

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего
образования
«Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

На правах рукописи

Зелинский Алексей Сергеевич

**РАЗРАБОТКА МЕТОДА ОЦЕНКИ ХАРАКТЕРИСТИК ЛИВНЕВЫХ
ОСАДКОВ ПО РАДИАЦИОННОМУ ФОНУ ПРИЗЕМНОЙ АТМОСФЕРЫ**

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

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
д. т. н., профессор
Яковлева Валентина Станиславовна

Томск — 2022

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1. МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ЖИДКИХ АТМОСФЕРНЫХ ОСАДКОВ.....	13
1.1 Характеристика жидких атмосферных осадков.....	13
1.2 Классификация методов измерений характеристик осадков	15
1.2.1. Механические осадкомеры	16
1.2.2. Дистанционное зондирование осадков	20
1.2.3. Оптические, термические, конденсаторные, акустические и вибрационные методы	23
1.2.4. Радиационные методы	25
1.3 Недостатки существующих методов и приборов контроля характеристик осадков.....	27
1.4 Заключение по главе	29
ГЛАВА 2. ДИНАМИКА ПРИЗЕМНОГО ГАММА-ФОНА, СПОСОБЫ РЕГИСТРАЦИИ И ФОРМЫ ОТКЛИКА.....	31
2.1 Аппаратура систем контроля атмосферного гамма-излучения.....	31
2.2 Основные факторы вариации приземного гамма-фона	33
2.2.1 Космическое излучение	33
2.2.2 Почвенное излучение.....	42
2.2.3 Суточная динамика объемной активности продуктов распада радона	52
2.3 Экспериментальная площадка и ее оборудование	54
2.4 Отклик гамма-фона на жидкие атмосферные осадки.....	55
2.5 Заключение по главе	59
ГЛАВА 3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ ПО ИНТЕНСИВНОСТИ ОСАДКОВ.....	61
3.1 Распределение дочерних продуктов распада радона в подоблачном пространстве	61
3.1.1 Математическая модель распределения радионуклидов по высоте атмосферы	62

3.1.2 Изменение объемной активности радионуклидов в зависимости от состояния атмосферы	64
3.1.3 Соотношение интегральных активностей Pb-214 и Bi-214 в зависимости от состояния атмосферы.....	68
3.2 Математическая модель динамики осажденных на земную поверхность продуктов распада радона	73
3.3 Метод восстановления мощности дозы гамма-излучения.....	76
3.4 Экспериментальная проверка метода	80
3.5 Заключение по главе	83
ГЛАВА 4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ЛИВНЕВЫХ ОСАДКОВ ПО ИЗМЕРЕННОМУ ГАММА-ФОНУ	85
4.1. Математическая модель, описывающую связь между средним-значением интенсивности осадков и активностями Pb-214, Bi-214.	85
4.2 Метод оценки характеристик ливневых осадков по радиационному фону приземной атмосферы.....	88
4.3 Экспериментальная проверка метода	92
4.4 Заключение по главе	97
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	98
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	100
ПРИЛОЖЕНИЕ А. Акт внедрения метода восстановления мощности дозы гамма-излучения	
ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Акт внедрения метода оценки характеристик ливневых осадков по радиационному фону приземной атмосферы	

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы существенно увеличилась частота опасных природных явлений: одни регионы страдают от аномальной жары, другие – от слишком суровых и снежных зим, непривычных для этих мест [1–4]. Во многих исследованиях активно изучаются тенденции глобального изменения климата, включающего увеличение средней годовой температуры, вызывающей таяние ледников и повышение уровня Мирового океана. Кроме потепления, происходит разбалансировка всех природных систем, что приводит к изменению режима выпадения осадков, температурным аномалиям и увеличению частоты возникновения экстремальных явлений таких, как ураганы, наводнения и засухи.

Важной частью экосистемы, отвечающей за формирование климата, является гидросфера. Состояние гидросферы напрямую связано с количественной характеристикой осадков, прогноз которой используется в хозяйственной деятельности человека и авиации. Для краткосрочного прогноза осадков нашло применение обучение нейронных сетей на основе радарных данных об эволюции облаков [5]. Алгоритмы наукастинга продолжают развиваться и требуют новые типы данных, не ограничиваясь радарной съемкой местности [6]. Востребованной для краткосрочного прогноза является информация о фактическом выпадении осадков на местности. И здесь разработчики совместно с бизнесом сталкиваются с нехваткой достоверных и подробных данных по местоположению и количеству выпавших осадков в реальном масштабе времени. Помочь в решении указанной проблемы смогла бы обширная сеть автоматических осадкомеров, но в нашей стране количество метеорологических постов существенно сократилось по сравнению с советским периодом. Решение может быть найдено при использовании приборов, изначально не предназначенных для таких задач. При этом с минимальными капиталовложениями. Такие приборы должны находиться на балансе различного рода предприятий и государственных учреждений. В постоянной эксплуатации и на периодическом обслуживании.

Оптимальными по предъявляемым требованиям, в том числе по доступности информации онлайн в режиме реального времени, являются автоматизированные системы контроля (мониторинга) радиационной обстановки (АСКРО). Эти системы, основанные на регистрации гамма-излучения, имеют перспективы расширения в связи с развитием тенденций на использование безуглеродной энергетики и возникновением нового энергетического кризиса в Евросоюзе, ожидаемым последствием которого является введение новых мощностей атомных электростанций.

Неоднократно замечен эффект резкого роста гамма-фона в периоды атмосферных осадков, причиной чему служит вымывание радиоактивных аэрозолей на земную поверхность [7, 8, 9, 10, 11]. Основными дозообразующими являются гамма-излучающие короткоживущие дочерние продукты распада радона-222 Рb-214 и Bi-214. Другие природные атомы, такие как дочерние радионуклиды торона, практически не влияют на величину мощности дозы, поскольку их активность в приземной атмосфере ~ на 2 порядка меньше, чем активность Рb-214 и Bi-214. При отсутствии информации об осадках резкое повышение гамма-фона может быть расценено как аномалия, связанная с развитием радиационного инцидента.

Для исключения ложного сигнала тревоги пункты АСКРО рекомендуется комплектовать осадкомерами и другими метеорологическими датчиками. Это существенно увеличивает затраты на возведение, эксплуатацию и обслуживание дополнительного оборудования.

С другой стороны, этот эффект может быть использован для оценки количества и интенсивности ливневых осадков по гамма-фону. Таким образом, не потребуется дополнительного дооснащения пунктов мониторинга осадкомерами. Поэтому исследования, направленные на разработку метода оценки характеристик ливневых осадков по радиационному фону приземной атмосферы, являются актуальными.

К тому же новый метод определения интенсивности осадков по гамма-фону может служить полезным инструментом для изучения химии и физики аэрозолей, принципов формирования облаков, тенденций в изменении климата, а также различных динамических процессов, включая влагообмен.

Степень разработанности темы

Исследованиям по взаимосвязи приземного гамма-фона и интенсивности осадков посвящено немалое количество работ отечественных и зарубежных ученых. Н. Такеучи предложена модель, делящая атмосферу на высоту облака и подоблачного пространства, которая позволяет прогнозировать изменение гамма-фона в дождливые дни. Для этого используется количество осадков, высота основания облака, концентрация радона в облаке и подоблачном пространстве с зависимостью от турбулентности [12]. Указанная работа осталась хорошим теоретическим исследованием и не нашла практического применения из-за множества входных данных и сложности их получения.

Д. Мориизуми с соавторами предложил использовать в дождевой воде соотношение Bi-214 к Pb-214 для определения времени зарождения и жизни облаков. Коллективом была установлена отрицательная корреляция этого времени с интенсивностью осадков [13]. В Канаде научная группа Дж.-Ф. Мерсье нашла связь между максимальным отклонением гамма-фона во время осадков и циркуляцией атмосферы, что позволяет предполагать «географическую родину» мигрирующей воздушной массы [14]. Наиболее результативное исследование взаимосвязи гамма-фона и интенсивности осадков было проведено в Италии группой К. Боттарди [15]. В исследовании была установлена связь между активностью осажденного Pb-214 и интенсивностью осадков. Результаты этой работы мало применимы при регистрации гамма-фона при помощи дозиметров из-за неспособности данных приборов разделять спектры излучений с выделением энергетических линий, принадлежащих Pb-214 .

Объект исследования – реакция гамма-фона на жидкие атмосферные осадки.

Предмет исследования – связь между гамма-фоном и характеристиками осадков.

Цель диссертационной работы – разработка метода определения интенсивности осадков по измеренному гамма-фону, а также метода восстановления гамма-фона по измеренной интенсивности осадков.

Основные задачи работы:

1. Разработать математическую модель динамики активности дочерних продуктов распада радона, осажденных на земную поверхность жидкими атмосферными осадками.

2. Исследовать формы отклика гамма-фона на жидкие атмосферные осадки и определить характерные отличительные признаки влияния осадков.

3. Разработать метод реконструкции гамма-фона в атмосфере по измеренной интенсивности осадков.

4. Разработать математическую модель, описывающую связь между средними значениями интенсивности ливневых осадков и максимальными значениями мощности амбиентного эквивалента дозы приземной атмосферы.

5. Разработать метод определения среднего значения интенсивности осадков по измеренной динамике мощности амбиентного эквивалента дозы приземной атмосферы и плотности потока радона.

Научная новизна диссертационной работы заключается в том, что:

1. Разработана математическая модель динамики активности дочерних продуктов распада радона, осажденных на земную поверхность жидкими атмосферными осадками, отличающаяся рассмотрением интегральных значений активностей в воздушном столбе. Модель позволяет определять естественную убыль радионуклидов радонового ряда из подоблачного пространства, а также будет полезна для исследования коэффициента вымывания аэрозолей осадками.

2. Разработан метод реконструкции гамма-фона, основанный на измерении интенсивности ливневых осадков, в котором вместо измерения вертикального градиента объёмной активности дочерних продуктов распада радона достаточно

знать плотность потока радона с поверхности грунта. Метод сможет позволить во время выпадения осадков определять наличие техногенного радиоактивного загрязнения атмосферы.

3. Разработана математическая модель, описывающая связь между средними значениями интенсивности ливневых осадков и максимальными значениями мощности амбиентного эквивалента дозы гамма-излучения приземной атмосферы, которая позволяет определять суммарное количество осадков, выпавших за эпизод дождя.

4. Разработан метод определения средних значений интенсивности и общего количества осадков, основанный на измерении динамики мощности амбиентного эквивалента дозы гамма-излучения и плотности потока радона с поверхности земли. Метод позволяет отбирать случаи, для которых применима разработанная математическая модель.

Практическая значимость работы заключается в том, что полученные результаты могут быть использованы в разработке систем сбора и обработки данных о ливневых атмосферных осадках по измеренной динамике гамма-фона. Результаты работы используются в ряде дисциплин, преподаваемых в отделении ядерно-топливного цикла инженерной школы ядерных технологий ТПУ, а также внедрены для контроля состояния окружающей среды в институте мониторинга климатических и экологических систем сибирского отделения Российской академии наук, г. Томск. (Акты внедрения №15323/14-366 и №15323/14-367 от 20.10.2021).

Методы исследования: При проведении исследований были использованы теоретические методы, такие как анализ и обобщение знаний справочной и научной литературы; эмпирический метод, заключающийся в наблюдении – получении и обработке сигналов, содержащих информацию о величине мощности дозы гамма-излучения, интенсивности, а также времени начала и окончания осадков и плотности потока Rn-222; математические методы исследования –

моделирование с использованием пакета прикладных программ Geant4, Wolfram Mathematica.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Математическая модель динамики активности дочерних продуктов распада радона, осажденных на земную поверхность жидкими атмосферными осадками, отличающаяся рассмотрением интегральных значений активности радионуклидов в воздушном столбе, учитывающая, что вымывание аэрозольных радионуклидов происходит только из подоблачного пространства.

2. Новый метод реконструкции гамма-фона, основанный на измерении интенсивности жидких атмосферных осадков, в котором вместо определения вертикального распределения объёмной активности дочерних продуктов распада радона по всей высоте подоблачного пространства достаточно определить величину плотности потока радона с поверхности грунта.

3. Математическая модель, описывающая связь между средними значениями интенсивности ливневых осадков и максимальными значениями мощности AMBIENTНОГО эквивалента дозы гамма-излучения в приземной атмосфере, которая позволяет определять суммарное количество осадков, выпавших за эпизод дождя.

4. Основанный на измерении динамики мощности AMBIENTНОГО эквивалента дозы гамма-излучения и плотности потока радона с поверхности земли оригинальный метод определения характеристик ливневых осадков: времени начала и окончания, среднего за один случай значения интенсивности, общего количества осадков.

Личный вклад автора заключается в участии на всех этапах работы: формулировка цели и задач работы; проведение теоретических и экспериментальных исследований; обработка и интерпретация полученных результатов; верификация, дополнение математических моделей, разработка метода; формулировка заключений и выводов; подготовка научных публикаций по теме исследования.

Достоверность результатов обеспечивается большим объемом экспериментальных данных, сходимостью теоретических и экспериментально полученных зависимостей, корректностью постановки задач и их физической обоснованностью, получением результатов, не противоречащих физике исследуемых процессов.

Апробация работы.

Материалы, вошедшие в диссертацию, были обсуждены на следующих российских и международных конференциях:

– V Международная научно-практическая конференция. «Физико-технические проблемы атомной энергетики и промышленности» (2010, Томск, Россия);

– V и X Юбилейные международные конференции. «Солнечно-земные связи и физика предвестников землетрясений» (2010, 2019 с. Паратунка, Камчатский край);

– V Международной научной конференции молодых ученых, аспирантов и студентов. «Изотопы: технологии, материалы и применение» (2018, Томск, Россия);

– «Аэрозоли Сибири» (2019, 2020 Томск, Россия);

– «Физико-технические проблемы в науке, промышленности и медицине. Российский и международный опыт подготовки кадров» (2020, Томск, Россия);

– XXII Всероссийская научная конференция с международным участием «Сопряженные задачи механики реагирующих сред, информатики и экологии» (2021, Томск, Россия).

Публикации: по тематике исследования опубликовано 8 работ, в том числе 5 статей в журналах из перечня ВАК, 3 статьи в международных журналах, индексируемых в базах данных Scopus и Web of Science, из них 2 статьи в журналах первого квартиля.

Структура диссертации.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, двух приложений и списка цитируемой литературы, содержащего 111 библиографических ссылок. Объем работы составляет 109 страниц и включает 38 рисунков, 13 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность тематики исследования, сформулированы цель и задачи исследования, представлены основные защищаемые положения, научная новизна и практическая значимость работы, обозначена структура научно-квалификационной работы.

В первой главе описываются существующие методы определения характеристик осадков: механические, оптические, термические, конденсаторные, акустические, вибрационные, дистанционного зондирования с использованием волн электромагнитного излучения с длиной от нескольких десятков нанометров до десятков метров; а также методы, основанные на измерении содержания влаги в почве. Приводятся результаты анализа существующих методов регистрации осадков. Делается вывод о целесообразности разработки метода определения характеристик осадков по гамма-фону.

Во второй главе описаны переменные компоненты гамма-фона, такие как космическое излучение, радиоактивность почв, динамика плотности потока радона и как следствие изменение объемной активности Pb-214 и Bi-214 в приземной атмосфере, увеличение фона, связанное с выпадением осадков.

В третьей главе показано влияние турбулентного перемешивания и вертикального движения воздуха на концентрацию радионуклидов Pb-214 и Bi-214 в атмосфере, представлена модель динамики осажденных на земную поверхность продуктов распада радона, а также алгоритм и метод восстановления мощности дозы гамма-излучения по интенсивности осадков и плотности потока радона.

В четвертой главе представлена математическая модель, описывающая связь между средними значениями интенсивности осадков и максимальными значениями мощности амбиентного эквивалента дозы в приземной атмосфере и метод определения средних за случай значений интенсивности и количества осадков.

В заключении сформулированы основные результаты диссертационной работы.

Автор выражает глубокую признательность и огромную благодарность научному руководителю д. т. н., профессору Валентине Станиславовне Яковлевой за предоставленные данные по плотности потока радона, неоценимую помощь при проведении диссертационного исследования и поддержку при подготовке к защите. Автор благодарит творческий коллектив соавторов научных работ, за слаженную работу; коллектив из Института мониторинга климатических и экологических систем СО РАН за предоставленные данные по осадкам и бесценные консультации по климатическим системам; Андрея Леонидовича Полюдина за консультации по климатическим и экологическим вопросам; а также коллег из Госкорпорации «Росатом», родных и близких за понимание и поддержку.

ГЛАВА 1. МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ЖИДКИХ АТМОСФЕРНЫХ ОСАДКОВ

В первом разделе главы дается определение осадков. Во втором разделе приводится классификация методов измерений характеристик осадков. В третьем разделе приведены некоторые недостатки, существующих методов определения характеристик осадков. В заключении, в качестве перспективного направления, выделена разработка методов оценки характеристик атмосферных осадков по вариации гамма-фона.

1.1 Характеристика жидких атмосферных осадков

Атмосферные осадки это вода в жидком или твердом состоянии, выпадающая из облаков или осаждающаяся из воздуха на поверхности земли и на предметах. Из облаков осадки выпадают в виде дождя, мороси (диаметром капель меньше чем у дождя), снега, мокрого снега, снежной и ледяной крупы, снежных зерен, града, ледяного дождя, ледяных игл. Непосредственно из воздуха выделяется роса, иней, жидкий налет, твердый налет, изморозь [16, 17, 18].

Осадки измеряются в миллиметрах толщины слоя воды выпавшей за определенный промежуток времени и в определенном месте.

Формирование облаков сопровождается охлаждением конвективных потоков воздуха, выносящих с поверхности земли атмосферную влагу. Ее дальнейшей конденсацией в мелкие облачные капли. По мере того как капли разрастаются, взаимодействуя друг с другом и облачной влагой, увеличивается их вес. Эти укрупненные капли воды уже не могут преодолевать силу гравитации благодаря нисходящему потоку воздуха и опускаются внутри облака, продолжая слияние и рост, выпадая из облака осадками.

Дождь – это осадки в виде капель воды со средним диаметром от 0,5 до 9 мм. При больших размерах капли имеют тенденцию разделяться. Капли имеют сферическую форму и называются облачными при диаметре менее 0,1 мм. По

мере увеличения размера дождевой капли ее форма становится более сплюснутой с наибольшим поперечным сечением, обращенным к набегающему воздушному потоку. Изменение формы и размера продолжается, пока капля не сформируется до состояния перевернутого парашюта. Дальнейшее увеличение капли приводит к ее разделению на несколько частей набегающим потоком воздуха. В любом дожде присутствуют капли всех допустимых размеров. Распределение капель по размерам описывается усредненным по осадкам экспоненциальным уравнением Маршалла-Палмера. В этом распределении количество капель определенного размера связано с интенсивностью осадков, которая выше для более крупных капель. Так на уровне моря без ветра капли диаметром 0,5 мм будут иметь скорость 2 м/с, в то время как большие капли 5 мм около 9 м/с. Отклонение размера капель дождя от распределения Маршалла-Палмера связано со многими условиями и наиболее часто встречается для размеров, измеренных в малые интервалы времени. Из соотношений диаметра капель, интенсивности осадков, водозапаса облаков просматривается природа обратной связи интенсивности и продолжительности. Осадки высокой интенсивности обычно кратковременны, а низкой имеют большую продолжительность [16, 17, 18].

Различают обложной, ливневой дождь, а также морось, имеющую диаметр капель (0,1–0,5 мм).

Моросящий дождь характеризуется минимальным количеством выпадающих осадков при наименьшем среднем диаметре капель, с интенсивностью не превышающей 0,01 мм/мин. Морось не приносит в гидрологию суши и почвы существенных изменений.

Обложной дождь характеризуется темными, закрывающими небо, обширными облаками, с продолжительностью в несколько часов, дней или недель. Интенсивность таких дождей невелика и составляет 0,04–0,06 мм/мин, но затяжной характер опасен для сельского хозяйства и экономики региона.

Конвективный дождь, или ливневые осадки, образуются из кучево-дождевых или кучевых облаков. Ливневые осадки выпадают на определенной

территории в течение относительно короткого времени, поскольку конвективные облака имеют ограниченную горизонтальную протяженность. Ливень начинается внезапно с быстро меняющейся интенсивностью. Довольно часто он сопровождается шквалистым ветром и грозами. Средний диаметр капель при ливне имеет максимальное значение, а его средняя интенсивность может превышать 1 мм/мин. К ливням относят дожди с интенсивностью, убывающей в зависимости от продолжительности дождя: более 0,50 мм/мин при продолжительности в 5 мин; более 0,23 мм/мин – 30 мин; более 0,20 мм/мин – 1 ч; более 0,09 мм/мин – 6 ч [16, 17, 18].

При сильных ливнях, продолжающихся в течение нескольких часов, может быть нанесен серьезный урон из-за наводнений, оползней, эрозии почвы. При этом стоит учесть, что именно интенсивность ливня, а не его продолжительность является более критическим параметром, так как почва имеет предел фильтрации, после превышения которого, на ее поверхности будет накапливаться слой воды, втягиваемый земной гравитацией. Для определения интенсивности дождя существуют различные методы ее измерения. Наиболее известным способом с 60-х годов прошлого века является использование записей Плювиографа.

Плювиограф в отличие от осадкомера Третьякова позволяет однозначно определять такие характеристики осадков как время начала и окончания. Методы измерений характеристик осадков не стоят на месте и на смену плювиографам приходят оптические, термические, конденсаторные, акустические, вибрационные и другие типы осадкомеров.

1.2 Классификация методов измерений характеристик осадков

Установки для измерения количества атмосферных осадков, выпавших за некоторые промежутки времени, называют осадкомерами или дождемерами.

В настоящее время известны следующие способы определения характеристик осадков: механические, оптические, термические, конденсаторные, акустические, вибрационные, дистанционного зондирования с использованием

волн электромагнитного излучения с длиной от десятков нанометров до нескольких метров, косвенное определение осадков по содержанию влаги в почве с использованием ионизирующего излучения. Надо полагать данное деление условным, так как методы регистрации осадков постоянно развиваются и то, что ранее регистрировалось, например, при помощи механически связанного системой рычагов пера, теперь может быть реализовано посредством тензометра с акустическим принципом регистрации деформации.

1.2.1. Механические осадкомеры

Примерами осадкомеров объемного типа являются: измерительные ведра (мерные цилиндры), поплавковые, водяные колеса, счетчики осадков ковшового типа (челночные) и т.д. [20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30].

К измерительному ведру относится осадкомер Третьякова (рисунок 1.2.1).



Рисунок 1.2.1. – осадкомер Третьякова

Осадкосборный сосуд представляет собой металлический цилиндр высотой 40 см, площадью 200 см^2 , который служит для сбора и накопления осадков. Измерение количества осадков производится ручным способом. Осадкомер позволяет регистрировать как жидкие, так и твердые осадки. Эта особенность и необходимость в сохранении тренда многолетних метрологических наблюдений приводит к тому, что на станциях гидрометеорологической сети этим прибором производится измерение осадков два раза в сутки: в 8 ч и 20 ч по местному времени.

К поплавковым осадкомерам относится плювиограф, представляющий самопишущий прибор, состоящий из трех основных узлов: приемника осадков, часового механизма с барабаном бумажной ленты, поплавковой камеры с поплавком и регистрирующим пером (рисунок 1.2.2).



Рисунок 1.2.2. – плювиограф

Принцип действия прибора состоит в сборе через приемник в поплавковую камеру осадков и регистрации уровня поплавка часовым механизмом на диаграммном бланке при помощи пера. При перемещении поплавка в верхнюю точку из камеры автоматически сливается вода и перо возвращается на нижнюю

отметку, что позволяет заново размечать изменение интенсивности осадков на часовой шкале. Плувиограф позволяет определить время начала, окончания дождя, изменение интенсивности и количество выпавших осадков.

Осадкомеры типа водяного колеса в свою конструкцию могут включать: желоб, имеющий впуск для сбора атмосферных осадков и выход для их сброса, водяное колесо, приводимое в движение водосбросом, счетчики поворотов на разных физических принципах [31].

Счетчики осадков ковшового типа (челночные) могут состоять из двух спаренных перегородкой ковшиков, которые во время опрокидывания совершают колебательные движения проходя через счетчик и поочередно сменяя друг друга под осадкоприемником (рисунок 1.2.3).



Рисунок 1.2.3. – Челночный осадкомер

Осадкомеры весового типа в упрощенной схеме представляют собой весы с чашей и по принципу действия напоминают работу Плувиографа (рисунок 1.2.4). В настоящее время у осадкомеров этого типа основным датчиком выступают весы различных физических принципов действия (рисунок 1.2.5), а подвижные части

заменены тензOMETрами с электрическими, оптическими, пневматическими, акустическими принципами регистрации деформаций, и отнесение их к механическим осадкомерам можно производить с большой натяжкой.

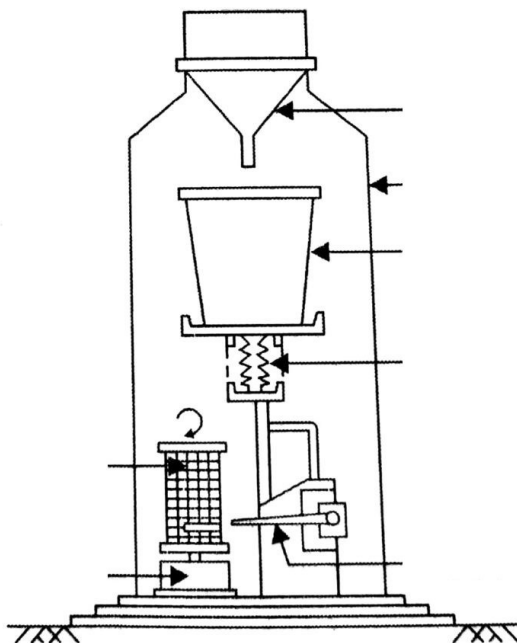


Рисунок 1.2.4 – Весовой датчик осадков, работающий по принципу плевниографа



Рисунок 1.2.5 – Весовой датчик измерения суммарных осадков оборудованный тензOMETром TRwS214

Для точного перевода веса к объему воды в данных осадкомерах могут использоваться микропрограммы, направленные на введение температурных поправок [32, 33, 34, 35, 36].

К преимуществам механических осадкомеров можно отнести: низкую стоимость изготовления, легкость использования, удовлетворительную разрешающую способность и устойчивость показаний при наличии ветра. Точность измерения, как правило, составляет $\pm 4\%$. Недостатки данных устройств обусловлены наличием подвижных элементов, а также испарением пробы при регистрации осадкомерами объемного типа.

1.2.2. Дистанционное зондирование осадков

Существующие методы как пассивного, так и активного спутникового и наземного микроволнового зондирования широко распространены для прогнозирования и учета осадков на континентах и в морях, так как позволяют проводить регулярное не зависящее от времени суток сканирование обширных территорий [37, 38]. Зачастую радиолокационное зондирование атмосферы производится с последующей идентификацией типа облачности по известным критериям и определение искомых параметров осадков с использованием корреляционных функций и данных радиолокационной отражаемости облаков [39, 40].

Спутниковое пассивное зондирование (микроволновая радиометрия) позволяет определять интенсивность осадков, влагозапас атмосферы и водозапас облаков, при помощи измерений поглощенной и испускаемой жидкостью атмосферы электромагнитной волны, над поверхностью океана имеющей коэффициентом излучения <1 . Суша, снег и лед обладают коэффициентом излучения ~ 1 и поэтому определение параметров атмосферы (в том числе и осадков) спутниковым пассивным зондированием над этими поверхностями достаточно затруднительно и не получило распространения. Твердые осадки в

виде снега и града, а также облака, содержащие их, не поглощают и не излучают радиацию, поэтому не могут быть обнаружены при микроволновом зондировании. Для активного зондирования могут использоваться радиолокаторы измеряющие с помощью эффекта Доплера линейные скорости газообразных и жидких сред, (рисунок 1.2.6), это позволяет с высокой точностью фиксировать опасные погодные явления, такие как смерч и ледяной дождь.



Рисунок 1.2.6 – Размещенный на земле доплеровский метеорологический радиолокатор

В настоящее время по всему миру находит широкое применение активное радиолокационное зондирование с использованием данных об уровне сигнала, полученных от коммерческих сетей сотовой связи (рисунок 1.2.7). В этом случае для определения характеристик осадков используется ослабленный дождем сигнал между соседними антеннами телефонных вышек. Обширность и развитость сетей сотовой связи является неоспоримым преимуществом. Но использование таких сетей для определения характеристик осадков имеет свои особенности, связанные с линейной направленностью и узкой пространственной фокусировкой межантенного сигнала, а также с 15-минутной частотой опроса

микроволновых каналов. Такую частоту многие телекоммуникационные компании считают достаточной для мониторинга работы сети сотовой связи [41].

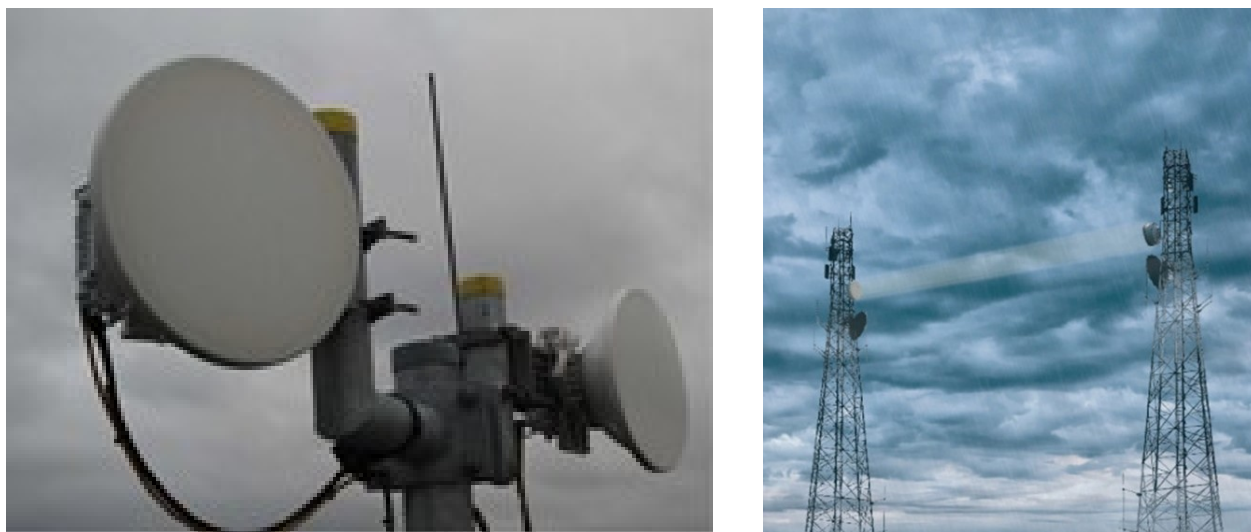


Рисунок 1.2.7 –Антенна микроволновой связи, слева и две соседние сотовые вышки во время дождя, справа

Наименее популярными становятся методы определения интенсивности осадков при дистанционном зондировании с борта самолета и с применением компьютерного зрения в камерах наблюдения. Хотя с развитием беспилотных летательных аппаратов и микроэлектроники появляются надежды на массовое возрождение данных подходов. На первой стадии бортового зондирования производится периодический анализ видеоизображения окружающей обстановки на предмет наличия помех, характерных для съемки в условиях осадков, и поиске таких шумов в видеопотоке, получаемом с помощью телевизионной камеры, установленной на борту летательного аппарата. Далее производится цифровая обработка изображений при помощи платы видеозахвата и бортовой вычислительной машиной, где к нему, для достижения технического результата, могут применяться следующие подходы: поиск векторов градиента функции изображения, построение ориентированной гистограммы двумерного поля градиентов функции изображения, определение преимущественного направления вектора градиента функции изображения, поиск границ, соответствующих преимущественному направлению вектора градиента функции изображения,

свертка изображения с двумерным вейвлетом-Хаара для детектирования линий, определение интенсивности осадков [42, 43].

1.2.3. Оптические, термические, конденсаторные, акустические и вибрационные методы

Оптические осадкомеры (рисунок 1.2.8) получают и анализируют формы и скорости капель по изображениям их теней [44, 45, 46]. Этот процесс происходит непрерывно при помощи оптических приемников при прохождении осадков через измерительную площадку. При высокой интенсивности осадков поток измерительной информации может достигать 40 Мб/с для одного измерительного канала [47]. Поэтому существует необходимость в использовании протяженных скоростных матриц (детекторов оптического излучения) и устройств регулировки потока данных [48]. Что может приводить к существенному удорожанию всей конструкции. Еще одной отличительной чертой работы оптических осадкомеров является привязка количества осадков к плотности объекта, создавшего тень на оптическом приемнике. Так как твердые и жидкие осадки, как правило, имеют разные плотности при одинаковых поперечных размерах.

Термические измерители параметров осадков (рисунок 1.2.9) включают в себя верхнюю тепловую пластину и окантовывающий бортик для улавливания осадков. Вторая тепловая пластина, с целью защиты от воздействия выпадающих осадков, расположена под верхней и используется для компенсации температуры атмосферы, влияния ветра. Кроме того, в конструкции для учета солнечной радиации присутствует датчик солнечного излучения. Во время дождя, на верхней и нижней тепловой пластине поддерживается постоянная температура и регистрируется расход электрической энергии для каждой из них. Скорость осадков измеряется разницей в расходе энергии для верхней и нижней пластины [49, 50].



Рисунок 1.2.8 – Оптический осадкомер Vaisala PWD22



Рисунок 1.2.9 – Термический осадкомер TPS-3100

Дождемеры конденсаторного типа не содержат движущихся частей и дополнительно позволяют измерять влажность окружающего воздуха. Осадки поступают в открытую тару с материалом, который поглощает осадки и имеет

диэлектрическую константу, меняющуюся в зависимости от объема поглощенной жидкости [51, 52, 53]. Некоторые виды дождемеров могут состоять из переменного сопротивления, помещенного между двумя электродами, имеющего пористый, влагопоглощающий, диэлектрический материал, который становится токопроводящим при увлажнении. Вода, поступая на диэлектрический материал, быстро поглощается, значительно уменьшая электрическое сопротивление между электродами. Это в свою очередь приводит к резкому возрастанию межэлектродного тока, который нагревает диэлектрик, тем самым испаряя воду. Количество требуемой мощности для выпаривания воды является мерой выпавших осадков [54].

Акустические методы основаны на попадании частицы осадков на акустический датчик или чувствительную область, что вызывает механический импульс, расположение и энергию которого можно измерить с достаточной точностью. Здесь, характеристика частицы определяется амплитудой и формой зарегистрированного сигнала, а общее количество осадков определяется суммированием вклада от каждой зарегистрированной частички [55, 56].

Вибрационные способы определения интенсивности осадков близки к акустическим и основаны на возникновении вибрации при попадании капель на поверхность осадкомера. В устройствах этого типа используется амплитуда и временные интервалы между зафиксированными ударами. Сигнал, возникающий от вибраций, пропорционален колебаниям поверхности. У вибросигнала определяются пики, а затем временные интервалы между пиками. Интенсивность дождя определяется с помощью уравнения, которое является производной нарастания вибросигнала [57, 58, 59].

1.2.4. Радиационные методы

Существующие радиационные методы определения количества выпавших осадков могут быть основаны на исследовании влагозапаса почв, а именно на установлении количественной связи между величиной выпавших осадков и

отличием влажности почвы до начала и после окончания дождя. То есть по аналогии применения алгоритмов оценки осадков на основе наблюдений за влажностью почвы [60]. Саму влажность почвы можно определять, используя, в том числе и нейтроны космических лучей. Ядерные методы, основанные на измерениях космических нейтронов, могут обеспечить надежный, относительно недорогой способ исследования содержания воды на площади формируемой радиусом ~300 м. Земля постоянно подвергается потоку заряженных частиц, поступающих из нашей галактики и от солнца, которые взаимодействуют с атмосферой земли и генерируют нейтроны, являющиеся вторичным космическим излучением. Чаще всего испускаются нейтроны с энергией несколько сотен МэВ. Они значительно замедляются благодаря реакции упругого столкновения и в итоге в энергетическом диапазоне 0,5 эВ – 20 МэВ становятся чрезвычайно чувствительными к водороду, практически игнорируя другие почвенные элементы, теряя значительную долю энергии при каждом столкновении. Таким образом, интенсивность потока тепловых и быстрых нейтронов становится отличным индикатором изменения уровня влажности почвы или других водоемов. Содержание влаги в почве связывают с потоком нейтронов с помощью калибровочной функции. Эта функция имеет три коэффициента, которые определяются ядерной физикой и не зависят от химического состава почвы. Составление калибровочной функции производят первично, измеряя поток нейтронов, с учетом стационарных источников воды в чувствительной зоне (близлежащие водоемы, лесные массивы, торфяники и т.д.) [61].

Гамма-излучение естественных радионуклидов почвы также может быть использовано для определения влагозапаса почвы. Ослабление этого излучения зависит от количества воды аккумулированной почвой, так как влажность почвы уменьшает количество регистрируемых импульсов за период.

При гамма-спектрометрии применяют излучение почвенных радионуклидов К-40 и Тl-208, так как их детектируемые энергетические линии мало зашумлены фоновой радиацией. Эти радионуклиды излучают фотоны с энергиями 1,460 и

2,613 МэВ соответственно. Для указанного энергетического интервала уровень радиоактивности земли практически постоянен. Наиболее часто при гамма-спектрометрии почвы применяют сцинтилляционные кристаллы, например, иодида натрия, легированного таллием (NaI(TL)). Кристаллы спектрометров оптически связаны с фотоумножителем, который усиливает поток выбитых электронов и формирует электрический сигнал. Программным обеспечением в коэффициент усиления вводится поправка на температурные колебания, и вычитается фоновое и космическое излучение [62]. Кроме определения величины осадков по влажности почвы через ослабление ионизирующего излучения, существует множество работ, направленных на получение прямых корреляционных связей между интенсивностью осадков и ростом гамма-фона из-за выпадения на поверхность земли радиоактивных дочерних продуктов распада радона. В этих исследованиях была получена хорошая корреляционная связь осадков с ростом приземной радиоактивности.

1.3 Недостатки существующих методов и приборов контроля характеристик осадков

Существующие датчики дождя (вибрационные, оптические, механические, акустические) имеют фиксированные области поверхностей для улавливания дождя и часто калибруются с учетом того, что дождь выпадает примерно параллельно оси датчика дождя, обычно перпендикулярно плоскости земли. Таким образом, эти приборы контроля достаточно точны для дождя, падающего вертикально, но по мере изменения угла падения дождя, количество осадков, захваченных прибором, уменьшится. Замечено, что в ливнях ветер часто меняет свое направление, при таких условиях возможны кратковременные практически горизонтальные направления движения капель возле приемного отверстия осадкомера, где будет регистрироваться добавочная величина осадков, близкая к нулю. Поле ветра вокруг прибора искажено препятствием, и это искажение приводит к изменению траектории движения капель воды. Этот эффект называют

аэродинамической ошибкой, ее величина зависит от условий ветра, размера падающих капель, типа осадкомера. Например, в абсолютно цилиндрическом приборе, это искажение сказывается на увеличении скорости ветра и изменении его направления над приемным отверстием, поэтому количество дождевых капель, попавших в цилиндрический осадкомер во время ветра, всегда меньше выпавшего [63, 64, 65, 66].

Кроме аэродинамической ошибки, осадкомеры воронкового типа, или имеющие проходное отверстие, могут подвергаться засорению листьями, пылью и насекомыми [67]. Такие засорения невозможно диагностировать с расстояния и как следствие, вызванные этим промахи, могут быть причиной срыва целого сезона дистанционного наблюдения за погодой.

Данные по осадкам, получаемые с помощью метеорологического радара, часто используются для визуализации местоположения и интенсивности осадков. Однако, из-за своих физических ограничений, метеорологический радар не в состоянии измерять осадки с очень низкой облачностью. Если дождевое облако находится далеко от радара, данные о фактической интенсивности и/или месте попадания осадков на землю могут содержать значительные ошибки. Кроме того, при дистанционном зондировании остается возможность испарения осадков до выпадения на землю, или их дрейф на расстояние до 100 км от предполагаемого места выпадения. Поэтому при дистанционном зондировании осадков, необходима плотная сеть наблюдательных постов для улучшения обработки радиолокационных сигналов, особенно в отношении обработки пороговых уровней шумов радиолокатора возле Земли. Достаточно плотная сеть может быть создана в густонаселенных районах при помощи телекоммуникационной сети. В этом случае для определения характеристик осадков используется ослабленный дождем сигнал между соседними антеннами телефонных вышек. Обширность и развитость сетей сотовой связи является преимуществом, но использование таких сетей для определения характеристик осадков имеет свои особенности, связанные с линейной направленностью и узкопространственной фокусировкой

межантенного сигнала, а также с частотой опроса микроволновых каналов, превышающей 15 минут, которую многие телекоммуникационные компании считают достаточной для проверки качества работы сети сотовой связи.

Из перечисленных в этой главе способов определения осадков, для организации автоматической сети станций при минимальных капиталовложениях и существующей инфраструктуре, наибольший интерес представляют системы, основанные на обработке видеоизображения. Это связано с тем, что видеокамеры стали повсеместно использоваться как на объектах городской застройки, так и на междугородних трассах. Однако преобладающим назначением систем наружного видеонаблюдения является контроль и поддержание уличного порядка, чем определена закрытость доступа к данным видеокамер. Запрещенный доступ к данным становится непреодолимой преградой для использования уличных видеокамер в качестве интегрированной сети осадкомеров.

1.4 Заключение по главе

Определение характеристик осадков по изменению гамма-фона будет выгодно отличаться от механических методов отсутствием подвижных частей, благодаря чему можно повысить надежность и срок эксплуатации аппаратной части. А сопоставление с многокомпонентной электроникой оптических осадкомеров обнаруживает, что в детекторах гамма-излучения используется простейшая электронная база, принципиальная схема которой существенно не изменилась с прошлого века.

По сравнению с конденсаторными, акустическими и вибрационными осадкомерами, детекторы гамма-излучения не требуют периодического обслуживания, не боятся внешних загрязнений, слабо реагируют на обледенение горизонтальных поверхностей и могут иметь защиту от неблагоприятных метеорологических явлений, выполненную в виде навеса. Кроме того, сбор информации гамма-детекторами от основных дозообразующих осажденных радионуклидов Pb-214 и Bi-214 происходит в радиусе ~ 300 м, что относит

определение характеристик осадков по гамма-фону к интегральным методам, а также увеличивает точность измерений во время сильных боковых ветров.

Сравнение метода определения характеристик осадков, основанного на измерении гамма-излучения с телевизионным лучше проводить, учитывая современные потребности бизнеса и общества. С первого взгляда системы, основанные на обработке видеоизображения, из-за массового распространения видеокамер в городской и загородной черте удобны для организации автоматической сети осадкомеров при минимальных капиталовложениях и существующей инфраструктуре. Однако, с другой стороны, системы наружного видеонаблюдения хоть и могут служить дополнительной для них цели детектирования выпадения осадков, в силу своей специфики остаются закрытыми для внешнего потребителя. Поэтому, вопрос о свободной передаче с таких систем информации, отнесенной к определению осадков, в открытый интернет, остается нерешенным. Во многих странах мира испытывается применение разветвленной сети телекоммуникационных антенн, но труднопреодолима незаинтересованность операторов сотовой связи в повышении точности и надежности определения характеристик осадков за счет увеличения потока служебной информации при изменении 15-минутной частоты опроса микроволновых каналов. Указанных недостатков избавлены системы, выполненные на элементной базе АСКРО и изначально предназначенные для информирования населения о величине текущей мощности дозы гамма-излучения. По результатам анализа достоинств и ограничений существующих способов определения характеристик осадков, метод, основанный на регистрации гамма-излучения, представляется достаточно перспективным.

ГЛАВА 2. ДИНАМИКА ПРИЗЕМНОГО ГАММА-ФОНА, СПОСОБЫ РЕГИСТРАЦИИ И ФОРМЫ ОТКЛИКА

В первом разделе главы приводится описание наиболее часто применяемых дозиметров в системах контроля радиационной обстановки. Во втором разделе описаны причины суточных, сезонных и связанных с одиннадцатилетним циклом солнечной активности, а также влажностью почвы, вариаций гамма-фона. Рассмотрено космическое излучение, почвенная радиоактивность, влияние барометрического эффекта и выхода радона с поверхности грунта. Приведены результаты численного моделирования гамма-фона создаваемого космическим излучением в зависимости от солнечной активности и сезона года. Далее представлены результаты численного моделирования излучения почвенных радионуклидов, показывающие снижение гамма-фона в зависимости от влажности почвы. Третий раздел знакомит с экспериментальной площадкой и ее оборудованием. В четвертом приведены результаты анализа многолетних измерений мощности абонентного эквивалента дозы гамма-излучения и интенсивности осадков. Выделены четыре отличительные формы обратной связи гамма-фона, позволяющие характеризовать изменение интенсивности жидких атмосферных осадков.

2.1 Аппаратура систем контроля атмосферного гамма-излучения

Аппаратура, используемая в системах автоматического контроля радиационной обстановки, должна удовлетворять требованиям автономности, безотказности, температурной и влагозащищённости, конечной стоимости датчиков гамма-излучения.

Из наиболее часто встречающихся современных датчиков (рисунок 2.1) можно выделить:

1. Детекторы на основе газоразрядных счетчиков. С диапазоном измерений $0,1 \text{ мкЗв/ч} \div 10 \text{ Зв/ч}$, регистрируемых энергий $0,05 \div 3 \text{ МэВ}$, и рабочих температур $-60 \div +80 \text{ }^\circ\text{C}$.
2. Детекторы на основе ионизационных камер. С диапазоном измерений $0,05 \text{ мкЗв/ч} \div 10^3 \text{ Зв/ч}$, регистрируемых энергий $0,05 \div 3 \text{ МэВ}$ и рабочих температур $-30 \div +120 \text{ }^\circ\text{C}$.
3. Детекторы на основе тканеэквивалентных пластмассовых сцинтилляторов. С диапазоном измерений $0,1 \text{ мкЗв/ч} \div 1 \text{ Зв/ч}$, регистрируемых энергий $0,015 \div 10 \text{ МэВ}$ и рабочих температур $-40 \div +5 \text{ }^\circ\text{C}$.



а)

б)

в)

Рисунок 2.1 – Датчики гамма-излучения: а) газоразрядный; б) ионизационный; в) сцинтилляционный

Каждый из этих типов датчиков имеет свои преимущества в определенных условиях. Детекторы с тканеэквивалентными пластмассовыми сцинтилляторами стоят примерно в пять раз дороже газоразрядных, но из-за высокой эффективности регистрации при прочих равных условиях охватывают больше контролируемой территории и поэтому для целей внешнего радиационного контроля являются более предпочтительными.

2.2 Основные факторы вариации приземного гамма-фона

Изучение динамики радиационного фона приземной атмосферы проводят практически во всех странах в рамках государственных программ и научных исследований [68, 69, 70, 71, 72, 73, 74].

Атмосферные поля ионизирующих излучений являются отражением как текущего состояния атмосферы, так и состояния системы «литосфера-атмосфера-ионосфера-космос» в целом. Суммарный атмосферный радиационный фон складывается из создаваемого атмосферными, почвенными радионуклидами, и космического излучения. Оценка вклада этих компонент в суммарный радиационный фон является глобальной задачей.

2.2.1 Космическое излучение

Поток частиц, испускаемый Солнцем и далекими галактиками, называется космическими лучами. В то время как, далекое космическое излучение примерно постоянно, из-за нерегулярных всплесков в результате вспышек на Солнце до земли долетает изменяющийся поток излучения с преобладающими высокоэнергетическими протонами (примерно 90% излучения). Вызванная этими событиями частота, с которой изменяется солнечное излучение, коррелирует с уровнем солнечной активности: в годы максимума регистрируется примерно 10 событий в год, а в годы минимума до одного или более, причем усредненные за год максимумы с минимумами повторяются, и наиболее заметно выражен цикл солнечной активности с периодом около 11 лет.

Верхний предел энергии солнечных космических лучей точно не установлен, однако имеются данные о регистрации энергии в несколько десятков ГэВ. Заряженные частицы первичного космического излучения галактического и солнечного происхождения, взаимодействуя с магнитосферой Земли, отклоняются от прямолинейной траектории. Часть частиц претерпевает геомагнитное обрезание, величина которого зависит от направления входа и

геомагнитной широты. Вследствие чего частицы, двигающиеся с запада и полюсов, могут иметь меньшую разрешенную энергию и значительную для входа в атмосферу на экваторе: при движении с запада $R_c = 9.8$ ГэВ, с востока $R_c = 57.2$ ГэВ, в вертикальном направлении $R_c = 14.3$ ГэВ [75]. Кроме геомагнитного обрезания, заряженные частицы на своем пути к земле проходят большой слой атмосферы, взаимодействуя с атомами ее молекул, в результате этого взаимодействия генерируется вторичное космическое излучение различных типов и энергий.

При помощи численного моделирования для широты 60° с.ш., (наиболее близкой к $56^\circ 29'$ широте размещения Томской обсерватории радиоактивности и ионизирующих излучений), нами произведена оценка интенсивности вторичного космического излучения на уровне моря. Рассчитывалась плотность потока в зависимости от Солнечной магнитной активности, одной из характеристик которой являются числа Вольфа или солнечные пятна. Они представляют собой тёмный области на Солнце с пониженной \sim на 1,2 тысячи C° , относительно средней температуры.

Для моделирования прохождения элементарных частиц через атмосферу была выбрана кубическая геометрия размерами 80 км, реализованная в среде Geant4 с использованием метода Монте-Карло [76]. Схема численного эксперимента представлена на рисунке 2.2. Кубическая геометрия по вертикали разделялась на несколько слоев. Снизу располагалась подстилающая поверхность, необходимая для учета почвенного рассеивания вторичного космического излучения. Слой земли задавался толщиной 30 см с плотностью и составом, соответствующим [72]. Приземный слой атмосферы имел толщину в 200 м с плотностью характерной для зимнего сезона года и 60° с.ш., в 1.36 мг/см³, или в величинах поверхностной плотности 27 мг/см² [77]. Толщина каждого из последующих слоев составила порядка 280 м, а плотность изменялась по градиенту с убыванием к верхнему. Длина пути, преодолеваемого космическим излучением в зимний сезон, была рассчитана из [77] и составила 1033.35 г/см².

Космическое излучение задавалось на верхней границе атмосферного столба в виде точечного источника протонов со спектром, соответствующим стандарту [78], учитывающему количество солнечных пятен (среднемесячное число Вольфа), годовые циклы (расчеты произведены для 2017 г.), геомагнитное обрезание на 60° с.ш. (начало спектра составило 2 ГэВ). Так как в указанном стандарте для расчета спектра используется количество солнечных пятен (среднемесячных чисел Вольфа), а также годовые циклы, поэтому расчеты вторичного космического излучения (ВКИ) проводились с привязкой к декабрю 2017 г.

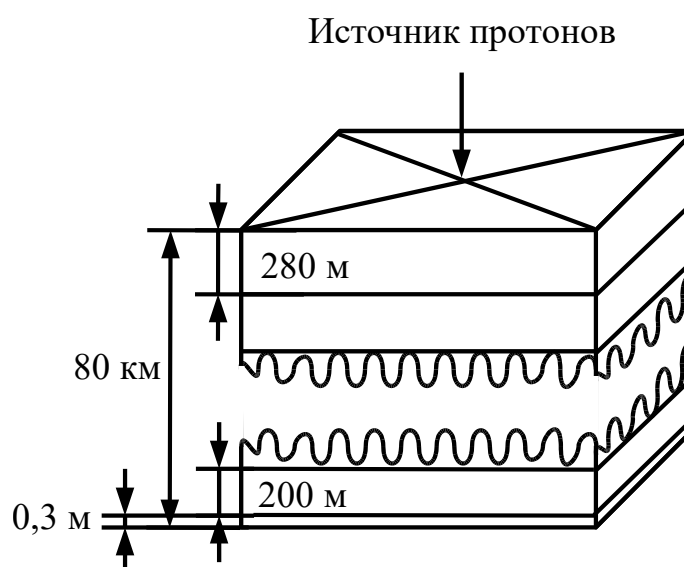


Рисунок 2.2 – Геометрия моделирования

Таким образом, итоговый спектр космического излучения, использованный в модели, менялся с числом Вольфа, а средняя энергия спектра протонов находилась в диапазоне 2,5–4,8 ГэВ, и плотность потока $3600\text{--}1200$ частиц $\cdot\text{с}^{-1}\cdot\text{м}^{-2}$, (см. таблицу 2.1).

Таблица 2.1 – Соотношение некоторых чисел Вольфа характеристикам первичного спектра протонов на декабрь 2017

Число Вольфа	0	25	50	75	100	125	150	175	200
Средняя энергия спектра протонов, ГэВ	2,5	2,7	2,9	3,1	3,4	3,7	4,0	4,4	4,8
Плотность потока, протонов/($\text{м}^2 \text{с}$)	3615	3343	2945	2542	2176	1856	1584	1355	1164

Из рисунков 2.3, 2.4, а также таблице 2.2 видно, что радиационные и дозиметрические характеристики ВКИ достигают своего пика при числах Вольфа от 0 до 25. Полученное поведение вторичного излучения имеет хорошее согласие с данными работы [79]. С увеличением числа Вольфа до 200 единиц убывает плотность потока и поглощённая воздухом энергия на 16–45% и 18–40%, соответственно.

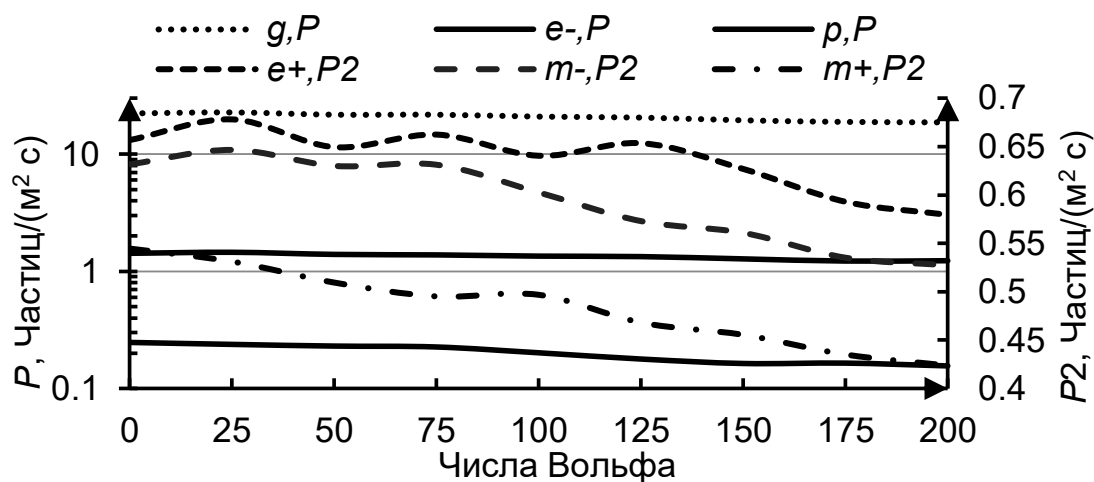


Рисунок 2.3 – Зависимость плотности потока компонент вторичного космического излучения от числа Вольфа (декабрь 2017): g – гамма-излучение; $e(-/+)$ – бета($-/+$)-излучение; p – протоны; $m-, m(-/+)$ – мюоны($-/+$)

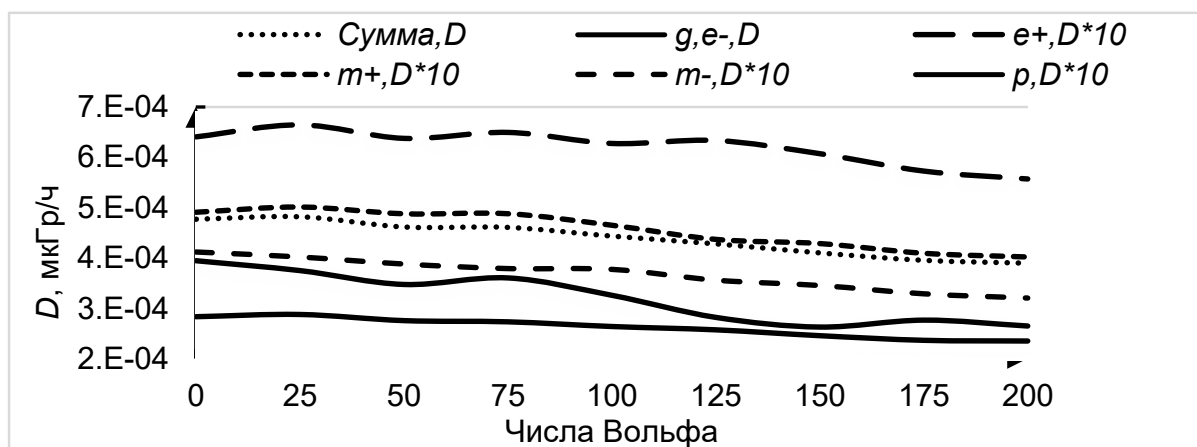


Рисунок 2.4 – Зависимость мощности дозы создаваемой компонентами вторичного космического излучения от числа Вольфа (декабрь 2017): g – гамма-излучение; $e(-/+)$ – бета($-/+$)-излучение; p – протоны; $m-, m(-/+)$ – мюоны($-/+$)

В абсолютных величинах мощность дозы, передаваемая воздуху всеми компонентами вторичного космического излучения для чисел Вольфа от 25 до

200 меняется в диапазоне $4,8 \cdot 10^{-4}$ – $3,9 \cdot 10^{-4}$ мкГр/ч, соответственно, что составляет до 0,7% от рассчитанного в работе [72] почвенного излучения 0,07 мкГр/ч, и примерно на два порядка меньше величины принятой на уровне моря в работе [79].

Таблица 2.2 – Изменение плотности потока (ПП) и мощности дозы компонентов ВКИ при изменении чисел Вольфа с 200 до 25

Компонента ВКИ	ПП прямого излучения, %	ПП излучения, отраженного от почвы и воздуха, %	Поглощенная в воздухе мощность дозы, %
Гамма	20	20	23
Бета-	16	25	20
Бета+	16	36	18
Мюоны-	20	-	20
Мюоны+	25	-	22
Протоны	45	-	40

С ростом количества солнечных пятен плотность потока отраженного от почвы и воздуха вторичного космического гамма-излучения незначительно снижается (рисунок 2.5).

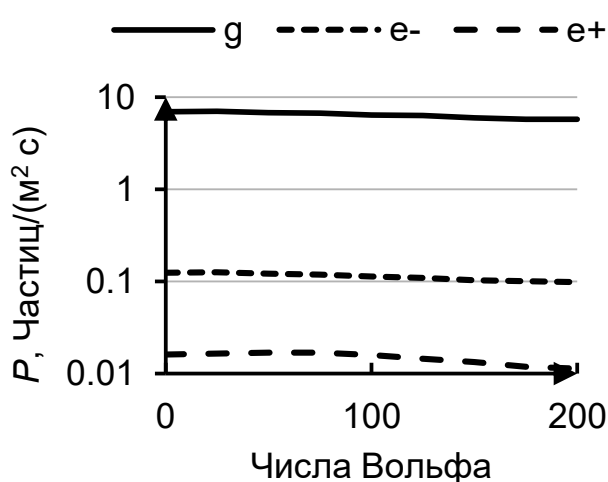


Рисунок 2.5 – Изменение плотности потока отраженной от воздуха и почвы компоненты вторичного космического излучения в зависимости от числа Вольфа (декабрь 2017): g – гамма- излучение; e(-/+)- бета(-/+)-излучение

Но с увеличением высоты до 50 метров совместно с плотностью потока прямого вторичного космического гамма-излучения возрастают на 4,5 и 35% соответственно (рисунок 2.6).

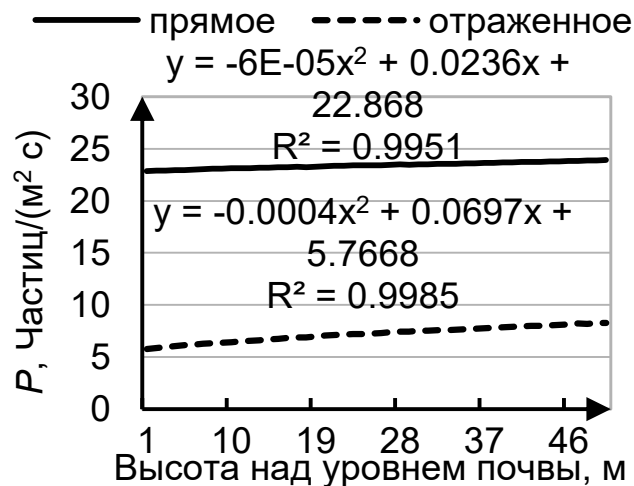


Рисунок 2.6 – Изменение плотности потока прямой, а также отраженной от почвы и воздуха, гамма-компоненты вторичного космического излучения, в зависимости от высоты (число Вольфа 100)

Полученные оценки плотности потока и мощности дозы ВКИ требуют уточнения в своей абсолютной величине, вместе с тем относительное изменение характеристик ВКИ в зависимости от чисел Вольфа хорошо согласуется с экспериментальными данными. Вариации ВКИ в зависимости от количества солнечных пятен могут достигать 40%. С ростом высоты над уровнем моря растет плотность потока отраженной гамма-компоненты, такое увеличение может достигать 35% для 50 м.

Сезонные различия вторичного космического излучения заключаются в изменении плотности слоев атмосферы и как следствие в разной длине пути воздушного столба. Полученная расчетом из рекомендаций [80] для лета она составила 1031,41, зимы – 1033,35 г/см², а разница давлений между сезонами года в 2,8 мбар.

Для цели оценки сезонного влияния связанного с изменением давления использовался один модельный источник. Рассчитанная средняя энергия

первичного спектра протонов находилась в диапазоне 2,6-4,5 ГэВ, а их плотность потока 1400-3600 частиц $\text{с}^{-1} \text{м}^{-2}$ [81].

Оцененные сезонные спектры ВКИ для гамма-излучения приведены на рисунке 2.7а, для электронов на рисунке 2.7б. Зимний спектр обозначен синим цветом, а красным – летний. На представленных рисунках невооруженным глазом невозможно заметить различие между сезонными характеристиками ВКИ. Это связано с незначительным летним возрастанием плотности потоков электронов. На рисунке 2.7а видно возрастание плотности потока гамма-излучения для диапазона 10–50 КэВ, с последующим убыванием при продвижении по шкале энергии. На отметке примерно в 0,5 МэВ наблюдается пик по интенсивности сопоставимый с отметкой в 50 кэВ. Фотоны с энергией 511 КэВ возникают от аннигиляции электрон-позитронной пары и были обнаружены, в том числе в полевых работах в США [68].

В таблице 2.3 приведены расчеты плотности поток бета- и гамма-излучения в зависимости от средней энергии ВКИ, а также барометрические коэффициенты [74].

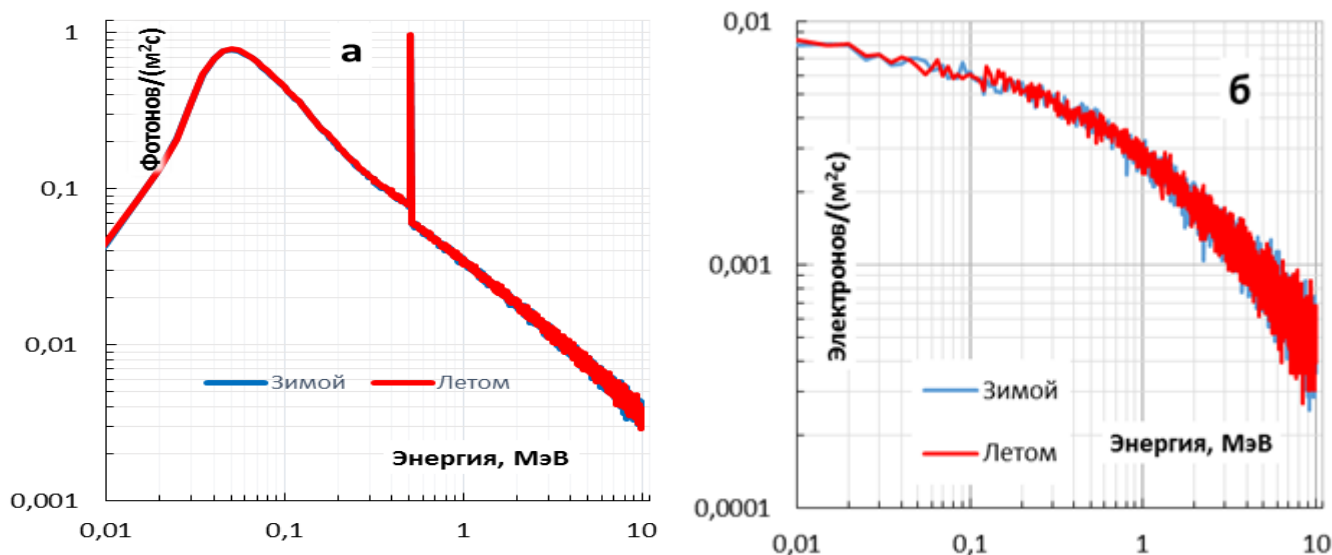


Рисунок 2.7 – Рассчитанные сезонные (синий – зимний, красный – летний) спектры: а) фотонов; б) электронов

Таблица 2.3 – Плотность потока бета- и гамма-излучения в зависимости сезона года и барометрические коэффициенты

Энергия излучения, МэВ	Плотность потока, частиц/(м ² с)				Барометрические коэффициенты для лета и зимы, %/мБар		
	Летом		Зимой		Электронны	Фотоны	Электронны и фотоны
	Электронны	Фотоны	Электронны	Фотоны			
0.02-0.1	0.11	9.18	0.11	9.09	-0.19	-0.33	-0.33
0.1-0.2	0.11	5.90	0.11	5.86	-0.53	-0.27	-0.27
0.2-1	0.61	12.58	0.60	12.47	-0.29	-0.32	-0.32
0.05-3	1.56	33.07	1.54	32.78	-0.35	-0.32	-0.32
0.15-3	1.44	23.11	1.42	22.90	-0.34	-0.32	-0.32
0.5-3	1.11	13.77	1.09	13.65	-0.42	-0.31	-0.32
1-3	0.77	8.11	0.76	8.04	-0.39	-0.31	-0.32
1-10	1.85	17.31	1.84	17.14	-0.27	-0.35	-0.34
3-10	1.08	9.20	1.07	9.10	-0.19	-0.39	-0.37
>3	3.07	20.81	3.03	20.54	-0.43	-0.46	-0.46
>10	1.99	11.61	1.96	11.44	-0.56	-0.52	-0.52
0-3ГэВ	4.71	56.89	4.66	56.31	-0.40	-0.37	-0.37

Из представленных данных видно, что для различных энергетических границ плотность потока бета- и гамма-излучения летом незначительно превосходит зимние показатели, это связано с меньшей плотностью воздуха и как следствие с уменьшением количества вещества, находящегося на пути космического излучения к земле. С ростом давления наблюдается снижение радиационной характеристики ВКИ. Для излучения с энергией до 10 МэВ барометрический эффект находится в диапазоне от |0,3| до |0,4|%/мБар. Вариация интенсивности бета-излучения космической природы с энергией до 10 МэВ приходится в диапазон от |0,2| до |0,5|%/мБар. Более 3 МэВ суммарный барометрический эффект выше на |0,1|%/мБар, чем для рабочего диапазона широко распространенных приборов радиоэкологического контроля 0,015–3 МэВ. Рост эффекта с энергией излучения продолжается, и от крайней границы в 10 МэВ, диапазон регистрируемого детекторами на основе тканеэквивалентных пластмассовых сцинтилляторов, достигает |0,5|%/мБар. Рассчитанная величина

барометрического эффекта электрон-фотонной компоненты близка к величине, полученной для нейтронов космических лучей [82]. Для области высоких энергий >10 МэВ численное моделирование показало хорошую схожесть с экспериментальными данными работы [73], и разошлось в области низких энергий, что может объясняться влиянием условий измерений. Кроме вариации, связанной со спонтанным изменением количества солнечных пятен, из полученных результатов моделирования и характеристик первичного космического излучения [81] вытекает, что вторичное космическое излучение подвержено циклическим изменениям с периодами примерно в 11 и 22 года. А из исследований П. А. Старрока [83] связь суточных циклов космического гамма-фона с интенсивными дневными потоками солнечного нейтрино (рисунок 2.8).

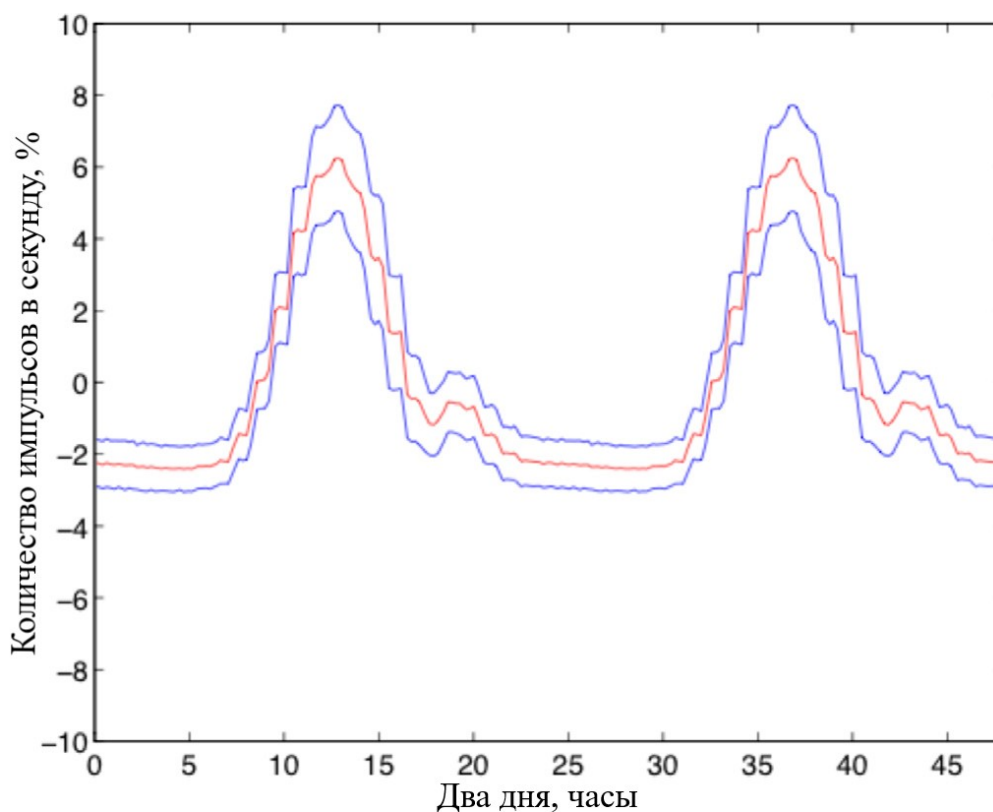


Рисунок 2.8 – Суточная вариация гамма-излучения, в процентах и после вычитания долговременного фона, измеренная от источника радона в лабораторных условиях. Синие кривые – масштабированная в 10 раз верхняя и нижняя границы стандартной ошибки среднего

Оценка вклада различных компонент бета-, гамма-фона приземной атмосферы (почвенные и атмосферные радионуклиды, космическое излучение) производится с учетом диапазона регистрации детектора, который чаще всего начинается от 15 и 50 кэВ и заканчивается 3 или 10 МэВ для дозиметров, и 0,5–3 МэВ для газоразрядных и 155 кэВ–3,5МэВ для сцинтилляционных счетчиков β -излучения. Полученные оценки плотности потока бета-, гамма-фона вторичного космического излучения на уровне земли с энергией 0,05–3 МэВ составили около 33 и $1,5 \text{ м}^{-2}\text{с}^{-1}$, соответственно.

2.2.2 Почвенное излучение

Кроме космической компоненты, немаловажное значение в формировании атмосферного поля излучения играет распад естественных и техногенных радионуклидов, сосредоточенных в окружающих объектах, таких как строительные сооружения, растительность, водная среда и почва [84, 85]. Из-за разнообразия источников излучения, и зачастую непостоянства их радиационных характеристик, разложение результатов наблюдений за радиационным фоном приземной атмосферы на составляющие является сложной задачей, которую зачастую решают с привлечением численного моделирования переноса излучения в веществе. В разделе представлены результаты оценок радиационных характеристик почвенных радионуклидов K-40, Cs-135 и радиоактивных семейств Th-232, U-238, U-235, с учетом возможного нижнего порога регистрации гамма-излучения в 0,015, 0,05 и 0,5(с учётом фильтра низкоэнергетического излучения) МэВ, обусловленного конструктивными особенностями регистрирующей аппаратуры. Расчеты вклада почвенной компоненты в атмосферное поле излучения были проведены с использованием системы библиотек для компьютерного моделирования Geant4 [86].

На рисунке 2.9 представлена геометрия расчетов. В качестве источника-поглотителя выступал грунт (смесь радионуклидов и грунта различной влажности), а поглощающей среды – воздух. Воздушная среда с грунтом

задавалась в геометрии большого и малого цилиндра. Малый цилиндр (воздух) имел диаметр 20 м, высоту 50 м и применялся для регистрации поглощенной дозы и плотности потока ионизирующего излучения. Наружный цилиндр имел диаметр в 20 раз больше, высоту равную 400 м и использовался для исключения влияния краевых эффектов. Глубина источника-поглотителя составляла 50 см. И в 2,5 раза была больше первых 20 см грунта, на которые приходится ~90% поглощения почвенного излучения.

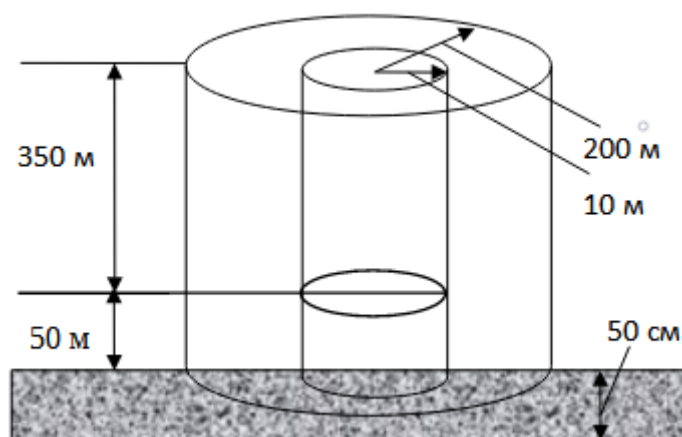


Рисунок 2.9 – Геометрия моделирования

Так как грунт являлся источником излучения, в моделировании учитывался энергетический спектр и интенсивность бета- и гамма-активных радионуклидов пяти групп, представленных в таблице 2.4 [87].

Таблица 2.4 – Используемые в моделировании группы радионуклидов

Группа 1	Ряд Th-232	Th-232, Ra-228, Ac-228, Th-228, Ra-224, Rn-220, P-216, Pb-212, Bi-212, Tl-208
Группа 2	Ряд U-238	U-238, Th-234, Pa-234m, Pa-234, U-234, Th-230, Ra-226, Rn-222, P-218, Pb-214, Bi-214, Po-214, Pb-210, Bi-210, P-210
Группа 3	Ряд U-235	U-235, Th-231, Pa-231, Ac-227, Fr-223, Th-227, Ra-223, Rn-219, P-215, Pb-211, Bi-211, Tl-207, P-211
Группа 4	K-40	-
Группа 5	Cs-137	-

Радионуклиды равномерно распределялись по грунту, а диффузия радона принималась равной нулю, то есть не учитывался вынос из системы источник-поглотитель сильнейших гамма-излучателей, таких как Pb-214, Bi-214, Tl-208. Расчеты производились для единичной удельной активности (1 Бк/кг) материнского радионуклида (родоначальники групп 1–5, см. таб. 2.4), что позволило легко получить радиационные характеристики грунта с сопоставимыми физико-химическими свойствами для любой удельной активности. В грунте соотношение между удельной активностью дочернего и материнского радионуклида групп 1–3 принималось с учетом радиоактивного равновесия [88]. Для итоговой оценки вклада почвенной компоненты в приземный радиационный фон использовалась удельная активность изотопов почвы U-238, Th-232, K-40, Cs-137 из результата работы [89], а для U-235 была вычислена из известного соотношения $A_{U-235} = A_{U-238}/21$ (таблица 2.5).

Характеристики грунта менялись в зависимости от его влагоемкости, где последняя из-за удобства обращения заменяет влажность почвы [90]. В сухом состоянии (влагоёмкость 0 мм) грунт имел плотность $1,3 \text{ г/см}^3$ и химический состав, как показано в таблице 2.6.

Таблица 2.5 – Почвенная удельная активность, представленная родоначальниками радиоактивных рядов

Радионуклид	Удельная активность, Бк/кг
U-238 (Ra-226) (без учета его равновесных продуктов)	25
Th-232 (без учета его равновесных продуктов)	26
K-40	345
Cs-137	10
U-235 (без учета его равновесных продуктов)	1,9
Сумма рядов	407,9

С изменением влагоемкости варьировалась плотность грунта, а также удельное количество кислорода и водорода в его химическом составе. Предельное значение влагоемкости в 500 мм (влажность 38%) изменяло итоговую плотность источника-поглотителя до $1,8 \text{ г/см}^3$.

Таблица 2.6 – Состав сухого грунта, использованного при моделировании

Элемент	Атомный номер Z	Атомная масса A	Весовая доля %
O	8	16	43,2
Si	14	28,09	20,2
Al	13	27	14,4
C	6	12	10,6
Fe	26	55,85	9,2
H	1	1,008	1,5
Ti	22	47,9	0,7
Mg	12	24,31	0,2

Состав атмосферы для моделирования использовался из библиотеки Geant4 [91], с усредненной за год плотностью $1,29 \cdot 10^{-3}$ г/см³ [92] и приведен в таблице 2.7.

Таблица 2.7 – Состав атмосферы для моделирования

Элемент	Весовая доля элементов вещества. %
C-12	0.000124
N-14	0.755268
O-16	0.231781
Ar-40	0.012827

Результаты расчета характеристики атмосферного поля бета- и гамма-излучения, создаваемого единичной удельной активностью радионуклида групп 1-5 представлены на рисунках 2.9-2.11 и в таблицах 2.8-2.10. На рисунке 2.10 изображена зависимость мощности дозы, формируемой радионуклидами сухой почвы, от высоты регистрации.

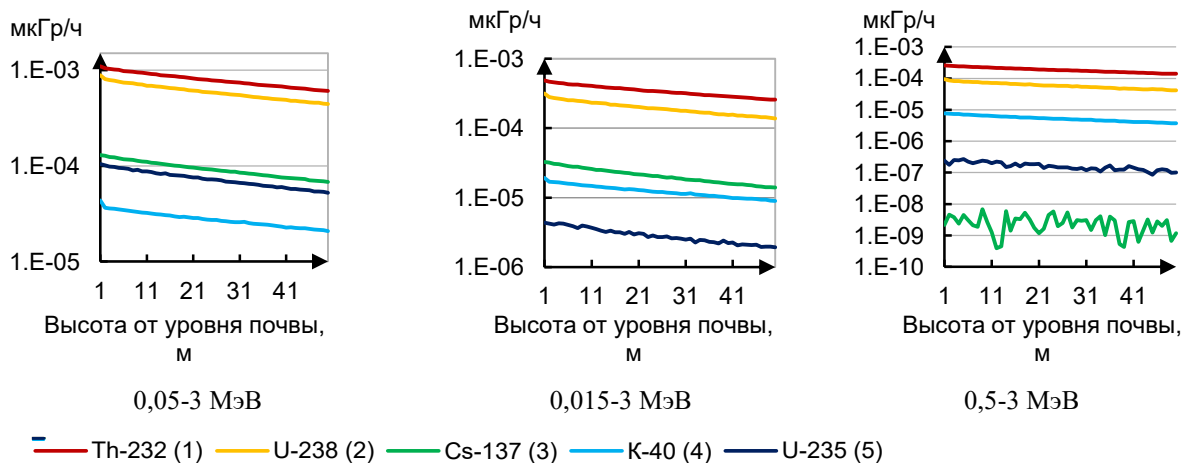


Рисунок 2.10 – Влияние высоты на изменение мощности дозы, создаваемой различными группами почвенных радионуклидов в пересчете на Бк/кг

Из рисунка видно, что преобладающая часть переданной цезием-137 энергии существует преимущественно в низкоэнергетическом диапазоне, и большой вклад на единичную удельную активность вносят ториевый и урановые (уран-238) ряды. Установление энергетического фильтра на 0,5 МэВ практически полностью отсекает дозовый вклад цезия. Излучение рядов урана, тория и калия имеет высокую энергию, из-за чего плохо поддается низкоэнергетической фильтрации.

В таблице 2.8 приведены уравнения аппроксимации дозовых характеристик почвенных радионуклидов 1–5 группы. Уравнения получены при помощи обработки данных, изображенных на рисунке 2.11.

Таблица 2.8 – Изменение мощности дозы от высоты при единичной удельной активности (влагоемкость почвы 0 мм)

Радионуклиды		Энергетический диапазон, МэВ		
		0,05-3	0,015-3	0,5-3
Группа 1	Ряд ^{232}Th	$1.1\text{E-}03e^{-0.011x}$	$5\text{E-}04e^{-0.012x}$	$3\text{E-}04e^{-0.012x}$
Группа 2	Ряд ^{238}U	$8\text{E-}04e^{-0.012x}$	$3\text{E-}04e^{-0.014x}$	$8\text{E-}05e^{-0.015x}$
Группа 3	Ряд ^{235}U	$1\text{E-}04e^{-0.013x}$	$3\text{E-}05e^{-0.017x}$	-
Группа 4	^{40}K	$4\text{E-}05e^{-0.012x}$	$2\text{E-}05e^{-0.013x}$	$7\text{E-}06e^{-0.014x}$
Группа 5	^{137}Cs	$1\text{E-}04e^{-0.013x}$	$4\text{E-}06e^{-0.017x}$	$2\text{E-}07e^{-0.017x}$

На рисунке 2.11 изображена зависимость мощности дозы различных энергетических диапазонов от влагоемкости почвы.

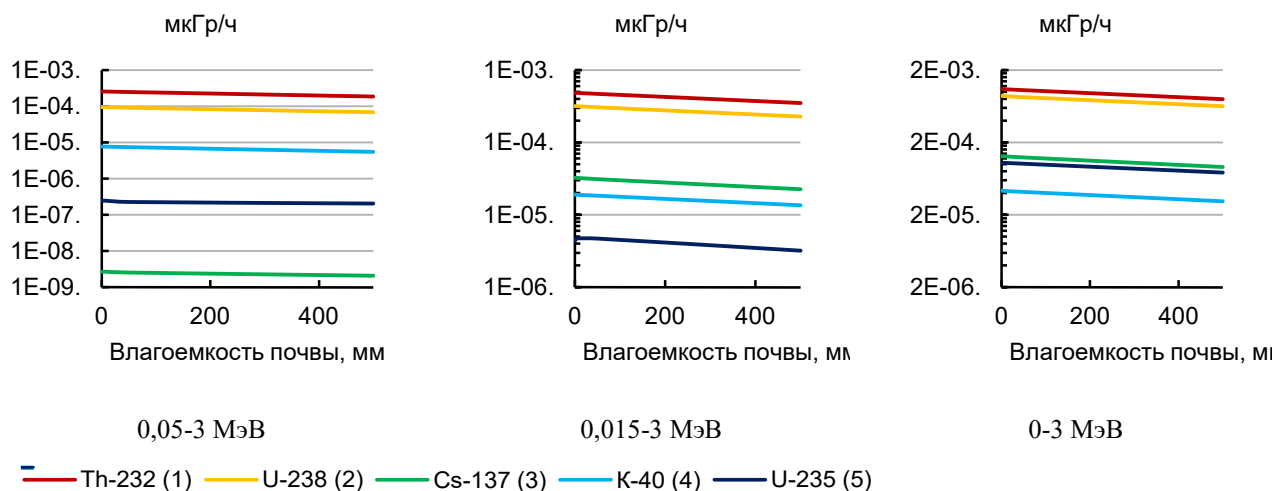


Рисунок 2.11 – Влияние влагоемкости почвы на изменение мощности дозы для высоты 1 м и в пересчете на Бк/кг

В таблице 2.9 приведены уравнения аппроксимации дозовых характеристик почвенных радионуклидов 1–5 группы, полученные при помощи обработки данных, изображенных на рисунке 2.11.

Таблица 2.9 – Изменение мощности дозы от влагоемкости при единичной удельной активности (высота 1 м)

Радионуклиды		Энергетический диапазон, МэВ		
		0,05-3	0,015-3	0,5-3
Группа 1	Ряд ^{232}Th	$1.09\text{E-}03\text{e}^{-6.40\text{E-}04x}$	$4.85\text{E-}04\text{e}^{-6.52\text{E-}04x}$	$2.57\text{E-}04\text{e}^{-6.46\text{E-}04x}$
Группа 2	Ряд ^{238}U	$8.78\text{E-}04\text{e}^{-6.55\text{E-}04x}$	$3.17\text{E-}04\text{e}^{-6.63\text{E-}04x}$	$9.48\text{E-}05\text{e}^{-6.50\text{E-}04x}$
Группа 3	Ряд ^{235}U	$1.29\text{E-}04\text{e}^{-6.86\text{E-}04x}$	$3.25\text{E-}05\text{e}^{-7.25\text{E-}04x}$	$2.67\text{E-}09\text{e}^{-4.96\text{E-}04x}$
Группа 4	^{40}K	$4.31\text{E-}05\text{e}^{-6.74\text{E-}04x}$	$1.91\text{E-}05\text{e}^{-6.79\text{E-}04x}$	$7.72\text{E-}06\text{e}^{-6.79\text{E-}04x}$
Группа 5	^{137}Cs	$1.05\text{E-}04\text{e}^{-6.23\text{E-}04x}$	$4.65\text{E-}06\text{e}^{-7.36\text{E-}04x}$	$2.40\text{E-}07\text{e}^{-3.17\text{E-}04x}$

Используя третий столбец таблицы 2.9, для интервала энергии 0,05–3 МэВ, найдем среднее изменение мощности дозы для единичных удельных активностей

радионуклидов 1–5 группы при смене физико-химического состояния источника-поглотителя с абсолютно сухого до предельно влажного (то есть при 0 и 500 мм воды на метр почвы):

$$2 \cdot (e^{-6.46E-04 \cdot 0,01} - e^{-6.46E-04 \cdot 500}) / (e^{-6.46E-04 \cdot 0,01} + e^{-6.46E-04 \cdot 500}) \cdot 100\% = 32.0\% \text{ – семейство Th-232};$$

$$2 \cdot (e^{-6.50E-04 \cdot 0,01} - e^{-6.50E-04 \cdot 500}) / (e^{-6.50E-04 \cdot 0,01} + e^{-6.50E-04 \cdot 500}) \cdot 100\% = 32.2\% \text{ – семейство U-238};$$

$$2 \cdot (e^{-4.96E-04 \cdot 0,01} - e^{-4.96E-04 \cdot 500}) / (e^{-4.96E-04 \cdot 0,01} + e^{-4.96E-04 \cdot 500}) \cdot 100\% = 24.7\% \text{ – изотоп Cs-137};$$

$$2 \cdot (e^{-6.79E-04 \cdot 0,01} - e^{-6.79E-04 \cdot 500}) / (e^{-6.79E-04 \cdot 0,01} + e^{-6.79E-04 \cdot 500}) \cdot 100\% = 33.6\% \text{ – изотоп K-40};$$

$$2 \cdot (e^{-3.17E-04 \cdot 0,01} - e^{-3.17E-04 \cdot 500}) / (e^{-3.17E-04 \cdot 0,01} + e^{-3.17E-04 \cdot 500}) \cdot 100\% = 15.8\% \text{ – семейство U-235}.$$

С ростом влагоемкости почвы от нуля до полного насыщения среднее изменение мощности дозы на высоте 1 м от земли составляет от 16 до 34%.

На рисунке 2.12 приведено изменение плотности потока бета-излучения почвы (вторичного и первичного) в зависимости от влагоемкости почвы.

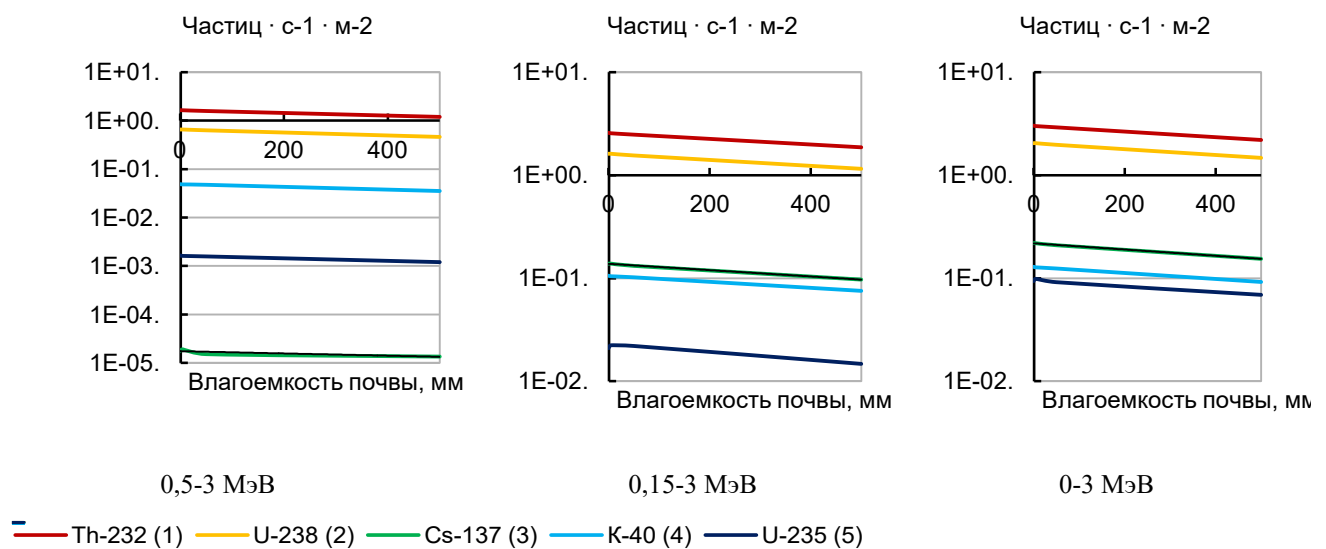


Рисунок 2.12 – Зависимость плотности потока бета-излучения от влагоемкости почвы на высоте 1 м, для 1–5 группы почвенных радионуклидов при единичной удельной активности

В таблице 2.10 приведены уравнения аппроксимации потоковых характеристик почвенных радионуклидов 1-5 группы, полученные при помощи обработки данных, изображенных на рисунке 2.12.

Таблица 2.10 – Изменение плотности потока бета-излучения от влагоемкости при единичной удельной активности (высота 1 м)

Радионуклиды		Энергетический диапазон, МэВ		
		0,5-3	0,15-3	0,5-3
Группа 1	Ряд ^{232}Th	$3.01\text{Ee}^{-6.33\text{E-}04x}$	$2.56\text{Ee}^{-6.38\text{E-}04x}$	$1.64\text{Ee}^{-6.33\text{E-}04x}$
Группа 2	Ряд $^{\text{U-238}}$	$2.04\text{Ee}^{-6.58\text{E-}04x}$	$1.61\text{Ee}^{-6.73\text{E-}04x}$	$6.55\text{E-}01\text{e}^{-7.05\text{E-}04x}$
Группа 3	Ряд ^{235}U	$2.18\text{E-}01\text{e}^{-6.96\text{E-}04x}$	$1.38\text{E-}01\text{e}^{-7.08\text{E-}04x}$	$1.75\text{E-}05\text{e}^{-5.37\text{E-}04x}$
Группа 4	^{40}K	$1.28\text{E-}01\text{e}^{-6.68\text{E-}04x}$	$1.05\text{E-}01\text{e}^{-6.70\text{E-}04x}$	$4.88\text{E-}02\text{e}^{-6.47\text{E-}04x}$
Группа 5	^{137}Cs	$9.58\text{E-}02\text{e}^{-6.60\text{E-}04x}$	$2.20\text{E-}02\text{e}^{-7.95\text{E-}04x}$	$1.63\text{E-}03\text{e}^{-6.14\text{E-}04x}$

Используя третий столбец таблицы 2.10, для интервала энергии 0,5–3 МэВ, найдем среднее изменение плотности потока почвенного бета-излучения, для единичных удельных активностей радионуклидов 1–5 группы при смене физико-химического состояния источника-поглотителя с абсолютно сухого до предельно влажного (то есть при 0 и 500 мм воды на метр почвы):

$$2 \cdot (e^{-6.33\text{E-}04 \cdot 01} - e^{-6.33\text{E-}04 \cdot 500}) / (e^{-6.33\text{E-}04 \cdot 01} + e^{-6.33\text{E-}04 \cdot 500}) \cdot 100\% = 31.4\% \text{ – семейство Th-232;}$$

$$2 \cdot (e^{-7.05\text{E-}04 \cdot 01} - e^{-7.05\text{E-}04 \cdot 500}) / (e^{-7.05\text{E-}04 \cdot 01} + e^{-7.05\text{E-}04 \cdot 500}) \cdot 100\% = 34.9\% \text{ – семейство U-238;}$$

$$2 \cdot (e^{-5.37\text{E-}04 \cdot 01} - e^{-5.37\text{E-}04 \cdot 500}) / (e^{-5.37\text{E-}04 \cdot 01} + e^{-5.37\text{E-}04 \cdot 500}) \cdot 100\% = 26.7\% \text{ – изотоп Cs-137;}$$

$$2 \cdot (e^{-6.47\text{E-}04 \cdot 01} - e^{-6.47\text{E-}04 \cdot 500}) / (e^{-6.47\text{E-}04 \cdot 01} + e^{-6.47\text{E-}04 \cdot 500}) \cdot 100\% = 32.1\% \text{ – изотоп K-40;}$$

$$2 \cdot (e^{-6.14\text{E-}04 \cdot 01} - e^{-6.14\text{E-}04 \cdot 500}) / (e^{-6.14\text{E-}04 \cdot 01} + e^{-6.14\text{E-}04 \cdot 500}) \cdot 100\% = 30.5\% \text{ – семейство U-235.}$$

Таким образом, среднее изменение плотности потока почвенного бета-излучения на высоте 1 м составляет от 27 до 35 % с ростом влагоемкости почвы от нуля до полного насыщения (500 мм).

Результаты моделирования плотности потока имеют хорошее согласие с выводами работы [72] для интервала энергий 0,5–3 МэВ.

На рисунке 2.13 изображена зависимость мощности дозы различных энергетических диапазонов от влагоемкости почвы для суммарной удельной активности в 407,9 Бк/кг (таблица 2.5).

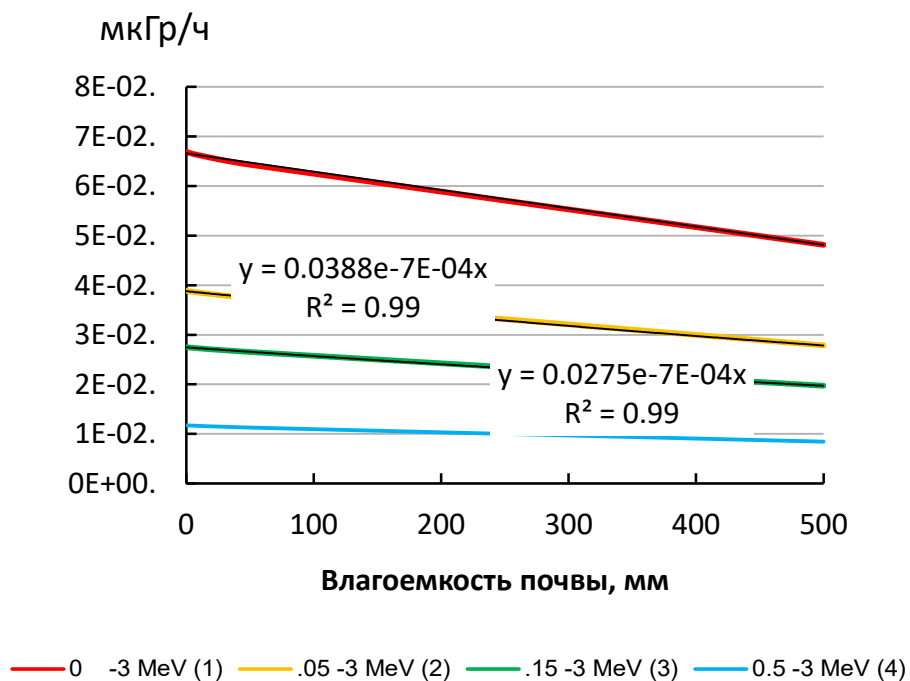


Рисунок 2.13– Влияние влагоемкости почвы на изменение мощности дозы, для высоты 1 м и в пересчете на суммарную удельную активность 1–5 групп радионуклидов

Анализ результатов численного моделирования формирования приземного фона показал особенности поведения излучения радионуклидов 1–5 группы при единичной удельной активности, которые необходимо учитывать во время расшифровки данных радиоэкологических наблюдений, полученных на высоте 1 м от земли дозиметром гамма-излучения и бета-радиометром:

Для К-40 и изотопов ряда Th-232 и U-238 плотность потока почвенного бета-излучения (энергии 0,00–3 МэВ) меньше плотности потока вторичного излучения воздуха в 3, 14, 5 раз соответственно, и составляет до 23, 6,5 и 16% от суммарной плотности потока создаваемой каждой конкретной группой;

В интервале энергии 0,5–3 МэВ основная плотность потока почвенного и вторичного бета-излучения формируется 1, 2 и 4 группой изотопов;

Для этих групп в интервале энергии 0,5–3 МэВ плотность потока почвенного бета-излучения в 47, 34, 5, раз, соответственно, меньше плотности потока вторичного излучения воздуха, и составляет до 2,1, 2,9, 17 % от суммарной плотности потока создаваемой каждым конкретным изотопом.

Анализ суммарного воздействия излучения радионуклидов всех групп с активностью родоначальников рядов составляющей 407,9 Бк/кг, проведенный для высоты 1 м от уровня земли, показал следующее:

Для K-40, Cs-137 и изотопов рядов Th-232, U-238, U-235, в интервале энергии 0–3 МэВ, плотность потока почвенного бета-излучения в 7 раз меньше плотности потока вторичного излучения воздуха, и составляет до 13% от суммарной зарегистрированной плотности потока, и в 17 раз в интервале энергий 0,5–3 МэВ, или 6% от всей плотности потока;

Плотность потока бета-излучения с энергией 0,15–3 МэВ в два раза выше плотности потока из интервала 0,5–3 МэВ, что может служить основанием для рекомендации установки счетчиков бета-излучения с более широкими энергетическими диапазонами регистрации излучения радионуклидов 1–5 группы;

Присутствие в почве K-40 и изотопов рядов Th-232, U-238 формирует основную плотность потока почвенного и вторичного бета-излучения равную примерно $76 \text{ частицам/м}^2 \cdot \text{сек.}$, что в ~ 60 раз больше плотности потока, рассчитанной для космической компоненты в работе [74]. Плотность потока гамма-излучения, в интервале энергий 0,05–3 МэВ, равную $\sim 3 \cdot 10^4 \text{ частицам} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{сек}^{-1}$, и примерно в 1000 раз больше плотности потока, рассчитанной для космической компоненты в работе [74];

При равномерном увлажнении почвы в 1 м на 30 мм воды, падение мощности дозы составит 0,5%. Но концентрирование того же количества в поверхности грунта, для расчета мощности дозы потребует к общей влагоемкости прибавить еще примерно 300 мм, т.к. верхний слой почвы в 20 см является основным источником почвенного излучения. Таким образом, при регистрации осадков с помощью дозиметров, необходимо учитывать влажность верхнего слоя почвы, что удобно проводить при помощи вычитания фона, измеренного перед выпадением осадков, а также между их сериями.

2.2.3 Суточная динамика объемной активности продуктов распада радона

Радон 86-й элемент периодической системы образуется в результате естественного распада изотопов Ra-223, Ra-224, Ra-226 из семейства урана и тория (см. таблицу 2.4) [93, 94]. Это бесцветный, не обладающий запахом и самый тяжелый благородный газ. Его естественное содержание в атмосфере настолько низкое (нормальная концентрация измеряется на уровне $4 \cdot 10^{-8}\%$), что первые исследования с инертными газами не позволили выделить его из атмосферы. Только применение радиометрического метода с использованием альфа-детекторов сделало возможным обнаружение радона. Широкое распространение урана и тория в земной коре делает ее подобной протяженному генератору радона, откуда газ распространяется в атмосферу через капилляры грунта и микротрещины горных пород, естественным образом накапливается в подземных резервуарах.

При концентрации всего четыре к одному миллиону частей атмосферы содержание радона является значительным, с точки зрения общей массы, кроме того, наличие дочерних продуктов распада (на пример Pb-214 и Bi-214) делает этот газ основным источником поступления природных радиоактивных аэрозолей в приземную атмосферу Земли.

Активность источника усиливается, если присутствуют территориальные аномалии с повышенным содержанием урана, тория или с нарушением барьерного слоя подстилающей поверхности. Ежегодный выброс радона из некоторых действующих урановых рудников колеблется в пределах 10–250 ТБк. Тогда как нормальным считается выброс от 0,2 до 3,4 ГБк/тонну горной породы [95]. Различие в среднегодовой скорости эмиссии на протяжении длительных наблюдений позволяет утверждать, что фоновый уровень объемной активности радона резко отличается от одного региона к другому [95]. Кроме региональных отличий в скорости эмиссии, существует суточная вариация объемной активности

радона, связанная с температурным прогревом и остыванием атмосферы, вертикальным переносом воздушных масс из соседних регионов [96].

Объемная активность радона и его суточная вариация определяет присутствие в воздухе дочерних продуктов, производимых преимущественно от изотопа Rn-222, который имеет период полураспада в 3,82 сут., что значительно отличает его от Rn-219 – 3,96 с и Rn-220 – 55,6 с. Высокоактивные Rn-219 и Rn-220 практически полностью распадаются при движении к поверхности грунта. Вклад этих источников в содержание радиоактивных аэрозолей атмосферы составляет от 1 до 10%. Обычно в течение суток объемная активность дочерних продуктов распада радона достигает пика утром, и после заметного снижения повторяется во второй половине дня (рисунок 2.14). Это связано с тем, что утром приземная атмосфера остывшая, и конвективный перенос воздуха, а вместе с ним и радона максимально ослаблен.

В ночные (утренние) часы нередки атмосферные (температурные) инверсии, которые способствуют удержанию продуктов распада радона близко от земли. В дневные часы атмосфера прогревается, возрастает скорость восходящего потока воздуха и накопленный возле поверхности земли радон устремляется в верхние слои атмосферы. Вечерний пик концентрации продуктов распада радона объясняется обратной зависимостью с влажностью атмосферы. Влажность атмосферы напрямую влияет на состояние почвы, уменьшая ее радонопроницаемость в утренние часы. После дневного прогрева влажность почвы уменьшается, в результате чего поток радона усиливается. Вечернее усиление потока приводит ко второму пику активности продуктов распада радона.

Помимо суточной динамики, объемная активность продуктов распада радона подвержена изменчивости в вертикальном профиле, что необходимо учитывать при использовании механизма влажного осаждения радионуклидов для определения характеристик осадков, так как верхняя граница облака может размещаться ниже конвективного выноса приземных аэрозолей.

Влажное осаждение сопровождается вымыванием радионуклидов из атмосферы и увлажнением почвы, что приводит к уменьшению радонопроницаемости. Поэтому в дождливые дни суточный пик объемной активности продуктов распада радона, хотя и может существовать в виде тенденции, имеет меньшую амплитуду в сравнении с безоблачными днями.

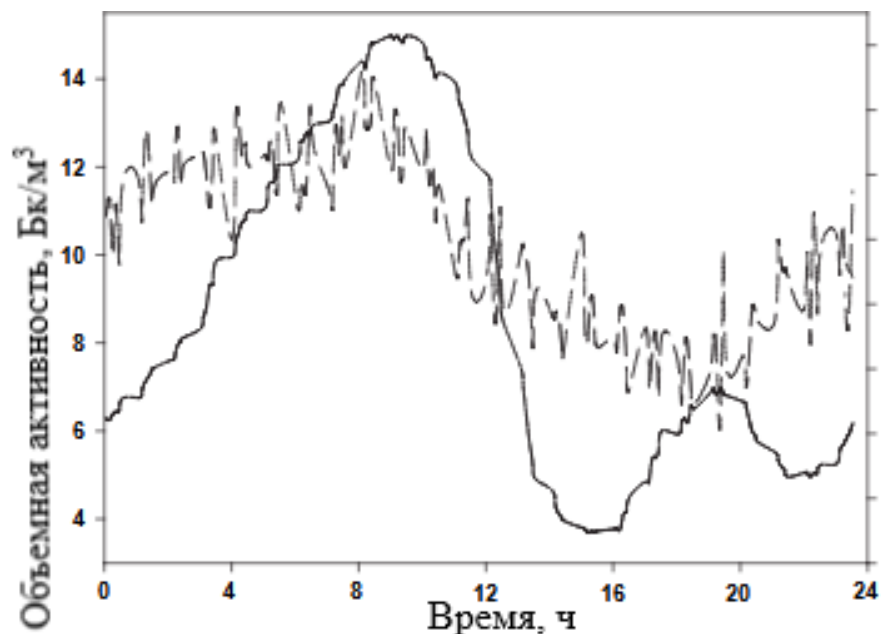


Рисунок 2.14 – Суточная вариация объемной активности дочерних продуктов распада радона в Бк/кг³ (сплошная линия), суточная вариация гамма-фона солнечного происхождения (штрихпунктирная линия), относительные единицы.

2.3 Экспериментальная площадка и ее оборудование

Начиная с 2017 года, в периоды от схода снежного покрова и до его установления, измерения амбиентного эквивалента мощности дозы гамма-излучения окружающей среды проводились с высокой частотой дискретизации данных в 1 минуту с использованием сцинтилляционного детектора BDKG-03 (производства АТОМТЕСН, Республика Беларусь). Детектор BDKG-03 в качестве чувствительного элемента содержит сцинтиллятор NaI(Tl) с размерами Ø25x40 мм. Диапазон регистрируемых энергий гамма-излучения составляет от 50 кэВ до 3 МэВ. Детекторы BDKG-03 были установлены на экспериментальной площадке

Геофизической обсерватории Института мониторинга климатических и экологических систем Сибирского отделения Российской академии наук (ИМКЭС СО РАН) на высоте 1 м от поверхности земли. Выбор высоты измерения гамма-фона, равной 1 м от поверхности почвы, обусловлен требованиями к контролю радиационной обстановки для населения. Использование одной и той же высоты измерения обеспечивает сопоставимость результатов измерений для разных территорий как в России, так и за рубежом. Данные об интенсивности осадков с высоким временным разрешением регистрировались челночным датчиком осадков Davis Rain Collector II (Davis Instruments, США) и оптическим (лазерным) датчиком осадков OPTIOS [99], разработанным в ИМКЭС СО РАН, установленным на расстоянии не более 10 м от детектора γ -излучения. Для измерения плотности потока радона с поверхности почвы использовали радиометр EQF-3200 (SARAD, Германия) с накопительной камерой, а также измерительный комплекс "Альфарад плюс - AP" (ООО "НТМ-Защита", Москва, РФ).

2.4 Отклик гамма-фона на жидкие атмосферные осадки

Данные многолетнего эксперимента по откликам мощности дозы гамма-излучения на осадки, проявляющимся в виде аномальных всплесков были детально изучены и классифицированы в работе [100]. Установлено, что зарегистрированные всплески гамма-фона, не имевшие определенной периодичности, вызваны осадками (исключая всплески, вызванные ошибками в работе детекторов гамма-излучения). Кроме того, величина всплеска гамма-фона не коррелирует с интенсивностью осадков $I(t)$ и этот результат находит подтверждение в различных исследованиях [101, 102].

В результате чего получилось выделить четыре характерные формы всплесков на гамма-фоне, соответствующие жидким атмосферным осадкам:

для одиночного события

(I) пик с различным положением максимума: слева (рисунок 2.15 а); посередине (2.15 б) или справа;

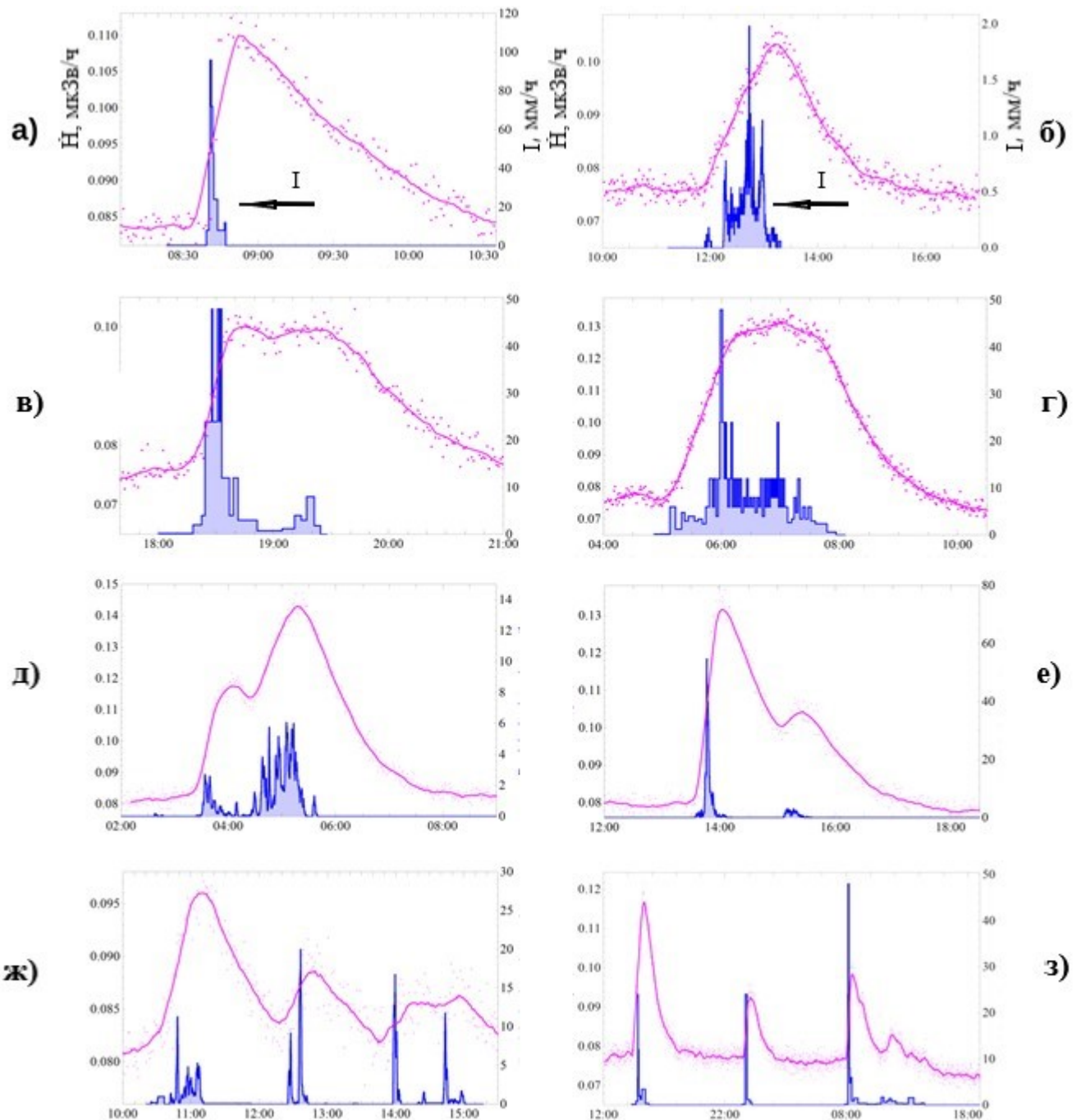


Рисунок 2.15 – Различные формы отклика гамма-фона на жидкие атмосферные осадки: а) 22.08.18; б) 22.07.17; в) 11.06.17; г) 28.06.17; д) 09.09.2020; е) 09.09.2020; ж) 05.09.2020; з) 30.05.2017

(II) плато (рисунок 2.15 в) и колокол (рисунок 2.15 г);
для серии осадков

(III) двугорбая (рисунок 2.15 д, 2.15 е);

(IV) волнообразная (рисунок 2.15 ж) и зубчатая / пилообразная (рисунок 2.15 з).

Анализ многолетних данных реакции мощности амбиентного эквивалента дозы гамма-излучения на жидкие атмосферные осадки позволил классифицировать различные формы отклика гамма-фона по характерным отличительным признакам:

1. Время начала роста гамма-фона соответствует началу осадков (точка 1 на рисунке 2.16);

2. Скорость роста гамма-фона (изменение угла наклона кривой роста) характеризует текущее значение интенсивности осадков;

3. Время наступления максимума (если в одном всплеске их несколько, то 1-го) соответствует окончанию осадков (кроме форм II типа), что соответствует точке 4 на рисунке 2.16;

4. Экспоненциальное уменьшение гамма-фона после максимума означает, что начался радиоактивный распад продуктов распада радона Bi-214 и Pb-214 , осажденных на землю, поэтому примерно через 3 ч их активность снижается более чем на 2 порядка;

5. Если после достижения максимума наблюдается плоская (небольшое падение и продолжающийся слабый рост) или колоколообразная форма, то это однозначно говорит о том, что дождь продолжается с переменной низкой интенсивностью по отношению к предыдущему интервалу (иллюстрация на рисунках 2.15в и 2.15г).

Для примера, определения по гамма-фону таких характеристик осадков как время начала и время окончания, рассмотрим случай произошедший 30 мая 2017 и изображенный на рисунке 2.16.

Начало дождя сопровождается увеличением гамма-фона, чему соответствует сегмент 1–2 рисунка 2.16, здесь же можно наблюдать прямую зависимость резкого повышения интенсивности осадков и гамма-фона, затем интенсивность осадков уменьшается, что приводит к незначительному

уменьшению скорости роста мощности дозы гамма-излучения, и как следствие, уменьшению угла наклона ее производной (сегмент 2–3). Затем производная мощности дозы гамма-излучения увеличивается (сегмент 3–4), что соответствует повторному повышению интенсивности дождя. Точку 4 можно считать временем окончания дождя, за которым следует только радиоактивный распад Pb-214 и Bi-214 . Превышение мощности амбиентного эквивалента дозы гамма-излучения над фоновым значением в максимуме определяется как разность значений \dot{H} , измеренных в точке 4 и 1 (рисунок 2.16). Чтобы определить среднюю интенсивность осадков за событие \bar{I} , необходимо использовать временной интервал сегмента 1–4.

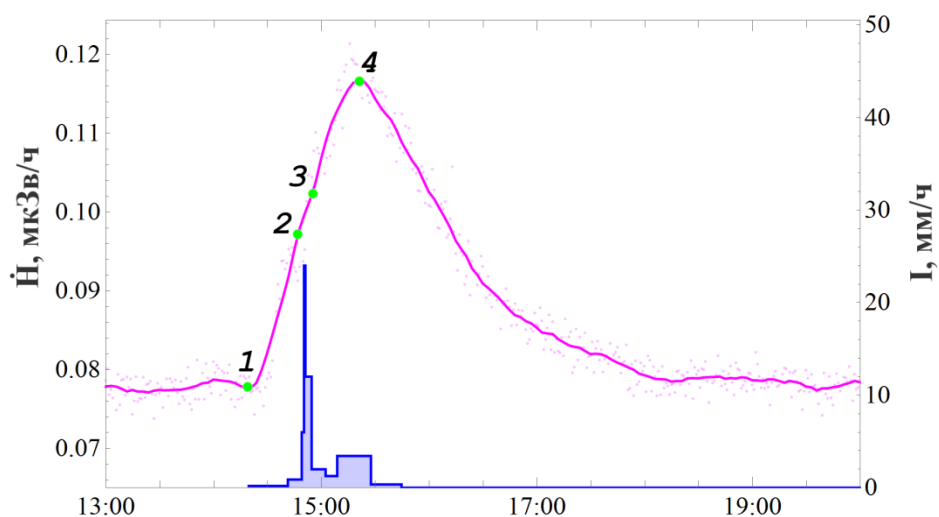


Рисунок 2.16 – Динамика гамма-фона (сплошная) и интенсивность осадков (гистограмма) 30 мая 2017 г.

2.5 Заключение по главе

Динамика приземного гамма-фона подвержена воздействию различных факторов, таких как:

- суточная, 11 и 22 летняя цикличность космической компоненты;
- спонтанное изменение солнечной компоненты, связанное с появлением солнечных пятен;
- суточное изменение влажности почвы, приводящее к увеличению самопоглощения гамма-излучения почвенных радионуклидов;
- суточная вариация дочерних продуктов распада радона, связанная с изменением радонопроницаемости почвы в зависимости от влажности;
- конвективный, вертикальный перенос дочерних продуктов распада радона в атмосфере.

Для получения характеристик осадков по изменению гамма-фона воздействие преобладающего количества радиационных факторов можно учитывать при помощи измерений мощности амбиентного эквивалента дозы за несколько минут перед началом реакции гамма-фона на осадки (следующей серии осадков). Это компенсирует воздействие фоновых источников радиации на получаемый результат и уменьшает потребность в использовании дополнительной аппаратуры контроля окружающей среды. Корректировку на суточную вариацию продуктов распада радона подоблачного пространства, связанную с изменением адвекции радона, удобно производить при помощи регистрации плотности потока радона с поверхности почвы.

Отдельного внимания заслуживает конвективный, вертикальный перенос дочерних продуктов распада радона в атмосфере, так как верхняя граница облака может находиться ниже конвективного выноса приземных аэрозолей, что приведет к недооценке характеристик осадков по гамма-фону. Кроме того такие процессы как турбулентность и скорость вертикального потока воздуха связаны с выносом и распределением изотопов Bi-214 , Pb-214 по высоте атмосферы. Это обстоятельство обнадеживает на применении соотношения радионуклидов Bi-

^{214}Pb , осажденных дождевой водой на поверхность почвы, в качестве трассера для диагностики состояния предливневой атмосферы – оценки турбулентности и вертикальных потоков воздуха, высоты выноса естественной радиоактивности с приземных слоев.

Взаимосвязь между интегральной величиной активности радионуклидов радонового ряда с турбулентностью атмосферы, скоростью потока воздуха будет рассмотрена в следующей главе.

ГЛАВА 3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ ПО ИНТЕНСИВНОСТИ ОСАДКОВ

В первом разделе главы описаны уравнения вертикального переноса радона и дочерних его продуктов в атмосфере, приведен переход от рассмотрения динамики объемной активности радона и дочерних продуктов его распада по оси z и времени t к интегральным активностям этих радионуклидов в подоблачном пространстве. Приводятся результаты расчета распределения продуктов распада радона по высоте атмосферы в зависимости от турбулентного перемешивания и вертикального движения воздуха при стационарных условиях. А также рассчитанные соотношения $Bi-214 / Pb-214$ в дождевой воде и на поверхности почвы, наблюдаемые во время осадков, что может быть полезным при изучении конвективных потоков и турбулентного перемешивания в подоблачной атмосфере при использовании в качестве маркера естественной радиоактивности.

Во втором разделе представлена математическая модель динамики активности дочерних продуктов распада радона, осаждаемых на земную поверхность жидкими атмосферными осадками, отличающаяся рассмотрением интегральных значений активностей воздушного столба.

В третьем – метод реконструкции гамма-фона, основанный на измерении интенсивности ливневых осадков, в котором вместо измерения вертикального градиента объёмной активности дочерних продуктов распада радона достаточно знать плотность потока радона с поверхности грунта.

Далее приводятся примеры экспериментальной проверки, делается заключение по главе.

3.1 Распределение дочерних продуктов распада радона в подоблачном пространстве

В первом подразделе описаны причины отступления от использования объемной активности радона и дочерних продуктов его распада при

восстановлении гамма-излучения по известной интенсивности осадков, а также при решении обратной задачи.

Во втором – в частных примерах, рассчитанных для стационарного состояния, наглядно продемонстрировано сложное поведение объемной активности Рb-214 и Вi-214 в зависимости от параметров атмосферы.

В третьем – приводятся рассчитанные для стационарных условий данные, однозначно связывающие отношение интегральных активностей Вi-214, Рb-214 подоблачного пространства с высотой облака, турбулентным перемешиванием и скоростью вертикального движения воздуха.

3.1.1 Математическая модель распределения радионуклидов по высоте атмосферы

Широко используемая во всем мире модель вертикального переноса радионуклидов в атмосфере учитывает: 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; 6) вертикальный перенос воздуха. Изменение во времени t и по координате z объемной активности радона и продуктов его распада в приземной атмосфере можно представить системой дифференциальных уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial A_{Rn}(z, t)}{\partial t} &= (D_{mRn} + D_T(z, t)) \frac{\partial^2 A_{Rn}(z, t)}{\partial z^2} - v_W(z, t) \frac{\partial A_{Rn}(z, t)}{\partial z} - \lambda_{Rn} A_{Rn}(z, t) \\ \frac{\partial A_i(z, t)}{\partial t} &= (D_{m_i} + D_T(z, t)) \frac{\partial^2 A_i(z, t)}{\partial z^2} - v_d(z, t) \frac{\partial A_i(z, t)}{\partial z} + \lambda_{di} A_{i-1}(z, t) - \lambda_{di} A_i(z, t) \end{aligned} \right\} (3.1.1)$$

где $A_{Rn}(z, t)$ и $A_i(z, t)$ – функции от времени и координаты объемной активности Rn-222 и Po-218, Рb-214, Вi-214 (соответствующие индексам $i = 2, 3, 4$), Бк/м³;

D_{mRn} и D_{m_i} – коэффициенты молекулярной диффузии Rn-222 и продуктов его распада, м²/с;

$D_T(z, t)$ – функция от времени и координаты коэффициента турбулентности атмосферы, $\text{м}^2/\text{с}$;

$v_d(z, t) = v_W(z, t) + v_F$; $v_W(z, t)$ – функция от времени и координаты вертикальной составляющей скорости воздуха, $\text{м}/\text{с}$;

v_F – скорость осаждения под действием силы тяжести, $\text{м}/\text{с}$;

λ_{Rn} – постоянная радиоактивного распада радона Rn-222, с^{-1} ;

$\lambda_{di} = \lambda_i + L$; λ_i – постоянная радиоактивного распада i -радионуклида, с^{-1} ;

L – коэффициент вымывания аэрозолей осадками, с^{-1} . При отрицательных значениях скорость ветра v_W направлена к поверхности земли, при положительных – совпадает с направлением оси z .

Система уравнений (3.1.1) дополнена начальными и краевыми условиями

$$\left. \begin{aligned} & -(D_{m_{Rn}} + D_T(z, t)) \frac{\partial A_{Rn}(z, t)}{\partial z} \Big|_{z=0} + v_W(z, t) A_{Rn}(z, t) \Big|_{z=0} = q_{Rn} \\ & (D_{m_i} + D_T(z, t)) \frac{\partial A_i(z, t)}{\partial z} \Big|_{z=0} - v_d(z, t) A_i(z, t) \Big|_{z=0} = 0 \end{aligned} \right\}, \quad (3.1.2)$$

$$A_{Rn}(z \rightarrow \infty, t) = 0; A_i(z \rightarrow \infty, t) = 0$$

где $q_{Rn}(t)$ – функция от времени плотности потока радона с поверхности грунта, $\text{Бк м}^2 \text{с}^{-1}$.

Практически невозможно измерить вертикальный профиль объемной активности Рb-214 и Вi-214 в приземной атмосфере, так как необходимо проводить синхронные измерения на разных высотах (до 1–2 км) в постоянно меняющейся среде атмосферы. Для моделирования динамики вертикального профиля активности Рb-214 и Вi-214 необходимо иметь большую базу данных по измеренным значениям метеорологических величин, так как с высотой существенно меняется состояния атмосферы и погодных условий. Поэтому для решения поставленных задач был предложен новый подход в описании изменения активности радионуклидов подоблачного пространства, основанный на введении воздушного столба с основанием в 1 м^2 и высотой h , совпадающей с нижней границей облака.

Для моделирования динамики гамма-фона, создаваемой изотопами Pb-214 и Bi-214, осажденными на поверхности грунта в периоды жидких атмосферных осадков будем полагать, что радионуклиды вымываются только из подоблачного пространства. Это позволяет для воздушного столба высотой h и основанием 1 м^2 определить интегральное значение

$$A_i^h(t) = \int_0^h A_i(z, t) \partial z. \quad (3.1.3)$$

Обозначим активность i -го радиоактивного аэрозоля или радона воздушного столба в начальный момент времени через $A_i^h(t=0) = A_i^h$.

В случае если мы переходим к интегральным значениям активности радионуклидов в подоблачном пространстве, то всегда выполняется условие радиоактивного равновесия:

$$A_{\text{Rn}}^{h0} = A_{\text{Po}}^{h0} = A_{\text{Pb}}^{h0} = A_{\text{Bi}}^{h0} = q_{\text{Rn}}/\lambda_{\text{rn}}, \quad (3.1.4)$$

где A_{Rn}^{h0} , A_{Po}^{h0} , A_{Pb}^{h0} , A_{Bi}^{h0} – начальные интегральные активности изотопов Rn-222, Po-218, Pb-214, Bi-214 в воздушном столбе, Бк/м².

3.1.2 Изменение объемной активности радионуклидов в зависимости от состояния атмосферы

Для оценки изменения объемной активности радионуклидов по высоте атмосферы удобно модель, выраженную системами уравнения 3.1.1 и 3.1.2, рассматривать в стационарном состоянии [103, 104]:

$$\left. \begin{aligned} -(D_{m_i} + D_T(z)) \frac{d^2 A_{\text{Rn}}(z)}{dz^2} - v_W(z, t) \frac{dA_{\text{Rn}}(z)}{dz} - \lambda_{\text{Rn}} A_{\text{Rn}}(z) &= 0 \\ (D_{m_i} + D_T(z)) \frac{d^2 A_i(z)}{dz^2} - v_d(z, t) \frac{dA_i(z)}{dz} + \lambda_{di} A_{i-1}(z) - \lambda_{di} A_i(z) &= 0 \end{aligned} \right\}, \quad (3.1.5)$$

краевое условие, учитывающее отсутствие радона и его дочерних продуктов с ростом высоты

$$A_i(z \rightarrow \infty) \rightarrow 0;$$

и начальное условие, учитывающее истекание радона с поверхности грунта, а также содержание продуктов распада у поверхности земли

$$\left. \begin{aligned} -\left(D_{m_{Rn}} + D_T(z)\right) \frac{d^2 A_{Rn}(z)}{dz^2} \Big|_{z=0} + v_w(z, t) \frac{dA_{Rn}(z)}{dz} \Big|_{z=0} &= q_{Rn} \\ \left(D_{m_i} + D_T(z)\right) \frac{d^2 A_i(z)}{dz^2} \Big|_{z=0} - v_d(z, t) \frac{dA_i(z)}{dz} \Big|_{z=0} &= 0 \end{aligned} \right\}, \quad (3.1.6)$$

Частные случаи стационарных уравнений переноса при разных значениях коэффициента турбулентной диффузии и скорости восходящего потока воздуха можно видеть на рисунке 3.1.

При значениях v_w и D_t близких к нулю радиоактивное равновесие между объемными активностями Рb-214 и Вi-214 устанавливается до высоты в 200 метров. Увеличение диффузии в десятки раз смещает момент наступления равновесия между объемными активностями изотопов до достижения высоты в 500 метров над землей. В то же время изменение скорости восходящего потока воздуха в 15 раз смещает до 1.5 км высоту установления равновесия объемных активностей Рb-214 и Вi-214. Турбулентное перемешивание и восходящие потоки способствуют более интенсивному выносу Вi-214 из приземного слоя воздуха по сравнению с содержанием Рb-214. Преобладание концентрации Рb-214 над Вi-214, на высоте от метров до нескольких километров в большей степени зависит от скорости восходящего потока воздуха, чем от турбулентного перемешивания.

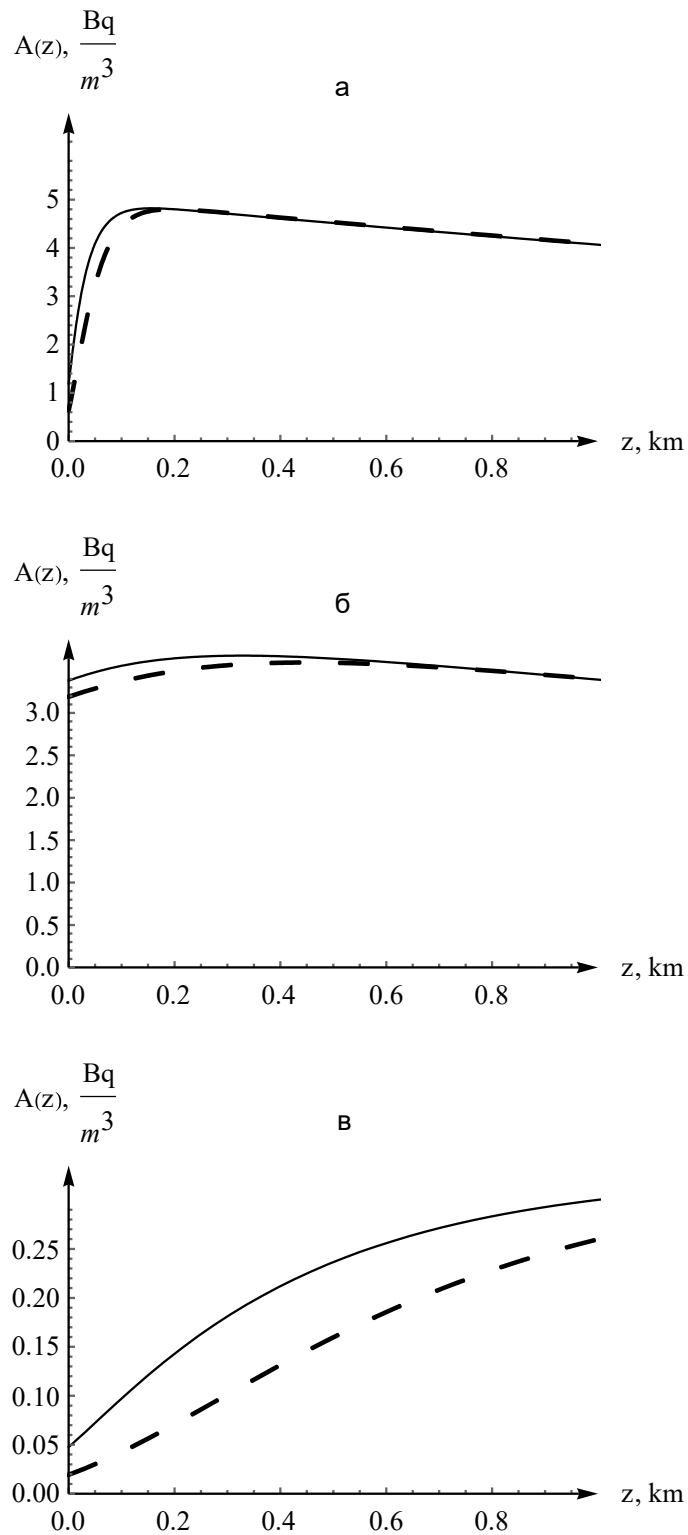


Рисунок 3.1 – Изменение объемной активности радионуклидов Pb-214 (сплошная линия) и Bi-214 (штрихованная линия) по высоте для разных случаев состояния атмосферы. а. – $v_w=0.01$, $D_t=0.13$; б. – $v_w=0.01$, $D_t=15$; в. – $v_w=0.15$, и $D_t=15$

Исходя из данных, приведенных в таблице 3.1, с ростом высоты нижней границы облака происходит восстановление равновесия между интегральными активностями Pb-214 и Bi-214. В то же время равновесие устанавливается раньше для малых значений восходящего потока воздуха.

Частный случай решения стационарного уравнения переноса для инверсии восходящего потока воздуха на высоте 1 км ($h = 1$ км, $v_w = 0$) и $D_t = 0.5$ показан на рисунке 3.2.

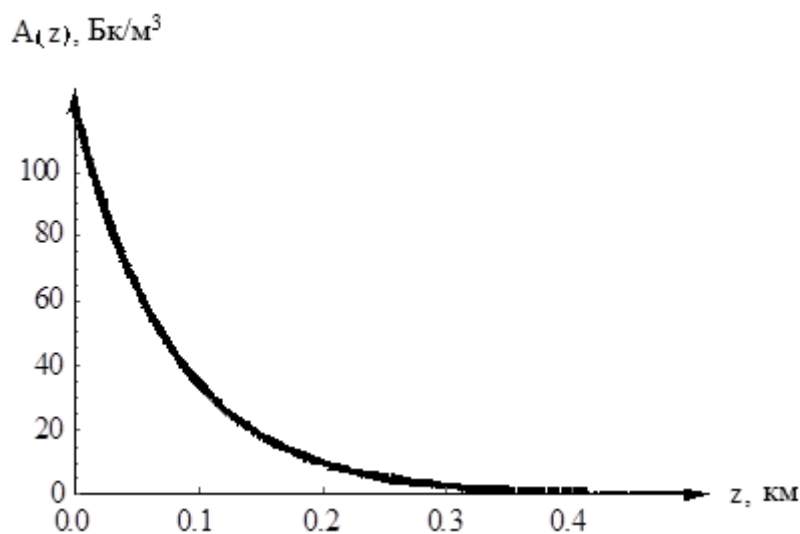


Рисунок 3.2 – Поведение равновесной объемной активности радона и его дочерних продуктов распада

При инверсии происходит экспоненциальный спад объемной активности радона и его продуктов распада. Объемные активности изотопов радонового ряда равны на всех высотах. Интегральные значения A_i^h продуктов распада радона сопоставимы между собой, а их отношение сводится к единице: $A_{Rn-222}^h : A_{Po-218}^h = 1$, $A_{Po-218}^h : A_{Pb-214}^h = 1$, $A_{Pb-214}^h : A_{Bi-214}^h = 1$. Инверсия атмосферы способствует равновесному накоплению изотопов радона в дождевой воде и на поверхности земли.

Из рисунка 3.2 и 3.1 для высоты 0 м видно различное поведение объемных активностей Pb-214 над Bi-214 при инверсии, турбулентном перемешивании и восходящем потоке воздуха. Принимая во внимание, что частные случаи для этих

рисунков построены при одинаковом состоянии плотности потока радона с поверхности грунта ($\text{ППР} = 0.05 \text{ Бк}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$), можно делать предположение о возможной индикации состояния атмосферы по плотности потока радона и объемной активности продуктов его распада в приземных слоях атмосферы, высотой до 200 м.

3.1.3 Соотношение интегральных активностей Pb-214 и Bi-214 в зависимости от состояния атмосферы

Чтобы найти соотношение радионуклидов радонового ряда, вымываемых дождевой водой из атмосферы, необходимо проинтегрировать объемные активности радионуклидов $A_i(z)$ в зависимости от высоты нижней границы облаков. Интегральные значения A_i^h активности i -го радионуклида в атмосферном столбе с единичным основанием 1 м^2 и высотой h , м, определяем из уравнения 3.1.3, но с учетом стационарного состояния.

В зависимости от высоты нижней границы облака для G класса устойчивости атмосферы [105] и различных значений v_w рассчитанные интегральные величины A_i^h в виде отношений $A_{\text{Rn-222}}^h : A_{\text{Po-218}}^h : A_{\text{Pb-214}}^h : A_{\text{Bi-214}}^h$ приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Отношение средневзвешенных по высоте нижней границы облака активностей $A_{\text{Rn-222}} : A_{\text{Po-218}} : A_{\text{Pb-214}} : A_{\text{Bi-214}}$ (относительные единицы) при различных скоростях вертикальной составляющей воздуха для G класса устойчивости атмосферы

$D_t, \text{м}^2/\text{с}$	$v_w, \text{м}/\text{с}$	$h, \text{км}$		
		0.6	0.8	1
0.13	0.01	1.00:1.00:0.96:0.93	1.00:1.00:0.97:0.95	1.00:1.00:0.98:0.96
0.13	0.05	1.00:0.98:0.79:0.65	1.00:0.98:0.84:0.73	1.00:0.99:0.87:0.79
0.13	0.1	1.00:0.95:0.60:0.38	1.00:0.97:0.69:0.50	1.00:0.97:0.75:0.58
0.13	0.15	1.00:0.93:0.47:0.23	1.00:0.95:0.56:0.33	1.00:0.96:0.63:0.42
0.13	0.2	1.00:0.91:0.38:0.15	1.00:0.93:0.47:0.23	1.00:0.95:0.54:0.31

Таблица 3.1 – Продолжение

$D_t, \text{м}^2/\text{с}$	$v_w, \text{м}/\text{с}$	$h, \text{км}$		
		1.2	1.4	1.6
0.13	0.01	1.00:1.00:0.98:0.97	1.00:1.00:0.98:0.97	1.00:1.00:0.99:0.98
0.13	0.05	1.00:0.99:0.89:0.82	1.00:0.99:0.91:0.85	1.00:0.99:0.92:0.87
0.13	0.1	1.00:0.98:0.79:0.65	1.00:0.98:0.82:0.70	1.00:0.98:0.84:0.73
0.13	0.15	1.00:0.97:0.69:0.50	1.00:0.97:0.73:0.56	1.00:0.97:0.76:0.61
0.13	0.2	1.00:0.96:0.60:0.38	1.00:0.96:0.65:0.44	1.00:0.97:0.69:0.50

В большинстве работ, основанных на анализе активностей висмута и свинца в собранной дождевой воде, используется отношение $A_{\text{Bi-214}}:A_{\text{Pb-214}}$, что эквивалентно активности радионуклидов атмосферного столба (интегральному значению) высотой сопоставимой с нижней границей облака h , то есть $A_{\text{Bi-214}}^h:A_{\text{Pb-214}}^h$. Эти отношения представлены в таблице 3.2. Для высоты нижней кромки облака в 0,2–1,4 км и скорости восходящего потока воздуха от 0.05 до 0.2 м/с, некоторые отношения активностей висмута и свинца попадают в диапазон от 0.6 до 0.7, чем схожий со значениями $A_{\text{Bi-214}}:A_{\text{Pb-214}}$ измеренными в дождевой воде Праги [9]. Высокие значения восходящего потока воздуха, вероятнее всего, связаны с городской застройкой и ее влиянием на возрастание конвективного потока. Например, для менее урбанизированного района Индии такие значения достаточно редки и занимают не более 10 % от наблюдаемых событий [106].

Таблица 3.2 – Отношение средневзвешенных по высоте облака активностей $AhBi-214:AhPb-214$ (относительные единицы) в зависимости от коэффициента турбулентной диффузии и вертикальной скорости воздуха.

$D_t, \text{ м}^2/\text{с}$	$v_w, \text{ м/с}$	$h, \text{ км}$									
		0.2	0.4	0.6	0.8	1	1.2	1.4	1.6	1.8	2
0.13	0.01	0.91	0.95	0.97	0.98	0.98	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99
0.13	0.05	0.51	0.72	0.82	0.87	0.91	0.93	0.95	0.95	0.95	0.96
0.13	0.10	0.31	0.49	0.63	0.72	0.77	0.85	0.87	0.88	0.88	0.91
0.13	0.15	0.18	0.38	0.49	0.59	0.67	0.77	0.80	0.82	0.82	0.84
0.13	0.20	0.17	0.31	0.39	0.49	0.57	0.68	0.72	0.75	0.75	0.77
0.13	0.40	0.00	0.17	0.21	0.27	0.34	0.44	0.49	0.57	0.57	0.27
0.13	0.50	0.00	0.11	0.20	0.24	0.27	0.39	0.43	0.45	0.45	0.49
1.5	0.01	0.92	0.95	0.97	0.98	0.98	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99
1.5	0.05	0.59	0.74	0.83	0.87	0.90	0.93	0.94	0.95	0.95	0.96
1.5	0.10	0.35	0.52	0.64	0.73	0.78	0.85	0.87	0.89	0.89	0.90
1.5	0.15	0.24	0.39	0.51	0.60	0.67	0.77	0.80	0.82	0.82	0.84
1.5	0.20	0.17	0.30	0.41	0.50	0.58	0.63	0.68	0.72	0.75	0.78
5	0.01	0.93	0.96	0.97	0.98	0.98	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99
5	0.05	0.69	0.78	0.84	0.88	0.90	0.93	0.94	0.95	0.95	0.96
5	0.10	0.45	0.57	0.67	0.74	0.79	0.85	0.87	0.89	0.89	0.90
5	0.15	0.31	0.43	0.54	0.62	0.68	0.77	0.80	0.82	0.82	0.84
5	0.20	0.23	0.34	0.44	0.52	0.59	0.64	0.69	0.73	0.76	0.78

Таблица 3.2 – Продолжение

$D_t, \text{ м}^2/\text{с}$	$v_w, \text{ м/с}$	$h, \text{ км}$									
		0.2	0.4	0.6	0.8	1	1.2	1.4	1.6	1.8	2
15	0.01	0.95	0.96	0.97	0.98	0.98	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99
15	0.05	0.79	0.83	0.86	0.89	0.91	0.93	0.94	0.95	0.95	0.96
15	0.10	0.60	0.66	0.72	0.77	0.80	0.86	0.88	0.89	0.89	0.90
15	0.15	0.45	0.52	0.59	0.65	0.70	0.78	0.81	0.83	0.83	0.85
15	0.20	0.34	0.42	0.49	0.56	0.61	0.66	0.70	0.74	0.76	0.79
70	0.01	0.96	0.97	0.97	0.97	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.99
70	0.05	0.89	0.90	0.91	0.92	0.92	0.94	0.94	0.95	0.95	0.95
70	0.10	0.79	0.80	0.82	0.83	0.85	0.88	0.89	0.90	0.90	0.91
70	0.15	0.69	0.71	0.73	0.75	0.77	0.81	0.83	0.85	0.85	0.86
70	0.20	0.60	0.62	0.65	0.67	0.70	0.73	0.75	0.77	0.79	0.81
100	0.01	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98
100	0.05	0.91	0.91	0.92	0.92	0.93	0.94	0.95	0.95	0.95	0.96
100	0.10	0.82	0.83	0.84	0.85	0.86	0.88	0.89	0.90	0.90	0.91
100	0.15	0.73	0.75	0.76	0.78	0.79	0.83	0.84	0.85	0.85	0.86
100	0.20	0.65	0.67	0.69	0.71	0.73	0.75	0.77	0.79	0.80	0.82
160	0.01	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98
160	0.05	0.92	0.93	0.93	0.93	0.94	0.95	0.95	0.95	0.95	0.96
160	0.10	0.86	0.86	0.87	0.87	0.88	0.90	0.90	0.91	0.91	0.92
160	0.15	0.79	0.79	0.80	0.81	0.82	0.84	0.85	0.86	0.86	0.87
160	0.20	0.72	0.73	0.74	0.75	0.77	0.78	0.79	0.81	0.82	0.83

Из таблицы 3.2 видно, что спад отношения $A_{\text{Bi-214}}^h : A_{\text{Pb-214}}^h$ происходит только при росте v_w , учитывая исследования работы [107], в которой наблюдалось уменьшение отношения $A_{\text{Bi-214}} : A_{\text{Pb-214}}$ при росте скорости выпадения дождя, можно предположить наличие связи между изменением восходящего потока воздуха и интенсивностью осадков. Это утверждение не противоречит здравому смыслу, так холодные капли дождя, проходя сквозь атмосферу, охлаждают ее верхние слои

сильнее, чем до начала дождя и создают дополнительный градиент температур, приводящий к росту скорости восходящего потока воздуха.

Игнорирование смещения отношения $A_{\text{Bi-214}}:A_{\text{Pb-214}}$ относительно единицы может создавать ошибку при анализе связи между интенсивностью осадков и ростом гамма фона:

$$\text{от } \frac{((1-1) \cdot 1.3 \cdot \text{кванта}_{\text{Bi-214}} + (1-0.8) \cdot 0.7 \cdot \text{кванта}_{\text{Pb-214}}) / \text{распад} \cdot 100\%}{(1.3 \cdot \text{кванта}_{\text{Bi-214}} + 0.7 \cdot \text{кванта}_{\text{Pb-214}}) / \text{распад}} = 7\%,$$

$$(1.3 \cdot \text{кванта}_{\text{Bi-214}} + 0.7 \cdot \text{кванта}_{\text{Pb-214}}) / \text{распад}$$

до $\frac{((1-1) \cdot 1.3 \cdot \text{кванта}_{\text{Bi-214}} + (1-0.6) \cdot 0.7 \cdot \text{кванта}_{\text{Pb-214}}) / \text{распад} \cdot 100\%}{(1.3 \cdot \text{кванта}_{\text{Bi-214}} + 0.7 \cdot \text{кванта}_{\text{Pb-214}}) / \text{распад}} = 14\%$, для измерений

$$(1.3 \cdot \text{кванта}_{\text{Bi-214}} + 0.7 \cdot \text{кванта}_{\text{Pb-214}}) / \text{распад}$$

выполненных при помощи радиометров;

и от $\frac{((1-1) \cdot 4.99 \cdot 10^{-17} \text{ Гр}_{\text{Bi-214}} + (1-0.8) \cdot 1.48 \cdot 10^{-17} \text{ Гр}_{\text{Pb-214}}) \cdot \text{м}^2}{(4.99 \cdot 10^{-17} \text{ Гр}_{\text{Bi-214}} + 1.48 \cdot 10^{-17} \text{ Гр}_{\text{Pb-214}}) \cdot \text{м}^2} \cdot 100\% = 5\%$,

$$(4.99 \cdot 10^{-17} \text{ Гр}_{\text{Bi-214}} + 1.48 \cdot 10^{-17} \text{ Гр}_{\text{Pb-214}}) \cdot \text{м}^2 / (\text{Бк} \cdot \text{с})$$

до $\frac{((1-1) \cdot 4.99 \cdot 10^{-17} \text{ Гр}_{\text{Bi-214}} + (1-0.6) \cdot 1.48 \cdot 10^{-17} \text{ Гр}_{\text{Pb-214}}) \cdot \text{м}^2}{(4.99 \cdot 10^{-17} \text{ Гр}_{\text{Bi-214}} + 1.48 \cdot 10^{-17} \text{ Гр}_{\text{Pb-214}}) \cdot \text{м}^2} \cdot 100\% = 9\%$,

для измерений

$$(4.99 \cdot 10^{-17} \text{ Гр}_{\text{Bi-214}} + 1.48 \cdot 10^{-17} \text{ Гр}_{\text{Pb-214}}) \cdot \text{м}^2 / (\text{Бк} \cdot \text{с})$$

выполненных при помощи дозиметров.

Как показано в таблице 3.2 скорость восходящего потока воздуха значительно влияет на соотношение между продуктами распада радона атмосферы, которое может быть обнаружено при спектрометрии или гамма-съемки местности во время дождя.

Обнаружено, что с ростом интенсивности дождя должно происходить смещение радиоактивного равновесия за счет увеличения скорости восходящего потока воздуха.

Инверсии способны уравнивать активности продуктов распада радона в атмосфере. Признаком наступления инверсии может служить равенство между

активностями дочерних продуктов распада радона в дождевой воде и на всех высотах атмосферы.

Гамма съемка местности, из-за изменения интегральной концентрации продуктов распада радона, может давать ошибку при поиске взаимосвязи с интенсивностью осадков. Такая ошибка может составлять от 7 до 14% по сравнению с результатами, получаемыми из условий установления радиоактивного равновесия при использовании гамма радиометров, и от 5 до 9% для измерений гамма фона при помощи дозиметров.

3.2 Математическая модель динамики осажденных на земную поверхность продуктов распада радона

Хотя уравнения баланса активности в воздухе известны уже давно [12], новизна подхода, как упоминалось ранее, заключается в том, что рассматривается активность радионуклидов, сосредоточенных в воздушном столбе площадью 1 м^2 и высотой от земли до нижней кромки облака. Таким образом, при моделировании динамики гамма-фона, создаваемого осажденными на поверхности земли изотопами Pb-214 и Bi-214 в период выпадения жидких атмосферных осадков получается избежать реконструкции вертикального профиля объемной активности указанных радионуклидов. Этот подход значительно упрощает моделирование осаднения на землю активности Bi-214 и Pb-214, за счет сужения набора входных параметров до измеряемых плотности потока радона и интенсивности осадков.

В период выпадения осадков динамика интегральных значений активности радионуклидов в воздушном столбе высотой h может быть определена путем решения системы уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dA_{Rn}^h(t)}{dt} = q_{Rn} - \lambda_{Rn} \cdot A_{Rn}^h(t) \\ \frac{dA_{Po}^h(t)}{dt} = \lambda_{Rn} \cdot A_{Rn}^h(t) - (\lambda_{Po} + L(t)) \cdot A_{Po}^h(t) \\ \frac{dA_{Pb}^h(t)}{dt} = \lambda_{Po} \cdot A_{Po}^h(t) - (\lambda_{Pb} + L(t)) \cdot A_{Pb}^h(t) \\ \frac{dA_{Bi}^h(t)}{dt} = \lambda_{Pb} \cdot A_{Pb}^h(t) - (\lambda_{Bi} + L(t)) \cdot A_{Bi}^h(t) \end{array} \right. \quad (3.2.1)$$

где $L(t) = I(t) \cdot k_1 \cdot k_2$ – функция коэффициента вымывания от времени, c^{-1} ;

$I(t)$ – функция интенсивности осадков от времени;

$k_1 = 10^{-5}$ (ч $mm^{-1} c^{-1}$) – коэффициент абсолютной вымывающей способности; k_2 – коэффициент относительной вымывающей способности. Система уравнений (3.2.1) дополнена начальным условием (3.1.4).

Динамика активности аэрозольных радионуклидов, осажденных на земную поверхность осадками, описывается следующей системой уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dA_{Po}^s(t)}{dt} = L(t) \cdot A_{Po}^h(t) - \lambda_{Po} \cdot A_{Po}^s(t) \\ \frac{dA_{Pb}^s(t)}{dt} = L(t) \cdot A_{Pb}^h(t) + \lambda_{Pb} \cdot A_{Po}^s(t) - \lambda_{Pb} \cdot A_{Pb}^s(t) \\ \frac{dA_{Bi}^s(t)}{dt} = L(t) \cdot A_{Bi}^h(t) + \lambda_{Bi} \cdot A_{Pb}^s(t) - \lambda_{Bi} \cdot A_{Bi}^s(t) \end{array} \right. \quad (3.2.2)$$

Разница между (3.2.1) и (3.2.1) заключается в том, что первая система описывает уменьшение активности подоблачного пространства, в то время как вторая – увеличение активности на поверхности почвы за счет вымывания из атмосферы. Поэтому во втором случае коэффициент вымывания $L(t)$ положительный.

В начальный момент времени активность радионуклидов, осажденных на земную поверхность, отсутствует, поэтому запишем $A_{Po}^{s0} = A_{Pb}^{s0} = A_{Bi}^{s0} = 0$. Решение систем уравнений (3.2.1) и (3.2.2) с начальными условиями (3.1.4) реализовано в среде Wolfram Mathematica с использованием встроенной функции DSolveValue и имеет следующий вид [108]:

$$\left\{ \begin{aligned}
 A_{Rn}^h &= \frac{\exp(-\tau \cdot \lambda_{Rn}) \cdot ((\exp(\tau \cdot \lambda_{Rn}) - 1) \cdot q_{Rn} + A_{Rn}^{h0} \cdot \lambda_{Rn})}{\lambda_{Rn}} \\
 A_{Po}^h &= \exp(-\tau \cdot (L_i + \lambda_{Po})) \cdot \frac{A_{Po}^{h0} \cdot (L_i + \lambda_{Po}) + \lambda_{Po} \cdot A_{Rn}^h (\exp(\tau \cdot (L_i + \lambda_{Po})) - 1)}{L_i + \lambda_{Po}} \\
 A_{Pb}^h &= \exp(-\tau \cdot (L_i + \lambda_{Pb})) \cdot \frac{A_{Pb}^{h0} \cdot (L_i + \lambda_{Pb}) + \lambda_{Pb} \cdot A_{Po}^h (\exp(\tau \cdot (L_i + \lambda_{Pb})) - 1)}{L_i + \lambda_{Pb}} \\
 A_{Bi}^h &= \exp(-\tau \cdot (L_i + \lambda_{Bi})) \cdot \frac{A_{Bi}^{h0} \cdot (L_i + \lambda_{Bi}) + \lambda_{Bi} \cdot A_{Pb}^h (\exp(\tau \cdot (L_i + \lambda_{Bi})) - 1)}{L_i + \lambda_{Bi}} \\
 A_{Po}^s &= \exp(-\tau \cdot \lambda_{Po}) \cdot \frac{L_i \cdot A_{Po}^h (\exp(\tau \cdot \lambda_{Po}) - 1) + \lambda_{Po} \cdot A_{Po}^{s0}}{\lambda_{Po}} \\
 A_{Pb}^s &= \exp(-\tau \cdot \lambda_{Pb}) \cdot \frac{L_i \cdot A_{Pb}^h (\exp(\tau \cdot \lambda_{Pb}) - 1) + \lambda_{Pb} \cdot A_{Pb}^{s0} + \lambda_{Pb} \cdot A_{Po}^s (\exp(\tau \cdot \lambda_{Pb}) - 1)}{\lambda_{Pb}} \\
 A_{Bi}^s &= \exp(-\tau \cdot \lambda_{Bi}) \cdot \frac{L_i \cdot A_{Bi}^h (\exp(\tau \cdot \lambda_{Bi}) - 1) + \lambda_{Bi} \cdot A_{Bi}^{s0} + \lambda_{Bi} \cdot A_{Pb}^s (\exp(\tau \cdot \lambda_{Bi}) - 1)}{\lambda_{Bi}}
 \end{aligned} \right. \quad (3.2.3)$$

где i – порядковый номер измерения мощности амбиентного эквивалента дозы;

L_i – дискретно заданный коэффициент вымывания для каждого временного интервала, равного τ , является кусочно заданной функцией от t ;

A_{Rn}^{h0} , A_{Po}^{h0} , A_{Pb}^{h0} , A_{Bi}^{h0} – активности радионуклидов в подоблачном пространстве из предыдущей итерации программы расчета, или начальные интегральные активности изотопов (3.1.4) при $t = <0$;

$A_{Rn}^h(t)$, $A_{Po}^h(t)$, $A_{Pb}^h(t)$, $A_{Bi}^h(t)$ – активности радионуклидов подоблачного пространства текущей итерации;

$A_{Po}^s(t)$, $A_{Pb}^s(t)$, $A_{Bi}^s(t)$ – активности осажденных радионуклидов текущей итерации;

A_{Po}^{s0} , A_{Pb}^{s0} , A_{Bi}^{s0} – активности осажденных радионуклидов из предыдущей итерации, или 0 значения до начала выпадения осадков $t = <0$.

(3.2.5)

3.3 Метод восстановления мощности дозы гамма-излучения

Общий вид системы (3.2.3) удобен для реализации алгоритма восстановления временной эволюции мощности амбиентного эквивалента дозы при помощи циклов вычисления переменных. Если восстановление мощности дозы выполняется с минутным интервалом $\tau = 60$ с, тогда общий период, охватываемый одной моделью, будет равен $i \cdot \tau$, где i – количество минут продолжительности осадков и времени восстановления значения мощности амбиентного эквивалента дозы до дождевого периода.

Метод реконструкции мощности дозы гамма-излучения в приземной атмосфере состоит из нескольких этапов.

Первым этапом является моделирование динамики интегральной активности радона и продуктов его распада в воздушном столбе с использованием систем уравнений (3.2.1).

Вторым этапом является моделирование динамики активности осажденных изотопов Po-218, Pb-214 и Bi-214 на поверхность почвы с использованием системы уравнений (3.2.2).

На третьем этапе производится реконструкция мощности дозы гамма-излучения от осажденных Pb-214 и Bi-214 путем суммирования произведений функций активности $A_{Pb}^S(t)$ и $A_{Bi}^S(t)$ на дозовые коэффициенты для соответствующих радионуклидов (\dot{H}_{Pb-214}^{1Bq} , \dot{H}_{Bi-214}^{1Bq} – дозовые коэффициенты рассчитываются численно или из предположения о дисковом плоском источнике). В данной работе дозовые коэффициенты для Pb-214 и Bi-214 были рассчитаны с помощью GEANT4 на высоте $R = 1$ м от земной поверхности для дискового источника радиусом 500 м, с учетом нижнего порога регистрации гамма-излучения детекторами БДКГ-03, равного 50 кэВ. Был использован встроенный в GEANT4 стандартный набор физических процессов QGSP_BIC_HP. Статистика составила 20 млрд. событий для каждого отдельного расчета (радионуклида). Дозовые коэффициенты составили:

$$\dot{H}_{Pb-214}^{1Bq} = 8.48 \cdot 10^{-7}, \text{ (мкЗв/ч)/(Бк/м}^2\text{)}; \quad (3.2.4)$$

$$\dot{H}_{Bi-214}^{1Bq} = 4.86 \cdot 10^{-6}, \text{ (мкЗв/ч)/(Бк/м}^2\text{)}. \quad (3.2.5)$$

Последним этапом является переход к суммарной мощности дозы $H(t)$ регистрируемой детектором. Для этого к фоновой составляющей H_0 , измеренной до выпадения осадков, необходимо добавить рассчитанные значения мощности доз, создаваемых свинцом и висмутом $H_{Pb} + H_{Bi}$. На рисунке 3.3 приведена иллюстрация реконструкции мощности дозы гамма-излучения в приземной атмосфере.

Для перехода на зарегистрированную эквивалентную мощность дозы $H(t)$ необходимо добавить мощность дозы, создаваемую свинцом и висмутом $H_{Pb} + H_{Bi}$, и учесть фоновую составляющую H_{Bkg} , которая присутствует до выпадения осадков, то есть (рисунок 3.4)

$$H = H_{bkg} + H_{Pb} + H_{Bi},$$

где H – показания дозиметра γ -излучения;

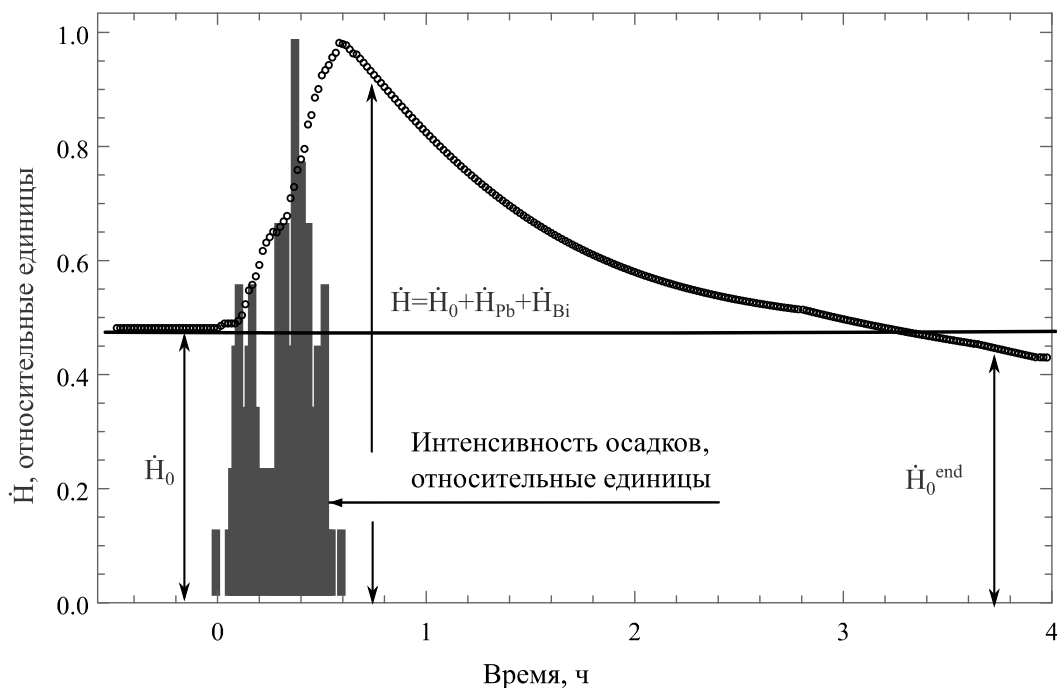


Рисунок 3.3. Восстановление мощности дозы гамма-излучения (круги) по интенсивности осадков (гистограмма). В относительных единицах

H_{Bkg} – фоновое значение мощности дозы до начала выпадения осадков (для второго и последующих событий осадков вместо H_{Bkg} следует использовать H_0^{end});

H_{Pb} – значение мощности дозы, сформированной активностью свинца в A_{Pb}^{S} ;

H_{Bi} – значение мощности дозы, сформированной активностью свинца в A_{Bi}^{S} .
 H_{Pb} , H_{Bi} – мощность амбиентного эквивалента дозы, создаваемая активностями осажденного свинца и висмута (A_{Pb}^{S} , A_{Bi}^{S}), рассчитанными по системе уравнений (3.2.2).

Стоит упомянуть, что переход от A_{Pb}^{S} , A_{Bi}^{S} к H_{Pb} , H_{Bi} , кроме дозовых коэффициентов (3.2.4, 3.2.5) может производиться при помощи калибровки аппаратуры через калибровочный коэффициент. Этот коэффициент подвержен изменению от типа прибора и подстилающей поверхности. Он может подбираться непосредственно под каждое событие осадков, что делает такой подход более гибким и позволяет нивелировать вымывающую способность дождя (среднего размера дождевых капель). Именно поэтому ряд исследователей предпочитают получать свой коэффициент для каждого дождя, то есть, калиброваться, подбирая величину программно или с использованием известной интенсивности, что при решении вопросов радиоэкологического мониторинга вполне реально.

На рисунке 3.4 показана динамика осажденной на поверхности почвы активности Pb-214 и Bi-214, а также рассчитанная суммарная мощность дозы гамма-излучения.

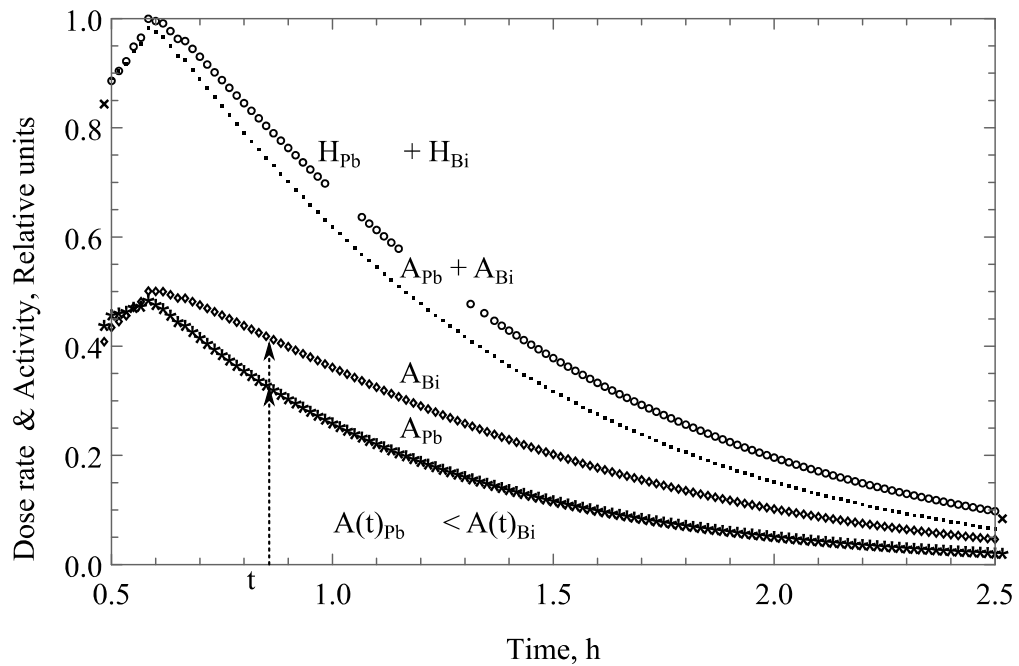


Рисунок 3.4. Изменение осажденной активности Pb-214 и Bi-214, и соответствующая ей мощность дозы гамма-излучения. Относительные единицы

Как видно из рисунка 3.4, со временем, после прекращения выпадения осадков ($t = 0,6$), свинец подвергается естественному распаду и переходит в висмут из-за более короткого периода полураспада. В интервале $t > 0,6$ активность висмута возрастает по сравнению со свинцом $A_{Pb}^S < A_{Bi}^S$. Из-за более высоких радиационных характеристик Bi-214 мощность дозы снижается медленнее, чем активность осажденных продуктов распада радона.

На рисунке 3.5 показан частный случай дождя с продолжительностью $t_1 - t_0 = 40$ минут. В этом примере сравнивается влияние выноса висмута из подоблачного пространства ($A_{Bi1}^{h0} = 0$), что приводит в конце дождя к снижению общей активности, осажденной на поверхности земли. Такое снижение составляет примерно 20% (t_1) по сравнению с дождем, в котором активность висмута и свинца в атмосфере равна ($A_{Bi2}^{h0} : A_{Pb2}^{h0} = 1:1$).

В работе [108] были смоделированы различные случаи соотношений изотопов свинца и висмута подоблачного пространства. А также сделан вывод, что если соотношение радионуклидов Pb-214 и Bi-214 подоблачного пространства неизвестно, то ошибка в результате восстановления значений активности может

составлять до 20%, а мощность дозы - до 25%, что происходит из-за возможной недооценки конвективного выноса Вi-214.

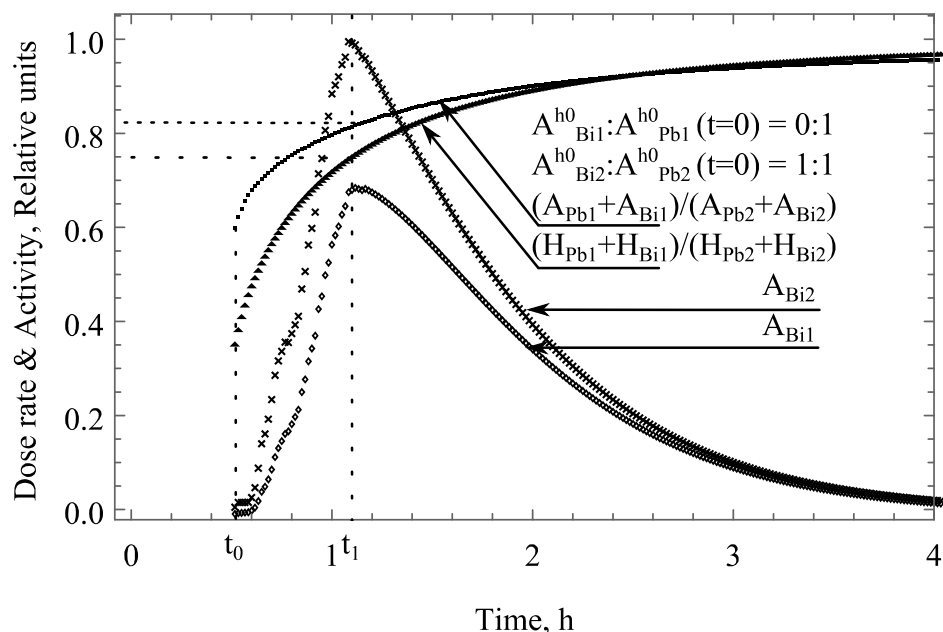


Рисунок 3.5 – Зависимость мощности дозы и активности осажденных на земную поверхность радионуклидов от активности висмута в подоблачном пространстве

Поэтому при моделировании динамики гамма-фона в периоды жидких атмосферных осадков крайне важно учитывать соотношение основных дозообразующих гамма-излучающих радионуклидов. Отсутствие висмута в подоблачном пространстве не приводит к его полному удалению из осажденных радионуклидов из-за продолжающегося процесса перехода Рb-214 в Вi-214.

Восстановление мощности дозы с учетом соотношений Вi-214/ Рb-214=0 и Вi-214/ Рb-214=1 формирует границы присутствия естественных радионуклидов на поверхности почвы. Что возможно позволит во время выпадения осадков определять наличие техногенного радиоактивного загрязнения атмосферы.

3.4 Экспериментальная проверка метода

Для экспериментальной проверки метода реконструкции гамма-фона по измеренной интенсивности осадков были сопоставлены данные, измеренные

детектором гамма-излучения ДБКГ-03, с рассчитанными значениями мощности амбиентного эквивалента дозы гамма-излучения по вышеописанному методу, основанному на использовании измеренных значений интенсивности осадков и плотности потока радона. По 44 исследованным случаям осадков эффективность метода подтверждается высоким коэффициентом детерминации ($R^2 = 0,81-0,99$) между измеренной и воссозданной мощностью эквивалента дозы в окружающей среде во время единичных дождей и серий ливней.

Например, на рисунке 3.5 показано одиночное событие с осадками, произошедшее 7 августа 2017 года.

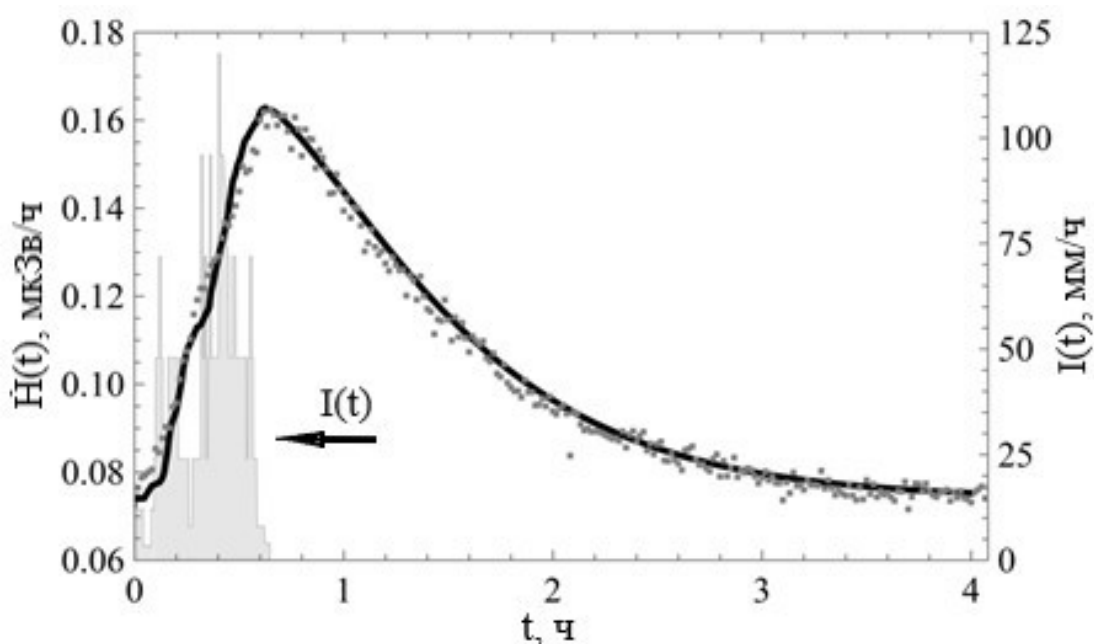


Рисунок 3.6 – Динамика осадков и гамма-фона: измеренная мощность дозы (точки); восстановленная мощность дозы (сплошная линия); интенсивность осадков (гистограмма)

Для этого события, согласно метеорологическим данным, основание облаков находилось на высоте 0,8 км. Максимальная интенсивность осадков составляла $120 \text{ мм}\cdot\text{ч}^{-1}$, а общее количество осадков – 23 мм. Измеренное значение плотности потока радона до выпадения осадков было в среднем $4,8 \cdot 10^{-4} \text{ Бк}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$. Для ливневого дождя, показанного на рисунке 4, получено хорошее согласие между расчетными и экспериментальными данными. Коэффициент детерминации R^2 составил 0,99, среднеквадратичная ошибка RMSE составила $0,004 \text{ мкЗв}\cdot\text{ч}^{-1}$.

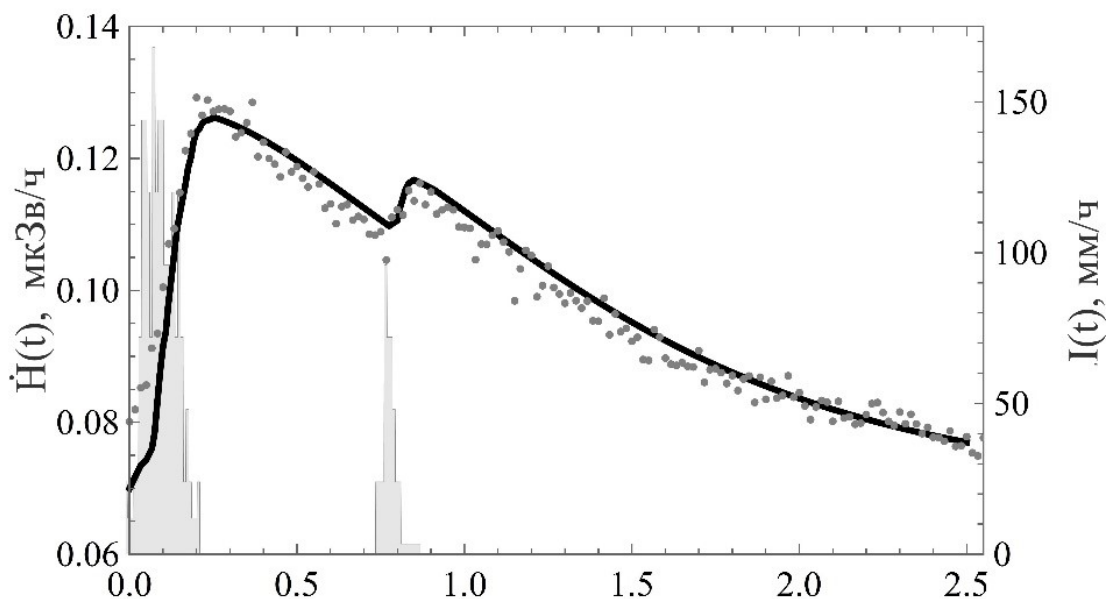


Рисунок 3.7 – Динамика осадков и гамма-фона: измеренная мощность дозы (точки); восстановленная мощность дозы (сплошная линия); интенсивность осадков (гистограмма)

Два последовательных ливневых дождя от 30 июня 2017 года, показаны на рисунке 3.7. Для этого случая выпадения осадков реконструированная мощность амбиентного эквивалента дозы имеет превосходное согласие с экспериментальными данными. Коэффициент детерминации $R^2 = 0,91$, среднеквадратичная ошибка RMSE составила $0,006 \text{ мкЗв} \cdot \text{ч}^{-1}$.

На Рисунке 3.8 показан случай выпадения осадков, произошедший 30 июля 2017 года. Согласно метеорологическим данным, высота нижнего края облаков составляла 1,2 км, интенсивность осадков при ее максимальном значении составляла $55 \text{ мм} \cdot \text{ч}^{-1}$, а общее количество осадков составило 8,6 мм. Измеренное значение плотности потока радона до выпадения осадков составляло в среднем $5,7 \cdot 10^{-4} \text{ Бк} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$.

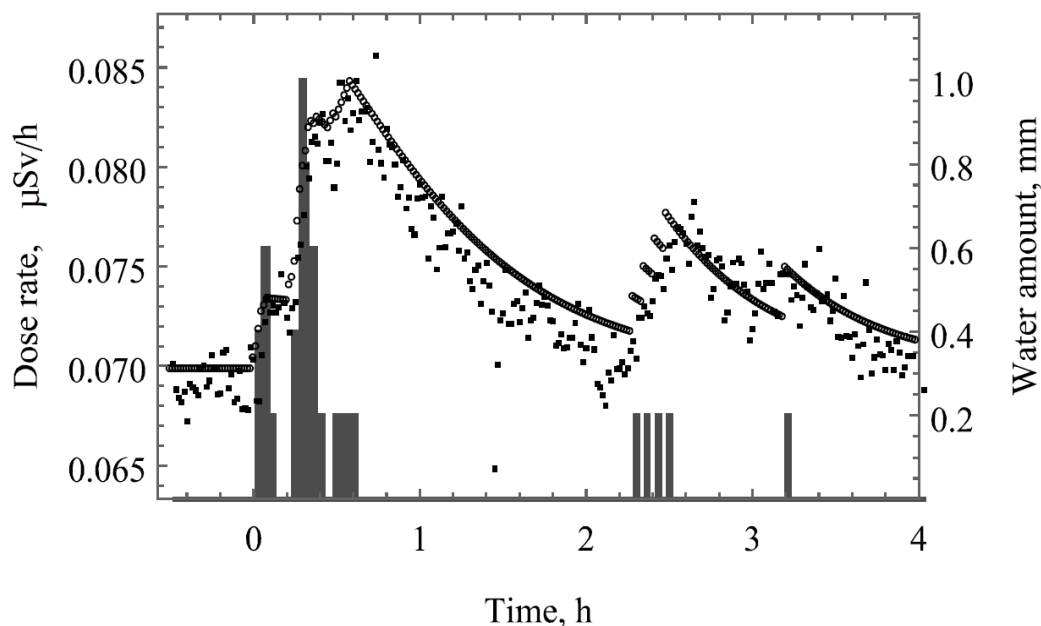


Рисунок 3.8 – Динамика осадков и гамма-фона: измеренная мощность дозы (точки); восстановленная мощность (кружки), количество осадков (гистограмма)

Восстановленная динамика мощности AMBIENTНОГО эквивалента дозы гамма-излучения (рисунок 3.8), коэффициент детерминации $R^2 = 0,81$, что указывает на хорошее соответствие между расчетными и экспериментальными данными. Среднеквадратичная ошибка RMSE составила $0,007 \text{ мкЗв} \cdot \text{ч}^{-1}$. В данном примере для интервала 1-2 ч после начала выпадения осадков наблюдается завышенное значение восстановленной мощности дозы по сравнению с зарегистрированной. Это возможно объяснить увеличением ослабляющей способности почвы, по отношению к гамма-излучению, из-за ее значительного влагонасыщения. Для восстановления AMBIENTНОГО эквивалента дозы циклического дождя использовалось значение \dot{N}_0^{Bkg} предыдущего события.

3.5 Заключение по главе

Анализ результатов работы позволяет сделать следующие важные выводы:

1. Разработана новая математическая модель динамики активности дочерних продуктов распада радона, осажденных на земную поверхность жидкими атмосферными осадками. Она позволяет определять естественную

убыль радионуклидов радонового ряда из подоблачного пространства, а также будет полезна для исследования коэффициента вымывания аэрозолей осадками.

2. Разработан новый метод восстановления мощности дозы гамма-излучения по интенсивности осадков и плотности потока радона. Он был испытан путем сравнения экспериментальных и реконструированных данных. Его эффективность подтверждается высоким коэффициентом детерминации ($R^2 = 0,81-0,99$) между измеренной и воссозданной мощностью эквивалента дозы окружающей среды во время единичных и повторяющихся в течение суток дождей. Метод позволяет во время выпадения осадков определять наличие техногенного радиоактивного загрязнения атмосферы.

3. Метод восстановления суммарной мощности дозы, изложенный в данной работе, удобен для программной реализации и состоит из трех последовательных этапов: моделирование динамики активности продуктов распада радона в атмосферном столбе; на поверхности почвы; и итоговая реконструкция временной изменчивости мощности амбиентного эквивалентной дозы гамма-излучения окружающей среды.

4. Предложенный новый подход оправдал себя тем, что для восстановления мощности амбиентного эквивалента дозы необходимо знать не более трех параметров, часть из которых может с успехом быть заменена определенным калибровочным коэффициентом.

Очевидно, что в данной работе раскрыт не весь потенциал описанного метода. Например, в тех случаях, когда есть серия дождей с переменной интенсивностью, он требует уточнения, о чем свидетельствует сниженный коэффициент детерминации. В этом направлении возможно дальнейшее развитие изложенных подходов, а также проверка на других типах атмосферных осадков. Использование метода в совокупности с современными технологиями может помочь в решении вопроса о количественном и качественном очищении атмосферы за счет вымывания ливневыми осадками.

ГЛАВА 4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ЛИВНЕВЫХ ОСАДКОВ ПО ИЗМЕРЕННОМУ ГАММА-ФОНУ

В первом разделе главы показано преобразование систем уравнений, изложенных ранее. Что в целом упрощает разрешение систем относительно коэффициента вымывания радионуклидов ливневыми осадками.

Во втором разделе описан метод определения интенсивности ливневых осадков по измеренной мощности амбиентного эквивалента дозы и плотности потока радона с поверхности грунта. В методе используется полученная разность между максимальной и фоновой мощностью дозы, расчет осажденной активности, зависящей от вымывающей способности дождя и плотности потока радона с поверхности почвы; приравнивание мощности дозы сформированной осажденной активностью к измеренному значению; расчет средней интенсивности осадков.

Далее работа знакомит с верификацией метода на ливневых осадках и заключением по главе.

4.1. Математическая модель, описывающую связь между средним значением интенсивности осадков и активностями Pb-214, Bi-214

Из-за сложной калибровки спектрометров затруднительно измерить динамику активности продуктов распада радона Pb-214 и Bi-214, осажденных на поверхности земли, или их активность в момент прекращения осадков. Практически невозможно измерить общую активность этих радионуклидов в приземной атмосфере, так как необходимо проводить измерения на разных высотах (до 2 км.), в одно и то же время и меняющейся среде атмосферы. В равновесном состоянии, когда активность радона и продуктов его распада одинакова, в отсутствии дождя и при $h \rightarrow \infty$, $A_{\text{Pb-214}}^h$ и $A_{\text{Bi-214}}^h$ можно определить по значению плотности потока радона с поверхности земли q_{Rn} , Бк $\text{м}^{-2} \text{с}^{-1}$, из системы уравнений (3.1.4).

В период выпадения осадков интегральные значения активности радионуклидов в столбе высотой h могут быть определены путем решения описанной ранее системы уравнений (3.1.3).

Изначально (глава 3) зависящая от времени активность радионуклидов, осаждаемых на поверхность почвы в результате выпадения осадков, определялась из выражений, полученных путем совместного решения систем уравнений (3.2.1) и (3.2.2). Это существенно затрудняло расчет характеристик осадков из-за большого количества вхождений физических процессов радиоактивного распада радона и его потомков, сосредоточенных как в атмосфере, так и на поверхности почвы, а также очистки атмосферы от радионуклидов. В дальнейшем за счет простых преобразований было получено существенное упрощение описанной в 3 главе модели. За счет того, что физические процессы, представленные уравнением (3.2.2) и описывающие накопление изотопов Рb-214 Вi-214 на поверхности земли, можно преобразовать в виде убыли из воздушного столба этих радионуклидов следующим образом (рисунок 4.1):

$$\left. \begin{aligned} A_{\text{Pb-214}}^s(t) &= A_{\text{Pb-214}}^h(t=0) - A_{\text{Pb-214}}^h(t), \text{ Бк м}^{-2}; \\ A_{\text{Bi-214}}^s(t) &= A_{\text{Bi-214}}^h(t=0) - A_{\text{Bi-214}}^h(t), \text{ Бк м}^{-2}; \end{aligned} \right\} \quad (4.1.1)$$

где $A_{\text{Pb-214}}^s(t)$ и $A_{\text{Bi-214}}^s(t)$ – накопленные на поверхности земли активности изотопов Рb-214 Вi-214.

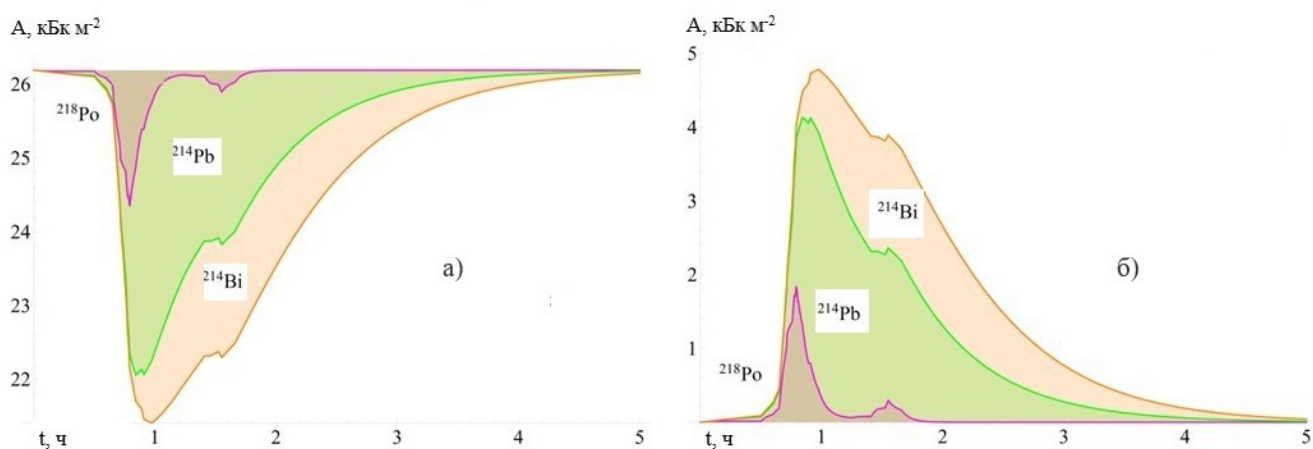


Рисунок 4.1.– Динамика активности Рb-214 и Вi-214 в период осадков 11 июня 2017: а) – в атмосфере; б) – на поверхности земли

Аналитическим решением системы дифференциальных уравнений (4.1.1) с постоянными коэффициентами и начальными условиями (3.1.4) является уравнение (4.1.2). Это решение произведено из предположения о средней интенсивности осадков в течение одного события, такой оценки вполне достаточно для практической задачи кратковременного прогноза осадков [100].

$$A_3^h = \frac{q e^{-t(L + \lambda_2)} (L \lambda_2 e^{t(\lambda_2 - \lambda_3)} (L + \lambda_2) + \lambda_2 \lambda_3 e^{t(L + \lambda_2)} (\lambda_2 - \lambda_3) - L \lambda_3 (L + \lambda_3))}{\lambda_1 (L + \lambda_2) (L + \lambda_3) (\lambda_2 - \lambda_3)}$$

$$X = -L \lambda_2 \lambda_3 e^{t(\lambda_2 + \lambda_3)} (L + \lambda_2) (L + \lambda_3) (\lambda_2 - \lambda_3) \quad (4.1.2)$$

$$Y = -\lambda_2 \lambda_3 \lambda_4 e^{t(L + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4)} (\lambda_2 - \lambda_3) (\lambda_2 - \lambda_4) (\lambda_3 - \lambda_4)$$

$$Z = -L \lambda_2 \lambda_4 e^{t(\lambda_2 + \lambda_4)} (L + \lambda_2) (L + \lambda_4) (\lambda_2 - \lambda_4)$$

$$W = -L \lambda_3 \lambda_4 e^{t(\lambda_3 + \lambda_4)} (L + \lambda_3) (L + \lambda_4) (\lambda_3 - \lambda_4)$$

$$A_4^h = \frac{q e^{-t(L + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4)} (X + Y + Z + W)}{\lambda_1 (L + \lambda_2) (L + \lambda_3) (L + \lambda_4) (\lambda_2 - \lambda_3) (\lambda_2 - \lambda_4) (\lambda_4 - \lambda_3)}$$

где L – коэффициент вымывания аэрозоля осадками, равный $L = I_{\text{middle}} k_1 \cdot k_2$,

k_1 – коэффициент абсолютной вымывающей способности осадков, равный 36 м^{-1} ($10^{-5} \text{ ч}/(\text{мм} \cdot \text{с})$) [109];

k_2 – коэффициент относительной вымывающей способности осадков, отн. единицы, равные 1 для дождя [109];

I – средняя интенсивность осадков во время события, м/с;

индексы 1, 2, 3, 4 – соответствуют изотопам – Rn-222, Po-218, Pb-214, Bi-214.

4.2 Метод оценки характеристик ливневых осадков по радиационному фону приземной атмосферы

Разработку метода оценки средних за одно событие значений количества и интенсивности жидких атмосферных осадков производили, исходя из набора величин, которые мы можем реально измерить либо оценить, исходя из известных геофизических данных и ядерных констант, либо оценить по известным геофизическим данным и ядерным константам. Кроме измеренной мощности дозы гамма-излучения технически возможно измерить плотность потока радона q_{Rn} с поверхности почвы, либо оценить её по известным моделям из концентрации почвенного Ra-226 (U-238).

Введем ряд допущений и уточнений:

1. Процесс вымывания осадками дочерних продуктов распада радона происходит только из подоблачного пространства (т.е. отсутствует присоединение аэрозолей к облачным каплям или вклад такого присоединения невелик).

2. Вклад дочерних продуктов торона и ряда радона, кроме изотопа Pb-214 и Bi-214, пренебрежимо мал. То есть считаем Pb-214 и Bi-214 основными дозоформирующими радионуклидами.

Как показали исследования, поведение производной $\frac{d\dot{H}(t)}{dt}$ характеризует форму интенсивности осадков. Для исключения сложных форм и поведений гамма-фона рекомендуется визуально или при помощи производной анализировать изучаемые события, что минимизирует ошибки определения характеристик осадков. Данная работа основана на визуальном анализе событий осадков. После выбора подходящих по форме событий, для определения среднего значения интенсивности дождя для одного события, применяется модель (4.1.2) раздела 4.1.

На рисунке 4.2 показан алгоритм (схема) реализации метода для определения средней интенсивности и количества осадков по атмосферному гамма-фону.

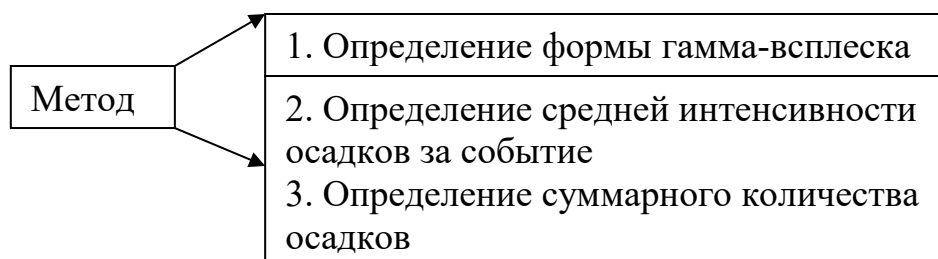


Рисунок 4.2. Алгоритм (схема) реализации метода.

Оценка средних значений интенсивности и количества осадков за одно событие производится по данным мониторинга, получаемым с дозиметров мощности дозы гамма-излучения, и с учетом равенства:

$$\Delta \dot{H}_{\text{measured}} = \Delta \dot{H}_{\text{estimated}} \quad (4.2.1)$$

где $\Delta \dot{H}_{\text{measured}}$ и $\Delta \dot{H}_{\text{estimated}}$ – измеренное и рассчитанное значения всплеска (максимальное зарегистрированное значение, превышающее фоновое) мощности дозы гамма-излучения, соответственно, мкЗв/ч.

Значение $\Delta \dot{H}_{\text{measured}}$ может быть определено по экспериментальным данным следующим образом:

$$\Delta \dot{H}_{\text{measured}} = \dot{H}_{\text{end}} - \dot{H}_0 \quad (4.2.2)$$

где \dot{H}_0 – значение мощности дозы гамма-излучения в момент t_0 , соответствующий началу выпадения жидких атмосферных осадков. Определяется как точка перед непрерывным возрастанием производной мощности дозы до максимального значения \dot{H}_{end} , мкЗв/ч;

\dot{H}_{end} – максимальное значение мощности дозы гамма-излучения в “всплеске”, мкЗв/ч.

Анализ теоретического материала из области ядерной физики и физики взаимодействия ионизирующего излучения с веществом, а также экспериментальных данных, позволяет утверждать, что величина всплеска мощности дозы гамма-излучения $\Delta \dot{H}$, мкЗв/ч пропорциональна осажденной на поверхности почвы активности радионуклидов в конце выпадения осадков. Кроме того, на высоте в один метр от поверхности почвы, каждый j -й радионуклид единичной активности на единицу площади вносит постоянный вклад \dot{H}_j ^{1Bq} в

общую мощность дозы гамма-излучения приземной атмосферы, которая зависит от ядерных характеристик радионуклида.

Если на момент окончания ливневых осадков известна активность радионуклидов, осажденных на поверхность почвы, и равна $A_j^s(t = t_{end})$, Бк·м⁻², тогда, зная дозовый коэффициент для единицы активности этих радионуклидов, можно записать точное равенство между измеренным значением амплитуды мощности дозы гамма-излучения и активностью осажденных на поверхности почвы радионуклидов:

$$\Delta \dot{H}_{measured} = \sum_{j=1}^n (\dot{H}_j^{1Bq} A_j^s(t = t_{end})) \quad (4.2.3)$$

где j - радионуклид, а n - количество осажденных радионуклидов;

\dot{H}_j^{1Bq} – дозовые коэффициенты. Мощность дозы гамма-излучения, создаваемого на расстоянии 1 м от поверхности почвы (источника) определенным j -м радионуклидом единичной активности.

Дозовые коэффициенты для радионуклидов Pb-214 и Bi-214 и каждой конкретный условий наблюдений можно рассчитать, используя дозовую керму и выражение для поля излучения поверхностного дискового источника [109] или с использованием набора инструментов GEANT4 [76]. Дозовые коэффициенты для условий наблюдений данной работы представлены уравнениям (3.2.4, 3.2.5)

Затем находим неизвестное значение $A_j^s(t = tend)$, пренебрегая внутриоблачным вкладом, из предположения о малом содержании продуктов распада радона Pb-214 и Bi-214 в облачном воздухе, или об их практически полном распаде при движении до места осаднения. Тогда активность свинца и висмута, осажденная на поверхности почвы $A_{Pb-214}^s(t)$ и $A_{Bi-214}^s(t)$, является функцией от времени и определяется из общего содержания этих радионуклидов в атмосфере (3.1.3), интенсивностью и продолжительностью осадков или их количеством.

Подставим (3.1.4) в (4.1.1) и получим:

$$A_{Pb-214}^s(t) = q_{Rn}/\lambda_{Rn} - A_{Pb-214}^h(t), \text{ Бк м}^{-2};$$

$$A_{Bi-214}^s = q_{Rn}/\lambda_{Rn} - A_{Bi-214}^h(t), \text{ Бк м}^{-2};$$

В этих решениях заменим A_{Pb-214}^h на A_3^h и A_{Bi-214}^h на A_4^h из уравнения (4.1.2), произведем элементарные преобразования и подставим в (4.2.3)

$$\Delta \dot{H}_{measured} = \frac{q_{Rn}}{\lambda_{Rn}} (\dot{H}_{Pb}^{1Bq} + \dot{H}_{Bi}^{1Bq}) - \dot{H}_{Pb}^{1Bq} A_3^h(t_{end}, L) - \dot{H}_{Bi}^{1Bq} A_4^h(t_{end}, L) \quad (4.2.4),$$

где t_{end} – продолжительность осадков, с.

Для того чтобы найти среднюю интенсивность осадков \bar{I} , необходимо численно решить уравнение (4.2.4) относительно L , при условии, что $L > 0$. При умножении \bar{I} на t_{end} , получаем количество осадков \bar{Q} .

Так как метод чувствителен к плотности потока радона, то получим поправку на его вариацию. С учетом суточных колебаний для теплого периода года, плотность потока в зависимости от погодных условий может изменяться от 5 до более 30% [111] с максимумом в 6 часов утра и обычным минимумом примерно в 6 часов вечера.

Вместо объемной активности дочерних продуктов распада радона в приземной атмосфере, рассмотрим изменение активности в воздушном столбе подоблачного пространства и получим временной сдвиг в наступлении максимумов и минимумов на 6 часов (рисунок 4.5).

Динамика активности радона в воздушном столбе моделировалась с использованием первого уравнения системы (3.2.1), предполагая что

$$q(t) = q_0 \cdot (1 + A \sin(2\pi T^{-1} t));$$

где A – амплитуда колебаний;

T – период колебаний;

q_0 – среднее значение ППР.

Вариации ППР до 30% (рисунок 4.3) приводят к незначительным изменениям, которыми можно пренебрегать в расчетах. Тем не менее, при многократной вариации ППР в течение суток, для реализации метода оценки рекомендуется принимать значения ППР, измеренные за 6 ч до начала осадков. Это предложение уменьшит неточность в оценке интенсивности и количества осадков. При высокоинтенсивных или затяжных осадках, когда дождевая вода не успевает впитаться в почву, на некоторое время может образоваться слой воды,

блокирующий выход радона. Однако, если время существования такого слоя много меньше 3,8 дня, это не оказывает существенного влияния на интегральную величину активности подоблачного радона, поскольку не превышает период полураспада Rn-222, кроме того, радон практически не захватывается из атмосферы осадками. Рассмотрим для наглядности следующий пример. Интенсивный дождь продолжительностью 30 минут, предположительно уменьшит плотность потока радона до нуля (что в действительности невозможно, так как холодная вода слоем в несколько сантиметров является плохой преградой для радона). Если перед этим дождем ППР составила $55 \text{ мБк м}^{-2} \text{ с}^{-1}$, а затем резко снизилась до «нуля», общая активность радона в воздушном столбе во время такого случая осадков снизится менее чем на 0,3%.

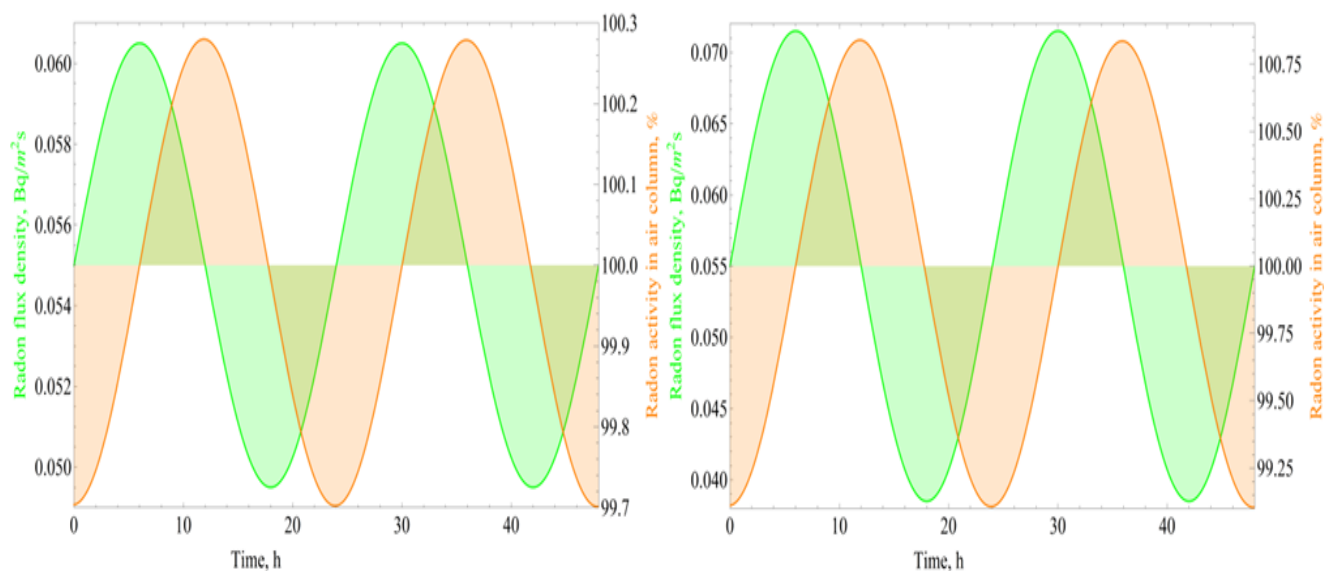


Рисунок 4.3. – Динамика плотности потока радона с поверхности почвы и интегральной активности радона в атмосфере в течение 2 суток при отклонении ППР от среднего значения: слева на 10%; справа на 30%

4.3 Экспериментальная проверка метода

Метод прошел верификацию на ~ 50 случаях ливней. Для примера покажем реализацию метода на нескольких случаях ливней. Рассмотрим дождь длительностью 42 минуты, который произошел 25.06.2017 в 16:19 часов (рисунок 4.4).

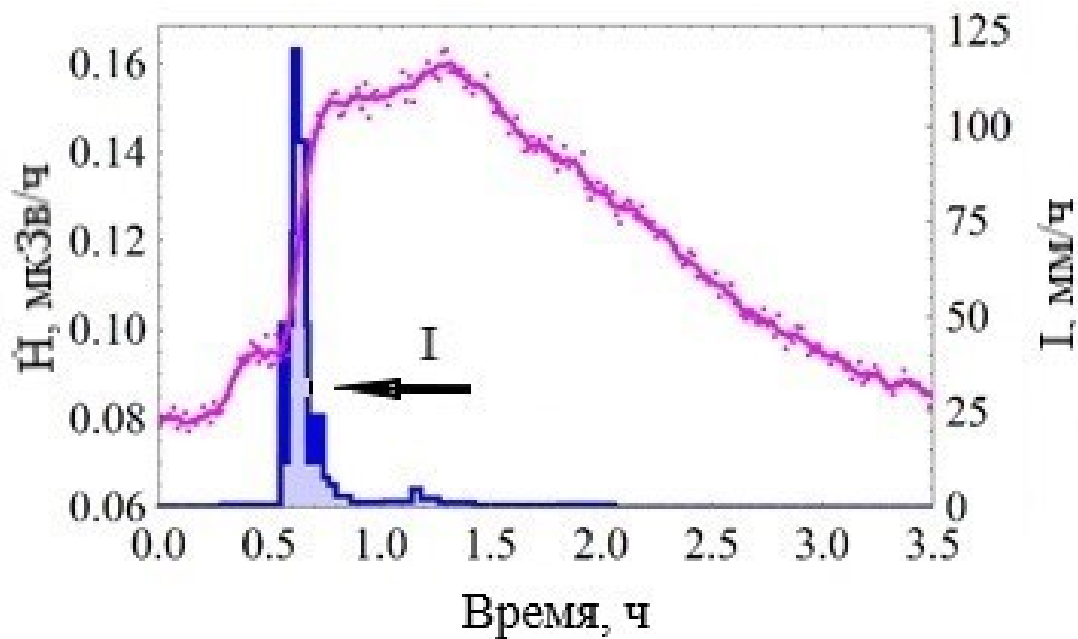


Рисунок 4.4 – Динамика мощности AMBIENTНОГО эквивалента дозы гамма-излучения и интенсивности осадков 25.06.2017

Среднее за 1 мин. значение интенсивности изменялось до максимального 120 мм/ч, спектр интенсивности представлен на рисунке синим цветом. Среднее измеренное значение плотности потока радона с поверхности грунта составляло 52 мБк/м²с. Полученные методом переменные составили: $t_{\text{end}} = 42$ мин.; $A_{\text{Po}}^h(t=0) = A_{\text{Bi}}^h(t=0) = 29$ кБк/м²; $A_{\text{Po}}^h(t_{\text{end}}) = 5,3$ кБк/м²; $A_{\text{Bi}}^h(t_{\text{end}}) = 4,5$ кБк/м²; $\Delta \dot{H}_{\text{measured}} = 0,08$ мкЗв/ч. Рассчитанное по модели среднее за одно событие значение интенсивности осадков составило 12.84 мм/ч, а среднее значение измеренной интенсивности составило 11.7 мм/ч.

Приведем также результаты анализа дождя сложной формы, имеющего 3 интенсивных фазы в одном событии, со спектром, напоминающим по форме «корону» (рисунок 4.5).

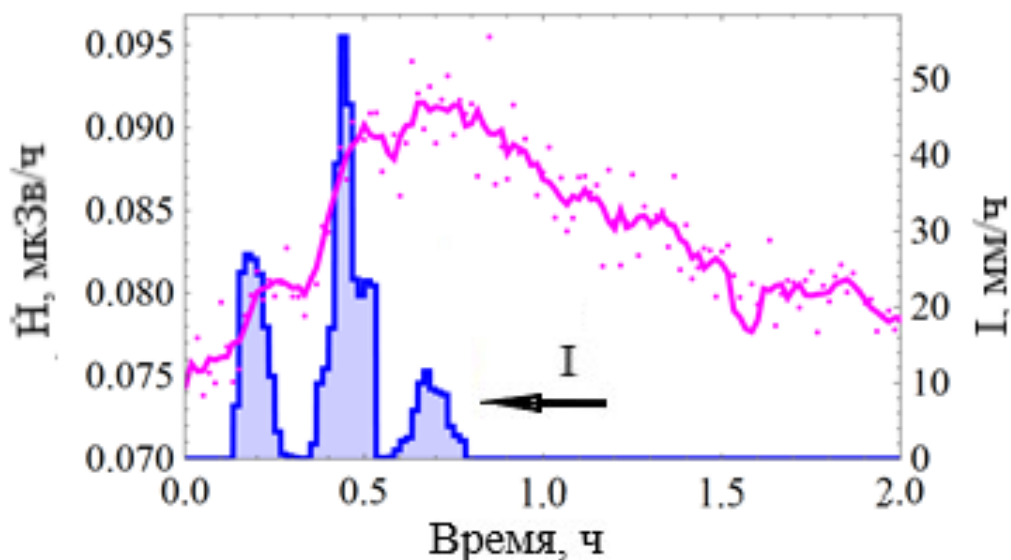


Рисунок 4.5 – Динамика мощности дозы гамма-излучения и интенсивности осадков 30.07.2017

Этот дождь произошел 30.07.2017 в 11:53 часов, его общая длительность составила 48 минут. Среднее за 1 мин. значение интенсивности изменялось до максимального 55,7 мм/ч, спектр интенсивности представлен на рисунке 8 гистограммой. Среднее измеренное значение плотности потока радона с поверхности грунта составляло, в среднем, 36 мБк/м²с. Полученные методом переменные составили: $t_{\text{end}} = 48$ мин.; $A_{\text{Po}}^h(t=0) = A_{\text{Bi}}^h(t=0) = 20$ кБк/м²; $A_{\text{Po}}^h(t_{\text{end}}) = 3,7$ кБк/м²; $A_{\text{Bi}}^h(t_{\text{end}}) = 3,1$ кБк/м²; $\Delta \dot{H}_{\text{measured}} = 0,016$ мкЗв/ч. Среднее за случай значение измеренной интенсивности составило 10.1 мм/ч, а рассчитанное составило 7.8 мм/ч.

В таблице 4.1 приведены случаи осадков, имеющие первую форму всплеска гамма-фона где: М – средняя интенсивность осадков, восстановленная по методу; ЧО – средняя интенсивность осадков, измеренная челночным осадкомером ($\pm 4\%$); ЛО – средняя интенсивность осадков, измеренная лазерным осадкомером; ЧЛО – суммарное количество осадков, рассчитанное по данным челночного, либо, при их отсутствии, лазерного осадкомера; Н – высота нижней кромки облаков, взятая с сайта <https://rp5.ru>; ППР – плотность потока радона с поверхности земли ($\pm 30\%$); $\Delta \dot{H}$ – высота амплитуды мощности амбиентного эквивалента дозы ($\pm 20\%$). Как

можно увидеть из таблицы, метод может быть чувствителен к высоте нижней кромки облаков. Так ошибка более 25% по сравнению с показаниями челночного осадкомера наблюдаются при средней высоте облаков в 0,6 км, в то время как при меньшей ошибке средняя высота облаков увеличивается до 0,9 км. Рассчитанная средняя абсолютная ошибка (MAE) метода определения характеристик ливневых осадков составила 1,2 мм/час, а среднеквадратическая ошибка (RMSE) 2 мм/час.

Таблица 4.1 – Случаи осадков с первой формой всплеска гамма-фона

ΔН, мкЗв/ч	ППР, Бк/(м ² с)	t, мин.	Интенсивность, мм/ч			Кол. ос., мм		Н, км	Дата
			М	ЧО	ЛО	М	ЧЛО		
0.0037	0.064	96	0.75	0.75	н.д.	1.2	1.2	0.3	06.07.17 12:39
0.0119	0.054	35	5.26	5.14	5.48	3.1	3	0.8	25.08.17 3:51
0.0027	0.054	39	1.07	н.д.	1.14	0.7	0.7	0.8	08.08.17 15:39
0.0086	0.065	48	2.34	2.50	2.32	1.9	2	0.8	10.08.17 19:01
0.0029	0.072	36	0.92	н.д.	0.86	0.6	0.5	0.8	13.07.17 19:10
0.0045	0.061	35	1.93	1.71	н.д.	1.1	1	1.5	24.07.17 19:58
0.0045	0.059	42	1.72	2.00	н.д.	1.2	1.4	1.25	08.08.17 21:25
0.0166	0.072	99	3.50	3.03	н.д.	5.8	5	1.25	09.08.17 20:18
0.0115	0.040	87	4.72	5.66	н.д.	6.8	8.2	0.6	12.07.17 19:42
0.0100	0.048	32	6.82	8.25	8.96	3.6	4.4	1.25	24.08.17 16:35
0.0129	0.056	66	4.06	3.45	н.д.	4.5	3.8	0.2	19.08.17 0:59
0.0132	0.064	92	2.80	2.35	н.д.	4.3	3.6	0.8	19.09.17 17:14
0.0360	0.054	71	12.43	15.55	12.89	14.7	18.4	1.25	24.08.17 20:18
0.0141	0.070	133	2.79	2.26	1.78	6.2	5	1.25	09.08.17 20:52
0.0058	0.070	158	1.09	0.76	н.д.	2.9	2	0.45	13.07.17 3:10
0.0048	0.062	134	0.91	0.63	н.д.	2	1.4	0.2	18.08.17 20:14
0.0100	0.064	180	1.92	1.13	н.д.	5.8	3.4	0.8	15.09.17 11:47
0.0113	0.071	489	2.13	1.25	н.д.	17.4	10.2	0.8	12.07.17 20:33
0.0112	0.071	254	2.12	0.94	н.д.	9	4	0.2	20.09.17 1:00
0.0144	0.062	234	2.77	1.18	н.д.	10.8	4.6	0.2	22.08.17 21:38
0.0044	0.069	52	1.13	0.46	0.56	1	0.4	0.45	18.08.17 13:33
0.0241	0.069	142	4.97	1.86	н.д.	11.8	4.4	0.45	05.07.17 3:34
0.0091	0.064	53	2.36	0.68	0.83	2.1	0.6	0.45	18.09.17 4:08

По результату оценки средней интенсивности ливневых осадков за событие можно сделать следующие выводы:

1. Разработанный метод имеет перспективы применения при реконструкции эволюции интенсивности ливневых осадков по гамма-фону с частотой дискретизации, ограниченной чувствительностью дозиметра.

2. Средняя интенсивность, рассчитанная с использованием метода оценки, имеет хорошее согласие с измеренным значением для осадков с одним максимумом по гамма-фону (одно событие с «первой формой» изменения мощности амбиентного эквивалента дозы), а для сложных спектров ошибка может достигать 25%. Большие значения ошибок (не считая грубых промахов) зачастую возникают при высоте кромки облака ниже 0,6 км. Возможные промахи, скорее всего, связаны с малоизученным внутриоблачным вымыванием.

3. Увеличение времени экспозиции гамма-датчика приведет к возрастанию погрешности в оценки характеристик осадков. Для уменьшения загрузки внутренней памяти устройств и получения более высокого временного разрешения, при сохранении ошибки на том же уровне или меньшем, необходимо выбрать более чувствительные датчики (например, больший размер чувствительного объема сцинтиллятора NaI(Tl)). Это позволит в изменении гамма-фона точнее различать участки с различной скоростью роста (углом наклона производной).

4.4 Заключение по главе

Анализ и обработка результатов долгосрочного исследования особенностей реакции атмосферного гамма-фона на жидкие ливневые осадки, а также изучение научной и технической литературы позволили:

1. Научится устанавливать факт появления дождя по изменению естественной радиоактивности атмосферы.

2. Сформулировать отличительные признаки, основанные на анализе эволюции мощности амбиентного эквивалента дозы, позволяющие определять время начала, окончания, а также изменение интенсивности осадков и количество одиночных событий ливней.

3. Научится определять среднюю интенсивность и количество ливневых осадков.

4. Развить математическую модель, связывающую среднюю интенсивность ливневых осадков и максимальное значение мощности амбиентного эквивалента дозы приземной атмосферы, учитывающую влажное очищение атмосферы от аэрозолей. Модель позволяет определять суммарное количество осадков, выпавших за эпизод дождя.

5. Разработать метод оценки среднего значения интенсивности, количества ливневых осадков, использующий экспериментальные данные о динамике мощности дозы гамма-излучения, плотности потока радона с поверхности почвы. Метод позволяет отбирать случаи, для которых применима разработанная математическая модель.

6. Провести проверку разработанного метода с установлением удовлетворительного соответствия восстановленной средней интенсивности ливней.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные теоретические и экспериментальные исследования позволили получить:

1. Компенсацию воздействия фоновых источников радиации на получаемый результат при помощи измерений мощности амбиентного эквивалента дозы за несколько минут перед началом реакции гамма-фона на осадки (следующей серии осадков).

2. Корректировку суточной вариации Pb-214 и Bi-214 подоблачного пространства, связанной с изменением адвекции радона, при помощи регистрации плотности потока Rn-222 с поверхности почвы.

3. Классификацию форм отклика гамма-фона на жидкие атмосферные осадки, позволяющую минимизировать грубые промахи при анализе случаев осадков.

4. Время начала и окончания ливневых осадков, а также максимальное зарегистрированное значение мощности дозы гамма-излучения по форме отклика гамма-фона.

5. Новую математическую модель динамики активности дочерних продуктов распада радона, осажденных на земную поверхность жидкими атмосферными осадками. Которая позволяет определять естественную убыль радионуклидов радонового ряда из подоблачного пространства, а также будет полезна для исследования коэффициента вымывания аэрозолей осадками.

6. Новый метод восстановления мощности дозы гамма-излучения по интенсивности осадков и плотности потока радона. В нем входными параметрами являются: интенсивность осадков, ППР, дозовые коэффициенты. Метод сможет позволить определять наличие техногенного радиоактивного загрязнения предливневой атмосферы.

7. Высокий коэффициент детерминации ($R^2 = 0,81-0,99$) между экспериментально измеренной и воссозданной мощностью эквивалента дозы

окружающей среды во время единичных и повторяющихся в течение суток дождей.

8. Систему уравнений, удобную для реализации алгоритма восстановления временной эволюции мощности амбиентного эквивалента дозы, включающую последовательные этапы вычисления активности продуктов распада радона в атмосферном столбе и на поверхности почвы.

9. Новую математическую модель, описывающую связь между средними значениями, интенсивности осадков и максимальными значениями мощности амбиентного эквивалента дозы гамма-излучения приземной атмосферы. Эта модель позволяет определять суммарное количество осадков, выпавших за эпизод дождя.

10. Новый метод определения средних за случай значений интенсивности, количества, а также вымывающей способности осадков по измеренной динамике мощности амбиентного эквивалента дозы в приземной атмосфере и плотности потока радона. Методом на основе форм гамма-всплеска производится выбор случаев, для которых применима разработанная математическая модель, чем исключаются грубые промахи.

11. Использование разработанных методов в практических целях контроля состояния окружающей среды, что подтверждается актами внедрения в институте мониторинга климатических и экологических систем Сибирского отделения Российской академии наук, г. Томск. (№15323/14-367, №15323/14-366 от 20.10.2021).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Phoenix T. et al. The ADF's Future Hinges on How it Prepares Today for a Climate-Crisis World. сайт. 2021. URL: <https://theforge.defence.gov.au/perry-group-papers/adfs-future-hinges-how-it-prepares-today-climate-crisis-world/> (дата обращения: 30.10.2021).
2. Chefaoui R. M. et al. Predicted regime shift in the seagrass ecosystem of the Gulf of Arguin driven by climate change //Global Ecology and Conservation. – 2021. – С. e01890.
3. Lockwood M. et al. Are cold winters in Europe associated with low solar activity? //Environmental Research Letters. – 2010. – Т. 5. – №. 2. – С. 024001.
4. Budikova D., Ford T. W., Wright J. D. Characterizing Winter Season Severity in the Midwest United States, Part II: Interannual Variability //International Journal of Climatology.
5. Peng X., Li Q., Jing J. CNGAT: A Graph Neural Network Model for Radar Quantitative Precipitation Estimation //IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 2021.
6. Как мы отказались от нейросетей, а затем вернули их в прогноз осадков Яндекс.Погоды //HABR.COM: сайт. 2020. URL: <https://habr.com/ru/company/yandex/blog/504794/> (дата обращения: 30.10.2021).
7. Livesay R. J. et al. Rain-induced increase in background radiation detected by Radiation Portal Monitors //Journal of environmental radioactivity. – 2014. – Т. 137. – С. 137-141.
8. Takeyasu M. et al. Concentrations and their ratio of ^{222}Rn decay products in rainwater measured by gamma-ray spectrometry using a low-background Ge detector //Journal of environmental radioactivity. – 2006. – Т. 88. – №. 1. – С. 74-89.
9. Ambrosino F. et al. $^{214}\text{Bi}/^{214}\text{Pb}$ radioactivity ratio three-year monitoring in rainwater in Prague //Nukleonika. – 2020. – Т. 65.

10. Inomata Y. et al. Seasonal and spatial variations of enhanced gamma ray dose rates derived from ^{222}Rn progeny during precipitation in Japan // *Atmospheric Environment*. – 2007. – Т. 41. – №. 37. – С. 8043-8057.
11. Yakovleva V. S. et al. Effect of precipitation on the background levels of the atmospheric β - and γ -radiation // *Applied Radiation and Isotopes*. – 2016. – Т. 118. – С. 190-195.
12. Takeuchi N., Katase A. Rainout-washout model for variation of environmental gamma-ray intensity by precipitation // *Journal of Nuclear Science and Technology*. – 1982. – Т. 19. – №. 5. – С. 393-409.
13. Moriizumi J. et al. $^{214}\text{Bi}/^{214}\text{Pb}$ radioactivity ratio in rainwater for residence time estimation of cloud droplets and raindrops // *Radiation protection dosimetry*. – 2015. – Т. 167. – №. 1-3. – С. 55-58.
14. Mercier J. F. et al. Increased environmental gamma-ray dose rate during precipitation: a strong correlation with contributing air mass // *Journal of environmental radioactivity*. – 2009. – Т. 100. – №. 7. – С. 527-533.
15. Bottardi C. et al. Rain rate and radon daughters' activity // *Atmospheric Environment*. – 2020. – Т. 238. – С. 117728.
16. Советская, Б. (1976). энциклопедия. URL: <http://slovari.yandex.ru/категория%20в%20языкознании/БСЭ/Категория,20>.
17. Петров, Ф. (1926). Большая советская энциклопедия. О. Ю. Шмидт (Ed.). ОГИЗ. РСФСР.
18. Руководство по метеорологическим приборам и методам наблюдений, Всемирная метеорологическая организация, Швейцария, 2014.
19. Datar G. et al. Response of Gamma-Ray Spectrum During Ockhi Cyclone // *Frontiers in Earth Science*. – 2020. – Т. 8. – С. 15.
20. Lee S. G., Jeong T. S., Kim K. W. Electronic bucket-type precipitation meter : пат. 9547106 США. – 2017.
21. Hagstrom G. L. Precise rain gauge and methods of calibration : пат. 5898110 США. – 1999.

22. Jacobsen H., Jacobsen O. Rain gauge of the tiltable spoon type : пат. 4644786 США. – 1987.
23. Glenn M. S. Rain gauge with illuminated float : пат. 9335440 США. – 2016.
24. Luce C. H. Magnetostrictive precipitation gage : пат. 6490917 США. – 2002.
25. Geschwender R. C. Rain gauge with horizontal indicator : пат. 6609422 США. – 2003.
26. Rain gauge: пат. 6,494,089 США. 09/450,542; заявл. 30.11.1999; опубл. 17.12.2002, 6с.
27. Moore D. G. Dynamic rain gauge assembly : пат. 6363781 США. – 2002.
28. Baer J. S. Total precipitation gauge with float sensor : пат. 5245874 США. – 1993.
29. Ambrus V., Karsai H. Equipment for the measurement of evaporation and/or precipitation : пат. 4380248 США. – 1983.
30. Rain gauge: пат. 5,038,606 США. 07/385,903; заявл. 27.07.1989; опубл. 13.08.1991, 5 с.
31. Davis J. B. Water wheel all season rain gage : пат. 3978723 США. – 1976.
32. Li Q. et al. Method and apparatus for remote siphon drainage type rainfall measurement with self-compensation function : пат. 9588253 США. – 2017.
33. Greenblatt C. L., Dalby M. J. S., Mang S. Gauge for accurately measuring precipitation : пат. 6044699 США. – 2000.
34. Precipitation measuring system: пат. 6,038,920 США. № 09/105,157; заявл. 26.06.1999; опубл. 21.03.2000, 9с.
35. Snow scale/rate meter: пат. 4,499,761 США. № 06/442,494; заявл. 18.11.1982; опубл. 19.02.1985, 5с.
36. Rain rate meter: пат. 4,476,718 США. № 06/482,754; заявл. 07.04.1983; опубл. 16.10.1984, 5с.
37. Заболотских Е. В. Способ оценки интенсивности дождя по данным измерений спутникового микроволнового радиометра amsr2. – 2017.

38. Chapron B. et al. Ocean remote sensing data integration-examples and outlook //Proceedings of OceanObs' 09: Sustained Ocean Observations and Information for Society. – 2010.

39. Способ измерения осадков: пат. 95115647 Рос. Федерация. № 95115647/28; заявл. 05.09.1995; опубл. 10.09.1997, 1 с.

40. Quantitative precipitation prediction method: пат. 6,581,009 США. № 10/032,452; заявл. 02.01.2002; опубл. 17.06.2003, 12с.

41. Uijlenhoet R., Overeem A., Leijnse H. Opportunistic remote sensing of rainfall using microwave links from cellular communication networks //Wiley Interdisciplinary Reviews: Water. – 2018. – Т. 5. – №. 4. – С. e1289.

42. Петров ю. В. И др. Способ определения интенсивности осадков в реальном времени в авиационных системах улучшенного видения. – 2017.

43. Cerqueira R. F., Mantripragada K. Estimating rainfall precipitation amounts by applying computer vision in cameras : пат. 9582730 США. – 2017.

44. Kruger A., Krajewski W. F. Two-dimensional video disdrometer: A description //Journal of Atmospheric and Oceanic Technology. – 2002. – Т. 19. – №. 5. – С. 602-617.

45. Optical precipitation detection and identification system using scintillation detection: пат. 4,760,272 США. № 07/001,459; заявл. 08.01.1987; опубл. 26.07.1988, 12с.

46. Barthazy E. et al. An optical array instrument for shape and fall velocity measurements of hydrometeors //Journal of Atmospheric and Oceanic Technology. – 2004. – Т. 21. – №. 9. – С. 1400-1416.

47. URL:https://www.researchgate.net/publication/26457135_One_decade_of_imaging_precipitation_measurement_by_2D-Video-Distrometer

48. Азбукин А.А. и др. Оптический способ измерения атмосферных осадков. – 2016.

49. Hot plate precipitation measuring system: пат. 6,751,571 США. №10/368,508; заявл. 18.02.2003; опубл. 14.06.2004, 14с.

50. Winter precipitation measuring system: пат. 5,744,711 США. №08/740,757; заявл. 01.11.1996; опубл. 28.04.1998, 9с.
51. Precipitation gauge: пат. 4,583,399 США. №06/712,210; заявл. 15.03.1985; опубл. 22.04.1986, 6с.
52. Dual filter, drop based, digital raingauge: пат. 4,827,766 США. № 07/060,652; заявл. 11.06.1987; опубл. 09.05.1989, 11с.
53. Nelson J. A. Nonmechanical digital raingauge : пат. 4520667 США. – 1985.
54. Rainfall intensity sensor: пат. 4,305,280 США. № 06/117,744; заявл. 01.02.1980; опубл. 15.12.1981, 7с.
55. Precipitation sensor: пат. 10,078,156 США. №15/036,873; заявл. 14.11.2014; опубл. 18.09.2018, 9с.
56. Caron A. B. Method and apparatus for acoustically measuring rainfall : пат. 5125268 США. – 1992.
57. Method for determining a rate of rain: пат. 6,892,580 США. №10/623,778; заявл. 07.04.2000; опубл. 21.05.2002, 9с.
58. Schön D. et al. Precipitation sensor, especially a hail sensor, and method for detecting a precipitation particle : пат. 9632211 США. – 2017.
59. Precipitation sensor: пат 9,244,192 США. № 14/215,710; заявл. 17.04.2014; опубл. 26.01.2016, 14с.
60. Brocca L. et al. Rainfall estimation from in situ soil moisture observations at several sites in Europe: An evaluation of the SM2RAIN algorithm //Journal of Hydrology and Hydromechanics. – 2015. – Т. 63. – №. 3. – С. 205.
61. Cirillo A. et al. An innovative neutron spectrometer for soil moisture measurements //The European Physical Journal Plus. – 2021. – Т. 136. – №. 10. – С. 985.
62. Choquette Y., Ducharme P., Rogoza J. CS725, an accurate sensor for the snow water equivalent and soil moisture measurements //Proceedings of the International Snow Science Workshop, Grenoble, France. – 2013. – С. 7-11.

63. Rain deflector: пат. 5,970,788 США. № 09/104,556; заявл. 25.06.1998; опубл. 26.10.1999, 10с.

64. Raingage for providing improved measurement of local rainfall: пат. 5,918,278 США. № 09/031,406; заявл. 26.02.1998; опубл. 29.06.1999, 8с.

65. Rain gauge: пат. 5,531,114 США. № 08/408,733; заявл. 22.03.1995; опубл. 02.07.1997, 5с.

66. Noren B. Arrangement in precipitation gauges : пат. 4895022 США. – 1990.

67. Delahaye J. Y. Rain gauge with clogging detection device : пат. 5138301 США. – 1992.

68. Mitchell A. L., Borgardt J. D., Kouzes R. T. Skyshine contribution to gamma ray background between 0 and 4 MeV. – Pacific Northwest National Lab.(PNNL), Richland, WA (United States), 2009. – №. PNNL-18666.

69. Балабин Ю. В. и др. Особенности вариаций гамма-излучения во время осадков //Physics of Auroral phenomena. – 2012. – Т. 35. – №. 1. – С. 143-146.

70. Яковлева В. С., Нагорский П. М., Черепнев М. С. Формирование α -, β -и γ -полей приземной атмосферы природными атмосферными радионуклидами //Вестник КРАУНЦ. Физико-математические науки. – 2014. – №. 1 (8. – С. 86-96.

71. Яковлева В. С., Нагорский П. М., Яковлев Г. А. Метод мониторинга плотности невозмущенного потока радона с поверхности грунта //Вестник КРАУНЦ. Физико-математические науки. – 2016. – №. 1 (12).

72. Яковлева В. С., Каратаев В. Д., Зукау В. В. Моделирование атмосферных полей γ и β излучений, формирующихся почвенными радионуклидами //Вестник КРАУНЦ. Физико-математические науки. – 2011. – Т. 2. – №. 1.

73. Яковлева В. С. и др. Модель вертикального распределения плотности плазмы приземной атмосферы //Известия вузов. Физика. – 2010. – Т. 53. – №. 11/2. – С. 86-88.

74. Зелинский А. С., Яковлева В. С. Оценка вклада космической компоненты в суммарный β - и γ -фон приземной атмосферы //Вестник КРАУНЦ. Физико-математические науки. – 2017. – №. 4 (20).

75. Ядерная физика в интернете //nuclphys.sinp.msu.ru: Проект кафедры общей ядерной физики физического факультета МГУ и отдела электромагнитных процессов и взаимодействия атомных ядер НИИЯФ МГУ. URL: <http://nuclphys.sinp.msu.ru/crm/crm03.htm> (дата обращения 08.11.2021).

76. Collaboration G. et al. GEANT4—a simulation toolkit //Nucl. Instrum. Meth. A. – 2003. – Т. 506. – №. 25. – С. 0.

77. ГОСТ 24631-81 Государственный стандарт Союза ССР. Атмосферы справочные. Параметры. М.: Издательство стандартов, 1982. 33 С.

78. ГОСТ 25645.150-90 Модель изменения потоков частиц. Государственный стандарт Союза ССР. Лучи космические галактические. М.: Издательство стандартов, 1991. 11 С.

79. Sources and effects of ionizing radiation. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation UNSCEAR 2008 Report to the General Assembly with Scientific Annexes Volume I, United Nations New York, 2010

80. ISO 5878, Reference Atmospheres for Aerospace Use, 1982.

81. ISO 15390:2004 Space environment (natural and artificial) -- Galactic cosmic ray model, 2004.

82. Янчуковский В. Л. Геофизические эффекты космических лучей и экспериментальные методы их исследования : дис. – Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. АА Трофимука СО РАН, 2008.

83. Sturrock P. A., Steinitz G., Fischbach E. Analysis of gamma radiation from a radon source. II: Indications of influences of both solar and cosmic neutrinos on beta decays //Astroparticle Physics. – 2018. – Т. 100. – С. 1-12.

84. Wedekind C. et al. Gamma-radiation monitoring network at sea //Applied Radiation and Isotopes. – 1999. – Т. 50. – №. 4. – С. 733-741.

85. Abimanyu A. et al. Design of IoT-based Radiation Monitor Area for Nuclear and Radiological Emergency Preparedness System in Yogyakarta Nuclear Area //Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2020. – Т. 1428. – №. 1. – С. 012050.

86. <http://www.geant4.org/geant4/>
87. ICRP 2008. Nuclear Decay Data for D-symmetric Calculations. ELSEVIER, ICRP. Publication 107. Annals of the ICRP, 38 (3)
88. Громов В. В. Краткий курс радиохимии / Под ред. чл.-кор. АН СССР И. Н. Плаксына. — [М.] : Металлургия, 1966. — 243 с.
89. Каратаев В. Д., Яковлева В. С., Эргашев Д. Э. Исследование радиоактивности объектов окружающей среды на территории Томской области. — 2000.
90. Зайдельман Ф. Р. Генезис и экологические основы мелиорации почв и ландшафтов. — 2009.
91. Geant4 User's Guide for Application Developers. Version geant4. Published 19 2008. Geant4 Collaboration.
92. Атмосфера. Справочник / под ред. Ю.С. Седунова — Л.: Гидрометеиздат, 1991. — 511 с.
93. Fleischer R. L. Radon in the environment—opportunities and hazards //International Journal of Radiation Applications and Instrumentation. Part D. Nuclear Tracks and Radiation Measurements. — 1988. — Т. 14. — №. 4. — С. 421-435.
94. Knoll G. F. Radiation detection and measurement. — John Wiley & Sons, 2010.
95. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation et al. Sources, effects and risks of ionizing radiation. — 1988.
96. Avdic S. et al. A study of daily variations of the outdoor background radiation measured in continuous mode in Federation of Bosnia and Herzegovina //Journal of environmental radioactivity. — 2020. — Т. 217. — С. 106212.
97. Einarsson P. et al. Radon changes associated with the earthquake sequence in June 2000 in the South Iceland seismic zone //Terrestrial Fluids, Earthquakes and Volcanoes: The Hiroshi Wakita Volume III. — Birkhäuser Basel, 2008. — С. 63-74.

98. Kumar N. et al. Earthquake precursory research in western Himalaya based on the multi-parametric geophysical observatory data //Acta Geophysica. – 2013. – Т. 61. – №. 4. – С. 977-999.
99. Kalchikhin V. V. et al. Some results of optical precipitation gauge field tests //Optika Atmosfery i Okeana. – 2018. – Т. 31. – №. 4. – С. 330-332.
100. Yakovleva V. et al. Rainfall Intensity and Quantity Estimation Method Based on Gamma-Dose Rate Monitoring //Sensors. – 2021. – Т. 21. – №. 19. – С. 6411.
101. Burnett J. L., Croudace I. W., Warwick P. E. Short-lived variations in the background gamma-radiation dose //Journal of Radiological Protection. – 2010. – Т. 30. – №. 3. – С. 525.
102. Fujinami N., Watanabe T., Tsutsui T. Looping variation of correlation between radon progeny concentration and dose rate in outdoor air //Radioactivity in the Environment. – Elsevier, 2005. – Т. 7. – С. 284-289.
103. Яковлева В. С., Паровик Р. И. Численное решение уравнения диффузии адвекции радона в многослойных геологических средах //Вестник КРАУНЦ. Физико-математические науки. – 2011. – Т. 2. – №. 1.
104. Яковлева В. С. Методы и приборы контроля полей α -, β -, γ -излучений и радона в системе " грунт-атмосфера" : дис. – Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2013.
105. Kalinin Y. G. et al. Transport model of gas impurities spread in urban area //Matematicheskoe modelirovanie. – 2000. – Т. 12. – №. 11. – С. 47-66.
106. Narayana Rao T. et al. Understanding the transportation process of tropospheric air entering the stratosphere from direct vertical air motion measurements over Gadanki and Kototabang //Geophysical research letters. – 2008. – Т. 35. – №. 15.
107. Takeyasu M. et al. Measurements of concentrations and its ratio of radon decay products in rainwater by gamma-ray spectrometry with a low background germanium detector //International Congress Series. – Elsevier, 2005. – Т. 1276. – С. 289-290.

108. Yakovleva V. et al. Model for Reconstruction of γ -Background during Liquid Atmospheric Precipitation //Mathematics. – 2021. – Т. 9. – №. 14. – С. 1636.
109. Бютнер Э.К., Гисина .А. Эффективный коэффициент захвата частиц аэрозоля дождевыми и облачными каплями. Труды ЛГМИ, вып. 15, с. 103-
110. Козлов В.Ф. Справочник по радиационной безопасности. - 4-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат. 1991.
111. Yakovlev G. A., Yakovleva V. S. Distortion of radiation background in urban environment due to aggressive influence of technosphere. stage 1: radon and alpha-background //Vestnik KRAUNC. Fiziko-Matematicheskie Nauki. – 2020. – Т. 32. – №. 3. – С. 154-164.

ПРИЛОЖЕНИЕ А. АКТ ВНЕДРЕНИЯ МЕТОДА ВОССТАНОВЛЕНИЯ МОЩНОСТИ ДОЗЫ ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ

Минобрнауки России
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт мониторинга климатических и экологических систем
Сибирского отделения Российской академии наук
(ИМКЭС СО РАН)

Академический пр., д. 10/3, г. Томск, 634055, Россия
Тел.: (3822) 492-265 Факс: (3822) 491-950 E-mail: post@imces.ru Http://www.imces.ru
ОКПО 03534200 ОГРН 1027000880170 ИНН 7021001400 КПП 701701001

20.10.2021 № 15323/14- 366
на № _____ от _____

«Утверждаю»

Директор ИМКЭС СО РАН, д. б. н.

Е. А. Головацкая



АКТ о внедрении результатов диссертационной работы Зелинского Алексея Сергеевича

Настоящим актом подтверждается, что метод восстановления мощности амбиентного эквивалента дозы гамма-излучения по данным измерений интенсивности осадков и плотности потока радона с поверхности почвы, разработанный А. С. Зелинским с соавторами и представленный в его диссертационной работе «Разработка метода оценки характеристик ливневых осадков по радиационному фону приземной атмосферы», внедрён в геофизической обсерватории ИМКЭС СО РАН с целью повышения качества измерений радиационных величин в рамках экологического мониторинга состояния окружающей среды.

Руководитель геофизической лаборатории,
с. н. с., к. ф.-м. н.

 С. В. Смирнов

Главный научный сотрудник лаборатории
физики климатических систем, д. ф.-м. н.

 П. М. Нагорский

ПРИЛОЖЕНИЕ Б. АКТ ВНЕДРЕНИЯ МЕТОДА ОЦЕНКИ ХАРАКТЕРИСТИК
ЛИВНЕВЫХ ОСАДКОВ ПО РАДИАЦИОННОМУ ФОНУ ПРИЗЕМНОЙ
АТМОСФЕРЫ

Минобрнауки России

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт мониторинга климатических и экологических систем
Сибирского отделения Российской академии наук
(ИМКЭС СО РАН)

Академический пр., д. 10/3, г. Томск, 634055, Россия
Тел.: (3822) 492-265 Факс: (3822) 491-950 E-mail: post@imces.ru Http://www.imces.ru
ОКПО 03534200 ОГРН 1027000880170 ИНН 7021001400 КПП 701701001

20.10.2021 № 15323/14-367
на № _____ от _____



«Утверждаю»

Директор ИМКЭС СО РАН, д. б. н.

Е. А. Головацкая


АКТ
о внедрении результатов диссертационной работы
Зелинского Алексея Сергеевича

Настоящим актом подтверждается, что метод определения характеристик ливневых осадков (интенсивность, количество, время начала и окончания) по радиационному гамма-фону, разработанный А. С. Зелинским с соавторами и представленный в его диссертационной работе «Разработка метода оценки характеристик ливневых осадков по радиационному фону приземной атмосферы», внедрён для практического использования в геофизической обсерватории ИМКЭС СО РАН с целью расширения области применения новых экспериментальных методов мониторинга состояния окружающей среды.

Руководитель геофизической лаборатории,
с. н. с., к. ф.-м. н.

 С. В. Смирнов

Главный научный сотрудник лаборатории
физики климатических систем, д. ф.-м. н.

 П. М. Нагорский