наружным. Для безподвальных зданий эффективно сквозное проветривание подполья через продухи площадью не менее 2 % от площади здания. Вентиляция является важным элементом системы защиты, требующим корректного проектирования и балансировки [155].

3.7. Депрессия подпольного пространства. Инженерно-техническое мероприятие, заключающееся в создании зоны пониженного давления (депрессии) на пути миграции радона из грунта в здание. Сущность метода заключается в устройстве под горизонтальной ограждающей конструкцией (плитой пола) газопроницаемого слоя, например, из промытого гравия или щебня толщиной не менее 15 см., который соединяется с системой труб для отвода почвенного газа в атмосферу. Это позволяет существенно снизить радоновую нагрузку на конструкцию [155].

3.8. Реконструкция (замена) грунтового основания. Полная или частичная замена грунта с высоким радоновыделением на мелкодисперсный грунт с активностью радия-226 не более 15 Бк/кг. Мера применяется только при крайней необходимости (например, при удалении химически загрязнённых грунтов) и в рамках комплексной реконструкции, так как технически и экономически сложна. Для снижения радонопроницаемости замещающий грунт может дополнительно пропитываться специальными составами [155].

Действующая нормативная база предписывает адаптивный, научно обоснованный подход, при котором выбор и последовательность защитных мер определяются, прежде всего, результатами оценки радоноопасности, типом здания и стадией его жизненного цикла. Для систематизации условий и порядка применения конкретных инженерных решений, регламентированных СП 321.1325800.2017 «Здания жилые и общественные. Правила проектирования противорадоновой защиты», разработана сводная матрица.

В таблице 4.1 представлена матрица технических решений по противорадоновой защите согласно СП 321.1325800.2017 «Здания жилые и общественные. Правила проектирования противорадоновой защиты» [155].

Таблица 4.1 – Матрица технических решений по противорадоновой защите согласно СП 321.1325800.2017 «Здания жилые и общественные. Правила проектирования противорадоновой защиты»

Техническое решение	Для проектируемых зданий	Для эксплуатируемых зданий	Профилактические	Защитные	На источник	На атмосферу	Нормативное основание (пункт СП 321.1325800.2017)
Барьер (сплошная фундаментная плита)	Основное решение при новом строительстве без подвала или с техподпольем.	Нет (требует полной замены фундамента).	+	–	+	–	6.1.1, 6.1.2
Барьер (фрагментированная плита пола подвала)	Для пола подвала или техподполья (опора на грунт или ростверк).	Да, если выполняется замена старого пола в подвале при реконструкции.	+	+	+	–	6.1.3
Мембрана (рулонная/листовая)	Дополнительная защита к барьеру (для плит <400 мм или повышения надежности).	Да, если в ходе ремонта есть доступ для устройства/замены гидроизоляционного ковра (например, при вскрытии стяжки).	+	+	+	–	6.2.1- 6.2.5
Покрытие (обмазочное/напыляемое)	Как правило, нет (предпочтение барьерам и мембранам).	Основное решение для реконструкции. Наносится на внутренние поверхности сложной формы при множестве швов.	–	+	+	–	6.3.1- 6.3.3
Пропитка конструкций	Для повышения качества бетона или обработки грунтовой подушки.	Для улучшения свойств существующих пористых конструкций (бетон, кирпич), которые сохраняются.	+	+	+	–	6.4.1, 6.4.2
Уплотнение швов и проходок	Обязательно на стадии монтажа конструкций и прокладки коммуникаций.	Первоочередная мера при любом ремонте. Герметизация всех выявленных зазоров.	+	+	+	–	6.5.1- 6.5.3

1	2	3	4	5	6	7	8
Система депрессии подполья	Основная/доп. мера на участках с высоким радоновым потенциалом грунта (особенно для малоэтажных зданий).	Возможно, если есть техническая возможность подвести трубы под существующее здание (например, при пристройке).	+	+	+	–	6.7.1-6.7.15
Вентиляция подполья (продухи)	Проектируется по умолчанию для безподвальных зданий с вентилируемым подпольем.	Да. Расчистка существующих или устройство дополнительных продухов при их недостаточной площади.	+	+	–	+	6.6.3
Вентиляция помещений	Проектируется с обеспечением минимального воздухообмена 0.15 ч ⁻¹ .	Оптимизируется или модернизируется для снижения концентрации радона.	+	+	–	+	6.6.1, 6.6.2
Замена грунтового основания	При необходимости, выявленной изысканиями (например, при загрязнении).	Крайняя мера при комплексной реконструкции со сносом до фундамента.	+	+	+	–	6.8.1, 6.8.2

ВЫВОДЫ ПО ЧЕТВЁРТОМУ РАЗДЕЛУ

Проведённые в четвёртом разделе исследования были направлены на достижение поставленной цели – разработку методики автоматизации контроля радоноопасности урбанизированных территорий, способствующей снижению трудоёмкости, повышению оперативности и экологической безопасности окружающей среды.

Разработана и реализована методика автоматизации контроля радоноопасности урбанизированной территории, которая позволяет проводить краткосрочные измерения на ограниченной репрезентативной выборке, строить на их основе прогнозную карту и выполнять подтверждающие измерения только в тех зданиях, где прогнозируются превышения референтного уровня. Такой подход вместо сплошного обследования всей территории позволяет эффективно использовать ресурсы, направляя их на критические участки.

Выполнено внедрение методики автоматизации контроля радоноопасности урбанизированных территорий в действующую систему оценки радоноопасности Российской Федерации путём согласования процедур автоматизированного контроля с требованиями МР 2.6.1.0333-23 и МУ 2.6.1.037-2015.

На основе анализа СП 321.1325800.2017 систематизированы мероприятия по противорадоновой защите и разработана матрица применения инженерных решений для проектируемых и эксплуатируемых зданий, что обеспечивает научно обоснованный переход от диагностики радоноопасности к планированию конкретных защитных мер.

Полученные результаты формируют научно обоснованную базу для планирования адресных профилактических мероприятий и совершенствования системы радиационно-гигиенического мониторинга с учётом региональной специфики и конструктивных особенностей зданий.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате диссертационного исследования решена важная научно-практическая задача, направленная на оценку, прогнозирование и минимизацию радиационных рисков, обусловленных радоноопасностью урбанизированных территорий. В рамках выполнения поставленных задач получены следующие научные результаты:

1. Разработанная математическая модель процесса оценки вклада конструктивных особенностей зданий позволяет оценить вклад конструктивных особенностей зданий в формирование дисперсии ЭРОА изотопов радона в жилых зданиях и повысить достоверность оценки на 27 % и сокращению времени на 34 %.

2. Внедрение алгоритма автоматизации контроля радоноопасности урбанизированных территорий позволяет сократить время на оценку радоноопасности урбанизированных территорий на 90–95 %, а также снизить затраты на проведение полевых измерений на 80–90 %.

3. Внедрение методики автоматизации контроля радоноопасности урбанизированных территорий позволяет повысить достоверность оценки на 12 %, а также сократить время принятия решений по снижению объёмной активности изотопов радона при выявлении зон с превышением референтного уровня с 4 месяцев до 2 месяцев, тем самым повысить уровень экологической безопасности урбанизированной территории.

Дальнейшие исследования должны быть направлены на совершенствование вычислительных алгоритмов, интеграцию мультидисциплинарных данных и разработку практических рекомендаций для архитектурно-планировочных решений, обеспечивающих минимизацию радиационных нагрузок на население в условиях неоднородности современного мегаполиса.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Тихонов, М. Н. Радонная радиация: источники, дозы и нерешенные вопросы / М. Н. Тихонов // Экология промышленного производства. – 2008. – № 1. – С. 35-51. – EDN JXRIPH.
2. Нешто, К. Я. Оценка существующих подходов к определению параметров поступления и стока радона в помещениях жилых и общественных зданий / К. Я. Нешто, С. Ю. Гончарова // Молодой учёный. – 2016. – № 26(130). – С. 68-74. – EDN XCHYFD.
3. Историк, О. А. К вопросу гигиенической оценки облучения за счёт природных источников ионизирующего излучения детского контингента Ленинградской области / О. А. Историк, И. К. Романович, Л. А. Еремина // Профилактическая медицина-2023 : СБОРНИК НАУЧНЫХ ТРУДОВ ВСЕРОССИЙСКОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ С МЕЖДУНАРОДНЫМ УЧАСТИЕМ, Санкт-Петербург, 15–16 ноября 2023 года. – Санкт-Петербург: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Северо-Западный государственный медицинский университет имени И.И. Мечникова» Министерства здравоохранения Российской Федерации, 2023. – С. 108-114. – EDN SOCUQD.
4. Радон: история, свойства, значение // Институт радиобиологии НАН Беларуси : [сайт]. – URL: <https://www.irb.basnet.by/ru/radon-istoriya-svoystva-znachenie/> (дата обращения: 17.05.2024).
5. Rutherford, E. Reviews-A Radio-Active Substance Emitted from Thorium Compounds // The Journal of Physical Chemistry. – 1900. – Vol. 5, No. 1. – P. 89. – DOI: 10.1021/j150028a631.
6. Dorn, F. E. Über die von radioaktiven Substanzen ausgesandte Emanation / Friedrich Ernst Dorn // Abhandlungen der Naturforschenden Gesellschaft zu Halle. – 1901. – Vol. 23. – P. 1-15.
7. Adams, E. Q. The Independent Origin of Actinium / E. Q. Adams // Journal of the American Chemical Society. – 1920. – Vol. 42, No. 3. – P. 2205-2208. – DOI: 10.1021/ja01456a010.

8. Thornton, B. F., Burdette S. C. Recalling radon's recognition / B. F. Thornton, S. C. Burdette // *Nature Chemistry*. – 2013. – Vol. 5, No. 9. – P. 804. – DOI: 10.1038/nchem.1731. – PMID: 23965684.

9. Samet, J. M. Indoor radon and lung cancer. Estimating the risks / J. M. Samet // *The Western Journal of Medicine*. – 1992. – Vol. 156, No. 1. – P. 25-29. – PMID: 1734594.

10. Стамат, И. П. Система гигиенических требований по ограничению облучения населения Российской Федерации природными источниками излучения : специальность 05.26.02 «Безопасность в чрезвычайных ситуациях (по отраслям)» : диссертация на соискание ученой степени доктора биологических наук / Стамат Иван Павлович. – Санкт-Петербург, 2012. – 413 с. – EDN QFNUZP.

11. Ильин, Л. А. «Радон: от фундаментальных исследований к практике регулирования» С.М. Киселев, М.В. Жуковский, М.В. Стамат, И.В. Ярмошенко. - Москва: из-во «ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России». 2016 / Л. А. Ильин // *Медицинская радиология и радиационная безопасность*. – 2017. – Т. 62, № 6. – С. 78-79. – EDN YKUQKS.

12. 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. – Т. 97, № 2. – С. 101-110. – DOI 10.18821/0016-9900-2018-97-2-101-110. – EDN YXICWT.

13. МУ 2.6.1.038-2015. Оценка потенциальной радоноопасности земельных участков под строительство жилых, общественных и производственных зданий: издание официальное : утверждены и введены в действие Федеральным медико-биологическим агентством от 15 мая 2015 г.: введен впервые : дата введения 2015-05-14. – Москва: ФГУП НТЦ РХБГ ФМБА России, 2016 – 36 с. - Текст : непосредственный.

14. Kulka U., Birschwilks M., Février L. [et al.] RadoNorm – towards effective radiation protection based on improved scientific evidence and social considerations – focus on RADON and NORM / U. Kulka, M. Birschwilks, L. Février, B. Madas, S.

Salomaa, A. Fronka, T. Perko, A. Wojcik, N. Železnik // EPJ Nuclear Sciences and Technologies. – 2022. – Vol. 8. – Art. No 38. – DOI: 10.1051/epjn/2022031.

15. Калашникова, М. Экологическое значение и основные задачи исследования потенциальной радоноопасности территории / М. Калашникова // Электроника: Наука, технология, бизнес. – 2024. – № 10(241). – С. 120-121. – DOI 10.22184/1992-4178.2024.241.10.120.121. – EDN EKNXJA.

16. Васильев, А. С. Оптимизация радиационного контроля содержания радона в воздухе помещений эксплуатируемых общественных зданий : специальность 3.2.1. Гигиена : диссертация на соискание ученой степени кандидата медицинских наук / Васильев Алексей Серафимович ; Федеральное бюджетное учреждение науки «Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева». – СПб., 2024. – 170 с.

17. Дозы облучения населения Российской Федерации по итогам функционирования ЕСКИД в 2002-2015 гг : Информационный сборник / В. С. Репин, Н. К. Барышков, А. А. Братилова [и др.]. – Санкт-Петербург : Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева, 2015. – 40 с. – EDN RTQPST.

18. Дозы облучения населения Российской Федерации в 2016 году : Информационный сборник / А. Н. Барковский, Н. К. Барышков, А. А. Братилова [и др.]. – Санкт-Петербург : Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева, 2017. – 78 с. – EDN SFPUEE.

19. Дозы облучения населения Российской Федерации в 2017 году : Информационный сборник / Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт радиационной гигиены им. профессора П.В. Рамзаева, Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека. – Санкт-Петербург : Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева, 2018. – 69 с. – EDN DUZERY.

20. Дозы облучения населения Российской Федерации в 2018 году : Информационный сборник / А. Н. Барковский, Р. Р. Ахматдинов, Р. Р. Ахматдинов [и др.] ; Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт радиационной гигиены им. проф. П.В. Рамзаева. – Санкт-Петербург : Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева, 2019. – 71 с. – EDN WLQTXW.

21. Дозы облучения населения Российской Федерации в 2019 году : Информационный сборник / Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт радиационной гигиены имени П.В. Рамзаева; Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека. – Санкт-Петербург : Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт радиационной гигиены имени П.В. Рамзаева, 2020. – 70 с. – EDN QSCWDA.

22. Дозы облучения населения Российской Федерации в 2020 г / А. Н. Барковский, Р. Р. Ахматдинов, Р. Р. Ахматдинов [и др.] // Радиационная гигиена. – 2021. – Т. 14, № 4. – С. 103-113. – DOI 10.21514/1998-426X-2021-14-4-103-113. – EDN LRZREJ.

23. Барковский, А. Н. Радиационная обстановка на территории Российской Федерации в 2021 году: справочник / А. Н. Барковский, Руслан Р. Ахматдинов, Рустам Р. Ахматдинов [и др.]. – СПб: ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева, 2022. – 72 с. – URL: http://www.niirg.ru/PDF/inf_sbor/2021.pdf (дата обращения: 12.09.2023).

24. Барковский, А. Н. Радиационная обстановка на территории Российской Федерации в 2022 году: справочник / А. Н. Барковский, Руслан Р. Ахматдинов, Рустам Р. Ахматдинов [и др.]. – СПб: ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева, 2023. – 66 с. – URL: http://www.niirg.ru/PDF/inf_sbor/2022.pdf (дата обращения: 01.05.2024).

25. Барковский, А. Н. Радиационная обстановка на территории Российской Федерации в 2023 году: справочник / А. Н. Барковский, Руслан Р. Ахматдинов, Рустам Р. Ахматдинов [и др.]. – СПб: ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева, 2024. – 71 с. – URL: http://www.niirg.ru/PDF/inf_sbor/2023.pdf (дата обращения: 09.04.2025).

26. Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ 99/2010) : Санитарные правила и нормативы СП 2.6.1.2612-10 / И. К.

Романович, М. И. Балонов, А. Н. Барковский [и др.]. – Москва : Федеральный центр гигиены и эпидемиологии, 2010. – 83 с. – EDN XSAUIX.

27. Калашникова, М. В. Проектирование 3D-модели облучения населения по субъектам Российской Федерации / М. В. Калашникова // Математические методы и модели в высокотехнологичном производстве : Сборник тезисов докладов III Международного форума. В 2-х частях, Санкт-Петербург, 08 ноября 2023 года. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, 2023. – С. 121-124. – EDN ASPHTX.

28. Маренный, А. М. О возможности сокращения в России заболеваемости раком легкого, инициированного радоном : размышления и предложения / А. М. Маренный. – Москва : ООО «Директ-Медиа», 2025. – 276 с. – ISBN 978-5-4499-5034-5. – DOI 10.23681/719552. – EDN DTQCYZ.

29. Токарева, А. Ю. Объемная активность радона-222 в воздухе помещений города Тобольска и прилегающих районов / А. Ю. Токарева, Г. С. Алимова, И. А. Уткина // Известия Иркутского государственного университета. Серия: Науки о Земле. – 2024. – Т. 48. – С. 121-139. – DOI 10.26516/2073-3402.2024.48.121. – EDN KSNJXR.

30. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009) : Санитарные правила и нормативы СанПиН 2.6.1.2523-09 / И. К. Романович, М. И. Балонов, А. Н. Барковский [и др.]. – 2-е издание, стереотипное. – Москва : Федеральный центр гигиены и эпидемиологии, 2009. – 100 с. – ISBN 978-5-7508-0805-2. – EDN OVCBNX.

31. СанПиН 2.6.4115-25. Санитарно-эпидемиологические требования в области радиационной безопасности населения при обращении источников ионизирующего излучения: издание официальное: утверждены постановлением Главного государственного санитарного врача РФ от 27 марта 2025 г. № 6: дата введения 2025-09-01 – Москва: Минюст России 21 апреля 2025 г. № 81916, 130 с. - Текст : непосредственный

32. МУ 2.6.1.037-2015. 2.6.1. Ионизирующее излучение, радиационная безопасность. Определение среднегодовых значений ЭРОА изотопов радона в

воздухе помещений по результатам измерений разной длительности: издание официальное: утверждены и введены в действие Федеральным медико-биологическим агентством 14 мая 2015 г.: введен впервые: дата введения 2015-05-14. – Москва: ФГУП НТЦ РХБГ ФМБА России, 2016 – 48 с. - Текст : непосредственный.

33. МР 2.6.1.0333-23 Радиационный контроль и санитарно-эпидемиологическая оценка жилых, общественных и производственных зданий и сооружений по показателям радиационной безопасности. 2.6.1. Гигиена. Радиационная гигиена. Ионизирующее излучение, радиационная безопасность: издание официальное: утверждены руководителем Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Главным государственным санитарным врачом Российской Федерации А.Ю. Поповой 1 декабря 2023 г.: дата введения 2023-12-01. – Москва : 2023. – 40 с. – Текст : непосредственный.

34. Калашникова, М. Анализ моделей и методик измерения показателей радоноопасности в Российской Федерации / М. Калашникова // Электроника: Наука, технология, бизнес. – 2025. – № 2(243). – С. 142-144. – DOI 10.22184/1992-4178.2025.243.2.142.144. – EDN STAIR.

35. United States. Environmental Protection Agency. Indoor Radon and Radon Decay Product Measurement Device Protocols : EPA 402-R-92-004. – URL: <https://p2infohouse.org/ref/17/radon/pubs/devprot1.html> (дата обращения: 14.05.2024).

36. United States. Environmental Protection Agency. Protocols For Radon And Radon Decay Product Measurements In Homes : EPA 402-R-93-003. – URL: <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPURL.cgi?Dockey=P100OS7X.txt> (дата обращения: 14.05.2024).

37. United States. Environmental Protection Agency. EPA Map of Radon Zones. – URL: <https://www.epa.gov/radon/epa-map-radon-zones-0> (дата обращения: 14.05.2024).

38. Калашникова, М. В. Анализ системы оценки радоноопасности территории в Соединенных Штатах Америки / М. В. Калашникова // Метрологическое обеспечение инновационных технологий : Сборник статей VII Международного форума, Санкт-Петербург, 04 марта 2025 года. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, 2025. – С. 532-533. – EDN BEQATZ.

39. Health Canada. Guide for radon measurements in residential dwellings (homes) : H128-1/08-543-2E-PDF. – URL: <https://publications.gc.ca/site/eng/9.834594/publication.html> (дата обращения: 14.05.2024).

40. Калашникова, М. В. Анализ системы оценки радоноопасности территории в Канаде / М. В. Калашникова // Метрологическое обеспечение инновационных технологий : Сборник статей VII Международного форума, Санкт-Петербург, 04 марта 2025 года. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, 2025. – С. 534-535. – EDN NWNGPH.

41. Seoul Metropolitan Government. Indoor Air Quality Control at Public Use Facilities : Clean Air for All. – URL: <https://seoulsolution.kr/en/content/indoor-air-quality-control-public-use-facilities-clean-air-all> (дата обращения: 14.05.2024).

42. Public Health England. Validation scheme for organisations making measurements of radon in UK buildings : 2018 revision. – URL: https://assets.publishing.service.gov.uk/media/5ba3aa6b40f0b6064612b0d4/validation_scheme_for_organisations_making_measurements_of_radon_in_UK_buildings_2018.pdf (дата обращения: 14.05.2024).

43. UK Radon Association. An Updated Radon Map of Great Britain has been Published. – URL: <https://radonassociation.co.uk/2023/02/an-updated-radon-map-of-great-britain-has-been-published/> (дата обращения: 14.05.2024).

44. Státní úřad pro jadernou bezpečnost (SÚJB). Měření a hodnocení záření z přírodních zdrojů v budovách s obytnými nebo rezidenčními místnostmi. – URL:

<https://sujb.gov.cz/radiacni-ochrana/prirodni-zdroje-ionizujiciho-zareni/aktualne-platna-doporuceni-sujb> (дата обращения: 14.05.2024).

45. Státní úřad pro jadernou bezpečnost (SÚJB). Stanovení radonového indexu pozemku. – URL: https://sujb.gov.cz/fileadmin/sujb/docs/radiacni-ochrana/PZIZ/doporuceni/171128_Doporuceni_RIP_final.pdf (дата обращения: 14.05.2024).

46. Калашникова, М. В. Анализ системных недостатков существующих методов оценки радоноопасности / М. В. Калашникова // Метрологическое обеспечение инновационных технологий : Сборник статей VIII Международного форума, Санкт-Петербург, 04 марта 2026 года. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, 2026. – С. 173-174.

47. World Health Organization. WHO handbook on indoor radon: a public health perspective. – Geneva : World Health Organization, 2009. – 122 p. – ISBN 978-92-4-154767-3.

48. Калашникова, М. В. Обзор методик по оценке потенциальной радоноопасности в Российской Федерации и зарубежных странах / М. В. Калашникова // Математические методы и модели в высокотехнологичном производстве : Сборник тезисов докладов IV Международного форума. В 2-х частях, Санкт-Петербург, 06 ноября 2024 года. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, 2024. – С. 166-168. – EDN CRFXZH.

49. Туманов, А. Ю. Сравнительный анализ методов и средств измерения радона в воздухе в России и Европейских странах / А. Ю. Туманов, М. В. Говор // Метрологическое обеспечение инновационных технологий : Материалы III Международного форума в рамках празднования 80-летия Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения, 300-летия Российской академии наук, Санкт-Петербург, 04 марта 2021 года / Под редакцией В.В. Окрепилова. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный

университет аэрокосмического приборостроения, 2021. – С. 349-350. – EDN RTIIMP.

50. Ярмошенко, И. В. Метод оценки радоноопасности участка с учетом потенциальной адвективной составляющей потока радона / И. В. Ярмошенко, Г. П. Малиновский, И. А. Юрков // Актуальные вопросы радиационной гигиены : материалы всероссийской научно-практической конференции с международным участием, Санкт-Петербург, 10–11 октября 2023 года. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева, 2023. – С. 315-318. – EDN LVASKH.

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

52. Природные радионуклиды в Санкт-Петербурге – URL:https://ecopeterburg.ru/2018/03/11/природные-радионуклиды-в-санкт-петер/?utm_medium=organic&utm_source=yandexsmartcamera (дата обращения: 25.06.2024).

53. Designing a Multicriteria WebGIS-Based Pre-Diagnosis Tool for Indoor Radon Potential Assessment / L. J. R. Nunes, A. Curado, R. Azevedo, J. P. Silva, N. Lopes, S. I. Lopes // Applied Sciences. – 2022. – Vol. 12, No. 3. – Art. 1412. – DOI: 10.3390/app12031412.

54. Analysis of Indoor Radon Data Using Bayesian, Random Binning, and Maximum Entropy Methods / M. Pylak, K. W. Fornalski, J. Reszczyńska [et al.] // Dose Response. – 2021. – Vol. 19, No. 2. – Art. 15593258211009337. – DOI: 10.1177/15593258211009337.

55. Mapping the geogenic radon potential for Germany by machine learning / E. Petermann, H. Meyer, M. Nussbaum [et al.] // Science of The Total Environment. – 2021. – Vol. 754. – Art. 142291. – DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.142291.

56. Assessing environmental influences on radon levels: analysis of independent variables / A. Pawade, S. Charhate // Mathematical Models in Engineering. – 2024. – Vol. 10, No. 3. – P. 168-192. – DOI: 10.21595/mme.2024.24169.

57. Radioactive hot-spot localisation and identification using deep learning / F. Mendes, M. Barros, A. Vale, B. Gonçalves // Journal of Radiological Protection. – 2021. – Vol. 42, No. 1. – DOI: 10.1088/1361-6498/ac1a5c.

58. Random forest as a generic framework for predictive modeling of spatial and spatio-temporal variables / T. Hengl, M. Nussbaum, M. N. Wright [et al.] // PeerJ. – 2018. – Vol. 6. – Art. e5518. – DOI: 10.7717/peerj.5518.

59. Jain, A. K. Data clustering: 50 years beyond K-means // Pattern Recognition Letters. – 2009. – Vol. 31, No. 8. – P. 651-666. – DOI: 10.1016/j.patrec.2009.09.011.

60. Comparison of radon mapping methods for the delineation of radon priority areas – an exercise / V. Gruber, S. Baumann, O. Alber, C. Laubbichler, P. Bossew, E. Petermann, G. Ciotoli, A. Pereira, F. Domingos, F. Tondeur, G. Cinelli, A. Fernandez, C. Sainz, L. Quindos-Ponceta // Journal of the European Radon Association. – 2021. – Vol. 2. – Art. 5755. – P. 1-18. – DOI: 10.35815/radon.v2.5755.

61. Галушкин, А. И. Нейронные сети: основы теории. – Москва : Горячая Линия–Телеком, 2024. – 496 с. – ISBN 978-5-9912-0082-0.

62. A Pre-Diagnosis Model for Indoor Radon Potential Assessment / P. Meneses, N. Lopes, P. Leite [et al.] // 11th International Symposium on Digital Forensics and Security (ISDFS). – Piscataway : IEEE, 2023. – P. 1-6. – DOI: 10.1109/ISDFS58141.2023.10131887.

63. Models of Radon Exhalation from Building Structures: General and Case-Specific Solutions / D. Carlo, A. Maiorana, M. Ampollini [et al.] // SSRN Electronic Journal. – 2023. – Art. 163800 – DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.163800.

64. Статистический анализ результатов мониторинга уровня радона и метеорологических параметров в помещениях геофизических станций Азербайджана / А.А. Фейзуллаев, Ч.С. Алиев, М.Дж. Марданов [и др.] // Геофизические процессы и биосфера. – 2019. – Т. 18, № 2. – С. 106-118. – DOI: 10.21455/GPB2019.2-9.

65. Stochastic models for radon daily time series: seasonality, stationarity, and long-range dependence detection / M. Siino, S. Scudero, A. D'Alessandro // Frontiers in Earth Science. – 2020. – Vol. 8. – Art. 575001. – DOI: 10.3389/feart.2020.575001.

66. Atmospheric radon measurements to assess the relative representativeness of radon flux models / D. Kikaj, E. Chung, M. Saba [et al.] // EGU General Assembly 2023. – Vienna : EGU, 2023. – Art. EGU23-12074. – DOI: 10.5194/egusphere-egu23-12074.

67. Антонов, Г. В. Линейная регрессия как один из методов статистического исследования / Г. В. Антонов, С. И. Иванов // Известия Великолукской государственной сельскохозяйственной академии. – 2021. – № 2(35). – С. 64-75. – EDN UNIRWN.

68. James, G. An Introduction to Statistical Learning: with Applications in R / G. James, D. Witten, T. Hastie, R. Tibshirani. – New York : Springer, 2013. – XIV, 426 p. : ill. – (Springer Texts in Statistics ; vol. 103). – ISBN 978-1-4614-7138-7. – DOI: 10.1007/978-1-4614-7138-7.

69. Изгагин, В. С. Метод измерения среднегодовой ЭРОА торона в современных жилых зданиях / В. С. Изгагин, М. В. Жуковский, А. Д. Онищенко // АНРИ. – 2023. – № 2(113). – С. 34-49. – DOI 10.37414/2075-1338-2023-113-2-34-49. – EDN TJUSXU.

70. Калашникова, М. В. Совершенствование существующих методов оценки потенциальной радоноопасности территории / М. В. Калашникова // Математические методы и модели в высокотехнологичном производстве : Сборник тезисов докладов IV Международного форума. В 2-х частях, Санкт-Петербург, 06 ноября 2024 года. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, 2024. – С. 142-143. – EDN LEEICR.

71. Малахов, В. М. Инженерная экология : В 3 томах / В. М. Малахов, А. Г. Гриценко, С. В. Дружинин. Том 2. – Новосибирск : Сибирская государственная геодезическая академия, 2012. – 271 с. – ISBN 978-5-87693-535-9. – EDN SAQITX.

72. Калашникова, М. Влияние факторов среды на радоноопасность территории Санкт-Петербурга / М. Калашникова // Электроника: Наука, технология, бизнес. – 2025. – № 3(244). – С. 164-167. – DOI 10.22184/1992-4178.2025.244.3.164.167. – EDN DXZXCS.

73. Шатская, Е. Ю. Анализ и оценка природных и техногенных факторов формирования коррозионной агрессивности подземной среды Санкт-Петербурга по отношению к строительным материалам / Е. Ю. Шатская // Записки Горного института. – 2009. – Т. 182. – С. 50-53. – EDN KZEAWX.

74. Дашко, Р. Э. Инженерно-геологическая интерпретация подземного пространства как многокомпонентной среды - повышение безопасности его освоения и использования (на примере Санкт-Петербурга) / Р. Э. Дашко // СЕРГЕЕВСКИЕ ЧТЕНИЯ. Инженерно-геологические и геоэкологические проблемы городских агломераций : Материалы годичной сессии Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии, Москва, 23–24 марта 2015 года. Том Выпуск 17. – Москва: Российский университет дружбы народов, 2015. – С. 128-134. – EDN UBWBUF.

75. Основные проблемы геоэкологии и результаты мониторинга геологической среды береговой зоны Санкт-Петербургского региона / М. А. Спиридонов, В. М. Анохин, Н. Р. Горбацевич [и др.] // Региональная геология и металлогения. – 2001. – № 13-14. – С. 174-182. – EDN YSVWOP.

76. Объемная активность радона и ионообразование в невозмущенной нижней атмосфере: наземные наблюдения и численное моделирование / С. В. Анисимов, С. В. Галиченко, К. В. Афиногенов [и др.] // Физика Земли. – 2017. – № 1. – С. 155-170. – DOI 10.7868/S0002333717010033. – EDN YVJBRS.

77. Stochastic Models for Radon Daily Time Series: Seasonality, Stationarity, and Long-Range Dependence Detection / M. Siino, S. Scudero, A. D'Alessandro // Frontiers in Earth Science. – 2020. – Vol. 8. – Art. 575001. – DOI: 10.3389/feart.2020.575001.

78. Влияние конструктивных особенностей и объемно-планировочных решений зданий на формирование концентрации радона в воздухе помещений в условиях уникальной радоновой аномалии С. Атаманово Красноярского края / Р. А. Назиров, С. А. Кургуз, И. В. Тарасов [и др.] // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. – 2007. – № 1(7). – С. 87-91. – EDN KBEALD.

79. Towards Indoor Radon Analytics: An OLAP-Based Multidimensional Approach / R. Azevedo, J. P. Silva, N. Lopes [et al.] // Proceedings of the 17th International Joint Conference on Computer Vision, Imaging and Computer Graphics Theory and Applications (VISIGRAPP 2022). – Setúbal : SCITEPRESS, 2022. – P. 132-139. – DOI: 10.5220/0011272800003269.

80. Русская христианская гуманитарная академия имени Ф. М. Достоевского (РХГА). Радиационно-опасные объекты Ленинградской области и Санкт-Петербурга : [Электронный ресурс]. – СПб., 2023. – URL: <https://rhga.ru/upload/iblock/561/qr7shw2c1xu4633mi98c4r7mqn3z4d3g.pdf> (дата обращения: 14.07.2024).

81. Говор, М. В. Обеспечение радиационной безопасности жилых зданий на территориях с повышенным содержанием радона в воздухе / М. В. Говор // Биотехнологии и безопасность в техносфере : Материалы Всероссийской конференции, Санкт-Петербург, 21–22 апреля 2021 года / СПбПУ Петра Великого. Том 2. – Санкт-Петербург: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», 2021. – С. 18-20. – EDN GASSHG.

82. Дашко, Р. Э. Особенности инженерно-геологических условий Санкт-Петербурга / Р. Э. Дашко, О. Ю. Александрова, П. В. Котюков, А. В. Шидловская // Развитие городов и геотехническое строительство. – 2011. – № 13. – С. 24-71.

83. Ступин, Ю. А., Коврижкина М. С., Исаченко Г. А., Макаров А. Д., Сорокин П. Е., Зиновьев А. С., Линдер В. И., Павлинов П. С. Санкт-Петербург // Большая российская энциклопедия: научно-образовательный портал – URL: <https://bigenc.ru/c/sankt-peterburg-168d03/?v=10092678>. (дата обращения: 14.07.2024).

84. Особенности эманации радона из грунтов на территориях, подработанных угольными шахтами (на примере Ленинск-Кузнецкого района) / Т. В. Лешуков, А. В. Ларионов, К. В. Легощин, С. Н. Яковлева // Проблемы региональной экологии. – 2019. – № 6. – С. 140-143. – DOI 10.24411/1728-323X-2019-18140. – EDN KJHUPW.

85. Эманация радона как индикатор интенсивности межгеосферных взаимодействий на границе земная кора атмосфера / А. А. Спивак, С. А. Кожухов, М. В. Сухоруков, В. А. Харламов // Физика Земли. – 2009. – № 2. – С. 34-48. – EDN JVSGZF.

86. Сидорин, А. Я. Геофизические исследования для решения локальных экологических проблем / А. Я. Сидорин // Наука и технологические разработки. – 2021. – Т. 100, № 3. – С. 3–4. – DOI 10.21455/std2021.3–1. – EDN VTJLPH.

87. Геологический атлас Санкт-Петербурга / Н. Б. Филиппов, М. А. Спиридонов, Т. С. Бахарев [и др.]. – Санкт-Петербург : Комильфо, 2009. – 57 с. : ил., карт. – ISBN: 978-5-91339-080-6.

88. Калашникова, М. В. Влияние пространственных вариаций геологических факторов среды на результаты измерений радона / М. В. Калашникова // Системы контроля окружающей среды. – 2024. – № 2(56). – С. 49-56. – DOI 10.33075/2220-5861-2024-2-49-56. – EDN GIZFGU.

89. Использование ресурсов подземных вод в Санкт-Петербурге [Электронный ресурс] // Экология Петербурга. – 2018. – 11 марта. – URL: <https://ecopeterburg.ru/2018/03/11/использование-ресурсов-подземных-во/> (дата обращения: 14.05.2025).

90. Водоснабжение населённых пунктов из подземных источников, загрязнённых радиоактивным газом радоном-222 / Е. В. Левин, Р. Ф. Сагитов, В. Д. Баширов [и др.] // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. – 2017. – № 1(63). – С. 174-177. – EDN YFNHWH.

91. Калашникова, М. В. Влияние геологических факторов среды на оценку результатов измерения уровня радона / М. В. Калашникова // Метрологическое обеспечение инновационных технологий : Сборник статей VI Международного форума, Санкт-Петербург, 01 марта 2024 года. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, 2024. – С. 119-120. – EDN QHQQPG.

92. Комитет по природопользованию, охране окружающей среды и обеспечению экологической безопасности Санкт-Петербурга. Характеристика

климата [Электронный ресурс] // Экологический портал Санкт-Петербурга. – URL: <https://comitet.ecopass.adc.spb.ru/pages/sostoianie-okruzhaiushhei-sredy/klimat/karakteristika-klimata> (дата обращения: 21.04.2025).

93. Пигольцина, Г. Б. Микроклиматические особенности различных районов Санкт-Петербурга / Г. Б. Пигольцина // Общество. Среда. Развитие. – 2009. – № 3(12). – С. 130-144. – EDN LDGDMT.

94. Responses of the atmospheric concentration of radon-222 to the vertical mixing and spatial transportation / X. Chen, J. Paatero, V.-M. Kerminen [et al.] // Boreal Environment Research. – 2016. – Vol. 21. – P. 299-318.

95. Подымов, И. С. Сезонная изменчивость объемной активности радона в приземном слое атмосферы Черноморского побережья / И. С. Подымов, Т. М. Подымова // Современные методы и средства океанологических исследований : Материалы XV Всероссийской научно-технической конференции (МСОИ-2017), Москва, 16–18 мая 2017 года / Федеральное агентство научных организаций, Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Российский фонд фундаментальных исследований и др.. Том I. – Москва: Институт океанологии им. П.П. Ширшова Российской академии наук, 2017. – С. 100-104. – EDN YSGYQV.

96. Zafrir, H. Differentiation between the effect of temperature and pressure on radon within the subsurface geological media / H. Zafrir, S. Barbosa, U. Malik // Radiation Measurements. – 2012. – Vol. 49. – P. 39-56. – DOI: 10.1016/j.radmeas.2012.11.019.

97. Яковлев, Г. А. Особенности сезонной динамики изотопов радона в приземной атмосфере / Г. А. Яковлев, В. С. Яковлева // Вестник КРАУНЦ. Физико-математические науки. – 2020. – Т. 31, № 2. – С. 129-138. – DOI 10.26117/2079-6641-2020-31-2-129-138. – EDN XOCSDW.

98. Radon Variability as a Result of Interaction with the Environment / S. Pulinets, I. Mironova, P. Miklyaev [et al.] // Atmosphere. – 2024. – Vol. 15, No. 2. – P. 167. – DOI 10.3390/atmos15020167. – EDN XRSBGZ.

99. Калашникова, М. В. Влияние метеорологических факторов среды на оценку результатов измерения уровня радона / М. В. Калашникова //

Метрологическое обеспечение инновационных технологий : Сборник статей VI Международного форума, Санкт-Петербург, 01 марта 2024 года. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, 2024. – С. 117-118. – EDN VPTFLK.

100. Защита жителей домов от влияния радона при эксплуатации здания / К. А. Роберт, К. Я. Нешто, Т. Д. Мамаев, И. Ю. Сенин // Строительство уникальных зданий и сооружений. – 2015. – № 10(37). – С. 46-52. – EDN VH GKZF.

101. Ignatieva M. History and Restoration of the St. Petersburg Summer Garden: Returning to the Roots / M. Ignatieva, I. Melnichuk, O. Cherdantseva [et al.] // Garden History. – 2015. – Vol. 43, No. 2. – P. 199-217.

102. Головина, С. Г. Формирование архитектурно-конструктивной системы зданий Санкт-Петербурга 1703-1730-х годов / С. Г. Головина // Вестник гражданских инженеров. – 2021. – № 3(86). – С. 5-14. – DOI 10.23968/1999-5571-2021-18-3-5-14. – EDN UMBTTZ.

103. Летюхин, И. Д. Промышленность Санкт-Петербурга: история, проблемы и перспективы развития / И. Д. Летюхин // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия: Экономика и экологический менеджмент. – 2014. – № 4. – С. 221-231. – EDN TCELPX.

104. Estokova, A. Investigation of Building Materials' Radioactivity in a Historical Building – A Case Study / A. Estokova, E. Singovszka, M. Vertal' // Materials. – 2022. – Vol. 15, No. 19. – Art. 6876. – DOI: 10.3390/ma15196876.

105. Suresh, S. N. Assessment of natural radioactivity levels and potential radiological risks of commonly used building materials in Uttara Kannada District, Karnataka, India / S. N. Suresh, D. R. Rangaswamy, S. Erathimmaiah [et al.] // Radiation Protection Dosimetry. – 2023. – Vol. 199, No. 15. – P. 2531-2536. – DOI: 10.1093/rpd/ncad212.

106. ГОСТ 30108-94 Материалы и изделия строительные. Определение удельной эффективной активности естественных радионуклидов (с Изменениями № 1, 2): издание официальное: утверждены и введены в действие Постановлением

Госстроя России от 30 июня 1994 г. № 18-48 введен впервые: дата введения 1995-01-01. – Москва: Стандартиформ,, 2007 – 7 с. - Текст : непосредственный.

107. ГОСТ 530-2012. Кирпич и камень керамические. Технические условия: издание официальное : утверждены и введены в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 27 декабря 2012 г. № 2148-ст: дата введения 2013-07-01. – Москва: Стандартиформ,, 2013 – 32 с. - Текст : непосредственный.

108. ГОСТ 12730.4-2020 Бетоны. Методы определения параметров пористости: утверждены и введены в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 22 декабря 2020 г. № 1344-ст: дата введения 2021-09-01. – Москва: Стандартиформ, 2021 – 16 с. - Текст : непосредственный.

109. Что такое радон и как мы подвергаемся его воздействию? [Электронный ресурс] // ООН. – URL: <https://www.ungeneva.org/ru/news-media/news/2024/05/93786/chto-takoe-radon-i-kak-my-podvergaemsya-ego-vozdeystviyu> (дата обращения: 21.04.2025).

110. Калашникова, М. В. Моделирование радоноопасности территории с учётом конструктивных параметров зданий: теоретическое обоснование в рамках системного подхода / М. В. Калашникова // Математические методы и модели в высокотехнологичном производстве : Сборник тезисов докладов V Международного форума. В 2-х частях, Санкт-Петербург, 3 декабря 2025 года. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, 2025. – С. 233–234.

111. Калашникова, М. В. Комплексный анализ и ранжирование факторов радоноопасности в условиях урбанизированной среды / М. В. Калашникова // Метрологическое обеспечение инновационных технологий : Сборник статей VIII Международного форума, Санкт-Петербург, 04 марта 2026 года. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, 2026. – С. 169-170.

112. Калашникова, М. В. Разработка геоинформационной системы оценки потенциальной радоноопасности территории / М. В. Калашникова // Контроль. Диагностика. – 2025. – Т. 28, № 5(323). – С. 32-38. – DOI 10.14489/td.2025.05.pp.032-038. – EDN MLQQRZ.

113. Калашникова, М. Модель потенциальной радоноопасности территории. Использование метода kriging и Global Positioning System / М. Калашникова // Электроника: Наука, технология, бизнес. – 2024. – № 6(237). – С. 104-107. – DOI 10.22184/1992-4178.2024.237.6.104.107. – EDN MJGEKR.

114. Aggarwal, C. C. Proximity-Based Outlier Detection // Outlier Analysis. – 2nd ed. – Cham : Springer, 2017. – P. 111-147. – DOI: 10.1007/978-3-319-47578-3_4. – ISBN 978-3-319-47577-6.

115. Tan, P.-N. Introduction to Data Mining / P.-N. Tan, M. Steinbach, V. Kumar. – Boston : Pearson Addison Wesley, 2005. – XX, 769 p. : ill. – ISBN 978-0-321-32136-7.

116. Hyndman, R. J. Sample Quantiles in Statistical Packages / R. J. Hyndman, Y. Fan // The American Statistician. – 1996. – Vol. 50, No. 4. – P. 361-365. – DOI: 10.1080/00031305.1996.10473566.

117. Хальясмаа, А. И. Синтез моделей и методов автоматизированной диагностики высоковольтного оборудования электрических станций и подстанций : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Хальясмаа Александра Ильмаровна, 2024. – 360 с. – EDN CJGADT.

118. ГОСТ Р ИСО 16269-4-2017 Статистические методы. Статистическое представление данных. Часть 4. Выявление и обработка выбросов: издание официальное: утверждены и введены в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 10 августа 2017 г. № 865-ств.: введен впервые: дата введения 2016-08-10. – Москва: Стандартинформ, 2017 – 48 с. – Текст : непосредственный.

119. Дьяконов, А. Г. Методы решения задач классификации с категориальными признаками / А. Г. Дьяконов // Прикладная математика и

информатика : труды факультета ВМК МГУ имени М.В. Ломоносова. Том № 46. – Москва : ООО «МАКС Пресс», 2014. – С. 103-127. – EDN XHMFSJ.

120. Samuels, J. One-Hot Encoding and Two-Hot Encoding: An Introduction // ResearchGate. – 2024. – DOI: 10.13140/RG.2.2.21459.76327.

121. Box, G. E. P., Cox D. R. An Analysis of Transformations // Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Methodological). – 1964. – Vol. 26, № 2. – P. 211-243. – DOI 10.1111/j.2517-6161.1964.tb00553.x

122. Порунов, А. Н. Mathcad в руках экономиста: Бокс-Кокс преобразование и иллюзия «нормальности» макроэкономического ряда / А. Н. Порунов // Бизнес-информатика. – 2010. – № 2(12). – С. 3-10. – EDN MSSTCF.

123. Старовойтов, В. В. Нормализация данных в машинном обучении / В. В. Старовойтов, Ю. И. Голуб // Информатика. – 2021. – Т. 18, № 3. – С. 83-96. – DOI 10.37661/1816-0301-2021-18-3-83-96. – EDN JКАНКМ.

124. Ковариация и корреляция [Электронный ресурс] – URL: https://studopedia.ru/8_10943_kovariatsiya-i-korrelyatsiya.html (дата обращения: 21.04.2025).

125. Анализ факторов социально-политической нестабильности в странах африканской макрзоны с помощью моделей машинного обучения [Электронный ресурс] // URL: https://www.socionauki.ru/upload/socionauki.ru/book/files/monitoring_sm_6/188-226.pdf. (дата обращения: 21.04.2025).

126. Калашникова, М. В. Выявление ключевых детерминант радоноопасности урбанизированных территорий / М. В. Калашникова // Вестник Камчатского государственного технического университета. – 2025. – № 74. – С. 22-31. – DOI 10.17217/2079-0333-2025-74-22-31. – EDN KGNEAJ.

127. Калашникова, М. В. Геоинформационные системы в системе мониторинга радоноопасности / М. В. Калашникова // Метрологическое обеспечение инновационных технологий : Сборник статей VII Международного форума, Санкт-Петербург, 04 марта 2025 года. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, 2025. – С. 536-537. – EDN CFNLBN.

128. Калашникова, М. В. Геоинформационная система по уровню объемной активности радона на территории Санкт-Петербурга в программе Golden Software Surfer / М. В. Калашникова // Биотехнологии и безопасность в техносфере : Сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 11–12 апреля 2023 года. – Санкт-Петербург: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2023. – С. 16-18. – EDN WBGBJA.

129. Шульгин, С. Г. Отбор переменных для анализа и прогнозирования нестабильности с помощью моделей градиентного бустинга / С. Г. Шульгин // Системный мониторинг глобальных и региональных рисков. Социально-политическая и экономическая дестабилизация: анализ страновых и региональных ситуаций в мир-системном аспекте : ежегодник. Том 9. – Волгоград : Издательство «Учитель», 2018. – С. 115-153. – EDN JFUNQP.

130. Лемешко, Б. Ю. Сравнительный анализ критериев проверки отклонения распределения от нормального закона / Б. Ю. Лемешко, С. Б. Лемешко // Метрология. – 2005. – № 2. – С. 3-24. – EDN KARDYZ.

131. Агалаков, С. А. Статистические методы анализа данных / С. А. Агалаков. – Омск : Омский государственный университет им. Ф.М. Достоевского, 2017. – 92 с. – ISBN 978-5-7779-2187-1. – EDN URORRC.

132. Тест Дики–Фуллера. Большая российская энциклопедия: [Электронный ресурс] – URL: <https://bigenc.ru/c/test-diki-fullera-ba2fa5> (дата обращения: 14.07.2024).

133. Павлов, Ю. В. Пространственные взаимодействия: оценка на основе глобального и локального индексов Морана / Ю. В. Павлов, Е. Н. Королева // Пространственная экономика. – 2014. – № 3. – С. 95-110. – DOI 10.14530/se.2014.3.95-110. – EDN SNZGYN.

134. Громов, В. А. Математические вычисления в программировании / В. А. Громов, А. З. Ядута, И. В. Гурьянова // Высокие технологии и инновации в науке : сборник избранных статей Международной научной конференции, Санкт-Петербург, 28 мая 2020 года. – Санкт-Петербург: ГНИИ «Нацразвитие», 2020. – С. 254-258. – EDN FHXMDX.

135. Расстояние между двумя точками на поверхности Земли [Электронный ресурс] // URL: <https://yu-xuan.livejournal.com/135917.html> (дата обращения: 21.04.2025).

136. Doğan, N. Determination of the Number of Bins/Classes Used in Histograms and Frequency Tables: A Short Bibliography / N. Doğan, İ. Doğan // İstatistik Araştırma Dergisi. – 2010. – Vol. 7, No. 2. – P. 77-86.

137. Демьянов, В. В. Геоestatистика: теория и практика / В. В. Демьянов, Е. А. Савельева. – Москва : Наука, 2010. – 327 с. – ISBN 978-5-02-037478-2. – EDN YLEGPR.

138. Mahdi E., Abuzaid A., Atta A. Empirical variogram for achieving the best valid variogram // Communications for Statistical Applications and Methods. – 2020. – Vol. 27, No. 5. – P. 547–568. – DOI: 10.29220/CSAM.2020.27.5.547.

139. Оценка качества построенной модели (адекватности эмпирическим данным) [Электронный ресурс] – URL: <https://studfile.net/preview/3571850/page:2/> (дата обращения: 14.05.2025)

140. Средняя абсолютная ошибка (Mean Absolute Error) [Электронный ресурс] – URL: <https://wiki.loginom.ru/articles/mae.html> (дата обращения: 14.05.2025)

141. Кросс-валидация в машинном обучении: Часть 1 [Электронный ресурс] – URL: <https://futureinapps.com/ru/blog/kross-validaciya-v-mashinnom-obuchenii-chast-1?pid=1kjAlrVFMI> (дата обращения: 14.05.2025)

142. Deutsch, C. V. GSLIB: Geostatistical Software Library and User's Guide / C. V. Deutsch, A. G. Journel. – 2nd ed. – New York : Oxford University Press, 1998. – 369 p. – ISBN 0-19-510015-8.

143. Sum of Squares: SST, SSR, SSE) [Электронный ресурс] – URL: <https://365datascience.com/tutorials/statistics-tutorials/sum-squares/> html (дата обращения: 14.05.2025)

144. Калашникова, М. В. Применение метода наименьших квадратов для оптимизации параметров при построении теоретической вариограммы / М. В. Калашникова // Математические методы и модели в высокотехнологичном

производстве : Сборник тезисов докладов IV Международного форума. В 2-х частях, Санкт-Петербург, 06 ноября 2024 года. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, 2024. – С. 144-145. – EDN UFMHНК.

145. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025618097 Российская Федерация. Программа для сбора, обработки, анализа и визуализации данных с датчиков (температура, влажность, радон, торон) для оценки состояния окружающей среды : заявл. 01.04.2025 : опубл. 11.04.2025 / М. В. Калашникова, Т. В. Колобашкина ; заявитель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения». – EDN RKUDTD.

146. Калашникова, М. В. Автоматизированная геоинформационная система оценки радоноопасности на урбанизированной территории / М. В. Калашникова // Контроль. Диагностика. – 2026. – Т. 29, № 2(332). – С. 60 – 72.

147. Свидетельство регистрации государственной программы на ЭВМ № 2025680007 Российская Федерация. Автоматизированная система комплексной оценки радоноопасности территорий на основе геостатистики и машинного обучения: заявл. 07.08.2025 : опубл. 07.08.2025 / М. В. Калашникова, Т. В. Колобашкина ; заявитель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения».

148. Калашникова, М. В. Регрессионная модель для автоматизированной оценки рисков последствий облучения радоном / М. В. Калашникова // Системы контроля окружающей среды. – 2025. – № 4(62). – С. 106–115. – DOI 10.33075/2220-5861-2025-4-106–115.

149. Калашникова, М. В. Разработка алгоритма для оценки влияния внутреннего облучения от радона на здоровья человека/ М. В. Калашникова // Математические методы и модели в высокотехнологичном производстве : Сборник тезисов докладов V Международного форума. В 2-х частях, Санкт-Петербург, 3

декабря 2025 года. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, 2025. – С. 235 – 236.

150. МУ 2.6.1.1088-02 Оценка индивидуальных эффективных доз облучения населения за счет природных источников ионизирующего излучения: издание официальное: утверждены Главным государственным санитарным врачом Российской Федерации от 4 января 2002 г. введен впервые: дата введения 2002-03-01. – Москва: Минздрав России, 2002 – 22 с. - Текст : непосредственный.

151. Свидетельство регистрации государственной программы на ЭВМ № 2025680593 Российская Федерация. Программа для автоматизированной оценки рисков облучения радоном: заявл. 07.08.2025 : опубл. 07.08.2025 /Т. В. Колобашкина М. В. Калашникова ; заявитель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения».

152. Риск возникновения рака легкого при облучении радоном и продуктами его распада. Заявление по радону : Труды МКРЗ, Публикация 115 МКРЗ. – Москва : Федеральный медицинский биофизический центр им. А.И. Бурназяна, 2013. – 92 с. – ISBN 978-5-905926-01-3. – EDN RWHVCF.

153. Калашникова, М. В. Оценка влияния радона на здоровье учащихся и персонал университета СПбПУ / М. В. Калашникова // Охрана труда в организациях, подведомственных Минобрнауки России : Сборник материалов Всероссийской конференции, Санкт-Петербург, 08–09 сентября 2022 года. – Санкт-Петербург: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», 2022. – С. 25-29. – EDN QRVVHM.

154. Калашникова, М. В. Теоретические аспекты воздействия альфа-излучения радона на организм человека для моделирования природно-технических систем/ М. В. Калашникова // Математические методы и модели в высокотехнологичном производстве : Сборник тезисов докладов V Международного форума. В 2-х частях, Санкт-Петербург, 3 декабря 2025 года. –

Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, 2025. – С. 231–232.

155. СП 321.1325800.2017 Здания жилые и общественные. Правила проектирования противорадионной защиты: утверждены и введены в действие Приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 5 декабря 2017 г. № 1616/пр: дата введения 2018-06-06. – Москва: Стандартинформ, 2017. – 39 с. – Текст: непосредственный.

156. Гулабянц, Л. А. Противорадионная защита жилых и общественных зданий / Л. А. Гулабянц, А. В. Калайдо. – Москва-Берлин : ООО «Директмедиа Паблшинг», 2020. – 237 с. – ISBN 978-5-4499-1619-8. – EDN RRKLAO.

Приложение А. Характеристика среды

Таблица А.1 –Характеристики жилых зданий

№	Тип дома	Год постройки	Тип фундамента
1	2	3	4
1	Монолитный	2015 г.	Свайный
2	Кирпичный	1969 г.	Ленточный
3	Кирпичный	1938 г.	Ленточный
4	Кирпичный	2018 г.	Свайный
5	Кирпичный	1854 г.	Ленточный
6	Кирпичный	1902 г.	Свайный
7	Панельный	1961 г.	Ленточный
8	Панельный	2009 г.	Свайный
9	Монолитный	2015 г.	Сплошной
10	Панельный	1970 г.	Ленточный
11	Монолитный	2016 г.	Свайный
12	Кирпичный	1917 г.	Ленточный
13	Панельный	1975 г.	Ленточный
14	Кирпичный	1966 г.	Ленточный
15	Панельный	1999 г.	Свайный
16	Смешанные	1972 г.	Ленточный
17	Кирпичный	1960 г.	Ленточный
18	Монолитный	2014 г.	Свайный
19	Кирпичный	1963 г.	Ленточный
20	Панельный	1975 г.	Ленточный
21	Панельный	1968 г.	Ленточный
22	Монолитный	2004 г.	Сплошной
23	Кирпичный	1958 г.	Ленточный
24	Кирпичный	1934 г.	Ленточный
25	Панельный	1967 г.	Ленточный
26	Кирпичный	1900 г.	Ленточный
27	Кирпичный	1899 г.	Ленточный
28	Монолитный	1966 г.	Ленточный
29	Кирпичный	1971 г.	Ленточный
30	Монолитный	1968 г.	Ленточный
31	Кирпичный	1995 г.	Ленточный
32	Панельный	1984 г.	Ленточный
33	Кирпичный	1860 г.	Ленточный
34	Кирпичный	1890 г.	Ленточный
35	Кирпичный	1890 г.	Ленточный
36	Панельный	1978 г.	Ленточный
37	Кирпичный	1903 г.	Ленточный
38	Кирпичный	1975 г.	Ленточный
39	Панельный	1971 г.	Ленточный
40	Кирпичный	1903 г.	Ленточный
41	Монолитный	2015 г.	Сплошной
42	Кирпичный	1877 г.	Ленточный

Продолжение приложения А

1	2	3	4
43	Монолитный	2012 г.	Свайный
44	Кирпичный	1969 г.	Ленточный
45	Кирпичный	1973 г.	Ленточный
46	Кирпичный	1916 г.	Ленточный
47	Панельный	1981 г.	Ленточный
48	Смешанные	2017 г.	Свайный
49	Кирпичный	1989 г.	Ленточный
50	Кирпичный	1953 г.	Ленточный
51	Железобетонная панель	1980 г.	Свайный
52	Монолитный	2017 г.	Свайный
53	Кирпичный	1983 г.	Свайный
54	Панельный	1984 г.	Ленточный
55	Панельный	1979 г.	Ленточный
56	Кирпичный	1989 г.	Сплошной
57	Кирпичный	2005 г.	Свайный
58	Панельный	1972 г.	Ленточный
59	Кирпичный	1908 г.	Ленточный
60	Панельный	1979 г.	Ленточный
61	Панельный	1964 г.	Ленточный
62	Смешанные	2018 г.	Свайный
63	Монолитный	2009 г.	Сплошной
64	Панельный	1966 г.	Ленточный
65	Монолитный	2020 г.	Свайный
66	Панельный	1977 г.	Ленточный
67	Кирпичный	1959 г.	Ленточный
68	Кирпичный	1882 г.	Ленточный
69	Кирпичный	2008 г.	Свайный
70	Смешанные	2007 г.	Свайный
71	Кирпичный	1998 г.	Свайный
72	Железобетон	1977 г.	Свайный
73	Панельный	1966 г.	Ленточный
74	Кирпичный	1998 г.	Ленточный
75	Кирпичный	1978 г.	Ленточный
76	Кирпичный	2007 г.	Свайный
77	Кирпичный	1917 г.	Ленточный
78	Панельный	1970 г.	Ленточный
79	Кирпичный	2007 г.	Свайный
80	Кирпичный	1901 г.	Ленточный
81	Монолитный	2000 г.	Свайный
82	Кирпичный	1962 г.	Ленточный
83	Кирпичный	1913 г.	Ленточный
84	Смешанные	1998 г.	Ленточный
85	Кирпичный	1952 г.	Ленточный
86	Кирпичный	1959 г.	Ленточный
87	Панельный	1959 г.	Ленточный

Окончание приложения А

1	2	3	4
88	Панельный	1974 г.	Ленточный
89	Кирпичный	1954 г.	Ленточный
90	Панельный	1968 г.	Ленточный
91	Кирпичный	1950 г.	Ленточный
92	Панельный	1979 г.	Ленточный
93	Кирпичный	1909 г.	Ленточный
94	Смешанные	2014 г.	Свайный
95	Кирпичный	2016 г.	Свайный
96	Панельный	1962 г.	Ленточный
97	Кирпичный	1962 г.	Ленточный
98	Панельный	1988 г.	Свайный
99	Кирпичный	1930 г.	Сплошной
100	Кирпичный	1959 г.	Ленточный
101	Панельный	1996 г.	Ленточный
102	Панельный	1986 г.	Ленточный
103	Монолит	2002 г.	Ленточный
104	Кирпичный	1951 г.	Ленточный
105	Монолитно-кирпичный	2008 г.	Свайный
106	Монолит	2015 г.	Свайный
107	Кирпичный	1913 г.	Ленточный
108	Панельный	1962 г.	Свайный
109	Монолит	2017 г.	Свайный
110	Кирпичный	1976 г.	Ленточный
111	Монолит	2015 г.	Свайный
112	Кирпичный	1934 г.	Ленточный
113	Панельный	1975 г.	Ленточный
114	Монолит	2016 г.	Свайный
115	Кирпичный	1959 г.	Ленточный
116	Панельный	2013 г.	Сплошной
117	Железобетон	2018 г.	Свайный
118	Кирпичный	1961 г.	Ленточный
119	Монолит	2019 г.	Свайный
120	Монолит	2015 г.	Свайный
121	Монолитно-кирпичный	2021 г.	Свайный
122	Панельный	1993 г.	Ленточный
123	Монолит	2019 г.	Свайный
124	Монолит	2012 г.	Свайный
125	Монолит	2018 г.	Свайный
126	Монолитно-кирпичный	2022 г.	Свайный
127	Монолитно-кирпичный	2017 г.	Свайный

Приложение Б. Свидетельство о государственной регистрации программы
для ЭВМ № 2025618097

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2025618097

**Программа для сбора, обработки, анализа и
визуализации данных с датчиков (температура,
влажность, радон, торон) для оценки состояния
окружающей среды**

Правообладатель: *Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования «Санкт-
Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения» (RU)*

Авторы: *Калашникова Мария Владимировна (RU),
Колобаикина Татьяна Владимировна (RU)*

Заявка № **2025616853**

Дата поступления **01 апреля 2025 г.**

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ **11 апреля 2025 г.**



*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

документ подписан электронной подписью
Сертификат 0692e7e1a6300b154f2401670bca2026
Владелец: **Зубов Юрий Сергеевич**
Действителен с 10.07.2024 по 03.10.2025

Ю.С. Зубов

Приложение В. Результаты измерений и расчётов

Таблица В.1 – Результаты измерений и расчётов

№	ОА	ЭРОА _{Ra}	Δ_{Rn}	ЭРОА _{Tn}	Δ_{Tn}	ЭРОА	Δ	ЭРОА+ Δ	x_{norm}
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	94	89	26,7	2,5	0,75	100,5	30,15	130,65	0,25
2	142	136	40,8	2,4	0,72	147,04	44,11	191,15	0,40
3	211	204	61,2	3,8	1,14	221,48	66,44	287,92	0,63
4	78	74	22,2	2,2	0,66	84,12	25,24	109,36	0,20
5	118	110	33	2,6	0,78	121,96	36,59	158,55	0,32
6	227	218	65,4	3,9	1,17	235,94	70,78	306,72	0,67
7	230	222	66,6	4	1,2	240,4	72,12	312,52	0,69
8	111	105	31,5	2,6	0,78	116,96	35,09	152,05	0,30
9	100	96	28,8	2,7	0,81	108,42	32,53	140,95	0,28
10	142	138	41,4	1,8	0,54	146,28	43,88	190,16	0,40
11	67	64	19,2	1,3	0,39	69,98	20,99	90,97	0,16
12	257	251	75,3	4,8	1,44	273,08	81,92	355,00	0,8
13	308	301	90,3	5,1	1,53	324,46	97,34	421,80	0,95
14	90	87	26,1	2,1	0,63	96,66	29,00	125,66	0,24
15	108	104	31,2	2,7	0,81	116,42	34,93	151,35	0,30
16	66	64	19,2	1,7	0,51	71,82	21,55	93,37	0,16
17	97	91	27,3	2,7	0,81	103,42	31,03	134,45	0,26
18	76	73	21,9	1,3	0,39	78,98	23,69	102,67	0,19
19	139	134	40,2	2,6	0,78	145,96	43,79	189,75	0,39
20	135	129	38,7	2,4	0,72	140,04	42,01	182,05	0,38
21	204	194	58,2	3,8	1,14	211,48	63,44	274,92	0,60
22	205	195	58,5	3,8	1,14	212,48	63,74	276,22	0,60
23	198	173	51,9	3,5	1,05	189,1	56,73	245,83	0,53
24	207	190	57	3,5	1,05	206,1	61,83	267,93	0,58
25	117	113	33,9	2,6	0,78	124,96	37,49	162,45	0,33
26	169	163	48,9	3,3	0,99	178,18	53,45	231,63	0,49
27	273	266	79,8	4,9	1,47	288,54	86,56	375,10	0,84
28	185	179	53,7	3,5	1,05	195,1	58,53	253,63	0,55
29	188	181	54,3	3,5	1,05	197,1	59,13	256,23	0,55
30	253	240	72	4,6	1,38	261,16	78,35	339,51	0,75
31	64	59	17,7	1,5	0,45	65,9	19,77	85,67	0,15
32	268	260	78	4,7	1,41	281,62	84,49	366,11	0,82
33	207	199	59,7	3,8	1,14	216,48	64,94	281,42	0,61
34	260	246	73,8	4,8	1,44	268,08	80,42	348,50	0,77
35	161	156	46,8	3,1	0,93	170,26	51,08	221,34	0,47
36	126	119	35,7	3,1	0,93	133,26	39,98	173,24	0,36
37	129	125	37,5	3	0,9	138,8	41,64	180,44	0,37
38	96	93	27,9	2,7	0,81	105,42	31,63	137,05	0,27
39	125	121	36,3	2,7	0,81	133,42	40,03	173,45	0,36
40	297	289	86,7	5	1,5	312	93,60	405,60	0,91

Продолжение приложения В

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
41	33	29	8,7	1,2	0,36	34,52	10,36	44,88	0,05
42	216	210	63	3,9	1,17	227,94	68,38	296,32	0,65
43	59	56	16,8	1,7	0,51	63,82	19,15	82,97	0,14
44	190	186	55,8	3,7	1,11	203,02	60,91	263,93	0,57
45	184	180	54	3,7	1,11	197,02	59,11	256,13	0,55
46	153	247	74,1	4,8	1,44	269,08	80,72	349,80	0,78
47	143	139	41,7	2,4	0,72	150,04	45,01	195,05	0,41
48	41	38	11,4	1,5	0,45	44,9	13,47	58,37	0,08
49	109	106	31,8	2,8	0,84	118,88	35,66	154,54	0,31
50	248	237	71,1	4,6	1,38	258,16	77,45	335,61	0,74
51	227	222	66,6	4	1,2	240,4	72,12	312,52	0,69
52	82	79	23,7	2	0,6	88,2	26,46	114,66	0,22
53	175	171	51,3	3,4	1,02	186,64	55,99	242,63	0,52
54	170	166	49,8	3,4	1,02	181,64	54,49	236,13	0,51
55	215	211	63,3	3,9	1,17	228,94	68,68	297,62	0,65
56	205	201	60,3	3,8	1,14	218,48	65,54	284,02	0,62
57	32	29	8,7	1,2	0,36	34,52	10,36	44,88	0,05
58	238	232	69,6	4,5	1,35	252,7	75,81	328,51	0,73
59	56	53	15,9	1,6	0,48	60,36	18,11	78,47	0,13
60	198	193	57,9	3,9	1,17	210,94	63,28	274,22	0,60
61	170	163	48,9	3,1	0,93	177,26	53,18	230,44	0,49
62	81	76	22,8	2	0,6	85,2	25,56	110,76	0,21
63	58	55	16,5	1,7	0,51	62,82	18,85	81,67	0,14
64	207	202	60,6	3,6	1,08	218,56	65,57	284,13	0,62
65	40	37	11,1	1,6	0,48	44,36	13,31	57,67	0,08
66	109	106	31,8	2,7	0,81	118,42	35,53	153,95	0,31
67	160	156	46,8	2,9	0,87	169,34	50,80	220,14	0,47
68	189	184	55,2	3,5	1,05	200,1	60,03	260,13	0,56
69	44	42	12,6	1,6	0,48	49,36	14,81	64,17	0,09
70	109	105	31,5	2,7	0,81	117,42	35,23	152,65	0,31
71	293	285	85,5	5,2	1,56	308,92	92,68	401,60	0,9
72	218	212	63,6	3,9	1,17	229,94	68,98	298,92	0,66
73	125	121	36,3	2,7	0,81	133,42	40,03	173,45	0,36
74	170	164	49,2	3	0,9	177,8	53,34	231,14	0,49
75	216	211	63,3	3,9	1,17	228,94	68,68	297,62	0,65
76	297	264	79,2	4,9	1,47	340,44	85,96	426,40	0,83
77	341	311	93,3	6,4	1,92	340,44	102,13	442,57	1
78	302	277	83,1	5	1,5	300	90,00	390,00	0,87
79	336	311	93,3	6,4	1,92	286,54	102,13	388,67	0,86
80	291	263	78,9	4,9	1,47	285,54	85,66	371,20	0,83
81	253	238	71,4	4,5	1,35	258,7	77,61	336,31	0,75

Продолжение приложения В

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
82	247	231	69,3	4	1,2	249,4	74,82	324,22	0,72
83	227	205	61,5	3,9	1,17	222,94	66,88	289,82	0,63
84	220	201	60,3	3,9	1,17	218,94	65,68	284,62	0,62
85	220	197	59,1	3,8	1,14	214,48	64,34	278,82	0,61
86	203	186	55,8	3,5	1,05	202,1	60,63	262,73	0,57
87	211	181	54,3	3,5	1,05	197,1	59,13	256,23	0,55
88	190	176	52,8	3,3	0,99	191,18	57,35	248,53	0,54
89	194	171	51,3	3,4	1,02	186,64	55,99	242,63	0,52
90	189	169	50,7	3,2	0,96	183,72	55,12	238,84	0,51
91	182	166	49,8	3,2	0,96	180,72	54,22	234,94	0,50
92	186	164	49,2	3,2	0,96	178,72	53,62	232,34	0,5
93	188	163	48,9	3,2	0,96	177,72	53,32	231,04	0,5
94	161	148	44,4	2,5	0,75	159,5	47,85	207,35	0,44
95	169	147	44,1	2,5	0,75	158,5	47,55	206,05	0,43
96	168	139	41,7	2,4	0,72	150,04	45,01	195,05	0,41
97	151	136	40,8	2,4	0,72	147,04	44,11	191,15	0,4
98	159	134	40,2	2,4	0,72	145,04	43,51	188,55	0,39
99	159	132	39,6	2,4	0,72	143,04	42,91	185,95	0,39
100	146	123	36,9	2,9	0,87	136,34	40,90	177,24	0,36
101	146	121	36,3	3	0,9	134,8	40,44	175,24	0,36
102	144	118	35,4	2,9	0,87	131,34	39,40	170,74	0,35
103	132	109	32,7	2,7	0,81	121,42	36,43	157,85	0,32
104	122	99	29,7	2,7	0,81	111,42	33,43	144,85	0,29
105	109	92	27,6	2,7	0,81	104,42	31,33	135,75	0,27
106	113	92	27,6	2,7	0,81	104,42	31,33	135,75	0,27
107	109	87	26,1	2,1	0,63	96,66	29,00	125,66	0,24
108	105	85	25,5	2,1	0,63	94,66	28,40	123,06	0,24
109	101	82	24,6	2,1	0,63	91,66	27,50	119,16	0,23
110	112	78	21	2,1	0,5	87,66	23,30	110,96	0,21
111	81	69	20,7	1,9	0,57	77,74	23,32	101,06	0,18
112	101	68	21	1,9	0,4	76,74	22,84	99,58	0,18
113	78	59	18	1,7	0,4	66,82	19,84	86,66	0,15
114	74	58	17,4	1,7	0,51	65,82	19,75	85,57	0,15
115	64	48	14,4	1,6	0,48	55,36	16,61	71,97	0,11
116	68	46	13,8	1,6	0,48	53,36	16,01	69,37	0,11
117	57	39	11,7	1,6	0,48	46,36	13,91	60,27	0,09
118	54	31	9	1,6	0,3	38,36	10,38	48,74	0,06
119	44	31	9,3	1,6	0,48	38,36	11,51	49,87	0,06
120	43	29	8,7	1,6	0,48	36,36	10,91	47,27	0,05
121	48	26	7,8	1,2	0,36	31,52	9,46	40,98	0,04
122	38	24	7,2	1,2	0,36	29,52	8,86	38,38	0,03

Окончание приложения В

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
123	46	22	7	1,1	0,2	27,06	7,92	34,98	0,03
124	37	21	6,3	1,1	0,33	26,06	7,82	33,88	0,02
125	42	19	5	0,83	0,2	22,818	5,92	28,74	0,01
126	27	18	5,4	0,6	0,18	20,76	6,23	26,99	0,01
127	37	17	4	0,6	0,1	19,76	4,46	24,22	0

Приложение Г. Визуализация карт и гистограмм пар точек для каждого бина

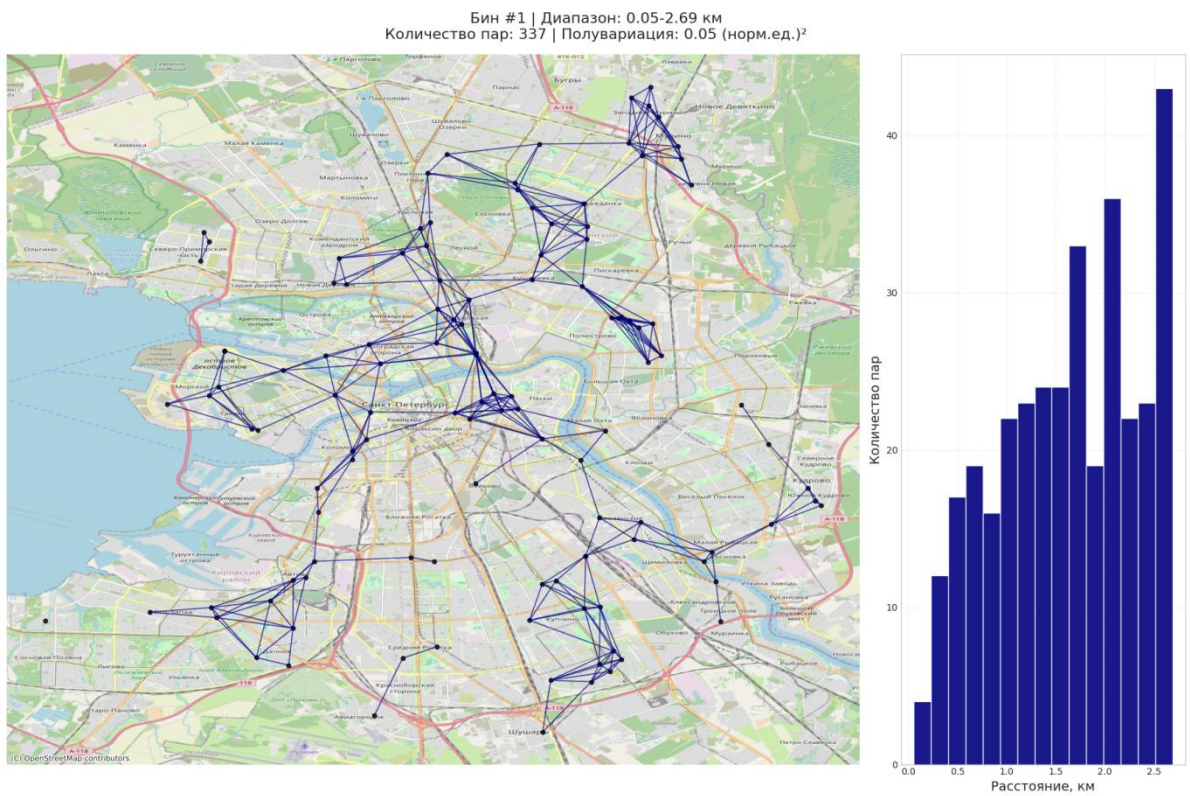


Рисунок Г.1 – Карта и гистограмма пар точек для первого бина

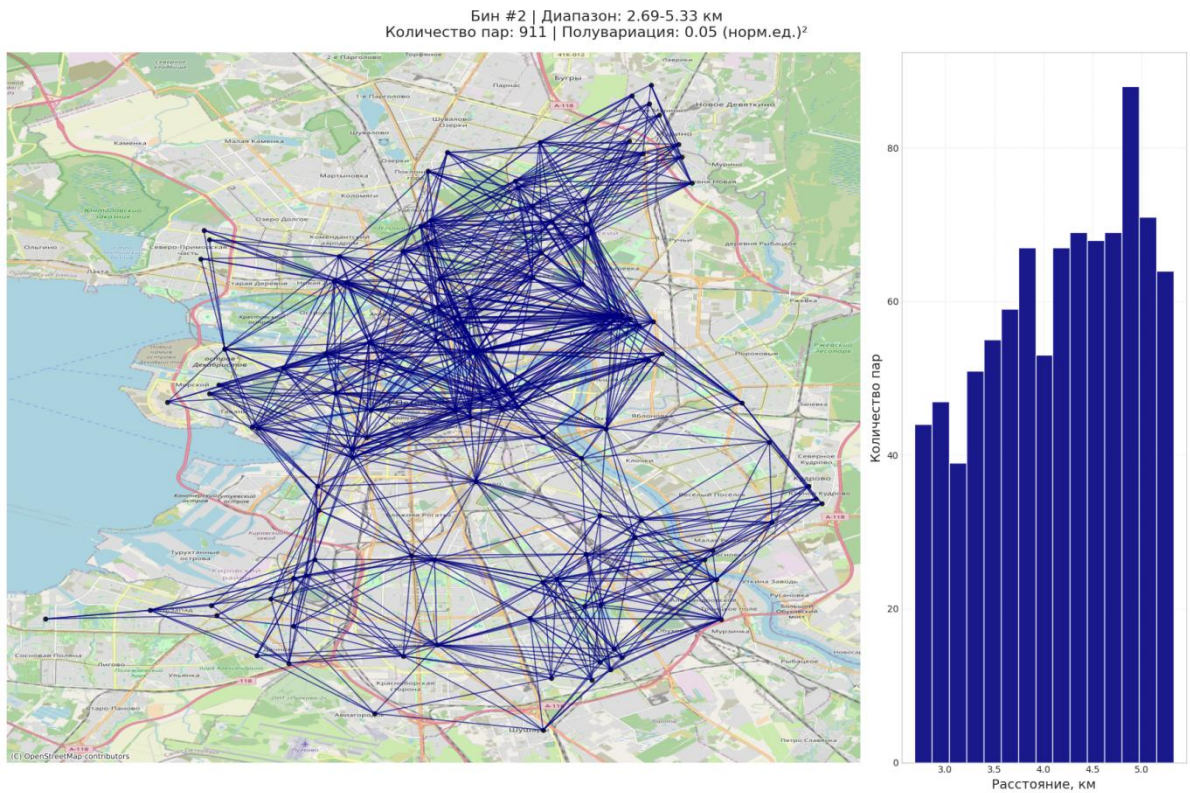


Рисунок Г.2 – Карта и гистограмма пар точек для второго бина

Бин #3 | Диапазон: 5.33-7.96 км
 Количество пар: 1108 | Полувариация: 0.05 (норм.ед.)²

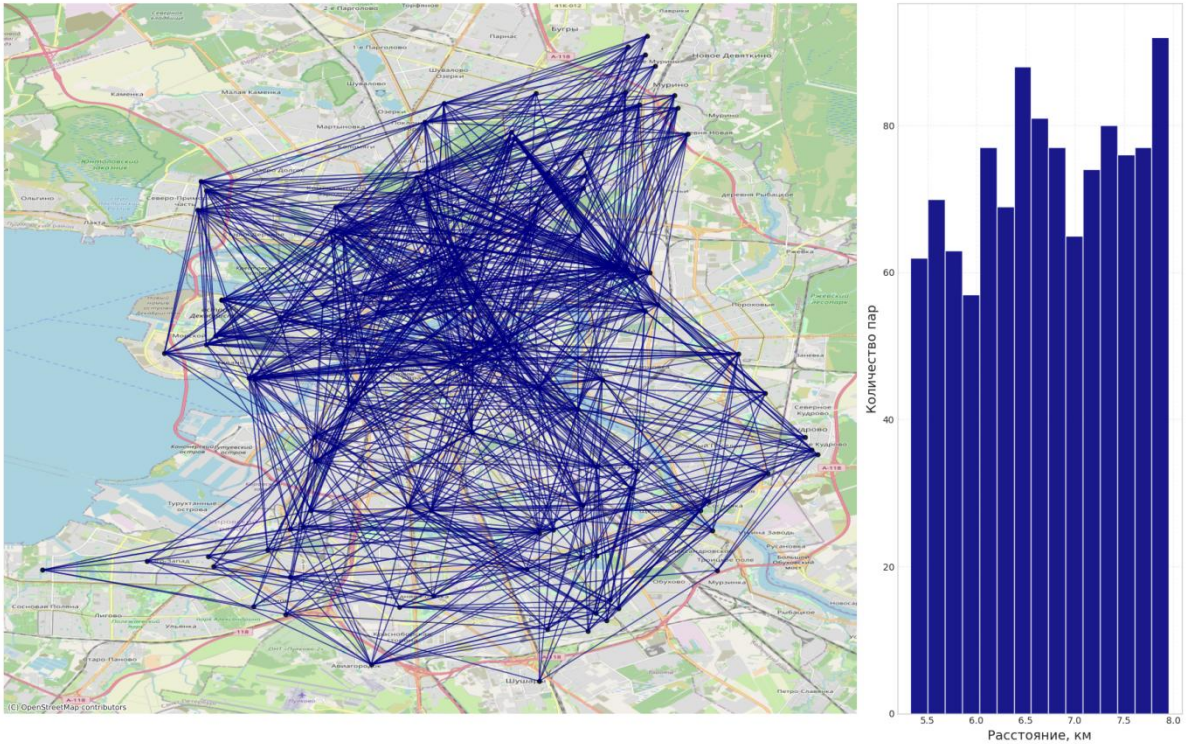


Рисунок Г.3 – Карта и гистограмма пар точек для третьего бина

Бин #4 | Диапазон: 7.96-10.60 км
 Количество пар: 1183 | Полувариация: 0.06 (норм.ед.)²

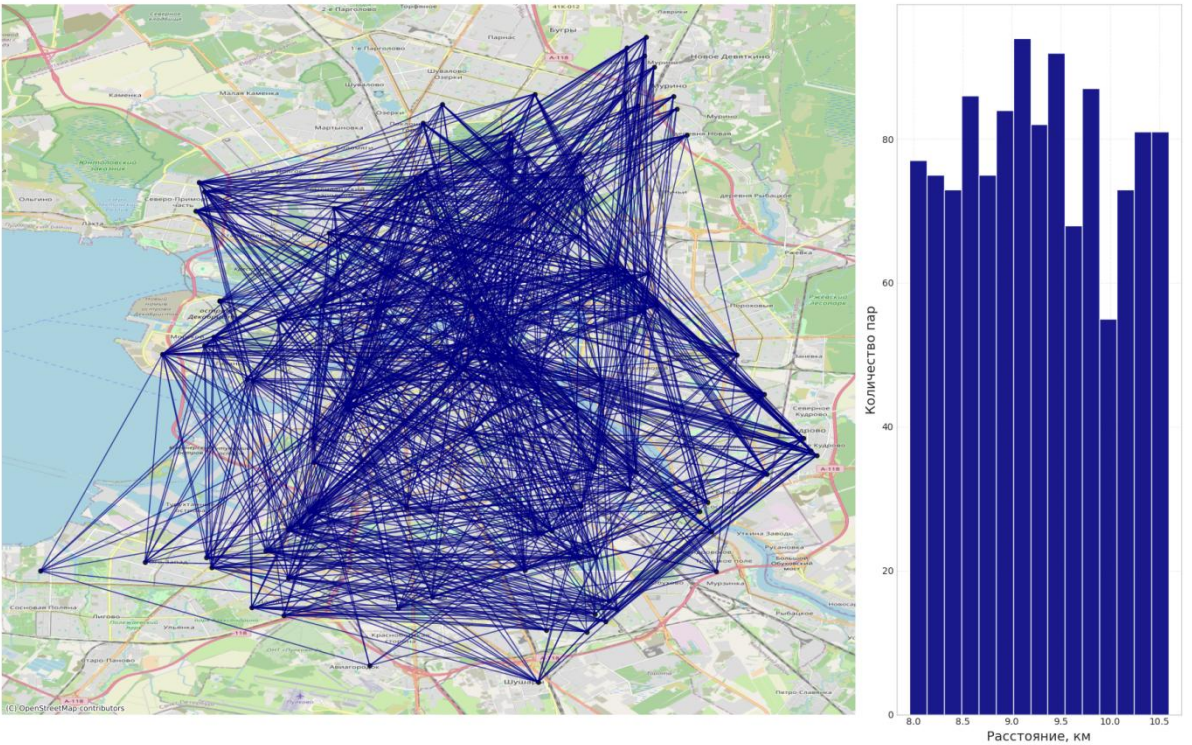


Рисунок Г.4 – Карта и гистограмма пар точек для четвертого бина

Бин #5 | Диапазон: 10.60-13.23 км
Количество пар: 1094 | Полувариация: 0.06 (норм.ед.)²

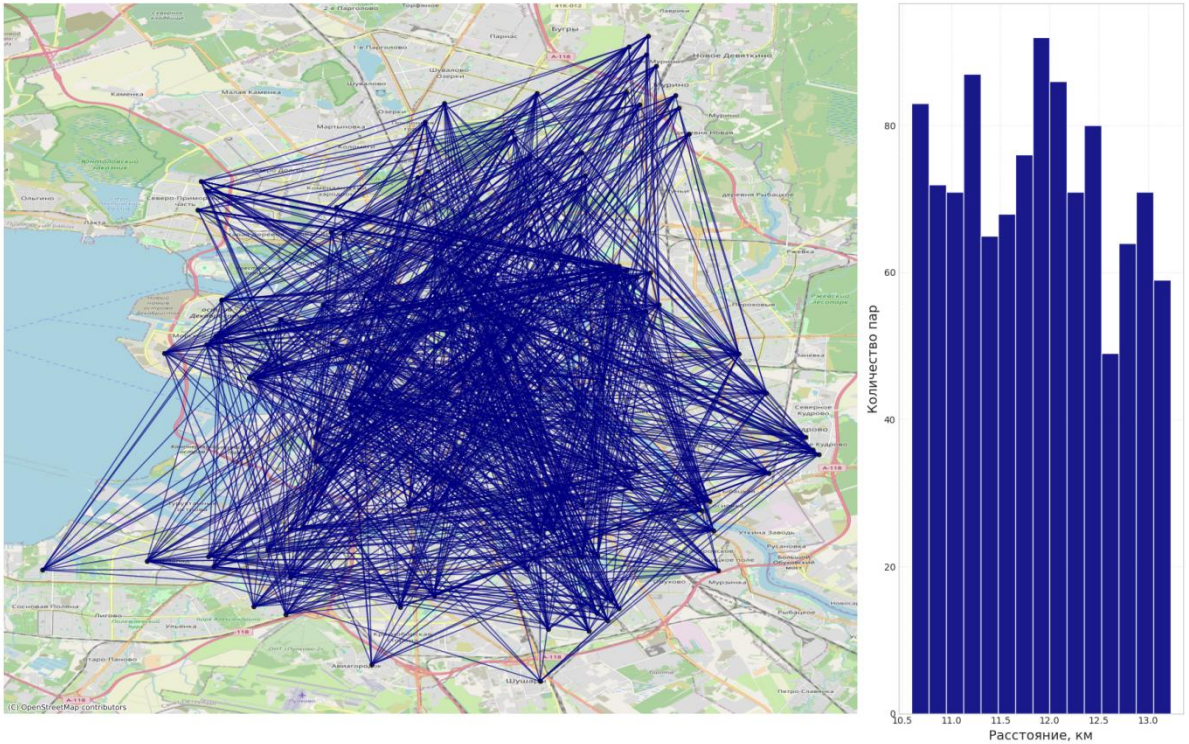


Рисунок Г.5 – Карта и гистограмма пар точек для пятого бина

Бин #6 | Диапазон: 13.23-15.87 км
Количество пар: 869 | Полувариация: 0.07 (норм.ед.)²

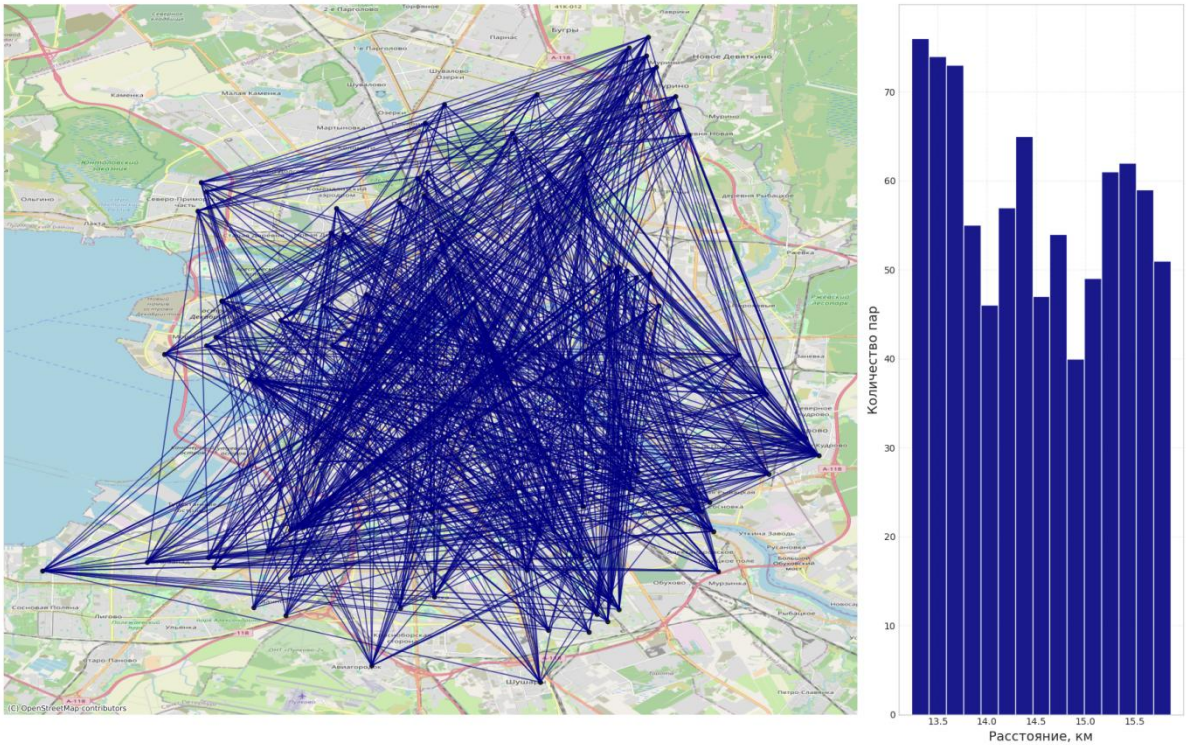


Рисунок Г.6 – Карта и гистограмма пар точек для шестого бина

Бин #7 | Диапазон: 15.87-18.50 км
 Количество пар: 668 | Полувариация: 0.06 (норм.ед.)²

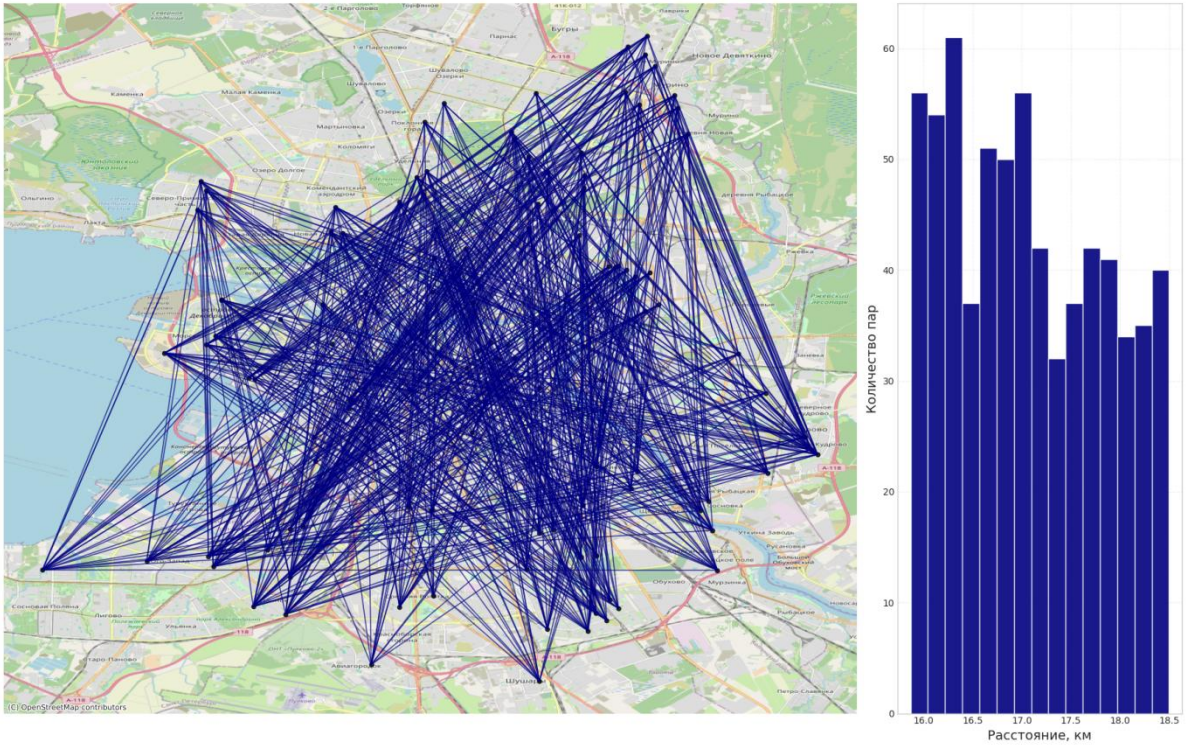


Рисунок Г.7 – Карта и гистограмма пар точек для седьмого бина

Бин #8 | Диапазон: 18.50-21.14 км
 Количество пар: 381 | Полувариация: 0.06 (норм.ед.)²

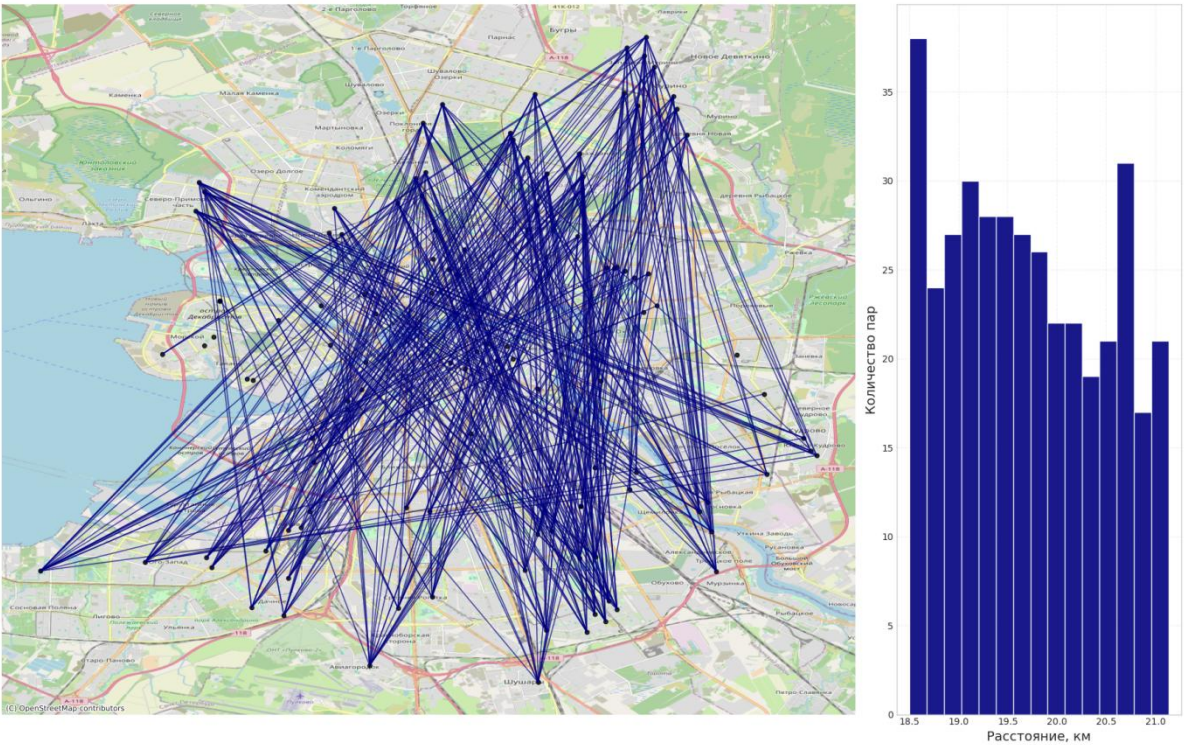


Рисунок Г.8 – Карта и гистограмма пар точек для восьмого бина

Бин #9 | Диапазон: 21.14-23.77 км
 Количество пар: 219 | Полувариация: 0.06 (норм.ед.)²

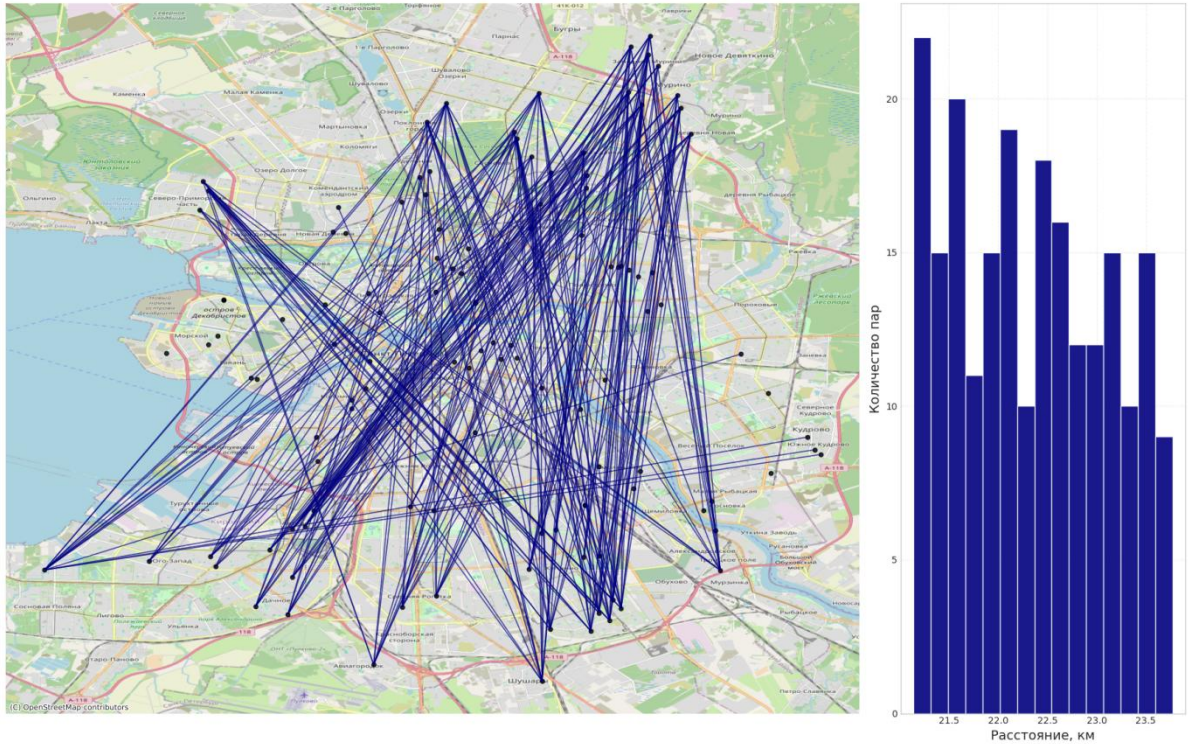


Рисунок Г.9 – Карта и гистограмма пар точек для девятого бина

Бин #10 | Диапазон: 23.77-26.41 км
 Количество пар: 102 | Полувариация: 0.07 (норм.ед.)²

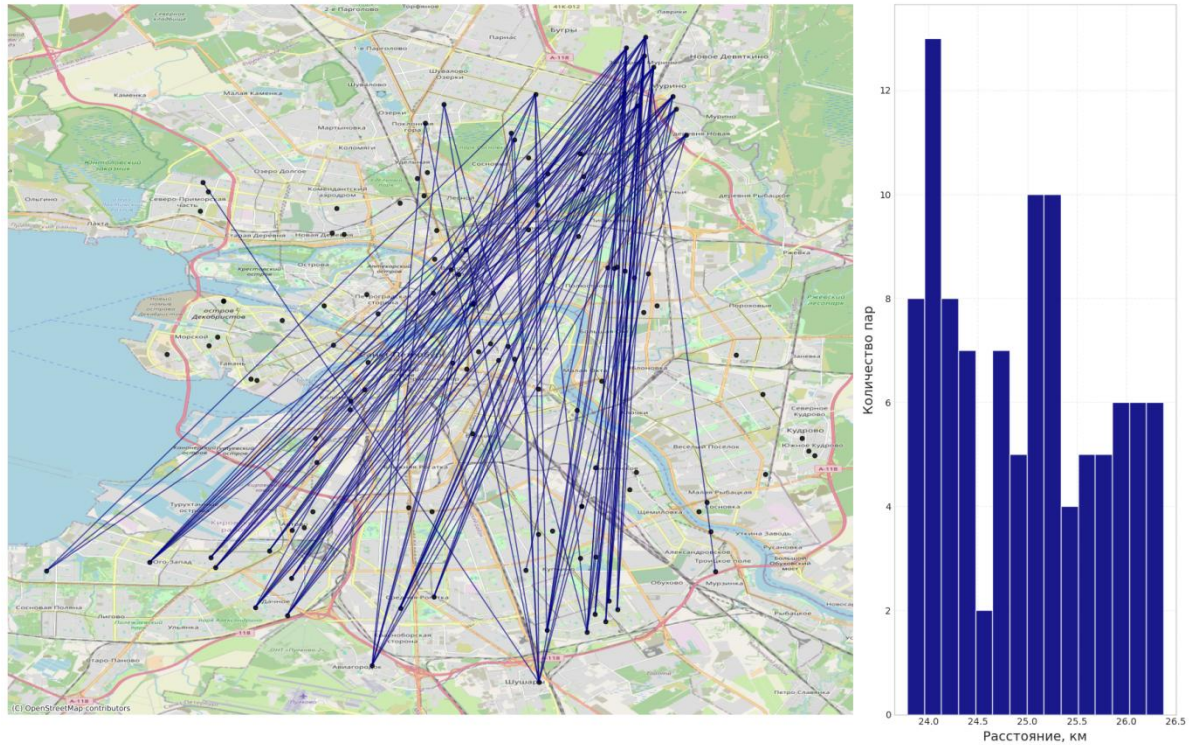


Рисунок Г.10 – Карта и гистограмма пар точек для десятого бина

Бин #11 | Диапазон: 26.41-29.04 км
Количество пар: 31 | Полувариация: 0.08 (норм.ед.)²

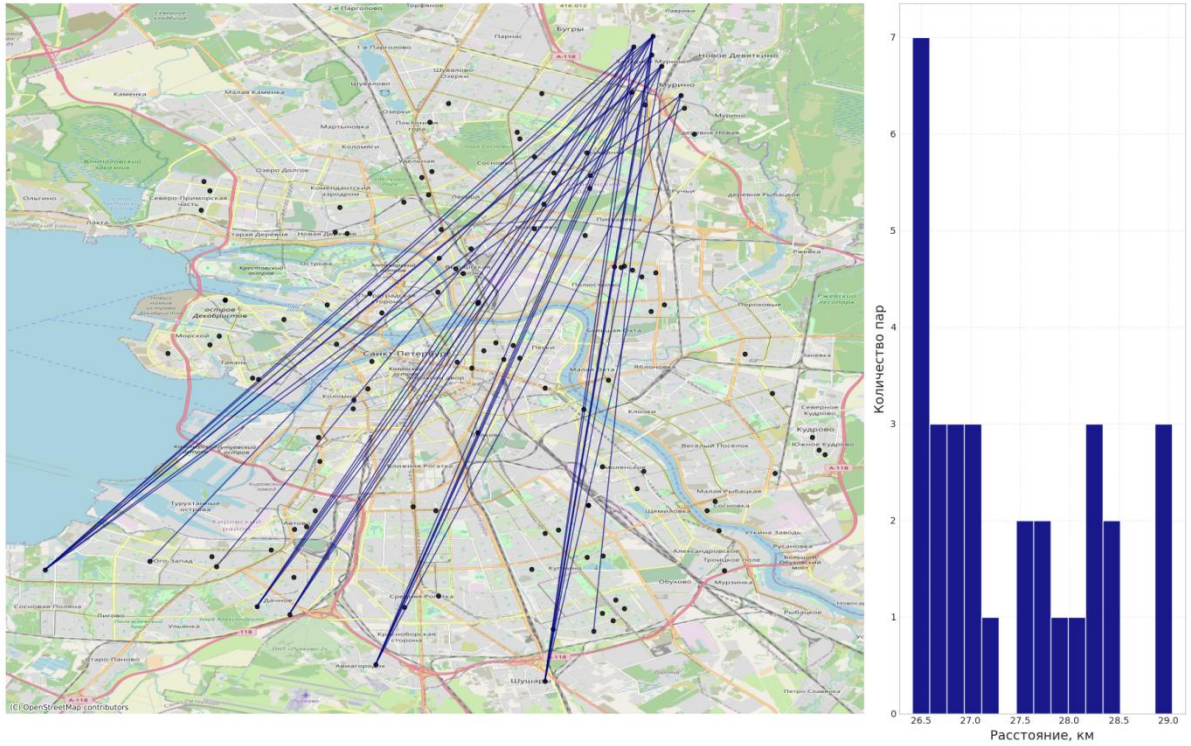


Рисунок Г.11 – Карта и гистограмма пар точек для одиннадцатого бина

Приложение Д. Свидетельство о государственной регистрации программы для
ЭВМ № 2025680594

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2025680594

**Автоматизированная система комплексной оценки
радоноопасности территорий на основе геостатистики и
машинного обучения**

Правообладатель: *Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения» (RU)*

Авторы: *Калашникова Мария Владимировна (RU),
Колобашкина Татьяна Владимировна (RU)*

Заявка № 2025680007

Дата поступления 07 августа 2025 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 07 августа 2025 г.



*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат: 0692e7c1ac3300bf54f240f670bca2026
Владелец: **Зубов Юрий Сергеевич**
Действителен с 10.07.2024 по 03.10.2025

Ю.С. Зубов

Приложение Е. Данные о результатах кластеризации и эффективной дозы
внутреннего облучения

Таблица Е.1 – Результаты измерений и расчётов

№ п/п	Район	Точка измерения	ЭРОА, Бк/м ³	Годовая доза, мЗв/год
1	2	3	4	5
1	Невский	1	130,7	8,38
2		2	191,2	12,21
3		4	109,4	7,03
4		6	306,7	19,54
5		7	312,5	19,90
6		10	190,2	12,15
7		11	91,0	5,87
8		12	355,0	22,60
9		16	134,4	8,62
10		24	162,4	10,40
11		32	281,4	17,93
12		50	312,5	19,90
13		52	242,6	15,48
14		53	236,1	15,06
15		54	297,6	18,96
16		63	57,7	3,76
17		68	152,6	9,77
18		69	401,6	25,55
19		73	297,6	18,96
20		95	191,2	12,21
21		98	177,2	11,33
22		106	123,1	7,90
23		109	101,1	6,51
24		112	85,6	5,52
25		116	47,3	3,10
Среднее по району			199,5	12,75
26	Красногвардейский	3	287,9	18,35
27		15	93,4	6,02
28		18	189,7	12,13
29		31	366,1	23,30
30		40	44,9	2,95
31		47	58,4	3,80
Среднее по району				9,64
32	Адмиралтейский	5	158,5	10,15
33		25	231,6	14,78
34		39	405,6	25,80
35		41	296,3	18,88
36		45	349,8	22,27

Продолжение приложения Е

1	2	3	4	5
37		107	119,2	7,65
Среднее по району			260,2	16,59
38	Выборгский	8	152,0	9,74
39		9	140,9	9,03
40		21	276,2	17,60
41		30	85,7	5,53
42		35	173,2	11,08
43		42	83,0	5,36
44		46	195,1	12,46
45		64	153,9	9,86
46		65	220,1	14,05
47		66	260,1	16,58
48		70	298,9	19,04
49		72	231,1	14,75
50		80	324,2	20,65
51		81	289,8	18,47
52		84	262,7	16,75
53		86	248,5	15,85
54		87	242,6	15,48
55		90	232,3	14,82
56		93	206,1	13,16
57		99	175,2	11,21
58		101	157,8	10,10
59		102	144,8	9,28
60		108	111,0	7,13
61		110	99,6	6,41
62	111	86,7	5,59	
63	114	48,7	3,19	
64	117	41,0	2,70	
Среднее по району			183,0	11,70
65	Калининский	13	421,8	26,83
66		20	274,9	17,52
67		27	253,6	16,17
68		28	256,2	16,34
69		29	339,5	21,61
70		37	137,0	8,79
71		38	173,4	11,09
72		59	230,4	14,70
73		62	284,1	18,11
74		67	64,2	4,17
75		71	173,4	11,09
76		88	238,8	15,24

Продолжение приложения Е

1	2	3	4	5
77		103	135,7	8,70
78		104	135,7	8,70
79	Калининский	119	27,0	1,81
80		120	24,2	1,64
Среднее по району			198,1	12,66
81	Кировский	14	125,7	8,06
82		19	182,1	11,64
83		22	245,8	15,68
84		23	267,9	17,08
85		43	263,9	16,83
86		55	44,9	2,95
87		85	256,2	16,34
88		96	188,6	12,05
89		97	186,0	11,88
90		100	170,7	10,92
91		118	38,4	2,53
Среднее по району			179,1	11,45
92	Другой	17	102,7	6,61
93		92	207,3	13,24
94		113	60,3	3,92
95		115	49,9	3,26
Среднее по району			105,0	6,76
96	Василеостровский	26	375,1	23,87
97		49	335,6	21,37
98		51	114,7	7,37
99		74	372,5	23,70
100		75	442,6	28,14
101		76	390,0	24,81
102		77	442,6	28,14
103		78	371,2	23,62
104		79	336,3	21,41
105		82	284,6	18,14
106		91	231,0	14,74
107		105	125,7	8,06
Среднее по району			318,5	20,28
108	Московский	36	180,4	11,54
109		44	256,1	16,33
110		56	328,5	20,92
111		58	274,2	17,48
112		83	278,8	17,77
113		89	234,9	14,99
114		94	195,1	12,46

Окончание приложения Б

1	2	3	4	5
Среднее по району			249,7	15,93
115	Центральный	33	348,5	22,18
116		34	221,3	14,13
117		57	78,5	5,07
118		60	110,8	7,12
119		61	81,7	5,28
Среднее по району			168,1	10,76
120	Пушкинский	48	154,5	9,89
Среднее по району			154,5	9,89
Среднее по городу:			205,5	13,12

Приложение Ж. Свидетельство о государственной регистрации программы для
ЭВМ № 2025680593

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2025680593

Программа для автоматизированной оценки рисков
облучения радоном

Правообладатель: *Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения» (RU)*

Авторы: *Колобашкина Татьяна Владимировна (RU),
Калашникова Мария Владимировна (RU)*

Заявка № 2025680006

Дата поступления **07 августа 2025 г.**

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ **07 августа 2025 г.**



*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат 0692e7c1e6300b154f240f670bca2026
Владелец **Зубов Юрий Сергеевич**
Действителен с 10.07.2024 по 03.10.2025

Ю.С. Зубов

Приложение И. Акт о внедрении результатов диссертационной работы в ФГАОУ
ВО «СПб ГУАП»



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования

«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ АЭРОКОСМИЧЕСКОГО ПРИБОРОСТРОЕНИЯ»

(ГУАП)

ул. Большая Морская, д. 67, лит. А, Санкт-Петербург, 190000, Тел. (812) 710-6510, факс (812) 494-7057
Электронная почта: info@guar.ru, сайт: guar.ru, ОГРН 1027810232680, ИНН/КПП 7812003110/783801001

№ _____
На № _____ от _____



УТВЕРЖДАЮ
Ректор ГУАП
Доктор экономических наук,
профессор

Ю.А. Антохина

«07» 10 2025 года

Акт о внедрении результатов диссертационной работы
Калашниковой Марии Владимировны
«Методика автоматизации контроля радионормы в техногенной среде
урбанизированных территорий»,
представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук
по специальности 2.2.8 – Методы и приборы контроля и диагностики
материалов, изделий, веществ и природной среды (технические науки)

Комиссия в составе:

Председателя комиссии – заместителя директора Института фундаментальной подготовки и технологических инноваций по учебно-методической деятельности, доцента кафедры метрологического обеспечения инновационных технологий и промышленной безопасности, кандидата технических наук, доцента Ефремова Н.Ю.

Членов комиссии:

Литвинова Б.Я. – профессора кафедры метрологического обеспечения инновационных технологий и промышленной безопасности, доктора технических наук, доцента

Чуновкиной А.Г. – профессора кафедры метрологического обеспечения инновационных технологий и промышленной безопасности, доктора технических наук, старшего научного сотрудника

Составила настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы Калашниковой Марии Владимировны «Методика автоматизации контроля радионормы в техногенной среде урбанизированных территорий», а именно:

1. Математическая модель процесса оценки вклада конструктивных особенностей зданий на урбанизированных территориях в формирование эквивалентной равновесной объёмной активности изотопов радона в жилых зданиях, что способствует повышению достоверности контроля потенциальной радоноопасности в техногенной среде.

2. Алгоритм автоматизации контроля радоноопасности урбанизированных территорий способствует снижению трудоёмкости, повышению оперативности и достоверности оценки потенциальной радоноопасности территории за счёт учёта конструктивных особенностей зданий, географических и геологических факторов среды и автоматизации контроля эквивалентной равновесной объёмной активности изотопов радона.

3. Методика автоматизации контроля радоноопасности урбанизированных территорий способствует снижению трудоёмкости, повышению оперативности и экологической безопасности окружающей среды.

использованы в учебном процессе при подготовке бакалавров по направлению 27.03.01 «Стандартизация и метрология» и специалистов по специальности 27.05.02 «Метрологическое обеспечение вооружения и военной техники» на кафедре метрологического обеспечения инновационных технологий и промышленной безопасности ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения» по дисциплинам: «Интеллектуальная обработка и анализ экспериментальных результатов», «Цифровые методы и средства измерений», «Безопасность жизнедеятельности», «Законодательная метрология в области обороны и безопасности Российской Федерации», «Автоматизированная обработка экспериментальных данных».

Заместитель директора Института фундаментальной подготовки и технологических инноваций
по учебно-методической деятельности,
доцент кафедры метрологического обеспечения
инновационных технологий и промышленной безопасности,
к.т.н., доцент



Ефремов Н.Ю.

профессор кафедры метрологического обеспечения
инновационных технологий и промышленной безопасности,
д.т.н., с.н.с.



Чуновкина А.Г.

профессор кафедры метрологического обеспечения
инновационных технологий и промышленной безопасности,
д.т.н., доцент



Литвинов Б.Я.

Приложение К. Акт о внедрении результатов диссертационной работы в
«Ленгипротранспуть» – филиала АО «Росжелдорпроект»



Санкт-Петербургский институт по проектированию инженерных сооружений и промышленных предприятий путевого хозяйства и геологическим изысканиям «Ленгипротранспуть» — филиал АО «Росжелдорпроект»
(Ленгипротранспуть — филиал АО «Росжелдорпроект»)
Набережная р. Фонтанки, д. 117, офис 438,
Санкт-Петербург, Россия, 190031
тел: (812) 318-45-10, email: lgtp@rzdpr.ru, web: www.rzdp.ru/lenftp

УТВЕРЖДАЮ



И.о. директора
Рыгзов П.С.

«30» января 2026 г.

АКТ №7

внедрения в лаборатории экологического контроля «Ленгипротранспуть» — филиала АО «Росжелдорпроект» научных результатов диссертационной работы Калашниковой Марии Владимировны на тему: «Методика автоматизации контроля радоноопасности в техногенной среде урбанизированных территорий».

Настоящий акт составлен в том, что комиссией в составе: и.о. директора филиала Рыгзова П.С., главного аудитора – главного специалиста технического отдела Скворцовой С.С., начальника отдела инженерных изысканий Харитонов В.П. и начальника лаборатории экологического контроля Носникова А.С. апробированы и внедрены следующие результаты диссертационной работы Калашниковой Марии Владимировны - ассистента кафедры метрологического обеспечения инновационных технологий и промышленной безопасности Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения, а именно:

— Математическая модель процесса оценки вклада конструктивных особенностей зданий на урбанизированных территориях в формирование эквивалентной равновесной объёмной активности изотопов радона в жилых зданиях, что способствует повышению достоверности контроля потенциальной радоноопасности в техногенной среде.

— Алгоритм автоматизации контроля радоноопасности урбанизированных территорий способствует снижению трудоёмкости, повышению оперативности и достоверности оценки потенциальной радоноопасности территории за счёт учёта конструктивных особенностей зданий, географических и геологических факторов среды и автоматизации контроля эквивалентной равновесной объёмной активности изотопов радона.

— Методика автоматизации контроля радоноопасности урбанизированных территорий способствует снижению трудоёмкости, повышению оперативности и экологической безопасности окружающей среды.

Комиссия установила:

— Разработанная математическая модель процесса оценки вклада конструктивных особенностей зданий позволяет оценить вклад конструктивных особенностей зданий в формирование дисперсии эквивалентной равновесной объёмной

Акт №7 от 30.01.2026 г. АКТ №7 внедрения в лаборатории экологического контроля «Ленгипротранспуть» — филиала АО «Росжелдорпроект» научных результатов диссертационной работы Калашниковой Марии Владимировны на тему: «Методика автоматизации контроля радоноопасности в техногенной среде урбанизированных территорий».

активности изотопов радона в жилых зданиях и повысить достоверность оценки на 27 % и сокращению времени на 34 %.

— Внедрение алгоритма автоматизации контроля радоноопасности урбанизированных территорий позволяет сократить время на оценку радоноопасности урбанизированных территорий на 90–95 %, а также снизить затраты на проведение полевых измерений на 80–90 %.

— Внедрение методики автоматизации контроля радоноопасности урбанизированных территорий позволяет повысить достоверность оценки на 12 %, а также сократить время принятия решений по снижению объёмной активности изотопов радона при выявлении зон с превышением референтного уровня с 4 месяцев до 2 месяцев, тем самым повысить уровень экологической безопасности урбанизированной территории.

Разработанная математическая модель подтверждена натурными измерениями: измеренные значения плотности потока радона с поверхности почвы, а также значения эквивалентной равновесной объёмной активности изотопов радона в помещениях жилых зданий, показали высокий процент сходимости результатов относительно расчетных по методике автоматизации контроля радоноопасности урбанизированных территорий и математической модели процесса оценки вклада конструктивных особенностей зданий на урбанизированных территориях (на примере территории г. Санкт-Петербурга) Калашниковой Марии Владимировны - ассистента кафедры метрологического обеспечения инновационных технологий и промышленной безопасности Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

И.о. директора
(должность)

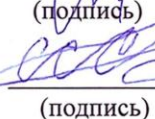


(подпись)

30.01.2026
(дата)

П.С. Рыгузов
(Ф.И.О.)

Ведущий инженер по качеству
(должность)



(подпись)

30.01.2026
(дата)

С.С. Скворцова
(Ф.И.О.)

Начальник отдела
инженерных изысканий
(должность)



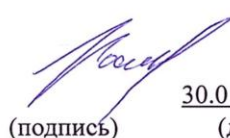
(подпись)

30.01.2026
(дата)

В.П. Харитонов
(Ф.И.О.)

Ответственный за внедрения в лаборатории экологического контроля «Ленгипротранспуть» — филиала АО «Росжелдорпроект» научных результатов диссертационной работы Калашниковой Марии Владимировны на тему: «Методика автоматизации контроля радоноопасности в техногенной среде урбанизированных территорий» с практическим подтверждением методики путем проведения натуральных измерений плотности потока радона с поверхности почвы и измерений эквивалентной равновесной объёмной активности изотопов радона и торона в помещениях производственных зданий на территории г. Санкт-Петербурга:

Начальник лаборатории
экологического контроля
(номер аттестата аккредитации в реестре
аккредитованных лиц Росаккредитации: RA.RU.21HC46)



(подпись)

30.01.2026
(дата)

А.С. Носников
(Ф.И.О.)

(должность)

Акт №7 от 30.01.2026 г. АКТ №7 внедрения в лаборатории экологического контроля «Ленгипротранспуть» — филиала АО «Росжелдорпроект» научных результатов диссертационной работы Калашниковой Марии Владимировны на тему: «Методика автоматизации контроля радоноопасности в техногенной среде урбанизированных территорий».

Приложение Л. Акт о внедрении результатов диссертационной работы в ООО
«НТЦ ЭкологиксЛаб»

УТВЕРЖДАЮ
Генеральный директор
ООО «НТЦ «ЭкологиксЛаб»
/ А.Н. Макаренко
05 марта 2026 г.



АКТ

внедрения в лаборатории радиационного контроля Общества с ограниченной ответственностью «Научно-Технический Центр «ЭкологиксЛаб» научных результатов диссертационной работы Калашниковой Марии Владимировны на тему: Методика автоматизации контроля радоноопасности в техногенной среде урбанизированных территорий»

Настоящий акт составлен в том, что комиссия в составе: генерального директора Макаренко Антона Николаевича, директора по развитию к.т.н. Потапова Романа Валерьевича, директора по научно-исследовательской работе к.т.н. Яковенко Алексея Александровича и руководителя лаборатории радиационного контроля Зеневица Дмитрия Валерьевича составила настоящий акт о том, что в лаборатории радиационного контроля ООО «НТЦ «ЭкологиксЛаб» (номер записи в реестре аккредитованных лиц РОСС RU.0001.21PK49) апробированы и внедрены следующие результаты диссертационной работы, которые имеют научную и практическую значимость, а также перспективу применения их в обследовании эксплуатируемых жилых зданий:

— Математическая модель процесса оценки вклада конструктивных особенностей зданий на урбанизированных территориях в формирование эквивалентной равновесной объёмной активности изотопов радона в жилых зданиях, что способствует повышению достоверности контроля потенциальной радоноопасности в техногенной среде.

— Алгоритм автоматизации контроля радоноопасности урбанизированных территорий способствует снижению трудоёмкости, повышению оперативности и достоверности оценки потенциальной радоноопасности территории за счёт учёта конструктивных особенностей зданий, географических и геологических факторов среды и автоматизации контроля эквивалентной равновесной объёмной активности изотопов радона.

— Методика автоматизации контроля радоноопасности урбанизированных территорий способствует снижению трудоёмкости, повышению оперативности и экологической безопасности окружающей среды.

Комиссия установила:

— Разработанная математическая модель процесса оценки вклада конструктивных особенностей зданий позволяет оценить вклад конструктивных особенностей зданий в формирование дисперсии эквивалентной равновесной объёмной

активности изотопов радона в жилых зданиях и повысить достоверность оценки на 27 % и сокращению времени оценки на 34 %.

— Внедрение алгоритма автоматизации контроля радоноопасности урбанизированных территорий позволяет сократить время на оценку радоноопасности урбанизированных территорий на 90–95 %, а также снизить затраты на проведение полевых измерений на 80–90 %.

— Внедрение методики автоматизации контроля радоноопасности урбанизированных территорий позволяет повысить достоверность оценки на 12 %, а также сократить время принятия решений по снижению объёмной активности изотопов радона при выявлении зон с превышением референтного уровня с 4 месяцев до 2 месяцев, тем самым повысить уровень экологической безопасности урбанизированной территории.

Председатель комиссии:
Генеральный директор

А.Н. Макаренко

Члены комиссии:
Директор по развитию к.т.н.

Р.В. Потапов

Директор по научно-исследовательской работе
к.т.н.

А.А. Яковенко

Руководитель лаборатории радиационного
контроля

Д.В. Зеневич

Приложение М. Акт о внедрении результатов диссертационной работы в СПб
НИИИ «ЭИЗ»

**Испытательная лаборатория Филнала «Санкт-Петербургский Научно-
Исследовательский Изыскательский Институт «Энергоизыскания»
(СПб НИИИ «ЭИЗ»)**

АКТ № 2026-1 от 06.03.2026 г.

внедрения в испытательной лаборатории научных результатов диссертационной работы
Калашниковой Марии Владимировны на тему: «Методика автоматизации контроля
радоноопасности в техногенной среде урбанизированных территорий»

Комиссия в составе:

начальник лаборатории Сухомлинова К.С.
эксперта по метрологии Абрамова Е.С.
эксперта Макаренкова Д.А.

составила настоящий акт о том, что в испытательной лаборатории апробированы и
внедрены следующие результаты диссертационной работы, а именно:

— Математическая модель процесса оценки вклада конструктивных особенностей зданий на урбанизированных территориях в формирование эквивалентной равновесной объёмной активности изотопов радона в жилых зданиях, что способствует повышению достоверности контроля потенциальной радоноопасности в техногенной среде.

— Алгоритм автоматизации контроля радоноопасности урбанизированных территорий способствует снижению трудоёмкости, повышению оперативности и достоверности оценки потенциальной радоноопасности территории за счёт учёта конструктивных особенностей зданий, географических и геологических факторов среды и автоматизации контроля эквивалентной равновесной объёмной активности изотопов радона.

— Методика автоматизации контроля радоноопасности урбанизированных территорий способствует снижению трудоёмкости, повышению оперативности и экологической безопасности окружающей среды.

Комиссия установила:

— Разработанная математическая модель позволяет оценить вклад конструктивных особенностей зданий в формирование дисперсии эквивалентной равновесной объёмной активности изотопов радона в зданиях и повысить достоверность оценки и сокращению времени.

— Внедрение алгоритма автоматизации контроля радоноопасности позволяет сократить время на оценку радоноопасности урбанизированных территорий на 90–95 %, а также снизить затраты на проведение полевых измерений на 80–90 %.

— Внедрение методики автоматизации контроля радоноопасности урбанизированных территорий позволяет повысить достоверность оценки на 12 %, а также

сократить время принятия решений по снижению объёмной активности изотопов радона при выявлении зон с превышением референтного уровня с 4 месяцев до 2 месяцев, тем самым повысить уровень экологической безопасности урбанизированной территории.

Начальник лаборатории

Эксперт по метрологии

Эксперт



К.С. Сухомлинов

Е.С. Абрамов

Д.А. Макаренков