

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»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2026

Работа выполнена на кафедре метрологического обеспечения инновационных технологий и промышленной безопасности федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения».

- Научный руководитель** – **Колобашкина Татьяна Владимировна**
кандидат технических наук, доцент
- Официальные оппоненты** – **Панкин Александр Михайлович**,
доктор технических наук, доцент, профессор Высшей школы атомной и тепловой энергетики федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»;
- Полисмакова Мария Николаевна**,
кандидат технических наук, доцент, доцент института кибербезопасности и цифровых технологий федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «МИРЭА – Российский технологический университет».
- Ведущая организация** – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)», 197022, г. Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, дом 5 литера Ф

Защита диссертации состоится «23» июня 2026 г. в 13.00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.384.02 при федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения» по адресу: 190000 Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 67, лит. А.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения» по адресу: 190000 Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 67, лит. А. Автореферат и текст диссертации размещены на сайте университета https://dissov.guap.ru/defense/kalashnikova_mv

Автореферат разослан: «23» апреля 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.2.384.02,
кандидат технических наук, доцент



С.А. Назаревич

I. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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 новой 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 снижению среднегодовой эквивалентной равновесной объёмной активности (ЭРОА) изотопов радона до допустимого уровня, но не устанавливают чёткого механизма его реализации. 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 подменяет 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 среднегодовой ЭРОА изотопов радона в жилых помещениях и отсутствием методики автоматизации контроля радоноопасности территорий для непрерывной оценки среднегодовой ЭРОА изотопов радона с высокой достоверностью при минимальных затратах.

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: Naquin 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, учёные приходят к общему выводу о серьёзности проблемы облучения населения изотопами радона, поэтому необходимо совершенствование системы контроля и диагностики изотопов радона 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 объемной 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 объемной 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 заключается:

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 данной работы заключается:

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 методика 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 НИИ «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.

II. ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, показаны её научная новизна и практическая ценность, сформулированы цель и задачи.

В первом разделе проведён анализ вклада природных источников ионизирующего излучения, особенно радона, в формирование дозовой нагрузки на население. Также выполнен сравнительный анализ систем оценки радоноопасности в Российской Федерации и зарубежных странах, включая США, Канаду, Южную Корею, Великобританию и Чехию. Проведённое исследование выявило значительную методологическую фрагментарность в подходах к оценке радоноопасности территории. Основные недостатки рассмотренных систем оценки радоноопасности заключается в противоречии между ключевыми критериями: оперативностью, достоверностью и трудоёмкостью. На основе проведённого анализа обоснована актуальность разработки методики автоматизации контроля радоноопасности урбанизированных территорий.

Второй раздел посвящён исследованию ключевых факторов, обуславливающих радоноопасность техногенных объектов, с фокусом на жилые здания. Проанализированы факторы среды, влияющие на процессы эманации и миграции радона. Основным источником радона имеет природное происхождение и создаёт неизменную фоновую концентрацию радионуклидов в земной коре. При этом деятельность человека может создавать или изменять пути поступления радона, в результате происходит его накопление в замкнутых пространствах, что приводит к значительному повышению концентрации радона внутри помещений по сравнению с естественным уровнем на открытой местности. Согласно Публикации № 103 «Рекомендации 2007 года МКРЗ» Международной комиссии по радиационной защите, управление воздействием должно осуществляться через контроль путей поступления радона, что реализуется посредством управления зданиями, а не индивидуальной экспозицией, и должно приводить к снижению объёмной активности радона в воздухе помещений до значений референтного уровня. На рисунке 1 представлена важность факторов при оценке радоноопасности в техногенной среде урбанизированных территорий.

Группа факторов	Фактор	Степень влияния на радон	Важность фактора при оценке радоноопасности в техногенной среде урбанизированных территорий
Геологические (источник)	Тектонические разломы и активность	Высокая	Естественные проводники для миграции, усиливают газовую эмиссию
	Грунтовые воды	Высокая	Транспортировка радона через водоносные горизонты
	Наличие ураносных пород (диктиномовые 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 неустойчивости, 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
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, плитовая 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

Рисунок 1 – Важность факторов при оценке радоноопасности в техногенной среде урбанизированных территорий

В третьем разделе выполнена разработка математических моделей и структурных схем, описывающих процесс оценки вклада конструктивных особенностей зданий урбанизированных территорий в формирование среднегодовой ЭРОА изотопов радона в жилых зданиях, алгоритм автоматизации контроля радоноопасности урбанизированных территорий, а также модель оценки канцерогенного риска последствий облучения радона. Созданная математическая модель процесса оценки вклада конструктивных особенностей зданий урбанизированных территориях была интегрирована в математическую модель алгоритма контроля радоноопасности урбанизированных территорий. На основе интегрированной модели было разработано программно-техническое обеспечение для автоматизации контроля радоноопасности на урбанизированных территориях.

На рисунке 2 представлены математическая модель и структурная схема процесса оценки вклада конструктивных особенностей зданий урбанизированных территорий в формирование среднегодовой ЭРОА изотопов радона в жилых зданиях, а на рисунках 3 и 4 представлены математическая модель и структурная схема алгоритма контроля радоноопасности урбанизированных территорий соответственно.

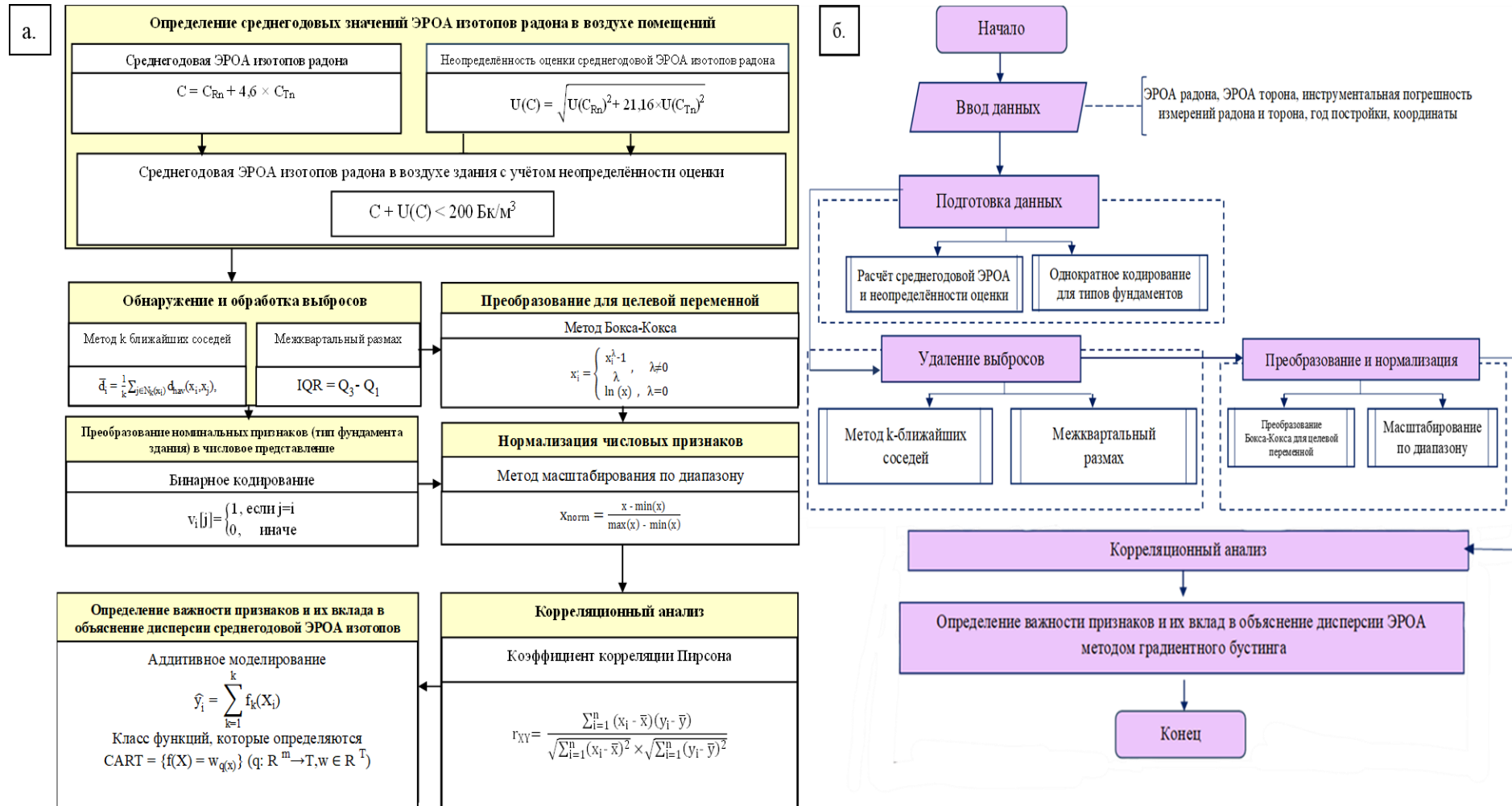


Рисунок 2 – Процесс оценки вклада конструктивных особенностей зданий на урбанизированных территориях в формирование среднегодовой ЭРОА изотопов радона в жилых зданиях а. – математическая модель; б. – структурная схема

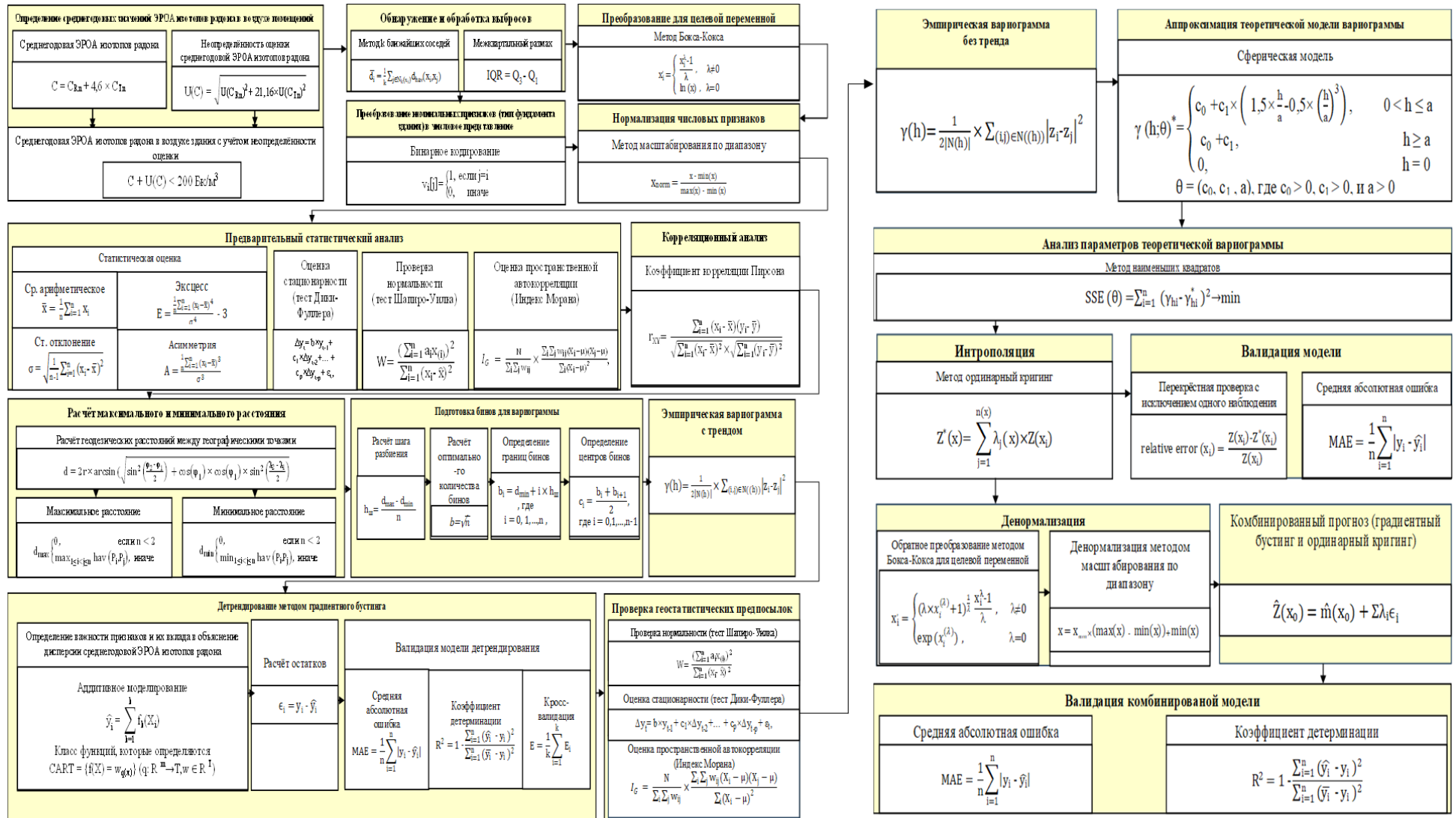


Рисунок 3 – Математическая модель алгоритма автоматизации контроля радионепасности урбанизированных территорий

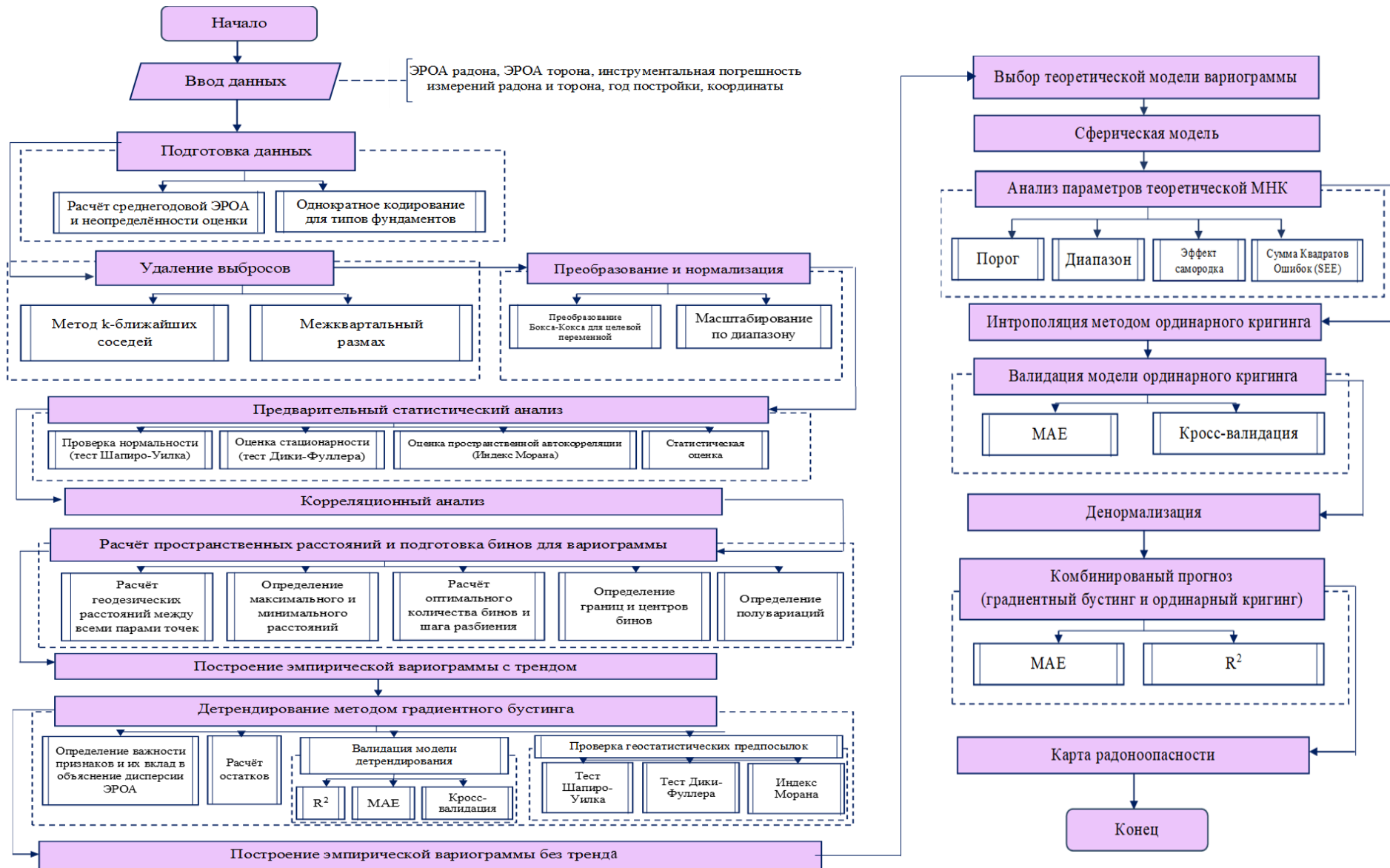


Рисунок 4 – Структурная схема алгоритма автоматизации контроля радоноопасности урбанизированных территорий

Проведён комплексный анализ применения гибридной модели для прогнозирования пространственного распределения среднегодовой ЭРОА изотопов радона в воздухе жилых зданий Санкт-Петербурга. Методами k-NN и IQR из исходной выборки исключены 7 аномальных наблюдений (5,5 % выборки), проведено бинарное кодирование номинальной переменной «тип фундамента», выполнено преобразование Бокса-Кокса ($\lambda = 0,66$) для коррекции асимметрии распределения, все числовые признаки нормализованы в диапазон [0, 1]. Построена и визуализирована корреляционная матрица. Для геопространственного анализа рассчитаны матрицы геодезических расстояний и полувариации. Оценен вклад конструктивных особенностей зданий в формирование дисперсии среднегодовой ЭРОА изотопов радона. Результаты визуализированы на рис. 5.



Рисунок 5 – Важность признаков модели

Построение эмпирической вариограммы выполнено для определения параметров теоретической модели. Установлено, что монотонное возрастание вариограммы без стабилизации указывает на значимый тренд, нарушающий условие стационарности. Для устранения детерминированной компоненты применено детрендрование с использованием градиентного бустинга с показателями качества $R^2 = 0,51$ и $MAE = 0,13$ норм. ед.

Результаты подтвердили выполнение трёх фундаментальных предпосылок для применения метода ординарного кригинга. Проверка нормальности распределения тестом Шапиро-Уилка показала высокое соответствие эмпирического распределения остатков нормальному закону ($p = 0,85$ при общепринятом уровне значимости $\alpha = 0,05$), что позволяет принять нулевую гипотезу о нормальности. Анализ стационарности методом Дики-Фуллера продемонстрировал отсутствие единичного корня в остаточном ряде ($p = 0,04$), что подтверждает стационарность – необходимое условие для пространственной интерполяции. Статистическая значимость данного результата на 5%-ном уровне значимости позволяет отвергнуть нулевую гипотезу о нестационарности временного ряда. Оценка пространственной автокорреляции индексом Морана выявила статистически значимую слабую положительную зависимость ($I = 0,08$, $p = 0,01$), свидетельствующую о неслучайном характере пространственного распределения остатков (вероятность случайного возникновения такой пространственной структуры составляет 1 %) и обосновывающую применение геостатистических методов.

В качестве оптимальной теоретической модели выбрана сферическая модель вариограммы, параметризованная методом наименьших квадратов с оценкой качества через стандартную ошибку (SEE). Для прогноза среднегодовой ЭРОА изотопов радона использован гибридный подход, сочетающий градиентный бустинг (для оценки конструктивных особенностей зданий) и пространственный анализ остатков методом

ординарного кригинга (для учёта географических и геологических факторов). Для экстраполяции применена стратегия «типового здания», переход к физической шкале обеспечен обратными преобразованиями. Качество разработанной гибридной модели характеризуется двумя ключевыми метриками: средней абсолютной ошибкой MAE = 37,08 Бк/м³ и коэффициентом детерминации $R^2 = 0,78$.

Для сравнения, в исследовании, основанном на данных мониторинга непосредственно внутри помещений геофизических станций Азербайджана (Фейзуллаев и др., 2019), где модели строились на связи концентрации радона с метеопараметрами внутри помещения (температура, влажность, атмосферное давление), точность оказалась существенно ниже. Наилучшая из полученных моделей имела показатель качества $R^2 = 0,50$, в то время как остальные модели имели $R^2 < 0,23$.

Результаты визуализированы на карте с контурным отображением интерполированных значений, изолиниями и точками замеров (рис. 6).

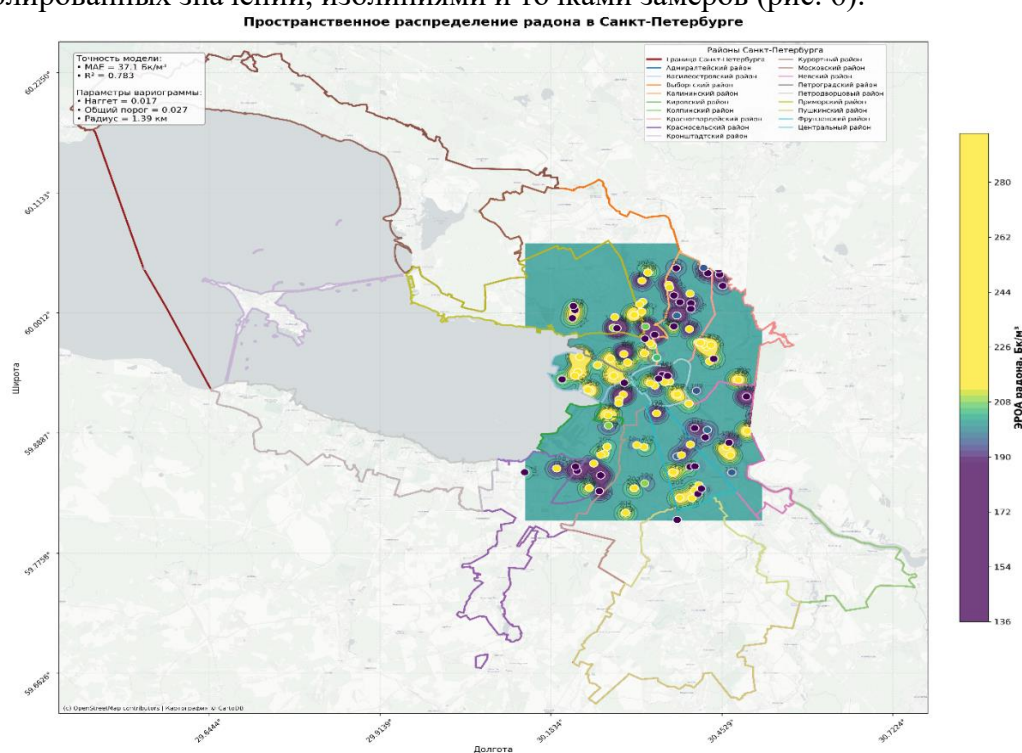


Рисунок 6 – Пространственное распределение среднегодовой ЭРОА изотопов радона в воздухе жилых зданий Санкт-Петербурга с учётом неопределённости оценки

В четвёртом разделе на основе алгоритма автоматизации контроля радоноопасности урбанизированных территорий и модели оценки канцерогенного риска последствий облучения радоном разработана методика автоматизации контроля радоноопасности урбанизированных территорий. Параллельно систематизированы мероприятия по снижению концентрации радона в помещениях, охватывающие технические решения для проектируемых и эксплуатируемых жилых зданий. Методика автоматизации содержит практические инструменты для планирования измерений, формирования массивов данных, их обработки и интерпретации результатов, направленные на обоснование управленческих решений по снижению радоноопасности. Структурная схема методики автоматизации контроля радоноопасности урбанизированных территорий в системе оценки радоноопасности в Российской Федерации представлена на рисунке 7. Также на рисунке 8 представлена матрица технических решений по противорадоновой защите согласно СП 321.1325800.2017 «Здания жилые и общественные. Правила проектирования противорадоновой защиты».

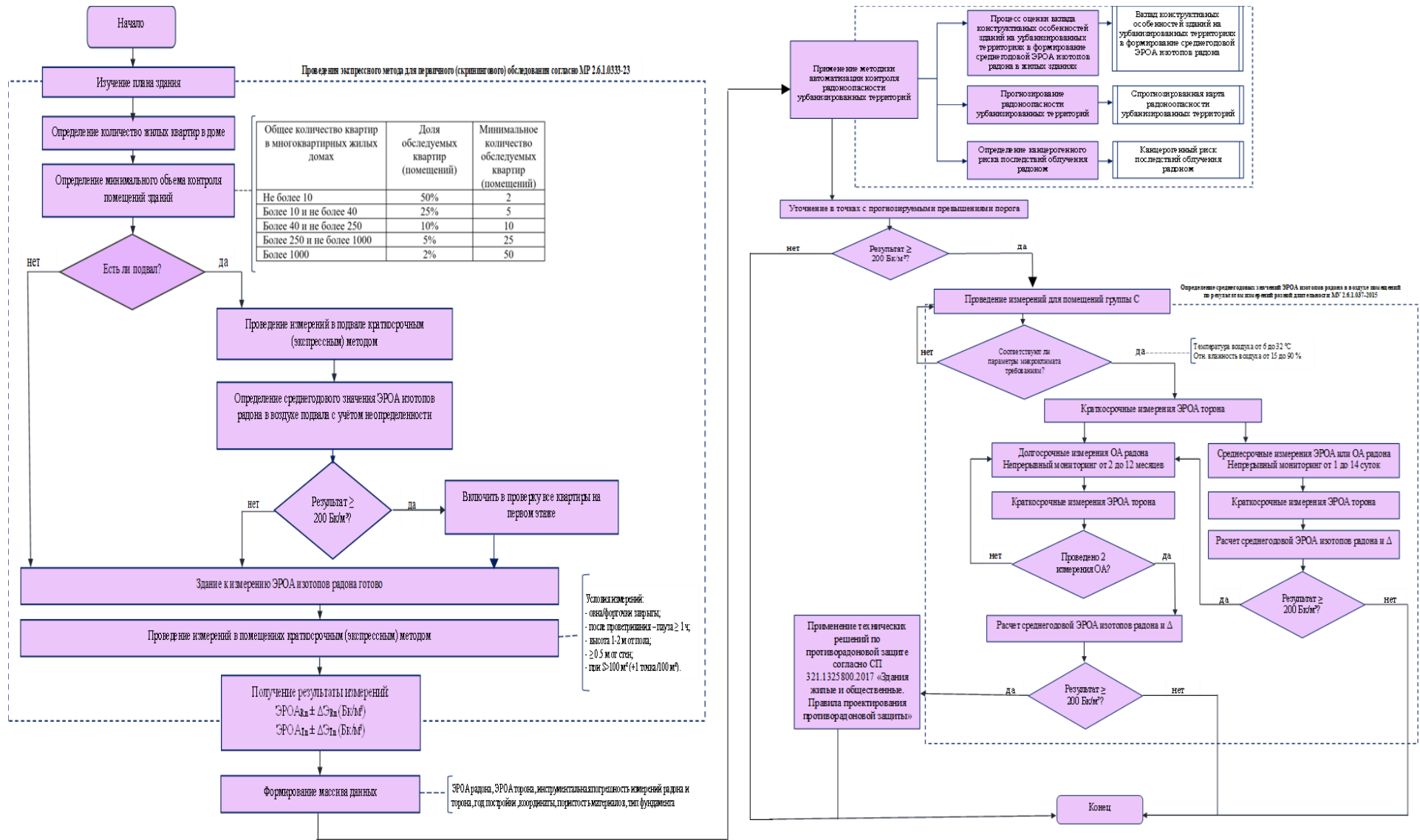


Рисунок 7 – Структурная схема методики автоматизации контроля радионуклидной безопасности урбанизированных территорий в системе оценки радионуклидной безопасности в Российской Федерации

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
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

Рисунок 8 – Матрица технических решений по противорадоновой защите согласно СП 321.1325800.2017 «Здания жилые и общественные. Правила проектирования противорадоновой защиты»

По результатам четвёртого раздела разработана методика автоматизации контроля радоноопасности урбанизированных территорий. На основе ограниченной репрезентативной выборки полевых измерений методика автоматизации контроля позволяет оценить радоноопасность урбанизированной территории, что снижает трудоёмкость, повышает оперативность контроля поскольку:

- не требуется проводить массовые сплошные измерения во всех зданиях;
- сокращается 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 противорадовой защите для снижения концентрации радона до установленного референтного уровня.

Методика представляет собой инструмент, который формирует научно обоснованную базу для планирования адресных мероприятий и совершенствования системы радиационно-гигиенического мониторинга с учётом региональной специфики и конструктивных особенностей зданий.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В результате диссертационного исследования решена научно-практическая задача, направленная на оценку и прогнозирование 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 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.

Полученные результаты соответствуют пунктам 1, 6 и 7 паспорта специальности 2.2.8 «Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды» и вносят существенный вклад в развитие методов радиационного контроля и диагностики природной среды за счёт создания комплексного подхода к оценке и прогнозированию радоноопасности урбанизированных территорий.

По теме диссертации опубликованы следующие работы автора.

I. Публикации в ведущих рецензируемых научных изданиях

В журналах по специальности 2.2.8:

1. 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.

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

3. Калашникова, М.В. Выявление ключевых детерминант радоноопасности урбанизированных территорий / М.В. Калашникова // Вестник Камчатского

государственного технического университета. 2025. № 74. С. 22-31.

4. Калашникова, М.В. Разработка геоинформационной системы оценки потенциальной радоноопасности территории / М.В. Калашникова // Контроль. Диагностика. 2025. Т. 28. № 5 (323). С. 32-38.

5. Калашникова, М.В. Анализ моделей и методик измерения показателей радоноопасности в Российской Федерации / М.В. Калашникова // Электроника: Наука, технология, бизнес. 2025. № 2 (243). С. 142-144.

6. Калашникова, М.В. Влияние факторов среды на радоноопасность территории Санкт-Петербурга / М.В. Калашникова // Электроника: Наука, технология, бизнес. 2025. № 3 (244). С. 164-167.

7. Калашникова, М.В. Экологическое значение и основные задачи исследования потенциальной радоноопасности территории / М.В. Калашникова // Электроника: Наука, технология, бизнес. 2024. № 10 (241). С. 120-121.

8. Калашникова, М.В. Модель потенциальной радоноопасности территории. Использование метода kriging и Global Positioning System / М.В. Калашникова // Электроника: Наука, технология, бизнес. 2024. № 6 (237). С. 104-107.

9. 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.

II. Статьи материалы конференций

10. 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.

11. 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.

12. 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.

13. 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.

14. 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.

15. 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-

Санкт-Петербург, 04 марта 2025 года. Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, 2025. С. 532-533.

16. 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.

17. 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.

18. 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.

19. 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.

20. 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.

21. 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.

22. 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.

23. 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.

24. 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.

25. 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.

26. Говор, М.В. 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. Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, 2021. С. 349-350.

27. 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.

Авторские свидетельства, патенты, информационные карты, алгоритмы

28. Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ: «Программа для сбора, обработки, анализа и визуализации данных с датчиков (температура, влажность, радон, торон) для оценки состояния окружающей среды» / Т.В. Колобашкина, М.В. Калашникова // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2025618097, 11.04.2025. Заявка № 2025616853 от 01.04.2025.

29. Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ: «Автоматизированная система комплексной оценки радоноопасности территорий на основе геостатистики и машинного обучения» / Т.В. Колобашкина, М.В. Калашникова // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2025680594, 07.08.2025. Заявка № 2025680007 от 07.08.2025.

30. Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ: «Программа для автоматизированной оценки рисков облучения радоном» / Т.В. Колобашкина, М.В. Калашникова // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2025680593, 07.08.2025. Заявка № 2025666402 от 03.07.2025.