



ТОМСКИЙ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи

Зелинский Алексей Сергеевич

РАЗРАБОТКА МЕТОДА ОЦЕНКИ ХАРАКТЕРИСТИК ЛИВНЕВЫХ
ОСАДКОВ ПО РАДИАЦИОННОМУ ФОНУ ПРИЗЕМНОЙ АТМОСФЕРЫ

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

2.2.8 – Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ
и природной среды

Томск – 2022

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ФГАОУ ВО НИ ТПУ)

Научный руководитель: **Яковлева Валентина Станиславовна**
доктор технических наук, профессор отделения
ядерно-топливного цикла Инженерной школы ядерных
технологий Томского политехнического университета

Официальные оппоненты: **Жуковский Михаил Владимирович**
доктор технических наук, профессор,
Институт промышленной экологии УрО РАН, главный
научный сотрудник лаборатории урбанизированной
среды, Екатеринбург

Романовский Олег Анатольевич
доктор физико-математических наук,
Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН,
заведующий лабораторией дистанционного
зондирования окружающей среды, Томск

Защита состоится 15 июня 2022 года в 15:00 на заседании диссертационного совета ДС.ТПУ.13 Национального исследовательского Томского политехнического университета по адресу: по адресу: 634028, г. Томск, ул. Савиных, 7, ауд. 215.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке Томского политехнического университета и на сайте dis.tpu.ru.

Автореферат разослан «__» _____ 2022 г.

Ученый секретарь диссертационного
совета ДС.ТПУ13



Кандидат технических наук, доцент
Шевелева Е.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

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. 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 количественными характеристиками осадков. Для краткосрочного прогноза осадков нашло применение обучение нейронных сетей на основе радарных данных об эволюции облаков. Алгоритмы наукастинга продолжают развиваться и требуют новые типы данных, не ограничиваясь радарной съемкой местности. Востребованной для краткосрочного прогноза является информация о фактическом выпадении осадков. И здесь разработчики, совместно с бизнесом, сталкиваются с нехваткой достоверных и полных данных по местоположению и количеству выпавших осадков в реальном 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, регистрирующие гамма-излучение, имеют перспективы расширения использования в связи с тенденцией на развитие безуглеродной энергетики и прогнозом 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. Основными дозообразующими являются гамма-излучающие короткоживущие дочерние

продукты распада радона Pb-214 и Bi-214. Другие природные гамма-излучающие радионуклиды, такие, как продукты распада торона, практически не влияют на величину мощности дозы, поскольку их активность в приземной атмосфере ~ на 2 порядка меньше, чем активность Pb-214 и Bi-214. Радионуклид Po-218, который является первым продуктом распада Rn-222 является α -активным, поэтому он не влияет на суммарный гамма-фон. 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. К сожалению, это существенно увеличивает затраты на введение, 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.

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, осаждаемых 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 AMBIENTНОГО 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, осаждаемых 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, осаждаемых 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 амбиентного эквивалента дозы гамма-излучения в приземной атмосфере, которая позволяет определять суммарное количество осадков, выпавших за эпизод дождя.

4. Основанный на измерении динамики мощности амбиентного 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 г. 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 и объем диссертационной работы.

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. Анализ существующих методов регистрации осадков показал, что определение характеристик осадков по изменению гамма-фона будет выгодно отличаться от механических осадкомеров 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-фона не требуют периодического обслуживания, не боятся внешних загрязнений, минимально реагируют на обледенение горизонтальных поверхностей, могут размещаться под навесами, защищающими их от неблагоприятных метеорологических явлений, таких как град и осадки. В сопоставлении с осадкомерами, имеющими область регистрации в

несколько квадратных сантиметров, сбор информации гамма-детекторами от основных дозообразующих осажженных радионуклидов Pb-214 и Bi-214 происходит в радиусе примерно 300 м, что относит его к интегральным методам, а также увеличивает вероятность регистрации осадков.

Сравнение методов оценки характеристик осадков лучше проводить с учетом современных потребностей бизнеса и общества. С первого взгляда системы определения характеристик осадков, основанные на обработке видео изображения, благодаря массовому распространению 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 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 избежаны 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 методов определения характеристик осадков, метод, основанный на регистрации гамма-излучения, представляется достаточно перспективным.

Во второй главе в первом разделе приводится описание наиболее часто применяемых детекторов гамма-излучения в системах контроля радиационной обстановки. Во втором разделе описаны причины суточных, сезонных, связанных с одиннадцатилетним циклом солнечной активности и влажностью почвы вариаций гамма-фона. Рассмотрено космическое излучение, почвенная радиоактивность, влияние выхода радона с поверхности грунта и барометрического эффекта. Приведены результаты численного моделирования гамма-фона, создаваемого космическим излучением, показывающие зависимость от солнечной активности и сезона года. Сделаны выводы о пренебрежимо (менее 0,1%) малом вкладе космического излучения в показания детектора гамма-излучения, работающего в счетном режиме, расположенного на уровне моря. Далее приведен анализ результатов численного моделирования переноса излучения почвенных радионуклидов в зависимости от влажности почвы. Показано снижение гамма-фона до 1% при равномерном увлажнении почвы 15 мм воды на глубину до 0,5 м. Подведено заключение о необходимости учета изменений гамма-фона, связанного с

увлажнением верхнего приповерхностного слоя грунта. Такой учет удобно проводить измерением гамма-фона перед началом осадков.

Третий раздел второй главы знакомит с экспериментальной площадкой и ее оборудованием. Каждый год начиная с момента таяния снега и до начала установления снежного покрова, производятся измерения мощности абонентного эквивалента дозы гамма-излучения с высокой частотой дискретизации данных 1 минуту, с использованием сцинтилляционных детекторов БДКГ-03 (производства АТОМТЕХ, Республика Беларусь). Детектор БДКГ-03 в качестве чувствительного элемента содержит сцинтиллятор NaI(Tl) размерами $\varnothing 25 \times 40$ мм. Диапазон регистрируемых энергий гамма-излучения от 50 кэВ до 3 МэВ. Детекторы БДКГ-03 были установлены на экспериментальной площадке геофизической обсерватории Института мониторинга климатических и экологических систем СО РАН (ИМКЭС СО РАН) на высоте 1 м от земной поверхности. Выбор высоты измерения гамма-фона в 1 м от земной поверхности обусловлен требованиями к проведению контроля радиационной обстановки. Использование одной и той же высоты измерения обеспечивает сопоставимость результатов для разных территорий как в России, так и за рубежом.

Данные об интенсивности осадков с высоким временным разрешением регистрировались челночным осадкомером Davis Rain Collector II (Davis Instruments, США) и оптическим (лазерным) осадкомером ОПТИОС, разработанным в ИМКЭС СО РАН, установленными на расстоянии не более 10 м от детектора гамма-излучения.

Для измерения плотности потока радона с поверхности грунта использовали измерительный комплекс «Альфарад плюс – AP» (ООО НТМ-Защита, Москва, RF).

В четвертом разделе второй главы приведены результаты анализа синхронных измерений мощности абонентного эквивалента дозы гамма-излучения и характеристик осадков. По результатам многолетнего эксперимента был проведен анализ реакции гамма-фона на жидкие атмосферные осадки, который показал, что все зарегистрированные всплески в гамма-фоне, не имеющие определенной периодичности, вызваны осадками (исключая всплески, вызванные ошибками в работе детекторов гамма-излучения).

Полученные в многолетнем эксперименте отклики мощности дозы гамма-излучения на осадки, проявляющиеся в виде аномальных всплесков, были детально изучены и произведена их классификация. В результате получилось выделить четыре характерные формы откликов гамма-фона на жидкие атмосферные осадки:

для одиночного события

- (I) пик с различным положением максимума: слева (рисунок 1а); посередине (1б) или справа;
- (II) плато (рисунок 1в) и колокол (рисунок 1г);

для серии осадков

(III) двугорбая (рисунок 1д, 1е);

(IV) волнообразная (рисунок 1ж) и зубчатая / пилообразная (рисунок 1з).

Характерная для одиночных кратковременных ливней форма всплеска, которую можно отнести к «классической», показана на рисунке 1а – ливень, прошедший 22 августа 2018 г. года в г. Томске, интенсивность которого составила более 100 мм/ч в максимуме.

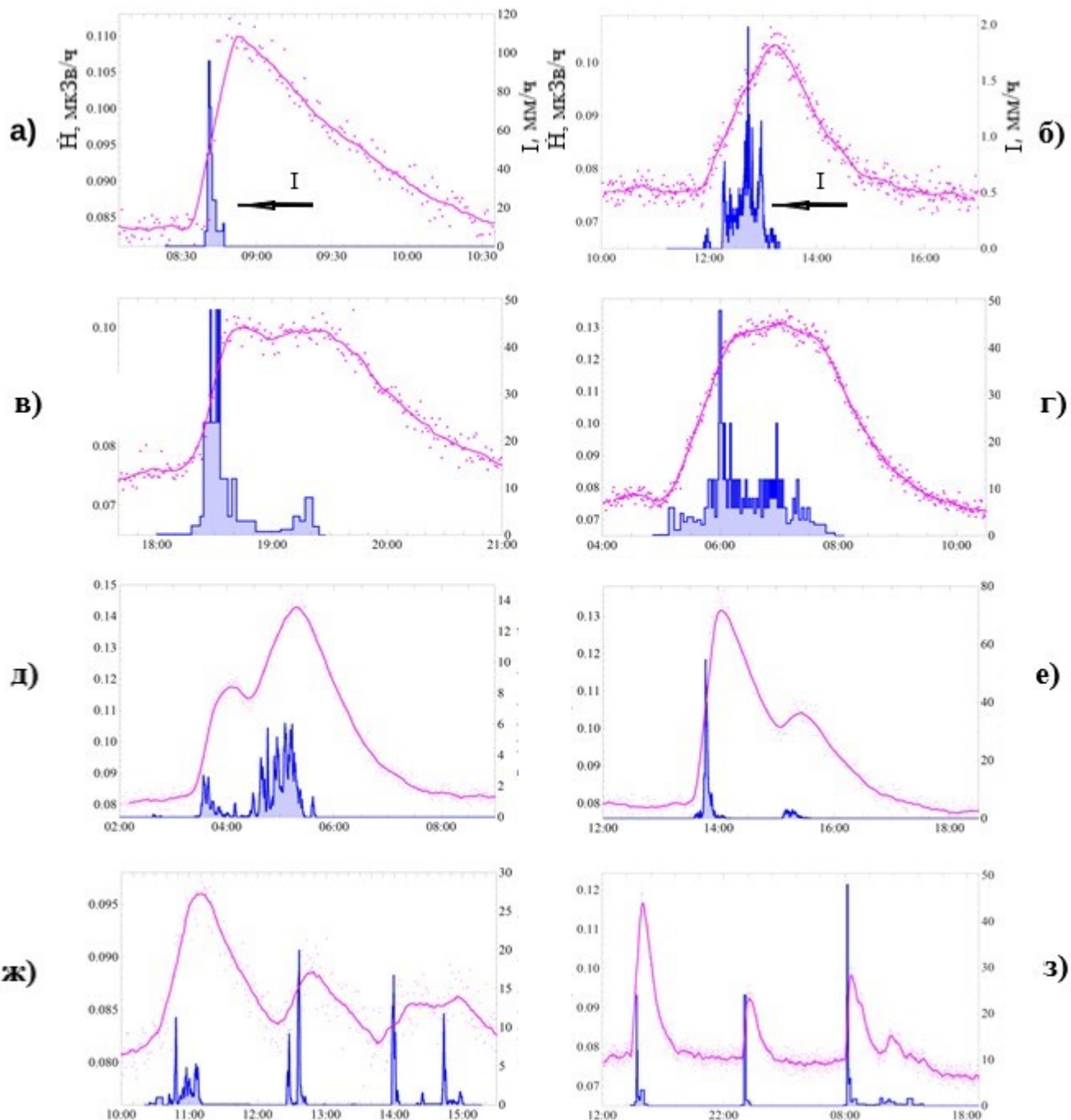


Рисунок 1 – Различные формы отклика гамма-фона на жидкие атмосферные осадки:

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

Для откликов классической формы характерен резкий рост, и после достижения максимума экспоненциальный спад в соответствии с законом радиоактивного распада как $e^{-\lambda t}$

и по результатам анализа экспериментальных данных показателем экспоненты в диапазоне $\lambda \approx 2,8-4,3 \times 10^{-4} \text{ с}^{-1}$, последнее значение близко к постоянной радиоактивного распада для Рb-214.

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);
- 2) Скорость роста гамма-фона (изменение угла наклона кривой роста) характеризует текущее значение интенсивности осадков;
- 3) Время наступления максимума соответствует окончанию осадков (за исключением форм II типа), что на рисунке 2 соответствует точке 4;
- 4) Экспоненциальное уменьшение гамма-фона после максимума означает, что начался радиоактивный распад дочерних продуктов радона Вi-214 и Рb-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, что дождь продолжается с переменной низкой интенсивностью по отношению к предыдущему интервалу (иллюстрируется рисунками 1 в и г).

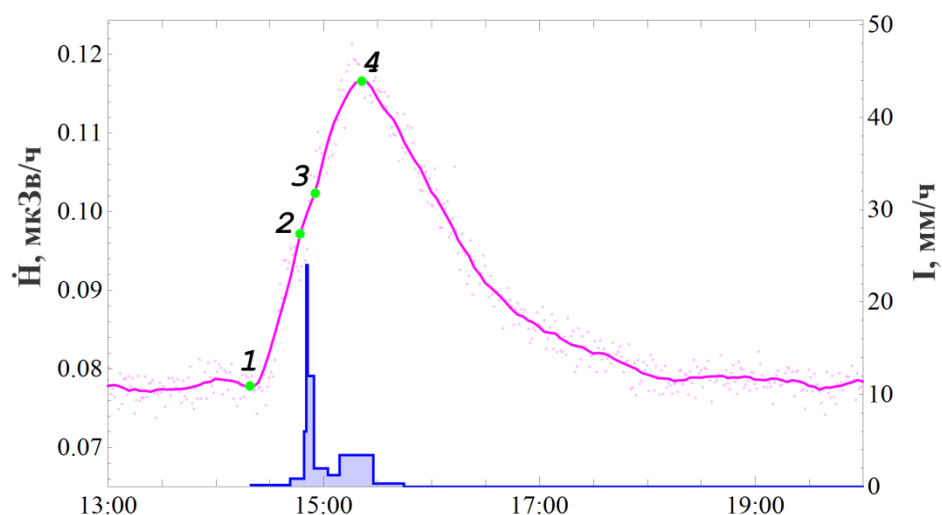


Рисунок 2 – Динамика гамма-фона (сплошная) и интенсивность осадков (гистограмма) 30 мая 2017 г.

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. 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). Далее 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 AMBIENTНОГО эквивалента дозы гамма-излучения над фоновым значением в максимуме определяется как разность значений \dot{N} , измеренных в точке 4 и 1 (рисунок 2). Чтобы определить среднюю интенсивность осадков \bar{I} за событие, необходимо использовать временной интервал сегмента 1–4.

В третьей главе описаны уравнения вертикального переноса радона в атмосфере, приведен переход от рассмотрения динамики объемной активности радона и дочерних продуктов его распада по оси z и времени t к рассмотрению только временной динамики интегральной активности этих радионуклидов в подоблачном пространстве. Далее описана модель временной динамики активности осажденных на земную поверхность Po-218, Pb-214 и Bi-214, и основанный на этой модели метод реконструкции гамма-фона.

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) ветровой вертикальный перенос. Изменение во времени и по координате z объемной активности радона и продуктов его распада в приземной атмосфере можно представить системой дифференциальных уравнений:

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

где $A_{Rn}(z, t)$ и $A_i(z, t)$ – функции от времени и координаты объемной активности Rn-222 и Po-218, Pb-214, Bi-214 (соответствующие индексам $i=2,3,4$), Бк/м³; D_{mRn} и D_{mi} – коэффициенты молекулярной диффузии Rn-222 и продуктов его распада, м²/с; $D_T(z, t)$ – функция от времени и координаты коэффициента турбулентности атмосферы, м²/с; $v_d(z, t) = v_W(z, t) + v_F$; $v_W(z, t)$ – функция от времени и координаты вертикальной составляющей скорости воздуха, м/с; v_F – скорость осаждения под действием силы тяжести, м/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 (1) дополнена начальными и краевыми условиями

$$\left. \begin{aligned} & -\left(D_{m_{Rn}} + D_T(z, t)\right) \frac{\partial A_{Rn}(z, t)}{\partial z} \Big|_{z=0} + v_W(z, t) A_{Rn}(z, t) \Big|_{z=0} = q_{Rn} \\ & \left(D_{m_i} + D_T(z, t)\right) \frac{\partial A_i(z, t)}{\partial z} \Big|_{z=0} - v_d(z, t) A_i(z, t) \Big|_{z=0} = 0 \\ & A_{Rn}(z \rightarrow \infty, t) = 0; A_i(z \rightarrow \infty, t) = 0 \end{aligned} \right\}, \quad (2)$$

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 активностей 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 высотой h , совпадающей с нижней границей облака, и основанием 1 м^2 .

Для моделирования динамики гамма-фона, создаваемой изотопами Рb-214 и Вi-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

$$A_i^h(t) = \int_0^h A_i(z, t) dz. \text{ Обозначим, что в начальный момент времени } A_i^h(t=0) = A_i^{h0}.$$

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

$$A_{Rn}^{h0} = A_{Po}^{h0} = A_{Pb}^{h0} = A_{Bi}^{h0} = q_{Rn} / \lambda_{Rn}, \quad (3)$$

где A_{Rn}^{h0} , A_{Po}^{h0} , A_{Pb}^{h0} , A_{Bi}^{h0} – начальные интегральные активности изотопов Rn-222, Po-218, Рb-214, Вi-214 в воздушном столбе, Бк/м^2 .

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

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dA_{Rn}^h(t)}{dt} = q_{Rn} - \lambda_{Rn} \cdot A_{Rn}^h(t) \\ \frac{dA_{Po}^h(t)}{dt} = \lambda_{Rn} \cdot A_{Rn}^h(t) - (\lambda_{Po} + L(t)) \cdot A_{Po}^h(t) \\ \frac{dA_{Pb}^h(t)}{dt} = \lambda_{Po} \cdot A_{Po}^h(t) - (\lambda_{Pb} + L(t)) \cdot A_{Pb}^h(t) \\ \frac{dA_{Bi}^h(t)}{dt} = \lambda_{Pb} \cdot A_{Pb}^h(t) - (\lambda_{Bi} + L(t)) \cdot A_{Bi}^h(t) \end{array} \right. \quad (4)$$

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 (4) дополнена начальным условием (3).

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

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dA_{Po}^s(t)}{dt} = L(t) \cdot A_{Po}^h(t) - \lambda_{Po} \cdot A_{Po}^s(t) \\ \frac{dA_{Pb}^s(t)}{dt} = L(t) \cdot A_{Pb}^h(t) + \lambda_{Po} \cdot A_{Po}^s(t) - \lambda_{Pb} \cdot A_{Pb}^s(t) \\ \frac{dA_{Bi}^s(t)}{dt} = L(t) \cdot A_{Bi}^h(t) + \lambda_{Pb} \cdot A_{Pb}^s(t) - \lambda_{Bi} \cdot A_{Bi}^s(t) \end{array} \right. \quad (5)$$

В начальный момент времени активность радионуклидов, осаждающихся на земную поверхность, отсутствует, поэтому запишем $A_{Po}^{s0} = A_{Pb}^{s0} = A_{Bi}^{s0} = 0$. Решение систем уравнений (4) и (5) с начальными условиями (3) имеет следующий вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} A_{Rn}^h = \frac{\exp(-\tau \cdot \lambda_{Rn}) \cdot ((\exp(\tau \cdot \lambda_{Rn}) - 1) \cdot q_{Rn} + A_{Rn}^{h0} \cdot \lambda_{Rn})}{\lambda_{Rn}} \\ A_{Po}^h = \exp(-\tau \cdot (L_i + \lambda_{Po})) \cdot \frac{A_{Po}^{h0} \cdot (L_i + \lambda_{Po}) + \lambda_{Po} \cdot A_{Rn}^h (\exp(\tau \cdot (L_i + \lambda_{Po})) - 1)}{L_i + \lambda_{Po}} \\ A_{Pb}^h = \exp(-\tau \cdot (L_i + \lambda_{Pb})) \cdot \frac{A_{Pb}^{h0} \cdot (L_i + \lambda_{Pb}) + \lambda_{Pb} \cdot A_{Po}^h (\exp(\tau \cdot (L_i + \lambda_{Pb})) - 1)}{L_i + \lambda_{Pb}} \\ A_{Bi}^h = \exp(-\tau \cdot (L_i + \lambda_{Bi})) \cdot \frac{A_{Bi}^{h0} \cdot (L_i + \lambda_{Bi}) + \lambda_{Bi} \cdot A_{Pb}^h (\exp(\tau \cdot (L_i + \lambda_{Bi})) - 1)}{L_i + \lambda_{Bi}} \end{array} \right. \quad (6.1)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} A_{Po}^S = \exp(-\tau \cdot \lambda_{Po}) \cdot \frac{L_i \cdot A_{Po}^h (\exp(\tau \cdot \lambda_{Po}) - 1) + \lambda_{Po} \cdot A_{Po}^{S0}}{\lambda_{Po}} \\ A_{Pb}^S = \exp(-\tau \cdot \lambda_{Pb}) \cdot \frac{L_i \cdot A_{Pb}^h (\exp(\tau \cdot \lambda_{Pb}) - 1) + \lambda_{Pb} \cdot A_{Pb}^{S0} + \lambda_{Pb} \cdot A_{Po}^S (\exp(\tau \cdot \lambda_{Pb}) - 1)}{\lambda_{Pb}} \\ A_{Bi}^S = \exp(-\tau \cdot \lambda_{Bi}) \cdot \frac{L_i \cdot A_{Bi}^h (\exp(\tau \cdot \lambda_{Bi}) - 1) + \lambda_{Bi} \cdot A_{Bi}^{S0} + \lambda_{Bi} \cdot A_{Pb}^S (\exp(\tau \cdot \lambda_{Bi}) - 1)}{\lambda_{Bi}} \end{array} \right. \quad (6.2)$$

где i – порядковый номер измерения мощности амбиентного эквивалента дозы; L_i – дискретно заданный коэффициент вымывания для каждого временного интервала, равного τ , и 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 значение выражения (3) при $t \leq 0$; $A_{Rn}^h(t)$, $A_{Po}^h(t)$, $A_{Pb}^h(t)$, $A_{Bi}^h(t)$ – 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 до начала выпадения осадков ($t \leq 0$) нулевые значения.

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 (4).

Вторым этапом является моделирование динамики активности осажденных изотопов Po-218, Pb-214 и Bi-214 на поверхность почвы с использованием системы уравнений (5). На третьем этапе производим реконструкцию 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 соответствующего радионуклида (\dot{H}_{Pb-214}^{1Bq} , \dot{H}_{Bi-214}^{1Bq} – дозовые коэффициенты рассчитываются численно или из предположения о дисковом плоском источнике). В этой 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:

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

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

Последним этапом является переход к суммарной мощности дозы $H(t)$ регистрируемой детектором, для чего к фоновой составляющей H_0 , измеренной до выпадения осадков,

необходимо добавить рассчитанные значения мощности доз, создаваемых свинцом и висмутом $\dot{H}_{Pb} + \dot{H}_{Bi}$. На рисунке 3 приведена иллюстрация реконструкции мощности дозы гамма-излучения в приземной атмосфере.

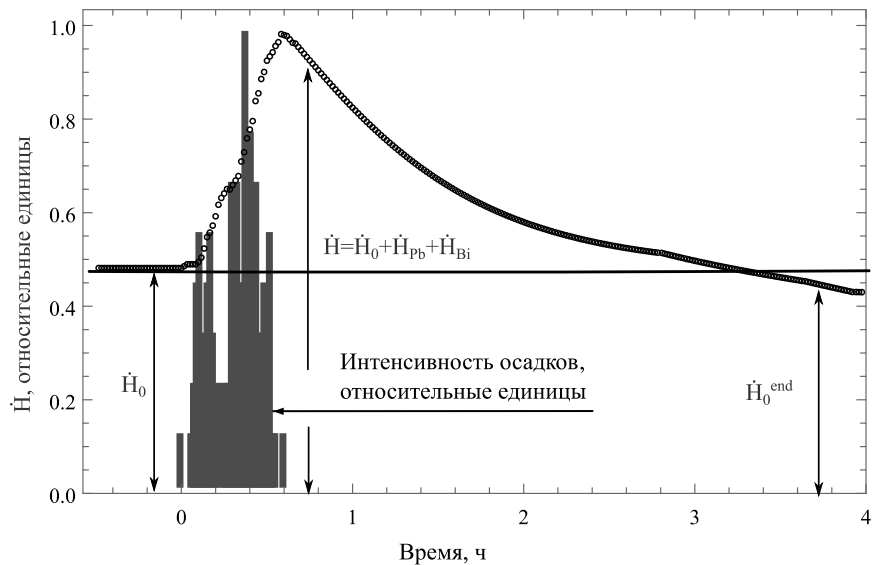


Рисунок 3. Зависимость мощности дозы гамма-излучения от осадков. Интенсивность осадков (гистограмма). Мощность дозы гамма-излучения (круги)

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 4 показано одиночное событие, произошедшее 7 августа 2017 года. 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 этого ливневого дождя получено хорошее согласие между расчетными и экспериментальными данными. Коэффициент детерминации R^2 составил 0,99, среднеквадратичная ошибка RMSE составила $0,004 \text{ мкЗв}\cdot\text{ч}^{-1}$.

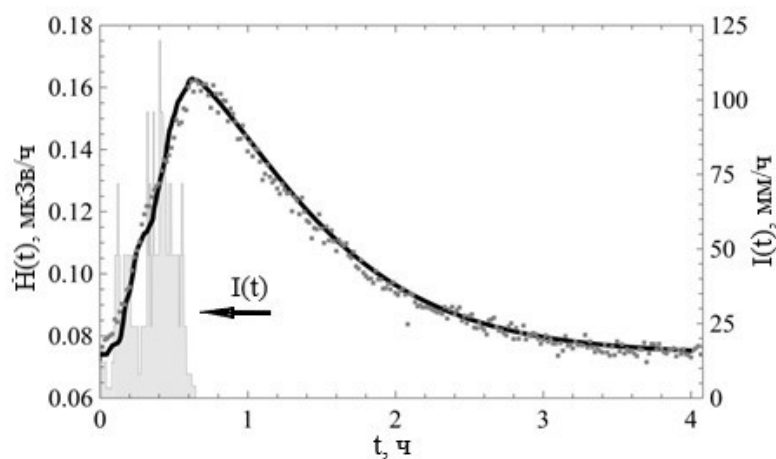


Рисунок 4 – Динамика осадков и гамма-фона: измеренная мощность дозы (точки); восстановленная мощность дозы (сплошная линия); интенсивность осадков (гистограмма)

Два последовательных ливневых дождя от 30 июня 2017 года, показаны на рисунке 5. Реконструированная мощность амбиентного эквивалента дозы хорошо согласуется с экспериментальными данными, для этого случая выпадения осадков. Коэффициент детерминации $R^2 = 0,91$, среднеквадратичная ошибка RMSE составила $0,006 \text{ мкЗв} \cdot \text{ч}^{-1}$.

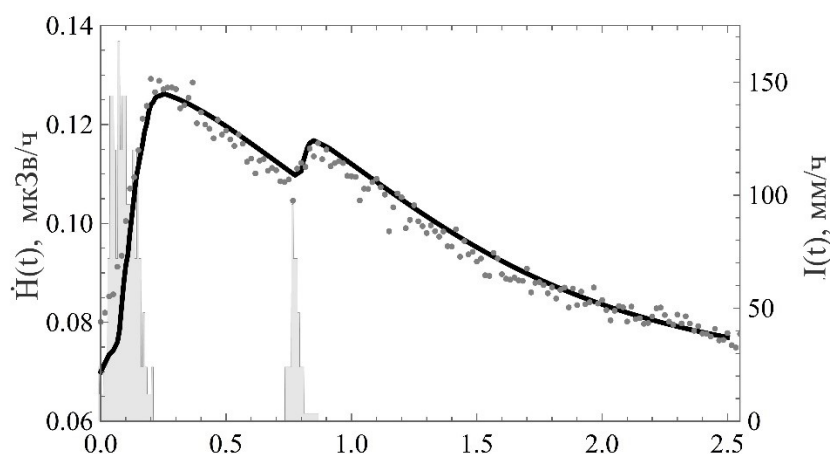


Рисунок 5 – Динамика осадков и гамма-фона: измеренная мощность дозы (точки); восстановленная мощность дозы (сплошная линия); интенсивность осадков (гистограмма)

По результатам исследований, представленным в третьей главе, было сформулировано первое и второе защищаемое положение.

В четвертой главе описаны математическая модель и метод определения средних за событие значений интенсивности и количества осадков по измеренному гамма-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. Кроме измеренной мощности дозы гамма-излучения, технически возможно измерить плотность потока радона q_{Rn} с поверхности почвы либо оценить её, исходя из содержания Ra-226 (U-238) в почве по известным моделям.

Для разработки математической модели определения средней за одно событие интенсивности (и количества) осадков запишем начальное равенство

$$\Delta \dot{H}_{measured} = \Delta \dot{H}_{estimated} \quad (7)$$

где $\Delta \dot{H}_{measured}$ и $\Delta \dot{H}_{estimated}$ - величина всплеска (превышения над фоновым значением в максимуме) мощности дозы гамма-излучения измеренная и рассчитанная, соответственно, мкЗв/ч.

Величину $\Delta \dot{H}_{measured}$ можно определить из экспериментальных данных как

$$\Delta \dot{H}_{measured} = \dot{H}_{end} - \dot{H}_0,$$

где \dot{H}_0 – значение мощности дозы гамма-излучения на момент времени t_0 , соответствующий началу выпадения жидких атмосферных осадков, t_0 определяется как точка, после которой наблюдается непрерывный рост мощности дозы в течение времени t_{end} до максимального значения \dot{H}_{end} , мкЗв/ч (согласно рисунку 2); \dot{H}_{end} – максимальное значение мощности дозы гамма-излучения во «всплеске», мкЗв/ч.

Анализ как экспериментальных данных, так и теоретического материала из области ядерной физики и взаимодействия ионизирующих излучений с веществом, позволяет утверждать, что величина всплеска мощности дозы гамма-излучения $\Delta \dot{H}$, мкЗв/ч, пропорциональна активности осажденных на земную поверхность радионуклидов на момент окончания осадков, при этом каждый j -й радионуклид единичной активности вносит постоянный вклад \dot{H}_j^{1Bq} в суммарную мощность дозы гамма-излучения приземной атмосферы на единичном расстоянии от земной поверхности, зависящий от ядерно-физических характеристик радионуклида.

Если известна активность осажденных на земную поверхность дождевыми осадками радионуклидов $A_j^s(t = t_{end})$, Бк/м², на момент окончания осадков t_{end} и дозовые коэффициенты на единичную активность \dot{H}_j^{1Bq} для этих радионуклидов, можно записать точное равенство между измеренной величиной всплеска (превышения) мощности дозы гамма-излучения и активностью осажденных на земную поверхность радионуклидов:

$$\Delta \dot{H}_{estimated} = \sum_{j=1}^n (\dot{H}_j^{1Bq} \cdot A_j^s(t = t_{end})), \text{ Зв/ч}, \quad (8)$$

где j – радионуклид, а n – количество осажденных радионуклидов.

Далее будем искать неизвестную величину $A_j^s(t = t_{end})$, сделав предположение о том, что в облаках активность продуктов распада радона ^{214}Pb и ^{214}Bi ничтожно мала, либо они

почти распались за время движения облака, и ими можно пренебречь. В этом случае функции от времени осажденных на земную поверхность активностей свинца и висмута $A_{Pb-214}^S(t)$ и $A_{Bi-214}^S(t)$ будут определяться их суммарной активностью в атмосфере, интенсивностью и длительностью осадков, или количеством выпавших осадков.

В равновесном состоянии, когда активности радона и продуктов его распада равны, в отсутствии дождя, и при $h \rightarrow \infty$, A_{Pb-214}^h и A_{Bi-214}^h можно определить по величине плотности потока радона с поверхности грунта q_{Rn} , Бк м⁻² с⁻¹, из простого соотношения (3).

Определим активности $A_{Pb-214}^S(t)$ и $A_{Bi-214}^S(t)$ осажденные на земную поверхность через активности воздушного столба следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} A_{Pb-214}^S(t) &= A_{Pb-214}^h(t=0) - A_{Pb-214}^h(t) = \frac{q_{Rn}}{\lambda_{Rn}} - A_{Pb-214}^h(t), \text{ Бк/м}^2; \\ A_{Bi-214}^S(t) &= A_{Bi-214}^h(t=0) - A_{Bi-214}^h(t) = \frac{q_{Rn}}{\lambda_{Rn}} - A_{Bi-214}^h(t), \text{ Бк/м}^2. \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

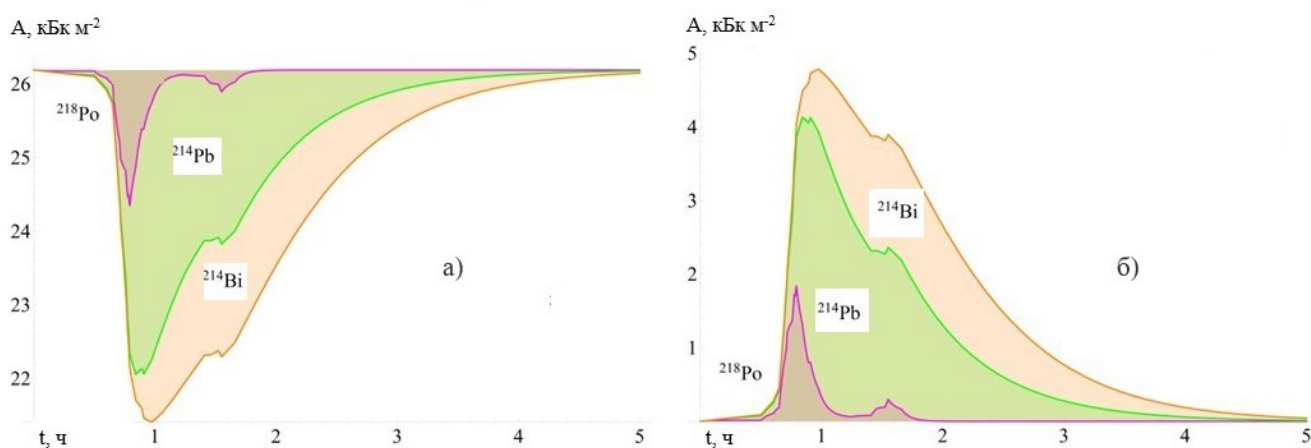


Рисунок 6 – Динамика активности ДПР радона в период осадков 11 июня 2017: а) – в атмосфере; б) – на земной поверхности

Система уравнений (9) позволяет производить замену активностей $A_{Pb-214}^S(t)$ и $A_{Bi-214}^S(t)$ на активности этих радионуклидов, находящихся в воздушном столбе. Такая замена связана с тем, что активности радионуклидов Po-218, Pb-214 и Bi-214 в период осадков симметрично изменяются с течением времени как в столбе воздуха, так и на поверхности земли (рисунок б), а решение систем уравнений (4), (5) относительно средней вымывающей способности дождя L принимает более компактный вид:

$$\begin{aligned} A_3^h(t) &= \frac{q e^{-t(L+\lambda_2)} (L \lambda_2 e^{t(\lambda_2-\lambda_3)} (L+\lambda_2) + \lambda_2 \lambda_3 e^{t(L+\lambda_2)} (\lambda_2-\lambda_3) - L \lambda_3 (L+\lambda_3))}{\lambda_1 (L+\lambda_2) (L+\lambda_3) (\lambda_2-\lambda_3)} \\ X &= -L \lambda_2 \lambda_3 e^{t(\lambda_2+\lambda_3)} (L+\lambda_2) (L+\lambda_3) (\lambda_2-\lambda_3) \\ Y &= -\lambda_2 \lambda_3 \lambda_4 e^{t(L+\lambda_2+\lambda_3+\lambda_4)} (\lambda_2-\lambda_3) (\lambda_2-\lambda_4) (\lambda_3-\lambda_4) \\ Z &= -L \lambda_2 \lambda_4 e^{t(\lambda_2+\lambda_4)} (L+\lambda_2) (L+\lambda_4) (\lambda_2-\lambda_4) \\ W &= -L \lambda_3 \lambda_4 e^{t(\lambda_3+\lambda_4)} (L+\lambda_3) (L+\lambda_4) (\lambda_3-\lambda_4) \end{aligned} \quad (10.1)$$

$$A_4^h(t) = \frac{q e^{-t(L + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4)}(X+Y+Z+W)}{\lambda_1(L + \lambda_2)(L + \lambda_3)(L + \lambda_4)(\lambda_2 - \lambda_3)(\lambda_2 - \lambda_4)(\lambda_4 - \lambda_3)} \quad (10.2)$$

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

Перепишем (7) с учетом (8), (9), (10.1) и (10.2)

$$\Delta \dot{H}_{measured} = \frac{q_{Rn}}{\lambda_{Rn}} (\dot{H}_{Pb-214}^{1Bq} + \dot{H}_{Bi-214}^{1Bq}) - \dot{H}_{Pb-214}^{1Bq} \cdot A_3^h(t = t_{end}) - \dot{H}_{Bi-214}^{1Bq} \cdot A_4^h(t = t_{end}) \quad (11)$$

Численно решаем полученное уравнение (11) относительно величины L при условии, что $L = const > 0$, используя полученное значение L и равенство $L = \bar{I} \cdot k_1 \cdot k_2$ рассчитываем среднее значение интенсивности осадков, а при умножении \bar{I} на t_{end} – среднее за событие количество осадков Q .

Разработанный метод определения средних за одно событие значений интенсивности и количества осадков состоит из следующих этапов. Первым этапом является измерение мощности дозы гамма-излучения до и во время осадков, плотности потока радона q_{Rn} , анализ формы отклика с определением времени начала и окончания осадков и величины $\Delta \dot{H}_{measured}$. Затем вторым этапом определяем величину L из уравнения (11) и, далее определяем среднее значение интенсивности из выражения, $\bar{I} = L / (k_1 \cdot k_2)$, и среднее значение количества осадков $\bar{Q} = \bar{I} \cdot t_{end}$. Метод прошел верификацию на ~ 50 случаях ливней. Для примера рассмотрим реализацию метода на нескольких случаях дождя. Рассмотрим дождь, который произошел 25.06.2017 в 16:19 часов, его длительность составила 42 минуты (рисунок 7).

Среднее за 1 мин. значение интенсивности изменялось до максимального 120 мкЗв/ч, поведение интенсивности представлено на рисунке 7 синим цветом. Среднее измеренное значение плотности потока радона с поверхности грунта составляло 52 мБк/м²с. Полученные методом переменные составили: $t_{end} = 42$ мин.; $A_{Po}^h(t=0) = A_{Bi}^h(t=0) = 29$ кБк/м²; $A_{Po}^h(t_{end}) = 5,3$ кБк/м²; $A_{Bi}^h(t_{end}) = 4,5$ кБк/м²; $\Delta \dot{H}_{measured} = 0,08$ 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.

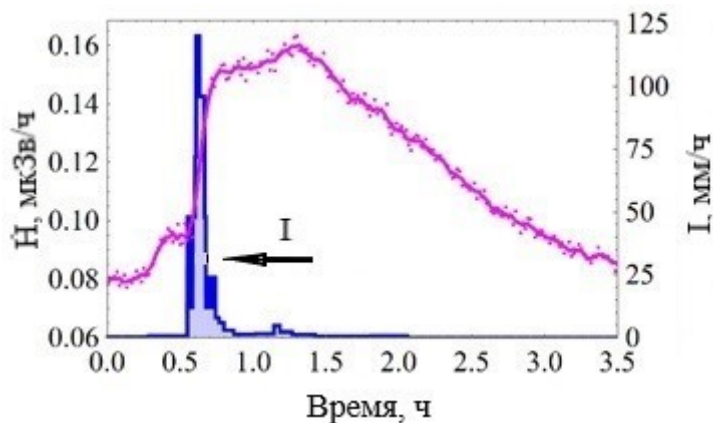


Рисунок 7 – Динамика мощности амбиентного эквивалента дозы гамма-излучения и интенсивности осадков 25.06.2017

Приведем также результаты анализа дождя сложной формы, имеющего 3 интенсивных фазы в одном событии, со спектром, напоминающим по форме «корону» (Рисунок 9).

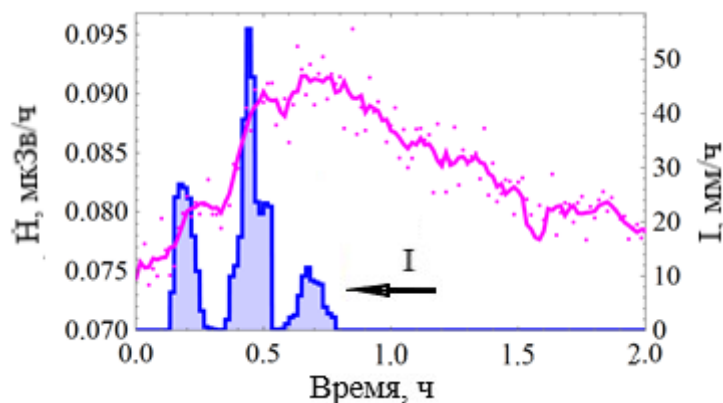


Рисунок 8 – Динамика мощности дозы гамма-излучения и интенсивности осадков 30.07.2017

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.

По результатам исследований, представленных в четвертой главе, было сформулировано третье и четвертое защищаемое положение.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

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, ППП, 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 ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ

Публикации в научных изданиях, индексируемых в WoS и Scopus:

1. Yakovleva, V. S. Rainfall Intensity and Quantity Estimation Method Based on Gamma-Dose Rate Monitoring / Yakovleva V, Yakovlev G, Parovik R, **Zelinskiy A**, Kobzev A. //Sensors. – 2021. – Vol. 21. – №. 19. – P. 6411.

2. Yakovleva, V. S. Model for Reconstruction of γ -Background during Liquid Atmospheric Precipitation / Yakovleva, V., **Zelinskiy, A.**, Parovik, R., Yakovlev, G., & Kobzev, A. //Mathematics. – 2021. – Vol. 9. – №. 14. – P. 1636.

3. Belyaeva, I., Determination of snow water equivalent by the atmospheric beta-background / Belyaeva, I., Yakovlev, G., **Zelinskiy, A.**, & Yakovleva, V.//AIP Conference Proceedings. – AIP Publishing LLC, 2019. – Vol. 2101. – №. 1. – P. 020010.

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. **Zelinskiy, A. S.** Relation of gamma dose rate with the intensity of rain showers/ Zelinskiy A. S., Yakovlev G. A., Fil'trov D. E.// Vestnik KRAUNC. Fiz.-mat. nauki. – 2021. – Vol. 36. – №. 3. – P. 189-199.

2. **Zelinskiy, A. S.** Effect of turbulence and air velocity on radon progenys/ Zelinskiy A. S., Yakovlev G. A. // Vestnik KRAUNC. Fiz.-mat. nauki. – 2021. – Vol. 36. – №. 3. – P. 200-209.

3. **Zelinskiy, A. S.** The estimation of cosmic ray component contribution into the total β -and γ -background of atmosphere/ Zelinskiy A. S., Yakovleva V. S. //Vestnik KRAUNC. Fiziko-Matematicheskie Nauki. – 2017. – №. 4. – P. 28-34.

4. Yakovleva, V. S. Preliminary results of analysis of variations of the beta background of the surface atmosphere due to cloudburst/ Yakovleva, V. S., Nagorskiy, P. M., Yakovlev, G. A., **Zelinskiy, A. S.**, Pustovalov, K. N., Smirnov, S. V., & Belyaeva, I. V.// Vestnik KRAUNC. Fiziko-Matematicheskie Nauki – 2020. – Vol. 31. – №. 2. – P. 139-149.

5. **Zelinskiy, A. S.** Dependence of cosmic ray component in background of atmosphere surface from solar magnetic activity/ Zelinskiy A. S., Yakovlev G. A. // Vestnik KRAUNC. Fiz.-mat. nauki. – 2021. – Vol. 34. – №. 1. – P. 114-121.