

На правах рукописи



Яковлева Валентина Станиславовна

**МЕТОДЫ И ПРИБОРЫ КОНТРОЛЯ ПОЛЕЙ α -, β -, γ -ИЗЛУЧЕНИЙ
И РАДОНА В СИСТЕМЕ «ГРУНТ-АТМОСФЕРА»**

05.11.13 – Приборы и методы контроля природной среды,
веществ, материалов и изделий

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Томск – 2013

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

**Научный
консультант:**

Нагорский Петр Михайлович, доктор физико-математических наук, профессор

**Официальные
оппоненты:**

Уткин Владимир Иванович, доктор технических наук, член-корреспондент РАН, заслуженный деятель науки, профессор, главный научный сотрудник Института геофизики им. Булашевича УрО РАН

Николаев Вадим Аркадьевич, доктор технических наук, старший научный сотрудник, начальник лаборатории ФГУП НПО «Радиовый институт им В.Г. Хлопина»

Кулешов Валерий Константинович, доктор технических наук, профессор, профессор-консультант ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

**Ведущая
организация:**

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Южный федеральный университет»

Защита состоится 3 декабря 2013 г. в 15:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.269.09 при ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: 634028, г. Томск, ул. Савиных, 7, ауд. 215 (актовый зал).

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: 634028, г. Томск, ул. Белинского, 53.

Автореферат разослан

2013 г.

Ученый секретарь совета Д 212.269.09
кандидат технических наук



Е.А. Васендина

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

В диссертационной работе изложены результаты исследований автора по различным аспектам радоновой проблемы, связанным с изучением процессов переноса радона и торона в системе «грунт-атмосфера», выявлением влияющих факторов, а также развитием методов и приборов контроля характеристик радоновых полей за период с 1998 по 2013 годы.

Актуальность темы. Одной из важнейших междисциплинарных фундаментальных проблем, которая приобрела в настоящее время глобальный характер, является проблема биологического воздействия малых (фоновых) доз радиации, вызванных естественной радиоактивностью. Важное место в этой проблеме отводится радиоактивному природному газу радону. Многократно вырос интерес и к другому изотопу радона – торону, после выявления регионов, в которых дозы природного облучения населения за счет торона оказались преобладающими.

Особое внимание к радону проявляется не только со стороны радиационной биологии, но и других областей знаний – радиационной и геоэкологии, геофизики, что связано с его замечательными индикаторными свойствами. Радон является широко используемым и перспективным радиоактивным трассером динамических процессов, протекающих в верхних слоях литосферы и приземной атмосфере. Задачи о массопереносе радона привлекают внимание многих исследователей богатством затрагиваемых явлений и процессов, а также своей прикладной значимостью.

Контроль и исследование структуры и динамики радоновых полей и создаваемых ими полей ионизирующих излучений (ИИ) в геологической среде и атмосфере необходимы при решении вопросов газообмена между почвой и атмосферой, прогноза изменения напряженно-деформированного состояния земной коры, исследования траекторий воздушных масс в вертикальном и горизонтальном направлении. Кроме того, радон и торон являются сильными ионизаторами приземной атмосферы.

Для решения вышеуказанных задач требуется длительный непрерывный радоновый и радиационный контроль, пункты которого могут быть расположены не только в городской черте, но и в отдаленных труднодоступных местах, что, в свою очередь, предъявляет ряд основных требований к приборам контроля характеристик полей радона: простота конструкции и обслуживания; длительная работа до отказа; низкая стоимость; возможность автоматизированной системы съема, сохранения и

передачи данных; высокая частота дискретизации данных измерений; широкий диапазон изменения условий эксплуатации прибора.

Большую часть этих требований удовлетворяют заменой сложного спектрометрического оборудования простыми и экономичными блоками детектирования плотности потоков ИИ, или дозиметрами. Например, на геодинамических прогностических полигонах Камчатки, Армении, Израиля, Турции мониторинг объемной активности (ОА) почвенного радона в скважинах, в целях прогноза землетрясений, производят по вторичным признакам – испускаемому α -, β - или γ -излучению с использованием блоков детектирования ИИ. Однако, здесь все еще остается множество нерешенных проблем, связанных с расшифровкой результатов мониторинга, их воспроизводимостью и сопоставимостью для разных регионов. Это обусловлено недостаточной изученностью связи ОА почвенного радона с характеристиками полей ИИ в геологической среде, а также отсутствием методов и методик калибровки используемых блоков детектирования.

Еще более остро стоит проблема с приборами и методами непрерывного контроля другой важной характеристики переноса изотопов радона – плотности потоков радона (ППР) и торона (ППТ) с поверхности грунта и других пористых материалов. Как в РФ, так и за рубежом промышленно выпускаемые и занесенные в госреестры приборы непрерывного контроля величин ППР и ППТ отсутствуют. И это не смотря на то, что величина ППР служит в России критерием радоноопасности территорий. Плотности потоков радона и торона с поверхности грунта являются входными параметрами модели переноса изотопов радона и дочерних продуктов их распада (ДПР) в атмосфере. Более того, величина плотности потока радона является более чувствительным индикатором изменения напряженно-деформированного состояния земной коры, чем традиционно используемая для этих целей ОА радона в грунте, что было экспериментально подтверждено на динамическом полигоне Камчатки.

Радон, являющийся полезным инструментом геофизики, радиационной и геоэкологии, может играть и отрицательную роль, т.е. существенно усложнять расшифровку результатов контроля атмосферного γ -фона, и даже инициировать аномальные всплески в γ -фоне, которые могут быть расценены как «ложные сигналы тревоги». Для устранения этой проблемы необходимо знать вклады различных источников в суммарные поля ИИ и производить соответствующие корректировки в зависимости от степени влияния радона (его изотопов и ДПР) на атмосферные поля излучений, с учетом высоты

установки детектора, метеоусловий и других факторов. Торон, в свою очередь, является фактором, влияющим на точность измерений активности или плотности потока радона, что также требует соответствующей проработки вопросов разделения аппаратурных сигналов от радона и торона.

Выявление роли радона в формировании суммарных атмосферных полей ИИ может быть успешным при рассмотрении системы «грунт-атмосфера» в целом. Целесообразно применить комплексный многофакторный подход к контролю характеристик полей радона с разработкой методологии синхронного мониторинга ряда наиболее информативных характеристик, основанной на результатах численных исследований переноса изотопов радона, продуктов их распада, и создаваемых ионизирующих излучений.

Всё вышесказанное определяет актуальность темы работы.

Объект исследования: динамика радонового поля в системе «грунт-атмосфера», методы и приборы контроля радона и торона по вторичным полям α -, β - и γ -излучений.

Цель и задачи работы. Цель диссертационной работы: разработка методов и приборов непрерывного контроля радона по вторичным полям ионизирующих излучений для изучения особенностей динамики радоновых полей в системе «грунт-атмосфера», их апробация в сейсмически пассивном регионе.

Основные задачи:

1. Исследование особенностей переноса изотопов радона в системе «грунт-атмосфера», поиск основных закономерностей в их динамике, проявляющихся на различных временных интервалах. Выявление роли радона в формировании суммарных атмосферных полей ионизирующих излучений.

2. Разработка методологии проведения комплексного синхронного мониторинга характеристик радоновых полей по вторичному ионизирующему излучению в системе «грунт-атмосфера» с целью выявления глобальных и локальных факторов, управляющих их поведением.

3. Формулировка, на основе анализа численных экспериментов по переносу изотопов радона, дочерних продуктов их распада и создаваемых ими ионизирующих излучений в системе «грунт-атмосфера», требований к универсальному комплексу непрерывного контроля радоновых полей.

4. Разработка простых, экономичных, надежных и достоверных методов и приборов контроля плотности потоков радона и торона с поверхности грунта и других пористых материалов, позволяющих производить

эпизодический и непрерывный автоматизированный контроль, пригодных для применения в полевых условиях, с широким диапазоном изменения условий эксплуатации.

5. Создание методов непрерывного контроля характеристик переноса радона и торона в системе «грунт-атмосфера»: скорости адвекции радона в грунте в широком диапазоне изменения значений, более 10^{-3} см/с; коэффициента диффузии радона и торона в грунте.

6. Разработка и реализация универсального комплекса непрерывного контроля характеристик радоновых полей по вторичному ионизирующему излучению в системе «грунт-атмосфера» и его апробация в сейсмически пассивном регионе.

7. Проведение оценок плотности ионизации атмосферы атмосферными (изотопы радона и продукты их распада) и почвенными радионуклидами с описанием функции интенсивности ионообразования.

Научная новизна

1. Предложена и протестирована методологии проведения комплексного синхронного мониторинга характеристик радоновых полей по вторичному ионизирующему излучению и метеорологических величин на серии высот и глубин в системе «грунт-атмосфера» с целью выявления глобальных и локальных факторов, управляющих их поведением. Создан универсальный комплекс непрерывного контроля характеристик радоновых полей по вторичному ионизирующему излучению в системе «грунт-атмосфера», включающий радиометрическую аппаратуру, размещенную до глубин 5 м и высот 35 м, с высокой частотой дискретизации данных (от 1 до 10 мин.).

2. Разработаны и применены оригинальные методы контроля характеристик переноса радона и торона в системе «грунт-атмосфера»: плотности потоков радона и торона с поверхности пористой среды; скорости адвективного переноса радона и торона в грунте; коэффициента диффузии радона и торона в грунте, которые подтверждены патентами РФ.

3. Разработаны и применены новые методы контроля плотности потоков радона и торона с поверхности грунта по α - и β -излучениям, и созданные на их основе приборы эпизодического и непрерывного контроля плотности потоков радона и торона с поверхности грунта и других пористых материалов.

4. Впервые произведены оценки степени влияния метеорологических факторов на нарушение радиоактивного равновесия между изотопами радона и продуктами распада в приземной атмосфере и установлено, что: 1) сдвиг

радиоактивного равновесия между радоном и короткоживущими ДПР определяется совокупным влиянием следующих факторов: высотой над земной поверхностью; скоростью вертикальной компоненты ветра; коэффициентом турбулентной диффузии; количеством осадков; 2) в зависимости от погодных условий погрешность оценок ОА радона в приземной атмосфере, полученных аспирационными методами, может достигать до 75%.

5. Впервые, на основе анализа материалов серии численных экспериментов переноса ионизирующих излучений атмосферных и почвенных радионуклидов получено, что:

- атмосферный γ -фон формируются, в основном (на 90–95%), почвенными радионуклидами;
- атмосферный радон существенно влияет на атмосферный β -фон, причем вклады атмосферного радона и почвенных радионуклидов сопоставимы и их соотношение сильно зависит от метеоусловий и высоты над земной поверхностью;
- вариации радона в грунте могут являться причиной вариаций атмосферного γ -фона до 25%, а β -фона – до 40%, таким образом, грунт является «вариативной» компонентой атмосферных полей ИИ, а не «постоянной», как было принято считать ранее.

6. По результатам калибровки в длительном эксперименте приборов контроля почвенного радона (α -, β - и γ -сцинтилляционных блоков детектирования и газоразрядных счетчиков β - и γ -излучений) с помощью эталонного радиометра радона получено:

- почвенные поля α - и γ -излучений не отражают динамику радонового поля и, следовательно, непригодны для мониторинга подпочвенного радона, однако при аномальных выбросах радона поле α -излучения до глубин 1 м реагирует заметным образом, что позволяет использовать данный параметр при прогнозировании опасных явлений с некоторыми ограничениями;
- поле β -излучения на глубинах 0,5–1 м удовлетворительно отражает динамику радонового поля, поэтому, для непрерывного контроля почвенного радона рекомендуются детекторы β -излучений.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Методология проведения комплексного синхронного мониторинга характеристик радоновых полей по вторичному ионизирующему излучению и метеорологических величин на серии высот и глубин в системе «грунт-

атмосфера» с целью выявления глобальных и локальных факторов, управляющих их поведением.

2. Созданный универсальный комплекс непрерывного контроля характеристик радоновых полей по вторичному ионизирующему излучению в системе «грунт-атмосфера», включающий радиометрическую аппаратуру, размещенную до глубин 5 м и высот 35 м, с высокой частотой дискретизации данных (от 1 до 10 мин.).

3. Разработанный и подтвержденный патентом РФ метод контроля плотности потоков радона и торона с поверхности грунта по α -излучению, созданные на его основе: лабораторный и полевой комплексы непрерывного контроля плотности потоков радона и торона на основе сцинтилляционного α -детектора с автоматизированной накопительной камерой; универсальный комплекс контроля плотности потоков радона и торона, подтвержденный патентом РФ, на основе полупроводникового α -детектора. Детекторы работают в счетном режиме, а аппаратурные сигналы от торона и радона разделяются по форме измеренной кривой скорости счета импульсов.

4. Разработанные: экспресс-метод контроля плотности потока торона с поверхности пористых материалов по α -излучению; метод непрерывного контроля плотности невозмущенного потока радона с поверхности грунта по α -излучению.

5. Разработанные и подтвержденные патентами РФ метод и основанное на нем автоматизированное устройство для непрерывного контроля плотности потока радона с поверхности грунта по β - и γ -излучению, содержащее накопительную камеру с открытым основанием из непроницаемого для радона материала и детектор β -излучения, работающий в счетном режиме.

6. Разработанные и подтвержденные патентами РФ методы контроля характеристик переноса радона и торона в системе «грунт-атмосфера»: 1) скорости адвекции радона и торона в грунте, основанный на диффузионно-адвективной модели переноса и на одновременной регистрации плотности потоков радона и торона с поверхности грунта; 2) коэффициента диффузии радона и торона в грунте, основанный на диффузионной модели переноса.

Практическая значимость. Использование универсального комплекса непрерывного контроля характеристик радоновых полей по вторичному ионизирующему излучению в системе «грунт-атмосфера» для модернизации действующих пунктов радиационного и радонового контроля позволит получать необходимую экспериментальную базу данных для решения задач

воздействия малых доз радиации на человека и окружающую среду, вопросов газообмена в системе «грунт-атмосфера», прогнозирования изменений напряженно-деформированного состояния земной коры.

Разработанные приборы и методы контроля плотности потоков радона и торона с поверхности грунта и строительных конструкций, являются конструктивно простыми и удобными в эксплуатации, экономичными, надежными и могут быть использованы как для непрерывного автоматизированного контроля на станциях мониторинга, так и для разового и эпизодического видов контроля радоноопасности территорий и зданий.

Полученные в работе результаты теоретических и экспериментальных исследований характеристик радоновых полей в системе «грунт-атмосфера» показывают важность и реальность создания широкой сети мониторинга радона, что особенно актуально в настоящее время, когда происходят трудно прогнозируемые изменения климата, состояния литосферы и атмосферы.

Фундаментальные, прикладные и методические работы проведены на стыке ядерной физики, метеорологии и геофизики, результаты которых предназначены для приложений в области естественной радиоактивности, сейсмологии и климатологии, строительстве.

В плане повышения научного потенциала высшей школы результаты диссертационной работы внедрены в учебный процесс для совершенствования процесса подготовки кадров высшей квалификации: бакалавров, магистров и аспирантов.

Достоверность результатов, выводов и научных положений диссертационной работы подтверждается:

- большим объемом экспериментальных исследований, которые не противоречат современным знаниям и фундаментальным основам в области радиационной экологии, геофизики и науки о радиоактивных аэрозолях;
- длительными временными рядами регулярных наблюдений за характеристиками полей радона и ИИ в грунте и атмосфере;
- удовлетворительным согласием результатов контроля с представленными в литературе экспериментальными данными, полученными различными авторами;
- использованием современных методов и программ статистической обработки экспериментальных данных.

Научные программы, в рамках которых были получены результаты диссертации. Диссертационная работа основана на результатах многолетних исследований (2003–2013 гг.), выполненных автором в т.ч. в рамках: АВЦП

РНПВШ гранты №2.1.1/544 и №2.1.1/13707 «Массоперенос радиоактивного газа радона в трещиновато-пористых средах и его влияние на приземный слой атмосферы» (2009–2011 гг.); ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» гос.контракт №02.740.11.0738 «Опасные явления и нестационарные процессы в динамике приземного слоя атмосферы» (2010–2012 гг.); проекта по гранту Президента РФ для поддержки молодых российских ученых №МК-3295.2004.5 «Радон как предвестник землетрясений» (2004–2005 гг.); ведомственной научной программы РНПВШ по разделу 1.2. «Университеты России» грант № ур.09.01.416 «Изучение массопереноса радона в районах динамического влияния разломных зон» (2005 г.).

Апробация результатов работы. Основные положения работы докладывались и обсуждались на: 14-й международной конференции по радиационным исследованиям (Варшава, Польша, 2011); 8-м и 9-м Сибирских совещаниях по климато-экологическому мониторингу (Томск, 2009, 2011); 11-й, 16-й, 18-й Рабочих группах "Аэрозоли Сибири" (Томск, 2004, 2009, 2011); 6-м международном симпозиуме «Hazard Detection and Management» (Дрезден, Германия, 2010); международной конференции «Radium and radon isotopes as environmental tracers» (Иерусалим, Израиль, 2010); 7-м Всероссийском симпозиуме «Контроль окружающей среды и климата (КОСК-2010)» (Томск, 2010); международных научно-практических конференциях «Физико-технические проблемы атомной энергетики и промышленности» (Томск, 2004, 2007 и 2010); 5-й международной конференции «Солнечно-земные связи и физика предвестников землетрясений» (Петропавловск-Камчатский, 2010); 7-й и 10-й международных конференциях «Gas Geochemistry» (Германия, 2003; Румыния, 2009); международной конференции «Radon in Environment 2009» (Закопане, Польша, 2009); международной научной конференции «Становление и развитие научных исследований в высшей школе» (Томск, 2009); 8-й международной конференции «Gas Geochemistry ICGG 8» (Палермо и Милаццо, Италия, 2005); международном симпозиуме «Проблемы геологии и освоения недр» (Томск, 2005); 21-й и 22-й международных конференциях «Nuclear Tracks in Solids» (Индия, 2002; Испания, 2004); семинарах кафедры Прикладной физики ФТИ ТПУ.

Публикации. По результатам исследования опубликовано 44 печатных работы, из них 22 – в рекомендованных ВАК журналах; 10 патентов РФ на изобретения и полезные модели, 1 монография.

Личный вклад. Основные исследования по тематике диссертационной работы выполнены лично автором, либо под его руководством и при его участии. Часть исследований, выполненных автором, производились совместно с коллегами кафедры Прикладной физики ТПУ и лаборатории физики климатических систем ИМКЭС СО РАН.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы, включающего 411 наименований. Общий объем работы составляет 323 страницы, включая 118 рисунков.

Основное содержание работы

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертации, определены цели и задачи исследования, раскрыты научная новизна и практическая значимость работы, сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

В **главе 1** сформулирована проблема мониторинга полей радона по вторичному ионизирующему излучению в системе «литосфера-атмосфера» и произведен выбор объектов исследования. С этой целью проведен анализ пригодности существующих приборов и методов контроля характеристик полей радона для целей непрерывного автоматизированного контроля в широком диапазоне изменения погодных условий для регионов с резко-континентальным типом климата. По результатам численных экспериментов, с использованием широко известной диффузионно-адвективной модели переноса радона и торона в грунте, модифицированной модели (1, 2) переноса радиоактивных газов и аэрозолей в приземной атмосфере, а также метода Монте-Карло для моделирования переноса ионизирующих излучений в грунте и приземной атмосфере, произведены оценки вкладов почвенного и атмосферного радона в суммарные β - и γ -поля приземной атмосферы в зависимости от физико-геологических и метеорологических условий, выбраны направления разработки новых приборов для непрерывного контроля плотности потоков радона и торона с поверхности грунта.

Для переноса радона, торона и короткоживущих продуктов их распада в вертикальном направлении, вдоль оси z (ось z направлена вверх от поверхности земли), была использована широко используемая модель, учитывающая следующие процессы рождения, переноса и удаления радионуклидов в атмосфере: 1) выход радиоактивных газов из грунта в атмосферу; 2) радиоактивный распад; 3) молекулярную и турбулентную диффузию; 4) осаждение под действием силы тяжести; 5) вымывание радионуклидов из атмосферы осадками, в которой кроме перечисленных

процессов мы учли ветровой перенос в вертикальном направлении:

$$\left. \begin{aligned} (D_{M_i} + D_T) \frac{d^2 A_i(z)}{dz^2} - v_w \frac{d}{dz} A_i(z) - \lambda_i A_i(z) &= 0, \text{ для } i=1,6; \\ (D_{M_i} + D_T) \frac{d^2 A_i(z)}{dz^2} - v_d \frac{d}{dz} A_i(z) + \lambda_i A_{i-1}(z) - \lambda_i A_i(z) &= 0, \text{ для } i=2-5,7-11. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Система уравнений (1) дополнена краевыми условиями

$$\left. \begin{aligned} -(D_{M_i} + D_T) \frac{dA_i(z)}{dz} \Big|_{z=0} + v_w A_i(z) \Big|_{z=0} &= q_i, \text{ для } i=1,6; \\ (D_{M_i} + D_T) \frac{dA_i(z)}{dz} \Big|_{z=0} - v_d A_i(z) \Big|_{z=0} &= 0, \text{ для } i=2-5,7-11; \\ A_i(z) &\rightarrow 0, \quad z \rightarrow \infty. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Здесь: $A_i(z)$ – функция объемной активности i -го радионуклида, Бк/м³; индексы $i = 1-5$ соответствуют радону ²²²Rn и продуктам его распада, соответственно ²¹⁸Po (RaA), ²¹⁴Pb (RaB), ²¹⁴Bi (RaC) и ²¹⁴Po (RaC'); индексы $i = 6-11$ соответствуют торону ²²⁰Rn и продуктам его распада, соответственно ²¹⁶Po (ThA), ²¹²Pb (ThB), ²¹²Bi (ThC), ²¹²Po (ThC') и ²⁰⁸Tl (ThC''); q_i – плотность потока радона ($i = 1$) и торона ($i = 6$) с поверхности грунта, Бк м² с⁻¹; D_M – коэффициент молекулярной диффузии, м²/с; D_T – коэффициент турбулентности атмосферы, м²/с; $v_d = v_w + v_F$; v_w – вертикальная составляющая скорости ветра, м/с; v_F – скорость осаждения аэрозольных частиц под действием силы тяжести, м/с; $\lambda = \lambda_d + L$; λ_d – постоянная радиоактивного распада, с⁻¹; L – коэффициент вымывания аэрозольных частиц из атмосферы осадками, с⁻¹.

При отрицательных значениях v_w – скорость ветра направлена к поверхности земли, при положительных – совпадает с направлением оси z .

Анализ материалов серии численных экспериментов переноса ионизирующих излучений, образованных атмосферными (изотопы радона и ДПР) и почвенными радионуклидами показал, что излучение почвенных радионуклидов является «вариативной» компонентой атмосферных полей ИИ, а не «постоянной», как было принято считать ранее. Получено, что атмосферный γ -фон формируется, в основном (на 90–95%), почвенными радионуклидами, при определенных метеорологических условиях (низкой турбулентности) вклад атмосферного радона в γ -фон может достигать 20% на 5 м и слабо увеличиваться с ростом высоты. С усилением турбулентности атмосферы вклад атмосферного радона в суммарный γ -фон снижается (рисунок 1).

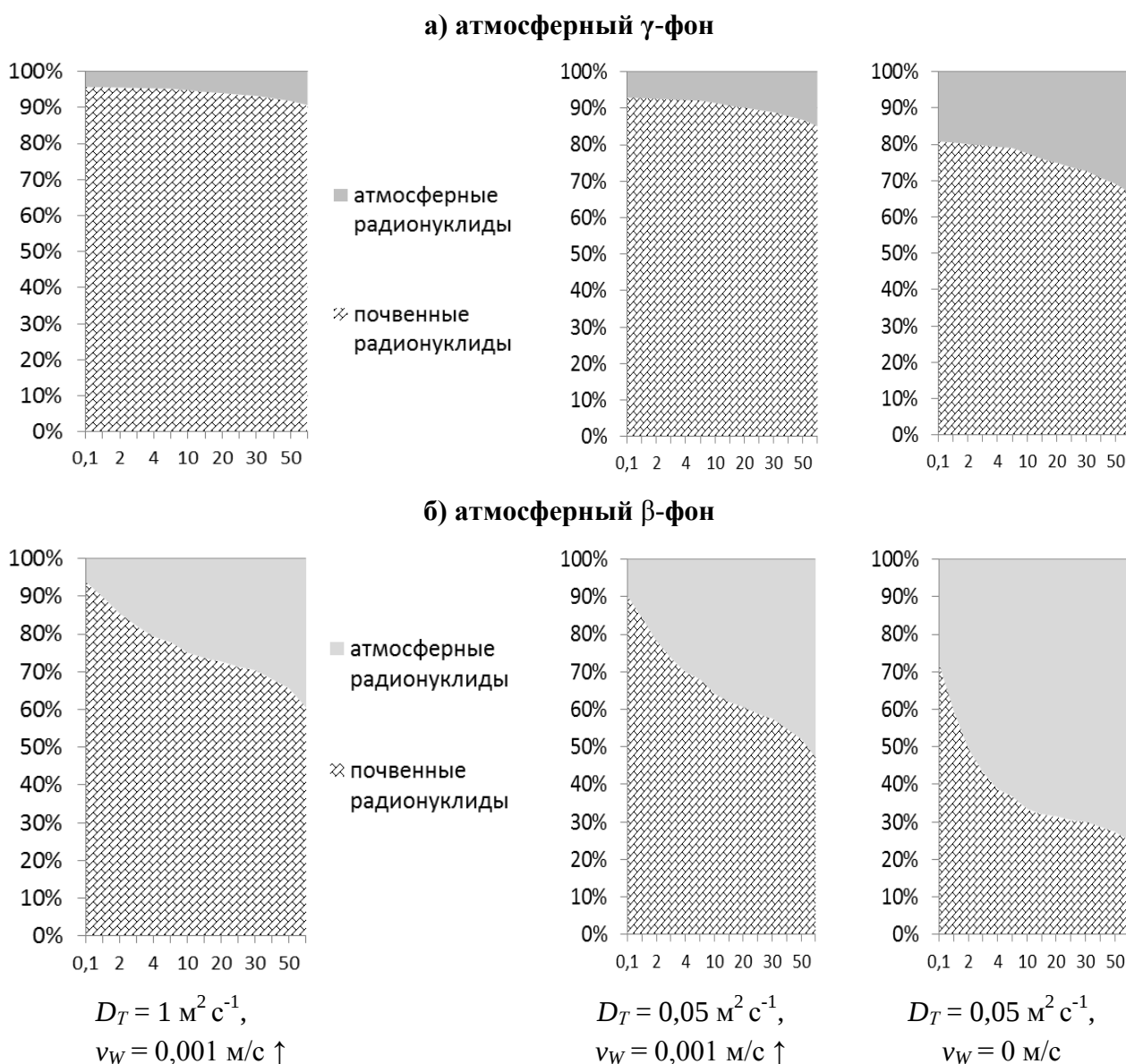


Рисунок 1 – Вклады (в %) атмосферных и почвенных радионуклидов в суммарный атмосферный: а) γ -фон; б) β -фон в зависимости от высоты, м, (ось X) и погодных условий

Выявлено, что атмосферный радон заметным образом влияет на поле β -излучения приземной атмосферы (рисунок 1), причем вклады атмосферного радона и почвенных радионуклидов сопоставимы и их соотношение сильно зависит от метеоусловий и высоты над земной поверхностью. Вариации радона в грунте могут являться причиной вариаций атмосферного γ -фона до 25%, а β -фона – до 40%.

На основе анализа результатов численных экспериментов показано, что самыми информативными для решения задач непрерывного радонового и радиационного контроля являются высоты до 20 м и глубины до 1 м, а также сформулированы требования к комплексу непрерывного контроля характеристик радоновых полей по вторичному ионизирующему излучению

в системе «грунт-атмосфера» с целью изучения «откликов» этих полей на возмущения естественного происхождения, в т.ч. опасные природные явления, обнаружение и изучение аномальных изменений – «предвестников».

Выявлена пропорциональность между дозой и плотностью потока для β -излучения, что позволяет делать простой пересчет одной характеристики в другую. Показано, что связь между дозой и плотностью потока для γ -излучения – нелинейная, существенно зависит от радионуклидного состава грунта и высоты над земной поверхностью.

Разработана и описана методология проведения комплексного синхронного мониторинга характеристик радоновых полей по вторичному ионизирующему излучению и метеорологических величин на серии высот и глубин в системе «грунт-атмосфера», позволяющего:

- выявлять глобальные и локальные факторы, управляющих поведением радоновых полей;
- с наибольшей эффективностью использовать полученные экспериментальные данные для решения задач радиационной экологии и радиобиологии, сейсмологии, физики приземного слоя атмосферы, инженерного строительства.

В главе 2 представлены разработанные приборы и методы контроля плотности потоков радона и торона с поверхности грунта и других пористых материалов.

В разделах 2.1–2.4 для выбора пригодных в проведении непрерывного скоординированного многофакторного эксперимента приборов и методов контроля величин плотности потоков радона и торона с поверхности земли произведен анализ преимуществ и недостатков существующих в мировой практике наработок с последующей классификацией методов контроля. Все методы контроля ППР и ППТ основаны на использовании накопительной камеры (НК) и измерительного устройства для измерения накопленных внутри НК активностей радона и торона. По результатам анализа сформулированы требования к приборам и методам контроля ППР и ППТ, предназначенным для длительного автоматизированного мониторинга в широком диапазоне изменения метеорологических величин и с большой частотой дискретизации данных. Выявлено, что ни один из существующих методов контроля полностью не удовлетворяет установленным требованиям.

Проанализированы проблемы, которые возникают при одновременном контроле плотностей потоков радона и торона. Для решения этих проблем произведено моделирование динамики радона, торона и продуктов их

распада, а также создаваемых ими ионизирующих излучений внутри НК. Выявлено, что суммарная кривая роста выхода α -частиц от торона и ДПР имеет специфическую форму и определяется физическими свойствами радионуклидов, а именно, соотношением периодов их полураспада. В момент времени, равный ~ 6 мин. после начала накопления кривая роста выхода α -частиц от торона и ДПР выходит на насыщение (равновесное состояние) и далее практически не изменяется, в то время как рост выхода α -частиц от радона и ДПР имеет практически линейную форму. Это позволяет использовать простые алгоритмы для разделения аппаратных сигналов от радона и торона при их совместном измерении. Полученные результаты использованы для разработки новых простых, экономичных, надежных и достоверных приборов и методов, лишенных ряда недостатков своих аналогов.

В разделе 2.5 описаны разработанные методы и приборы контроля плотности потоков радона и торона с поверхности грунта по α -излучению.

Решение поставленной задачи по разработке простых, экономичных, надежных и достоверных методов и основанных на них приборов контроля ППР и ППТ с поверхности грунта и других пористых материалов, позволяющих производить эпизодический и непрерывный автоматизированный контроль, пригодных для применения в полевых условиях и широком диапазоне изменения метеорологических величин, было найдено после анализа кривой роста суммарной скорости счета импульсов от α -излучения, образующегося при распаде накопленных внутри НК изотопов радона и продуктов их распада. При этом появилась возможность использовать вместо радиометров радона более экономичные и работающие при отрицательных температурах детекторы α -излучения. Более того, появилась возможность помещать измерительное устройство (α -детектор) внутрь накопительной камеры, в отличие от существующих приборов-аналогов, что существенно повысило надежность и достоверность разработанных нами методов и приборов.

В разработанном методе контроля плотности потоков радона и торона с поверхности грунта по α -излучению, который был подтвержден патентом РФ на изобретение №2419817, измерение скорости счета импульсов производят установленным внутри накопительной камеры α -детектором, работающим в счетном режиме. Разделение аппаратных сигналов от радона и торона производят по форме кривой роста скорости счета импульсов одним из следующих двух вариантов.

1 вариант. Производят измерение скорости счета импульсов в течение времени $t=40-60$ мин. от начала накопления. Далее обработку кривой накопления производят с использованием соответствующих алгоритмов, позволяющих выделить линейный участок, угол наклона которого пропорционален плотности потока радона и высоту пьедестала, на которую поднят линейный участок, которая соответствует равновесному значению скорости счета импульсов от торона и продуктов его распада и пропорциональна плотности потока торона с поверхности грунта.

2 вариант. Производят всего два измерения скорости счета импульсов, первое – в момент времени $t_1=6-7$ мин., после начала накопления, а второе – в момент времени t_2 от 40 до 60 мин., а затем величины ППР и ППТ определяют из выражений

$$q_{Rn} = \frac{K_{Rn}(t_2)}{60 \cdot \varphi \cdot S \cdot (t_2 - t_1)} \cdot (N_{t_2} - N_{t_1}), \quad (3)$$

$$q_{Tn} = \frac{6,3 \cdot 10^{-3} \cdot N_{t_1}}{\varphi \cdot S}, \quad (4)$$

где N_{t_1} – измеренная в момент времени t_1 , мин., после начала накопления скорость счета импульсов, имп./с; N_{t_2} – измеренная в момент времени t_2 , мин., после начала накопления скорость счета импульсов, имп./с; $K_{Rn}(t_2)$ – вклад радона (^{222}Rn) в суммарный выход α -частиц от радона и продуктов его распада внутри накопительной камеры в момент времени t_2 , зависящий от t_2 , отн. ед.; φ – коэффициент счета, который учитывает эффективность регистрации счетчика и геометрический фактор, имп. $\cdot$ с $^{-1}$ $\cdot$ Бк $^{-1}$; S – площадь основания накопительной камеры, м 2 ; $6,3 \cdot 10^{-3}$ – коэффициент, учитывающий вклад торона (^{220}Rn) в суммарный выход α -частиц от торона и продуктов его распада внутри накопительной камеры, а также накопление торона и его радиоактивный распад за 6 мин., с $^{-1}$.

Выбор первого времени измерения t_1 обусловлен тем, что в этот промежуток времени суммарная скорость счета соответствует равновесному значению скорости счета от торона и его α -излучающих продуктов распада. Рекомендованное минимальное время второго измерения t_2 равное 40 мин., определяется требованием к объему статистики.

Разработанный новый метод контроля плотности потока радона и торона с поверхности грунта по α -излучению, по сравнению со своими аналогами, является: 1) простым и дешевым, поскольку не требует использования сложной спектрометрической аппаратуры, технических приемов и средств

для разделения сигналов от торона и радона; 2) достоверным, т.к. не требуется разделять сигналы от радона, торона и продуктов их распада различными техническими средствами, использование которых приводит к увеличению суммарной погрешности; 3) достоверным, поскольку в этом методе статистика увеличивается за счет того, что регистрируемая суммарная скорость счета импульсов от α -излучения радона, торона и продуктов их распада в 4–5 раз выше, чем от одного радона; 4) пригодным для проведения длительного непрерывного контроля при использовании автоматизированной НК.

На основе этого метода созданы: лабораторный (рисунок 2) и полевой (рисунок 3) комплексы контроля ППР и ППТ на базе сцинтилляционного α -детектора с автоматизированной накопительной камерой; универсальный комплекс контроля ППР и ППТ на основе полупроводникового α -детектора, подтвержденный патентом РФ № №97540. Общая схема комплекса приведена на рисунке 4. Комплекс содержит накопительную камеру из непроницаемого для радона материала и детектор α -излучения. Внутри, в центре верхней части НК, устанавливаемой открытым основанием на грунт, размещен детектор α -излучения (сцинтилляционный, полупроводниковый или др.), чувствительная поверхность которого расположена не менее, чем на 10 см выше поверхности грунта. Детектор α -излучения соединен с блоком усиления сигнала (БУС), который подсоединен к блоку питания (БП) и к счетчику, который связан с ЭВМ. В качестве счетчика использована плата «Pci-count8», изготовленная ООО «Парсек» г. Дубна, которая позволяет работать с восемью источниками (устройствами) сигналов одновременно, с параллельным отображением данных на экран ЭВМ.

Разработан и описан экспресс-метод контроля ППТ с поверхности грунта и строительных конструкций по α -излучению, аналоги которого в РФ отсутствуют, который также основан на регистрации α -излучения радона, торона и продуктов их распада, накопленных внутри накопительной камеры, и отличается тем, что измерение суммарного количества импульсов проводят в течение первых пяти минут, после установки накопительной камеры на поверхность грунта или другого пористого материала, в т.ч. строительных конструкций. Численными расчетами подтверждено, что в большом диапазоне изменения величин ППР и ППТ за первые 5 минут счета импульсов вклад торона (и его ДПР) будет составлять около 98% от суммарного количества импульсов, и не менее 90% в случае «урановых аномалий», т.е. повышенного содержания ^{226}Ra в грунте.



Рисунок 2 – Внешний вид лабораторного комплекса контроля ППР и ППТ



Рисунок 3 – Внешний вид полевых комплексов контроля ППР и ППТ

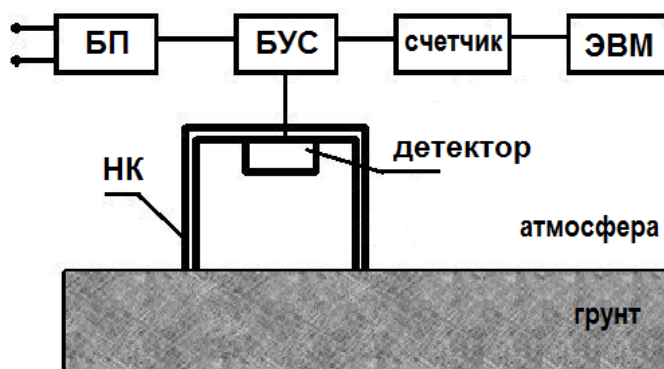


Рисунок 4 – Схема комплекса контроля плотности потоков радона и торона с поверхности грунта по α -излучению

Таким образом, погрешность метода составляет не более 10%. По сравнению с зарубежными аналогами разработанный экспресс-метод: 1) позволяет всего за 10 мин. произвести оценку ППТ; 2) является простым, поскольку не требует использования сложной спектрометрической аппаратуры, или технических приемов и средств для отделения торона от радоново-тороновой смеси; 3) достоверным, т.к. не требуется разделять сигналы от радона, торона и их ДПР различными техническими средствами, использование которых приводит к увеличению суммарной погрешности. Метод может быть использован для разового и эпизодического контроля ППТ с поверхности грунта или строительных конструкций, а также, при использовании автоматизированной НК, позволяет производить непрерывный контроль ППТ в полевых условиях.

В рамках настоящей работы разработан и описан новый метод непрерывного контроля плотности невозмущенного потока радона с поверхности грунта по α -излучению с использованием динамической НК, которая имеет небольшие отверстия для выхода газов во внешнюю атмосферу, который основан на выявленных при анализе результатов численных экспериментов особенностях переноса радона и торона в грунте. А именно, на том, что ППТ с поверхности грунта практически не зависит от скорости адвекции v почвенных газов (не более 2,6% в широком диапазоне значений $0 < v < 10^{-3}$ см/с) и изменяется только с изменением коэффициента диффузии, который, в свою очередь, зависит в одной точке контроля только от влажности грунта. Таким образом, в не дождливую погоду, торон, выходящий с поверхности грунта внутрь НК, будет вносить постоянный вклад в суммарную скорость счета импульсов, вариации которой будут обусловлены только изменением величины ППР. В периоды дождевых осадков корректировку результатов измерений можно производить на основе данных о влажности грунта. Метод основан на использовании динамической НК, устанавливаемой на поверхности грунта открытым основанием, и детектора ИИ, закрепленного внутри НК, работающего в счетном режиме, для измерения накопленной внутри накопительной камеры за определенный промежуток времени активности радона, с дальнейшим пересчетом в величину плотности потока радона.

Преимущества этого метода по сравнению с российскими и зарубежными аналогами заключаются в том, что не требуется автоматизации процесса открывания-закрывания накопительной камеры (либо присутствия оператора для этих целей) при проведении длительного контроля в режиме мониторинга, следовательно, упрощается конструкция НК, снижается суммарная методическая погрешность, увеличивается срок работы прибора до отказа, снижается стоимость. Разработанный метод непрерывного контроля плотности невозмущенного потока радона с поверхности грунта по α -излучению с использованием динамической НК, как показала его длительная многолетняя апробация на экспериментальной площадке ТПУ-ИМКЭС, является самым простым и экономичным для использования на геодинамических прогностических полигонах, а также, в отличие от своих аналогов, позволяет получать временные ряды данных с большой частотой дискретизации, что позволяет контролировать внутрисуточные вариации ППР.

В разделе 2.6 описаны разработанный метод, подтвержденный патентом

РФ №2428715, и основанное на нем автоматизированное устройство, подтвержденное патентом РФ №100295, для непрерывного контроля плотности потока радона с поверхности грунта по β - и γ -излучению дочерних продуктов распада радона. Метод заключается в регистрации β -излучения продуктов распада радона, накопленных внутри НК, установленной на поверхность грунта и отличается от своих аналогов тем, что он позволяет автоматизировать процесс управления, съема, сохранения и передачи данных контроля, а также является более экономичным при использовании в качестве измерительного устройства – газоразрядных счетчиков.

Согласно методу, производят измерения суммарного количества импульсов от β - и γ -излучения продуктов распада радона установленным внутри НК счетчиком β - и γ -излучения, чувствительная поверхность которого расположена таким образом, чтобы на нее не попадало β -излучение почвенных радионуклидов. При этом основание НК, которая автоматически открывается и закрывается на установленные временные промежутки, закрыто фильтром, предотвращающим попадание торона из грунта. При открытом и закрытом положениях камеры производят измерение количества импульсов от β - и γ -излучения, а затем ППР определяют из выражения

$$q_{Rn} = \frac{\lambda}{\varepsilon S(1 - e^{-\lambda t_2})} \left(\frac{N}{t_2} - \frac{N_f}{t_1} \right), \quad (5)$$

где N – измеренное суммарное количество импульсов за время t_2 , имп.; N_f – измеренное фоновое значение количества импульсов за время t_1 , имп.; ε – поправочный коэффициент, который включает эффективность регистрации счетчика, геометрический фактор и коэффициент перевода скорости счета импульсов в единицы активности, имп. с^{-1} Бк $^{-1}$; S – площадь основания накопительной камеры, м 2 ; λ – постоянная распада радона, с^{-1} ; t_1 – время измерения фона, с; t_2 – время накопления радона, с.

Сделан вывод о том, что характеристики разработанных приборов удовлетворяют предъявляемым требованиям и позволяют с высокой частотой дискретизации данных и приемлемой для решения такого рода задач погрешностью производить мониторинг ППР и ППТ с поверхности грунта.

3 глава посвящена разработке методов контроля характеристик диффузионного и адвективного переноса радона в приповерхностных слоях литосферы. В разделах 3.1–3.3, на основе результатов анализа существующих методов контроля скорости адвективного переноса радиоактивных газов в грунте, выявленных у них недостатков, а также по результатам численных

экспериментов по исследованию влияния скорости адвекции на величины ППР и ППТ и их соотношение: а) исследовано влияние различных геологических и погодных условий на зависимости плотности потоков радона и торона, а также их соотношения от величины скорости адвекции; б) получено, что величина плотности потока радона существенно реагирует на изменение скорости адвекции, превышающей по модулю 10^{-4} см/с; в) установлено, что плотность потока торона, в отличие от радона, практически не зависит от скорости адвекции, что объясняется коротким периодом жизни торона, и определяется, в основном, физико-геологическими параметрами грунта и его влажностью; г) выявлено, что при преимущественном диффузионном переносе радиоактивных газов в грунте между отношением плотностей потоков торона и радона и отношением удельных активностей ^{232}Th и ^{226}Ra в грунте существует линейная зависимость; д) получено, что поскольку ниже глубины ~ 10 см ОА торона в грунте является постоянной во времени величиной, торон не будет вносить помех при регистрации динамики почвенного радона по α - или β -излучению, это позволит существенно упростить процедуру мониторинга почвенного радона, заменив сложные и дорогие приборы, основанные на спектрометрическом анализе, на детекторы ИИ, работающие в счетном режиме; е) сделан вывод о том, что контроль ППТ с поверхности грунта может являться индикатором изменения влажности грунта, и наоборот, контроль влажности грунта может заменить собой контроль плотности потока торона.

На основе развития идеи об одновременном контроле величин ППР и ППТ с поверхности грунта, в сочетании с анализом результатов численных расчетов по диффузионно-адвективной модели переноса радона и торона в пористых средах, был создан новый метод контроля скорости адвекции почвенных радиоактивных газов в более широком диапазоне значений, чем методы-аналоги, вплоть до десятков см/с.

Согласно методу, на исследуемом участке измеряют плотности потоков радона и торона с поверхности грунта и удельные активности ^{226}Ra и ^{232}Th в поверхностном слое грунта, а затем скорость адвекции определяют из выражения

$$v = \sqrt{\frac{D_e}{B(B-1)(\lambda_{Tn} - \lambda_{Rn} B)}} \cdot (\lambda_{Tn} - \lambda_{Rn} B^2), \quad (6)$$

где $B = \frac{q_{Tn}}{q_{Rn}} \cdot \frac{A_{Ra}}{A_{Th}}$; q_{Tn} и q_{Rn} – плотности потоков торона и радона, соответственно, Бк $\text{м}^{-2} \text{с}^{-1}$; A_{Ra} и A_{Th} – удельные активности радия-226 и

тория-232 в грунте, Бк кг⁻¹; D_e – эффективный коэффициент диффузии радона/торона, м² с⁻¹; λ_{Tn} и λ_{Rn} – постоянные распада торона и радона, соответственно, с⁻¹.

Измеряемые значения плотностей потоков радона и торона автоматически учитывают адвективный перенос почвенных газов в реальных климатических и погодных условиях и физико-геологические свойства грунтов. Использование в данном методе величин ППР и ППТ позволяет избавиться от ограничений на верхнюю границу диапазона оценок скорости адвекции. Для реализации метода параметр B должен удовлетворять условию $1 < B < \lambda_{Tn}/\lambda_{Rn} = 5937$. На практике это условие всегда выполняется для всего многообразия пород и грунтов. Предлагаемый метода контроля скорости адвекции почвенных радиоактивных газов позволяет измерять скорость адвекции вплоть до десятков см/с, если таковые существуют на практике.

Почвенные газы всегда содержат радиоактивные газы радон и торон, которые являются продуктами распада содержащихся в земной коре радионуклидов ²²⁶Ra и ²³²Th. В разработанном методе измерения скорости адвекции почвенных газов радон и торон являются удобными для измерений индикаторами, а их совместное использование с привлечением диффузионно-адвективной модели переноса позволяет определять скорость адвекции из простого аналитического выражения (6).

Предложенный метод не содержит погрешности, связанные с определением плотности и пористости грунта, которые в реальной ситуации являются функциями глубины. К тому же, в данном методе, в отличие от своих аналогов, не требуется бурения скважин для измерения объемной активности радона и торона в почвенном воздухе, что существенно упрощает процедуру измерения скорости адвекции.

В разделах 3.4–3.5 по результатам анализа разработанных ранее методов контроля эффективного коэффициента диффузии радона (торона) в грунте в полевых условиях, выявлена их весьма ограниченная пригодность для целей длительного автоматизированного контроля, и показана необходимость в разработке нового простого и достоверного метода контроля эффективного коэффициента диффузии радона и торона в грунте, лишенного недостатков своих аналогов.

Приведено описание разработанного метода контроля эффективного коэффициента диффузии радона (торона) в грунте в полевых условиях. Метод основан на следующих положениях. Физико-химические свойства радиоактивных газов радона и торона практически не отличаются, поэтому

коэффициенты диффузии радона и торона являются при одних и тех же условиях одинаковыми. Из-за различий в ядерно-физических характеристиках радона и торона, а именно, в периодах полураспада, торон обладает большим преимуществом для использования его в новом методе измерения, по сравнению с радоном. Численными экспериментами показано, что ППТ с поверхности грунта практически не зависит от скорости адвекции v почвенных газов (не более 2,6% в широком диапазоне значений $0 < v < 10^{-3}$ см/с) и изменяется только с изменением коэффициента диффузии. Таким образом, в новом методе можно использовать диффузионную модель переноса изотопов радона в пористых средах. Согласно методу на исследуемом участке измеряют ППТ с поверхности грунта, объемную активность торона в почвенном воздухе на глубине не менее 15 см и пористость грунта, а затем эффективный коэффициент диффузии радона и торона в грунте определяют из простого аналитического выражения

$$D_e = \left(\frac{q_{Tn}}{\eta \cdot A_{Tn}} \right)^2 \cdot \frac{1}{\lambda_{Tn}}, \quad (7)$$

где q_{Tn} – плотность потока торона с поверхности грунта, Бк м⁻² с⁻¹; A_{Tn} – объемная активность торона в почвенном воздухе, Бк м⁻³; D_e – эффективный (объемный) коэффициент диффузии радона и торона, м² с⁻¹; η – пористость грунта, отн. ед.; λ_{Tn} – постоянная распада торона, с⁻¹.

Таким образом, предлагаемый метод контроля эффективного коэффициента диффузии радона и торона в грунте является: 1) простым, постольку не требует использования мощного источника радона и специального устройства для мгновенного ведения радона на заданную глубину грунта; 2) достоверным, поскольку не содержит погрешностей, связанных с влиянием скорости адвективного переноса почвенных газов на результат измерения; 3) пригодным для использования в длительном автоматизированном мониторинге. При использовании «мгновенных» методов контроля ППТ и ОА торона, разработанный метод позволит производить контроль внутрисуточных вариаций эффективного коэффициента диффузии радона и торона в грунте.

В главе 4, в разделе 4.1, произведен анализ степени влияния радиоактивного равновесия между изотопами радона и их ДПР в приземной атмосфере на выбор приборов контроля объемной активности радона. Представлены оценки степени влияния метеорологических факторов на нарушение радиоактивного равновесия, которые произведены с

использованием модели переноса радиоактивных газов и аэрозолей (1, 2).

Получено, что сдвиг радиоактивного равновесия между радоном и ДПР в приземной атмосфере определяется совокупным влиянием нескольких факторов, а именно: высотой над земной поверхностью; скоростью вертикальной компоненты ветра; коэффициентом турбулентной диффузии; количеством осадков. Усиление турбулентности и вертикальной составляющей скорости ветра, направленного к земной поверхности увеличивает сдвиг радиоактивного равновесия. Анализ полученных в данной работе результатов позволил оценить погрешность оценок коэффициента равновесия F_{Rn} и активности радона в приземной атмосфере, полученных аспирационным методом, и установить, что, в зависимости от погодных условий, погрешность оценок ОА радона может достигать до 75%.

На основе результатов произведенных оценок было решено к разрабатываемому универсальному комплексу контроля добавить радиометры аэрозольных продуктов распада радона и торона, так называемые радиометры ЭРОА радона.

В разделе 4.2 приведено описание разработанного универсального комплекса непрерывного контроля характеристик радоновых полей (ОА изотопов радона и их ДПР, ППР и ППТ, коэффициент равновесия между радоном и ДПР) по вторичному ионизирующему излучению (плотности потоков и мощности поглощенных доз α -, β - и γ -излучений) в системе «грунт-атмосфера» на экспериментальной площадке ТПУ-ИМКЭС на территории г. Томска.

С конца 2008 г. ведется одновременный контроль характеристик полей ИИ на серии высот 10 см, 1, 5, 10 и 25 м в приземном слое атмосферы, и на серии глубин 50 см, 1 и 5 м в грунте, согласно схеме, приведенной на рисунке 5. Экспериментальная площадка (рисунок 5) расположена во внутреннем дворе ИМКЭС, г. Томск, огороженная металлическим забором и просматривается тремя видеокамерами в режиме реального времени, и продолжается на мезонине здания. Универсальный комплекс включает лабораторный стенд «AtRad», состоящий из стандартной метеорологической мачты высотой 10 м, к которой прикреплены газоразрядные счетчики β - и γ -излучений (СТС-6 или СБМ-19). К каждому из 4-х газоразрядных счетчиков, измеряющих β + γ -излучение, расположенных на метеорологической мачте на 4-х высотах, добавлены однотипные счетчики, закрытые алюминиевым и пластиковым корпусами, и измеряющие только γ -излучение. Таким образом, по разности скорости счета импульсов между парными счетчиками,

расположенными на одной высоте, можно выделять "чистый" β -фон, и одновременно получать временные ряды данных о γ - и β -излучениях с частотой дискретизации 2 мин.

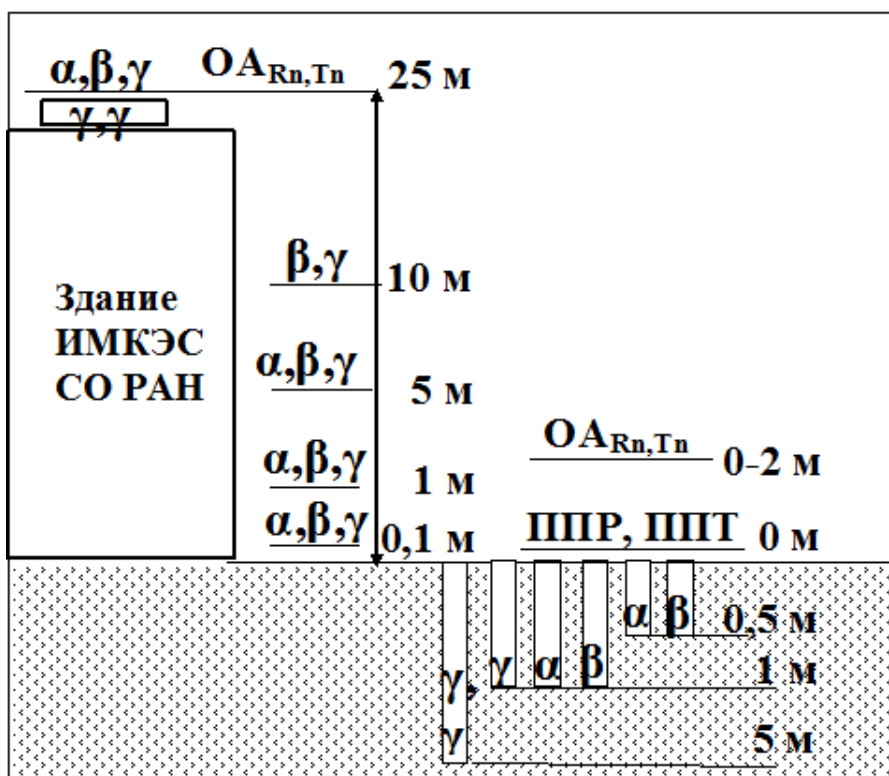


Рисунок 5 – Схема скоординированного многофакторного эксперимента по непрерывному контролю характеристик полей радона и ионизирующих излучений в системе «грунт-атмосфера»

Для контроля почвенного радона по α -излучению выбрали высокочувствительные сцинтилляционные интеллектуальные блоки детектирования БДПА-01, поскольку они работают в широком диапазоне температур от - 30 до + 50°C, и относительной влажности – вплоть до 98%. Эти же блоки БДПА-01 установили на метеомачту для контроля динамики атмосферных полей α -излучений. Контроль ОА изотопов радона, дочерних продуктов их распада, ЭРОА, коэффициента равновесия между радоном и ДПР производили с использованием переносных приборов радиационного контроля: радиометры радона РРА-01М-03; радиометр радона РГА-06П; радиометр ЭРОА радона РАМОН-01Н и радиометр ОА радона и торона и ДПР RTM 2200 (фирма SARAD, Германия).

Радиометры РРА, РГА и РАМОН предназначены только для разовых измерений при температуре окружающего воздуха выше 0 °C, и не могут быть использованы для целей длительного мониторинга без присутствия

оператора. Радиометр RTM 2200 полностью автоматизирован и модернизирован в морозоустойчивый вариант, т.е. помещен внутрь термостатического бокса с регулируемым обогревом. Этот радиометр использован для непрерывного контроля характеристик радонового атмосферного поля и установлен на стенке фургона на экспериментальной площадке ТПУ-ИМКЭС.

Мониторинг метеорологических, актинометрических и атмосферно-электрических величин (температура атмосферы, давление, относительная влажность, скорость и направление ветра, температура поверхности и подповерхностные температуры на серии глубин) в ИМКЭС СО РАН проводится с помощью автоматизированной информационно-измерительной системы. В её состав дополнительно входят измерители напряжённости электрического поля атмосферы Е «Поле-2», полярных электропроводностей атмосферного воздуха «Электропроводность-2» и уровня γ -фона. Приходящая солнечная радиация измеряется пиранометром Kipp & Zonen CM-11 и фотометром NILU-UV-6T. Измерения – непрерывные, с тактом 1 минута. Параллельно, измерения основных метеопараметров и характеристик турбулентности с тактом в 1 минуту ведутся с помощью двух ультразвуковых метеостанций АМК-3, расположенных над северным и южным торцами крыши здания.

Проведенный после предварительных экспериментов анализ технического состояния и отказов в работе отдельных узлов универсального комплекса контроля позволил установить: а) газоразрядные счетчики при их эксплуатации в жестких климатических условиях Сибири имеют среднюю продолжительность работы до отказа не более 1 года; б) торцевые счетчики, β -излучений имеют среднюю продолжительность работы до отказа не более 0,5 года; в) высокую чувствительность электроники к изменению температуры окружающей среды (что приводит к дрейфу пиков на спектрограмме излучения). По результатам возникла необходимость модернизации измерительного комплекса и расширения охвата высот контроля, поэтому были дополнительно установлены высокочувствительные сцинтилляционные интеллектуальные блоки детектирования β -излучений БДПБ-01 на высотах 10 см, 1, 5, 25 и 35 м, и на глубинах 0,1, 0,2, 0,5 и 1 м, блоки детектирования γ -излучений БДКГ-03 на высотах 1, 5 и 25 м и на глубине 0,5 м, блоки детектирования α -излучения БДПА-01 на высоты 30 и 35 м, 2 новых прибора непрерывного контроля плотности невозмущенного потока радона с поверхности грунта по α -излучению, на основе

динамических накопительных камер и встроенных в верхнюю часть НК блоков БДПА-01, чувствительная поверхность которых расположена в одном – на 5 см, в другом – на 10 см от поверхности грунта.

В разделах 4.3–4.4 описаны результаты калибровки детекторов ИИ, установленных в атмосфере и грунте, а также приборов контроля плотности потоков радона и торона с поверхности грунта. Для калибровки почвенных α - и β -сцинтилляционных детекторов, установленных на глубинах 0,5 и 1 м, предназначенных для мониторинга ОА радона в почвенном воздухе использован радиометр радона, основанный на полупроводниковой альфа-спектрометрии (фирма SARAD, Германия). Установлено, по данным длительного контроля в почве с целью выявления наиболее пригодного для радонового мониторинга вида излучения, следующее. В целом, α -поле на глубинах 0,5–1 м плохо отражает динамику радонового поля, как в плане суточного хода, так и амплитуды вариаций, а в отдельные интервалы наблюдается опережение суточного хода радона вплоть до асинхронного. Хорошая согласованность в динамике плотности потока α -излучений на разных глубинах наблюдается только тогда, когда температура положительна и отсутствуют осадки. В основном, α -поле отражает лишь изменения средних за 1–2 сут. значений ОА радона с погрешностью $\sim 30\%$, однако, при аномальных изменениях ОА радона (реакция на высокоинтенсивные осадки), поле α -излучения также реагирует аномальным изменением.

Выявлена хорошая согласованность в динамике плотности потока (ПП) β -излучения и ОА радона на глубинах 0,5–1 м, как на внутрисуточном, так и синоптическом масштабах, однако, в отдельные дни зарегистрирован небольшой временной сдвиг между рядами.

Получено, что зависимость между ПП β -излучения и ОА радона в грунте не линейная. Поэтому, для определения поправочного коэффициента K_β потребовалась следующая схема. Значения скорости счета импульсов β -детектора (N_β) были разделяли на 2 части: а) постоянная ($N_{\beta s}$), обусловленная почвенными радионуклидами, не относящимися к радоновой компоненте; и б) переменная ($N_{\beta Rn}$), обусловленная β -излучающими радионуклидами радоновой цепочки распада, содержащимися в воздухе скважины и 5 см слое грунта в нижнем открытом основании скважины. Суммарную скорость счета импульсов определяли как $N_\beta = N_{\beta s} + N_{\beta Rn}$, а ОА радона рассчитывали из выражения $OA_{Rn}(i) = (N_\beta(i) - N_{\beta s}) \cdot K_\beta$. Постоянная для одной точки контроля составляющая $N_{\beta s}$ зависит от физико-геологических характеристик исследуемого участка, расстояния от детектора до поверхности грунта,

площади чувствительной поверхности детектора и диаметра скважины.

В периоды, когда наблюдается ярко выраженный суточный ход во временных рядах, максимумы в суточном ходе ОА радона на разных глубинах наступают с задержкой по времени между рядами: на глубине 0,5 м – в ~ 16 –18 ч, а на глубине 1 м – в ~ 24 ч. Для β -излучений максимумы в рядах ПП на глубинах 0,5 м и 1 м наблюдаются чаще всего в одно и то же время вечером ($\sim 19:00$), а минимумы – около 7:00 утра, однако амплитуда вариаций на большей глубине (1 м) – меньше.

Показано, при анализе возможностей замены параметра измерения – ОА радона:

- на ПП β -излучения – при проведении мониторинга с целью изучения задач переноса почвенных газов в грунте, газообмена с атмосферой, прогноза землетрясений такая замена является вполне оправданной;

- на ПП α -излучения – может привести к большим сложностям в расшифровке данных мониторинга, однако также может оказаться оправданной при использовании в целях прогнозирования опасных природных явлений.

В разделе 4.5. предложены рекомендации к условиям и процедуре проведения калибровки детекторов ионизирующих излучений, устанавливаемых в скважины и используемых для контроля почвенного радона в режиме мониторинга.

В главе 5 описаны результаты апробации универсального комплекса непрерывного контроля характеристик радоновых полей по вторичному ионизирующему излучению в зависимости от состояния и изменчивости системы «литосфера-атмосфера», полученных в период с 2008 по 2013 гг. на экспериментальной площадке ТПУ-ИМКЭС, и произведен их анализ.

В разделе 5.1 представлены результаты синхронного мониторинга почвенного радона по создаваемым потокам α -, β - и γ -излучений на разных глубинах до 5 м, анализ временных рядов данных, установлена форма суточных вариаций полей излучений разного вида, проанализировано влияние смены сезонов года на динамику почвенного радона.

Получено, что в суточном ходе ОА радона на разных глубинах максимумы на глубине 0,5 м регистрируется приблизительно в 16–18 ч, а на глубине 1 м – в 24 ч. По величине задержки в наступлениях максимумов на разных глубинах оценена скорость диффузионно-адвективного переноса радона в грунте, которая составила $17 \cdot 10^{-4}$ см/с, что почти в 3 раза выше скорости движения радона только за счет молекулярной диффузии ($6 \cdot 10^{-4}$

см/с для исследуемого типа грунта).

В разделе 5.2 представлены и обсуждаются результаты апробации разработанных прямых методов контроля плотности потоков радона и торона с поверхности грунта в длительном эксперименте, приводится сравнение результатов контроля прямыми и косвенными, по измеренным в почвенном воздухе значениям ОА радона на разных глубинах, методами.

Выявлены особенности и закономерности в динамике величины ППР. В течение года, и из года в год хорошо прослеживается сезонный ход величины ППР, при этом максимальные значения наблюдаются в осенний период, в конце лета, и перед началом таяния снега, а минимальные значения – в зимний сезон. Аномалии в рядах ППР связаны с установлением и сходом снежного покрова, форма и длительность которых определяется погодными условиями (рисунок 6). Выявлена сильная временная изменчивость величины ППР в точке контроля более, чем на один порядок величины в течение года. Установлено, что суточные вариации ППР начинают проявляться после таяния снега, и продолжаются до наступления заморозков. В условиях хорошей погоды в динамике ППР наблюдаются максимум – в полночь и минимум – в полдень.

По результатам апробации разработанных приборов контроля ППР и ППТ на экспериментальной площадке ТПУ-ИМКЭС было получено хорошее согласие между данными. На основе анализа надёжности работы приборов в полевых условиях в течение 2010–2013 гг, было сделано заключение, что для целей непрерывного длительного контроля более предпочтительны приборы контроля плотности невозмущенного потока радона с динамической НК.

В разделе 5.3 представлены результаты длительного непрерывного контроля объемной активности изотопов радона и короткоживущих продуктов их распада, а также создаваемых ионизирующих излучений в приземной атмосфере. Определено, что диапазон изменения ОА радона в атмосферном воздухе на высоте ~ 1 м составляет от 1 до 55 Бк/м³, что сопоставимо с ОА радона в жилых многоэтажных кирпичных и панельных зданиях. Выявлено, что средний суточный ход ОА радона имеет максимум в предрассветные часы и минимум в (17–18) часов местного времени, в весенние месяцы средние значения ОА радона в 3 раза меньше чем в сентябре. Установлено, что мгновенные значения коэффициента радиоактивного равновесия между радоном и ДПР F_{Rn} могут изменяться в довольно широких пределах от 0 до 1 и более, при этом среднее значение F_{Rn} за весь период наблюдений составило 0,2, что существенно отличается от

среднегодовых значений, экспериментально определенных внутри помещений жилых зданий 0,4–0,5. Установлена значимая связь между активностью радона, аэрозольных продуктов распада радона (ЭРОА) и плотностью потоков α - и β -излучений на 1 м в отсутствие осадков для теплого периода года.

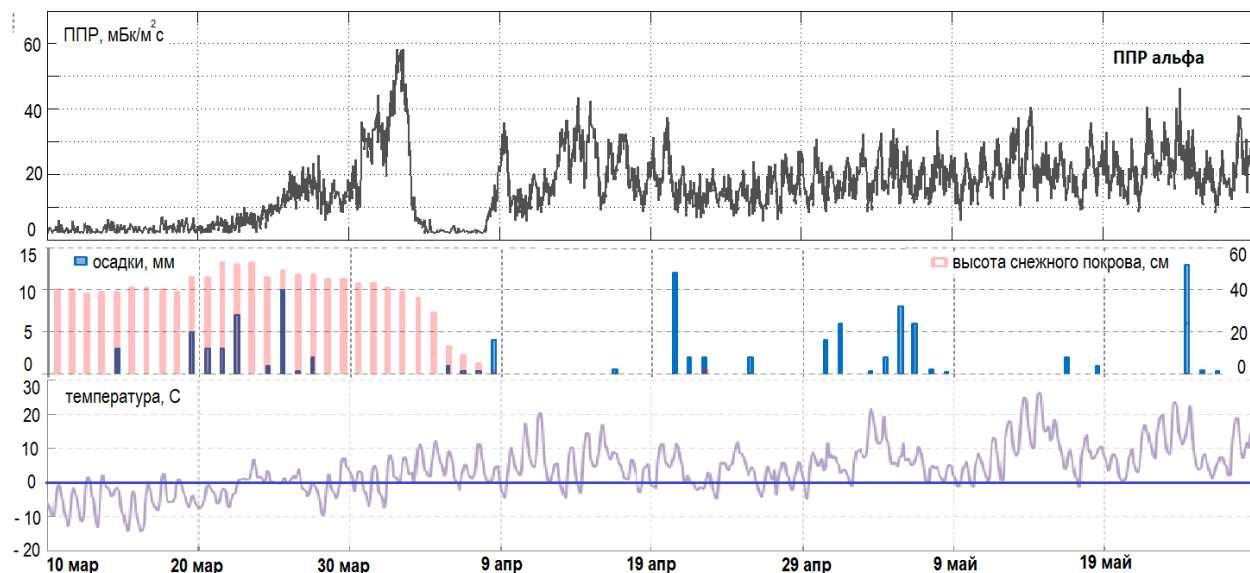


Рисунок 6 – Динамика плотности потока радона и метеорологических величин весной 2012 г.

В разделе 5.4 описаны результаты анализа взаимосвязей между характеристиками почвенных и атмосферных полей α -, β - и γ -излучений и метеорологических величин в зависимости от состояния и изменчивости системы «литосфера-атмосфера». Выявлено, что на синоптическом и более длительных масштабах между уровнями β - и γ -фона существуют высокие значения взаимной корреляции в зимних условиях и низкие – летом. Показано, что годовой ход β -фона изменяется от года к году, в отличие от γ -фона, для которого максимум наблюдается в ноябре, а минимум в феврале-марте.

В долгосрочном эксперименте было обнаружено, что снежный покров изменяет вертикальный профиль β - и γ - полей, в зимний период проявляется обратная зависимость величины плотности потока β -излучения от высоты, т.е. ее увеличение с ростом высоты. Получено, что на временных масштабах от синоптического до годового вариации γ -фона тесно связаны с изменениями атмосферного давления: уменьшение атмосферного давления на временных масштабах от синоптического до годового приводит к согласованному росту уровня γ -фона. Вариации β -фона оказываются

сравнительно слабо связанными с вариациями атмосферного давления синоптического масштаба и тесно связанными с суточными вариациями электропроводности атмосферы, её температуры, плотности и давления водяного пара.

Выявлено, что высокоинтенсивные дождевые осадки более 20–30 мм вызывают аномальные всплески не только в атмосферном β - и γ -фоне, но и почвенном α - и β -фоне до глубин 1 м. Длительность всплесков в атмосферном фоне составляет несколько часов, не зависит от высоты и количества осадков, а в грунте – может достигать нескольких суток, сильно зависит от глубины и количества осадков. Слабоинтенсивные осадки вызывают всплески в атмосферном β - и γ -фоне практически той же длительности в несколько часов, но меньшей величины, которая слабо зависит от интенсивности осадков, а также нарушают стандартный «суточный ход» ОА аэрозольных продуктов распада радона и торона в атмосфере снижая их активность, но в пределах наблюдаемых до периода осадков вариаций. Выявлено, также, что слабоинтенсивные осадки заметно нарушают стандартный «суточный ход» почвенных потоков α - и β -излучений на глубинах 0,5 м, и приводят к их увеличению, но в пределах наблюдаемых до периода осадков вариаций.

Анализ результатов многофакторного эксперимента позволил сформулировать новую научную проблему в исследовании естественного радиационного фона – согласованности временных вариаций уровней различных видов ионизирующих излучений и влияния этого обстоятельства на окружающую среду.

В разделе 5.5 рассмотрена роль радона и торона в задачах электричества приземной атмосферы. Представлены результаты расчетов с использованием метода Монте-Карло плотности ионизации приземной атмосферы излучением радона, торона и продуктов их распада, а также почвенными радионуклидами. Показано, что интегральное значение плотности ионизации определяется ППР и ППТ с поверхности грунта, а форма вертикального профиля – текущим состоянием и изменчивостью атмосферы. Получено, что плотность ионизации, обусловленная излучением почвенных радионуклидов, не является постоянной величиной, сильно зависит от высоты, а так же таких факторов, как плотность, пористость, влажность грунта и соотношение удельных активностей радионуклидов ^{235}U , ^{232}Th , ^{226}Ra (^{238}U), ^{40}K и ^{137}Cs в приповерхностном слое грунта. Вклад в суммарную плотность ионизации, создаваемую излучением изотопов радона и их ДПР на высотах до 200 м

является доминирующим. Показано, что использование традиционного представления об ионизации приземной атмосферы излучениями почвенных радионуклидов в численных моделях электродного слоя может привести к завышению результата до двух порядков по величине на высотах до 25 м.

Заключение содержит основные результаты работы и выводы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В результате выполнения диссертационной работы все поставленные задачи выполнены в полном объеме, цель работы достигнута.

1. На основе результатов исследования особенностей переноса изотопов радона в системе «грунт-атмосфера» и определения роли радона в формировании суммарных атмосферных полей ионизирующих излучений разработаны методология синхронного мониторинга и универсальный комплекс непрерывного контроля характеристик радоновых полей по вторичному ионизирующему излучению в системе «грунт-атмосфера».

2. Разработаны новые методы и приборы контроля плотности потоков радона и торона с поверхности грунта по вторичному ионизирующему излучению, методы контроля скорости адвекции радона и торона в грунте и коэффициента диффузии радона и торона в грунте.

3. Впервые произведены оценки степени влияния метеорологических факторов на нарушение радиоактивного равновесия между изотопами радона и продуктами распада в приземной атмосфере, на основании которых рассчитаны погрешности результатов измерений объемной активности радона в приземной атмосфере аспирационными методами.

4. Выявлено, что вариации атмосферных и почвенных полей радона приводят к вариациям атмосферного γ - и β -фона, величина которых зависит от метеорологических условий и высоты над земной поверхностью.

5. Показано, что мониторинг ОА радона в почвенном воздухе по β -излучению является вполне оправданным, дает надежные и достоверные результаты, и может применяться для решения задач переноса почвенных газов в грунте, газообмена с атмосферой, прогноза землетрясений. Замена контроля ОА радона на плотность потока α -излучения может привести к большим сложностям в расшифровке данных, однако может быть оправданной в целях прогнозирования опасных природных явлений.

Благодарности. Автор считает своим долгом выразить благодарность заведующему кафедрой ПФ ФТИ ТПУ профессору А.П. Потылицыну и всему коллективу кафедры за предоставленные возможности заниматься научной работой, поддержку, доброжелательные советы и пожелания,

профессору П.М. Нагорскому за помощь в работе, бесценные научные консультации и плодотворные дискуссии. Автор благодарен профессорам В.А. Николаеву, В.И. Бойко, доцентам В.Д. Каратаеву и Н.К. Рыжаковой, в лице которых нашел своих первых наставников в науке и полевых исследованиях. Автор благодарен А.В. Вуколову и М.С. Черепневу за помощь в решении технических аспектов, А.А. Будаевой и Г.А. Яковлеву за поддержку, доброжелательные советы и пожелания. Автор признателен своим многоуважаемым коллегам из ИМКЭС СО РАН, КФ ГС РАН, ИКИР ДВО РАН, а так же всем тем, кто так, или иначе оказывал положительное влияние на становление и развитие взглядов автора не только по научным, но и по общечеловеческим проблемам.

Основные публикации по теме диссертации

1. Патент РФ на изобретение №2470328 от 07.07.11 «Способ измерения скорости адвекции почвенных газов», автор: Яковлева В.С. Оpubл. 20.12.2012 в Бюл. №35.
2. Патент РФ на изобретение №2470327 от 07.07.11 «Способ измерения эффективного коэффициента диффузии радона и торона в грунте», автор: Яковлева В.С. Оpubл. 20.12.2012 в Бюл. №35.
3. Патент РФ на изобретение №2419817 от 03.03.10. «Способ измерения плотности потока радона и торона с поверхности грунта по α -излучению», авторы: Яковлева В.С., Вуколов А.В.
4. Патент РФ на изобретение №2428715 от 27.05.10 «Способ измерения плотности потока радона с поверхности грунта по β - и γ -излучению», авторы: Яковлева В.С., Вуколов А.В.
5. Патент РФ на полезную модель №97540 от 12.04.2010. Устройство для измерения плотности потока радона и торона с поверхности грунта по α -излучению. Авторы: В.С. Яковлева, А.В. Вуколов.
6. Патент РФ на полезную модель №100295 от 29.07.10. Автоматизированное устройство для непрерывных измерений плотности потока радона и торона с поверхности грунта по β - и γ -излучениям. Авторы: Вуколов А.В., Яковлева В.С.
7. Патент РФ на изобретение №2212688 от 29.07.2002. Способ оценки плотности потока радона с поверхности земли. Авторы: Рыжакова Н.К., Яковлева В.С.
8. Патент РФ на изобретение № 2212689 от 29.07.2002 «Способ измерения установившейся равновесной объемной активности радона в почвенном воздухе», В.С. Яковлева, Н.К. Рыжакова.
9. Патент РФ на изобретение № 2239206 от 25.07.03. «Способ определения скорости конвекции почвенных газов» Яковлева В.С., Рыжакова Н.К.
10. Патент РФ на изобретение № 2239207 от 30.07.03. «Способ измерения коэффициента эманирования радона-222 в почвогрунтах». Рыжакова Н.К., Яковлева В.С.
11. Яковлева В.С., Рыжакова Н.К. Метод оценки плотности потока радона с поверхности земли по измеренной концентрации радона в почвенном воздухе // Аппаратура и новости радиационных измерений АНРИ. – 2002. – № 4. – С. 18–22.
12. Яковлева В.С., Рыжакова Н.К. Оценка скорости конвекции радона в грунтах по измеренным значениям поровой активности // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. – 2003. – №5. – С. 466–469.

13. Яковлева В.С., Каратаев В.Д. Критерии оценки потенциальной радоноопасности территорий // Радиационная биология. Радиоэкология. – 2004. – Т. 44. – № 2. – С. 227–231.
14. Яковлева В.С., Каратаев В.Д. Дозы облучения детей Томской области при ингаляционном поступлении радона-222 // Гигиена и санитария. – 2004. – № 4. – С. 60–61.
15. Яковлева В.С., Шмидт В., Хамел П., Бучродер Х., Гынгазова М.А. Осаждение короткоживущих продуктов распада радона-222 на твердые поверхности // Оптика атмосферы и океана. – 2005. – Т. 18. – № 05–06. – С. 520–524.
16. Яковлева В.С., Каратаев В.Д. Факторы, определяющие формирование объемных активностей радона внутри зданий // Радиационная биология. Радиоэкология. – 2005. – Т. 45. – № 3. – С. 333–337.
17. Яковлева В.С., Каратаев В.Д. Дозы облучения взрослого населения // Гигиена и санитария. – 2005. – №5. – С. 31–33.
18. Фирстов П. П., Широков В. А., Руленко О. П., Яковлева В.С., Исаев А. В., Малышева О. П. О связи динамики подпочвенного радона (^{222}Rn) и водорода с сейсмической активностью Камчатки в июле-августе 2004 г. // Вулканология и сейсмология. – 2006. – № 5. – С. 49–59.
19. Яковлева В.С., Каратаев В.Д. Плотность потока радона с поверхности земли как возможный индикатор изменений напряженно-деформированного состояния геологической среды // Вулканология и сейсмология. – 2007. – № 1. – С. 74–77.
20. Яковлева В.С. Диффузионно-адвективный перенос радона в многослойных геологических средах // Известия Томского политехнического университета. – 2009. – Т. 315. – № 2. – С. 67–72.
21. Яковлева В.С., Каратаев В.Д., Вуколов А.В., Ипполитов И.И., Кабанов М.В., Нагорский П.М., Смирнов С.В., Фирстов П.П., Паровик Р.И. Методология многофакторного эксперимента по процессам переноса радона в системе “литосфера–атмосфера” // АНРИ. – 2009. – №4. – С.55–60.
22. Яковлева В.С. Динамика радона, торона и продуктов их распада внутри накопительной камеры // Аппаратура и новости радиационных измерений. – 2010. – №2. – С.56–63.
23. Яковлева В.С. Анализ методов измерения плотности потока радона и торона с поверхности земли // Аппаратура и новости радиационных измерений. – 2010. – №3. – С.23–30.
24. Яковлева В.С. Моделирование влияния состояния атмосферы и литосферы на динамику плотности потока радона и торона с поверхности земли // Известия ТПУ. – 2010. – Т. 317. – №2. – С 162–166.
25. Яковлева В.С., Вуколов А.В. Способ совместного измерения плотности потоков радона и торона с поверхности грунта по α -излучению // Известия ТПУ. – 2010. – Т. 317. – №2. – С 167–170.
26. Зукау В.В., Яковлева В.С., Каратаев В.Д., Нагорский П.М. Ионизация приземной атмосферы излучением почвенных радионуклидов // Известия ТПУ. – 2010. – Т. 317 – № 2. – С. 171–175.
27. Яковлева В.С. Особенности совместного измерения плотности потоков радона и торона с поверхности пористых материалов // АНРИ №4 (63) 2010. – С.31–37.
28. Яковлева В.С., Санников Ф.А., Лужанчук Я.В. Моделирование переноса изотопов радона и дочерних продуктов распада в приземной атмосфере // Известия ВУЗов. Физика. – 2010. – Т. 53. – № 11/2. – С. 79–85.
29. Нагорский П.М., Ипполитов И.И., Смирнов С.В., Яковлева В.С., Каратаев В.Д., Вуколов А.В., Зукау В.В. Особенности мониторинга радиоактивности в системе

"литосфера-атмосфера" по β - и γ -излучениям // Известия ВУЗов. Физика. – 2010. – Т. 53. – № 11. – С. 55–59.

30. Нагорский П.М., Ипполитов И.И., Смирнов С.В., Яковлева В.С., Каратаев В.Д., Вуколов А.В., Лужанчук Я.В., Манаков А.В. Влияние направления воздушного потока на динамику атмосферных полей гамма- и бета-излучений // Известия вузов. Физика. – 2010. – т. 53. – № 11. – С. 51–54.

31. Яковлева В.С., Нагорский П.М., Зукау В.В., Лужанчук Я.В. Модель вертикального распределения плотности плазмы приземной атмосферы // Известия вузов. Физика. – 2010. – Т. 53. – № 11/2. – С. 86–88.

32. Яковлева В.С., Вуколов А.В., Нагорский П.М., Гвай И.А., Нейман Д.А. Исследование сдвига радиоактивного равновесия между изотопами радона и продуктами их распада // АНРИ. – 2011. – №3 (66). – С. 43–51.

33. Yakovleva V.S., Parovik R.I. Solution of diffusion-advective equation of radon transport in many-layered geological medium // Nukleonika. – 2010. – V. 55. – №4. – P. 601–606.

34. Yakovleva V.S. Radon and its decay products dynamics inside the accumulative chamber // Nukleonika. . – 2010. – V. 55. – №4. – P. 595–600.

35. Firstov P.P., Yakovleva V.S., Shirokov V.A., Rulenko O.P., Filippov Yu.A., Malysheva O.P. The nexus of soil radon and hydrogen dynamics and seismicity of the northern flank of the Kuril-Kamchatka subduction zone // Annals of Geophysics. – 2007. – V. 50. – № 4. – P. 547–556.

36. Yakovleva V.S., Borisov V.P. Comparative analysis of radon sources' impacts into total radon level indoors for Altai and Tomsk regions of Russian Federation // Radiation Measurements. – 2005. – № 40. – P. 682–685.

37. Yakovleva V.S. A theoretical method for estimating the characteristics of radon transport in homogeneous soil // Annals of Geophysics. – 2005. – V. 48. – № 1. – P. 195–198.

38. Iakovleva V.S., Ryzhakova N.K. A method for estimating the convective radon transport velocity in soils // Radiation Measurements. – 2003. – V. 36. – №1. – P. 389–391.

39. Iakovleva V.S., Ryzhakova N.K. Spatial and temporal variations of radon concentration in soil air // Radiation Measurements. – 2003. – V. 36. – № 1. – P. 385–388.

40. Яковлева В.С., Паровик Р.И. Численное решение уравнения диффузии-адвекции радона в многослойных геологических средах // Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки. – 2011. – №1 (2). – С. 44–54.

41. Яковлева В.С., Каратаев В.Д., Зукау В.В. Моделирование атмосферных полей γ - и β -излучений, формирующихся почвенными радионуклидами // Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки. – 2011. – №1 (2). – С. 64–73.

42. Яковлева В.С. Инструментальные методы радиационных измерений: Учебное пособие. - Томск: ТПУ, 2010. – 168 с.

43. Яковлева В.С. Методы определения объемной активности изотопов радона и продуктов распада в воздухе: Учебное пособие. - Томск: ТПУ, 2010. – 119 с.

44. Яковлева В.С. Методы измерения плотности потока радона и торона с поверхности пористых материалов: Монография. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. – 174 с.