



ТОМСКИЙ  
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи

ЗД

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](http://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  $\alpha$ -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 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, 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 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 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 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 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 Ø25x40 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.

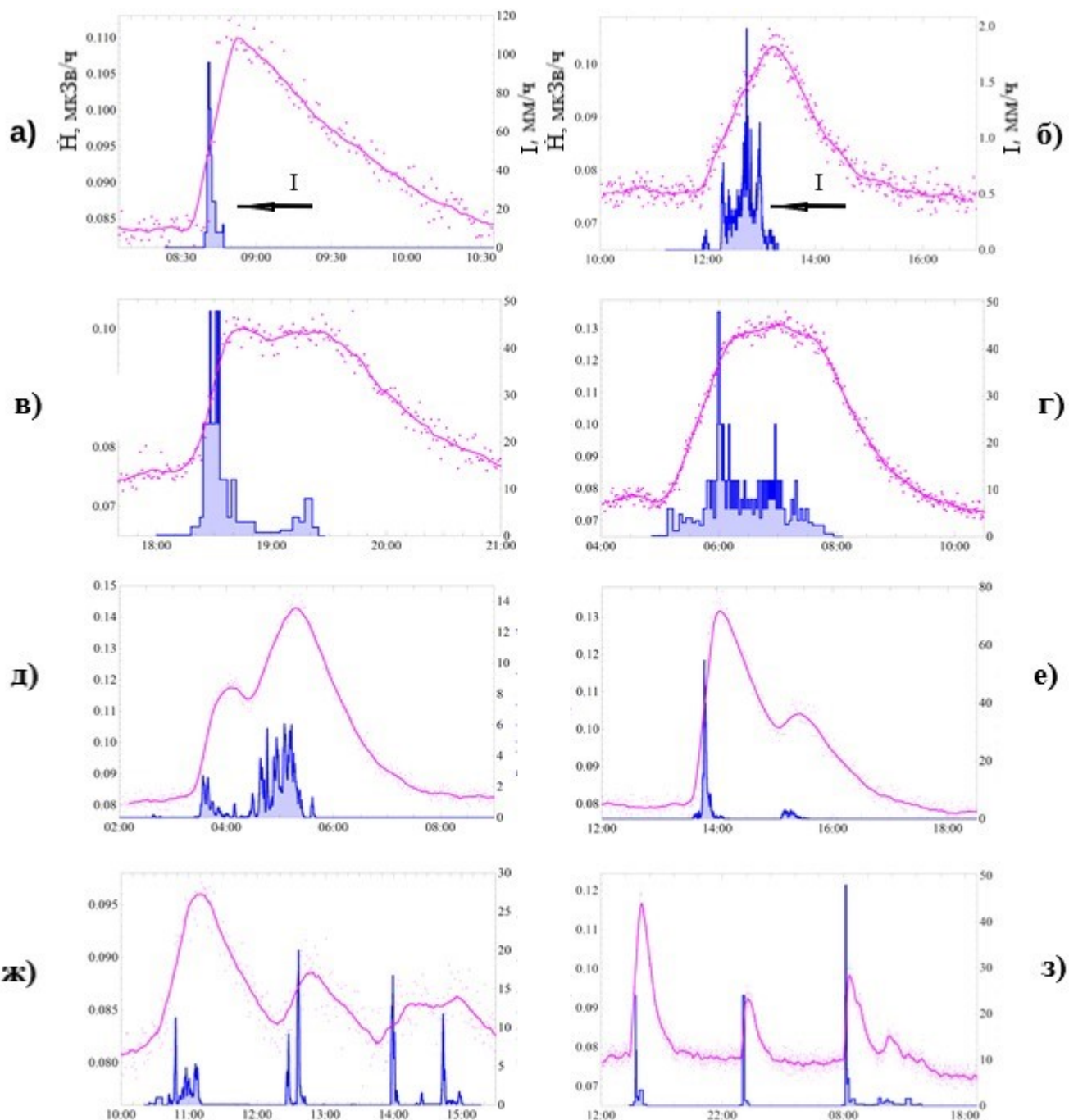


Рисунок 1 – Различные формы отклика гамма-фона на жидкие атмосферные осадки:

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 Pb-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 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, что дождь продолжается с переменной низкой интенсивностью по отношению к предыдущему интервалу (иллюстрируется рисунками 1 в и г).

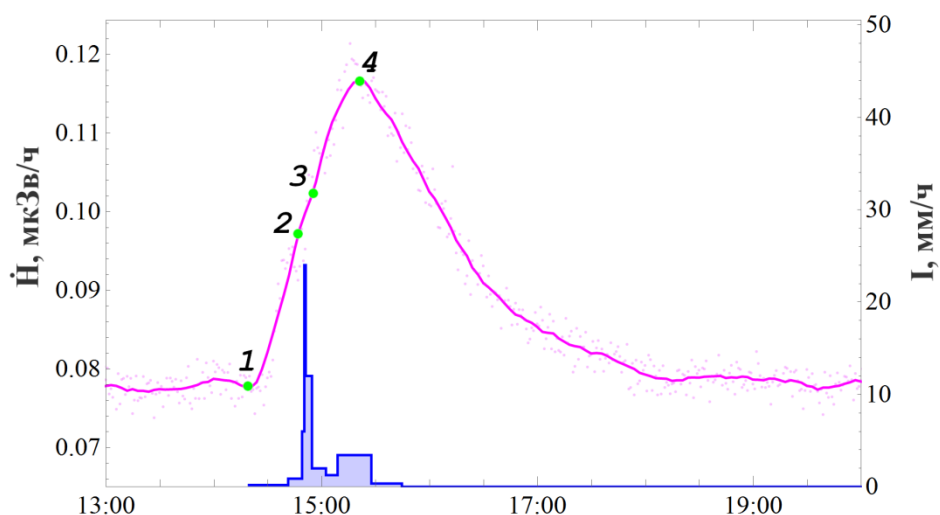


Рисунок 2 – Динамика гамма-фона (сплошная) и интенсивность осадков (гистограмма) 30 мая 2017 г.

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 амбиентного 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:

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

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/м<sup>3</sup>;  $D_{m_{Rn}}$  и  $D_{m_i}$  – коэффициенты молекулярной диффузии Rn-222 и продуктов его распада, м<sup>2</sup>/с;  $D_T(z, t)$  – функция от времени и координаты коэффициента турбулентности атмосферы, м<sup>2</sup>/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;  $\lambda_{Rn}$  – постоянная радиоактивного распада радона Rn-222, с<sup>-1</sup>;  $\lambda_{di} = \lambda_i + L$ ;  $\lambda_i$  – постоянная радиоактивного распада  $i$  – радионуклида, с<sup>-1</sup>;  $L$

– коэффициент вымывания аэрозолей осадками,  $\text{с}^{-1}$ . 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 Pb-214 и Bi-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 Pb-214 и Bi-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  $1 \text{ м}^2$ .

Для моделирования динамики гамма-фона, создаваемой изотопами Pb-214 и Bi-214, осаждаемыми 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  $1 \text{ м}^2$  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, Pb-214, Bi-214 в воздушном столбе,  $\text{Бк/м}^2$ .

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

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

где  $L(t) = I(t) \cdot k_l \cdot k_2$  – функция коэффициента вымывания от времени,  $\text{с}^{-1}$ ;  $I(t)$  – функция интенсивности осадков от времени;  $k_l = 10^{-5}$  ( $\text{ч мм}^{-1} \text{с}^{-1}$ ) – коэффициент абсолютной вымывающей способности;  $k_2$  – коэффициент относительной вымывающей способности. Система уравнений (4) дополнена начальным условием (3).

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

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

В начальный момент времени активность радионуклидов, осаждаемых 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:

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

$$\begin{cases} A_{Po}^s = \exp(-\tau \cdot \lambda_{Po}) \cdot \frac{L_i \cdot A_{Po}^h (\exp(\tau \cdot \lambda_{Po}) - 1) + \lambda_{Po} \cdot A_{Po}^{s0}}{\lambda_{Po}} \\ A_{Pb}^s = \exp(-\tau \cdot \lambda_{Pb}) \cdot \frac{L_i \cdot A_{Pb}^h (\exp(\tau \cdot \lambda_{Pb}) - 1) + \lambda_{Pb} \cdot A_{Pb}^{s0} + \lambda_{Pb} \cdot A_{Po}^s (\exp(\tau \cdot \lambda_{Pb}) - 1)}{\lambda_{Pb}} \\ A_{Bi}^s = \exp(-\tau \cdot \lambda_{Bi}) \cdot \frac{L_i \cdot A_{Bi}^h (\exp(\tau \cdot \lambda_{Bi}) - 1) + \lambda_{Bi} \cdot A_{Bi}^{s0} + \lambda_{Bi} \cdot A_{Pb}^s (\exp(\tau \cdot \lambda_{Bi}) - 1)}{\lambda_{Bi}} \end{cases} \quad (6.2)$$

где  $i$  – порядковый номер измерения мощности амбиентного эквивалента дозы;  $L_i$  – дискретно заданный коэффициент вымывания для каждого временного интервала, равного  $\tau$ , 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:

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

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

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.

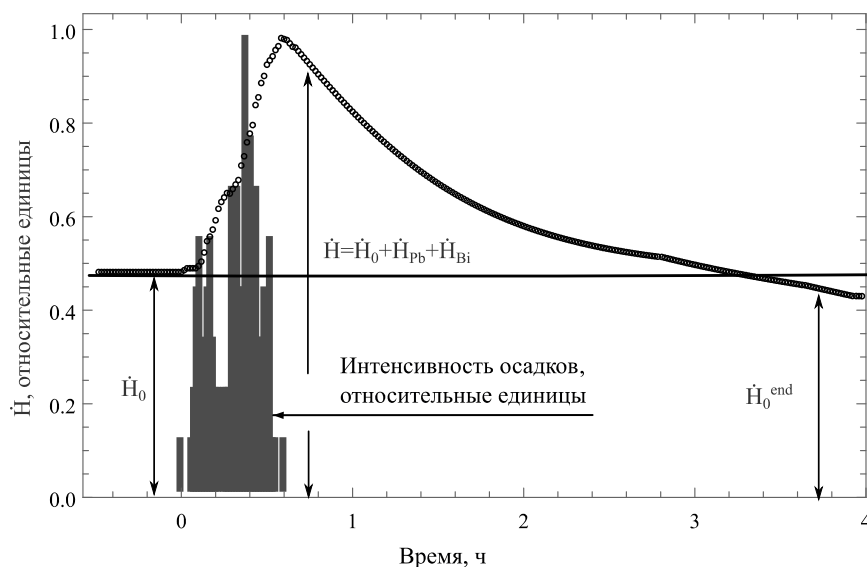


Рисунок 3. Зависимость мощности дозы гамма-излучения от осадков. Интенсивность осадков (гистограмма). Мощность дозы гамма-излучения (круги)

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  $0,004 \text{ мкЗв} \cdot \text{ч}^{-1}$ .

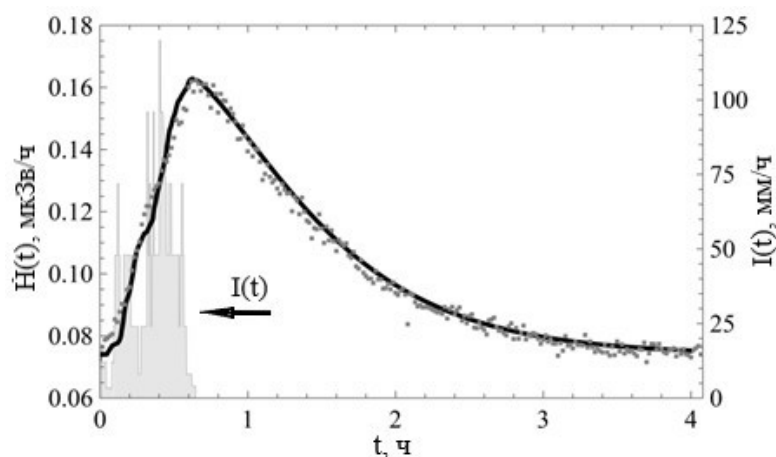


Рисунок 4 – Динамика осадков и гамма-фона: измеренная мощность дозы (точки); восстановленная мощность дозы (сплошная линия); интенсивность осадков (гистограмма)

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  $0,006 \text{ мкЗв} \cdot \text{ч}^{-1}$ .

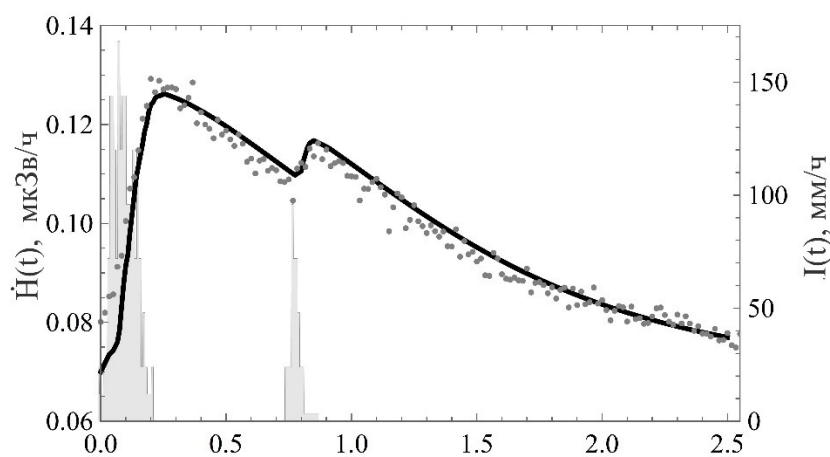


Рисунок 5 – Динамика осадков и гамма-фона: измеренная мощность дозы (точки); восстановленная мощность дозы (сплошная линия); интенсивность осадков (гистограмма)

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/м<sup>2</sup>, 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  $^{214}\text{Pb}$  и  $^{214}\text{Bi}$  ничтожно мала, либо они

почти распались за время движения облака, и ими можно пренебречь. В этом случае функции от времени осажженных 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  $m^{-2} c^{-1}$ , из простого соотношения (3).

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

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

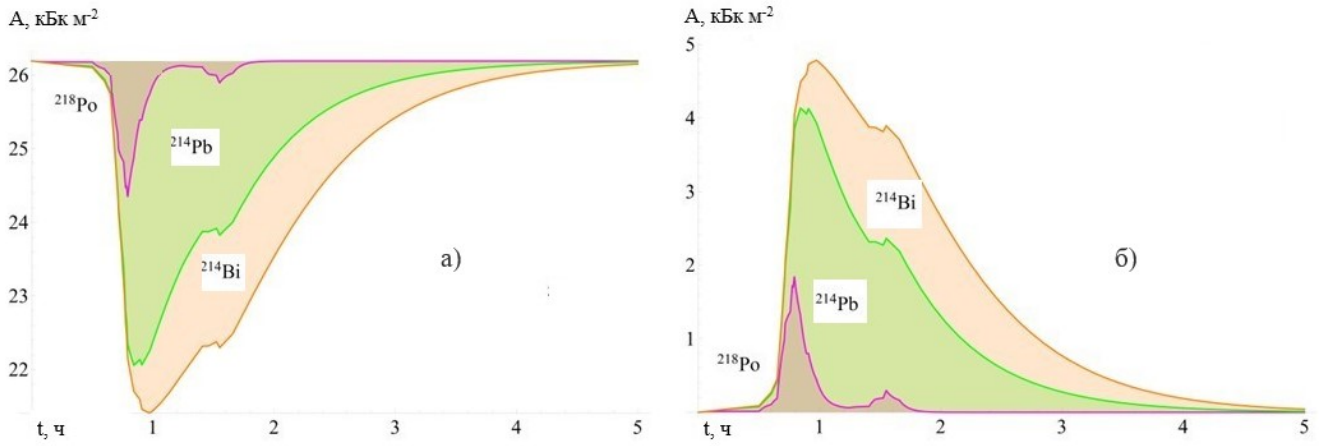


Рисунок 6 – Динамика активности ДПР радона в период осадков 11 июня 2017: а) – в атмосфере; б) – на земной поверхности

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 6), а решение систем уравнений (4), (5) относительно средней вымывающей способности дождя  $L$  принимает более компактный вид:

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

$$X = -L \lambda_2 \lambda_3 e^{t(\lambda_2+\lambda_3)} (L+\lambda_2) (L+\lambda_3) (\lambda_2-\lambda_3) \quad (10.1)$$

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

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

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

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

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  $\sim 50$  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/м<sup>2</sup>с. Полученные методом переменные составили:  $t_{end} = 42$  мин.;  $A_{Po}^h(t=0) = A_{Bi}^h(t=0) = 29$  кБк/м<sup>2</sup>;  $A_{Po}^h(t_{end}) = 5,3$  кБк/м<sup>2</sup>;  $A_{Bi}^h(t_{end}) = 4,5$  кБк/м<sup>2</sup>;  $\Delta \dot{H}_{measured} = 0,08$  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.

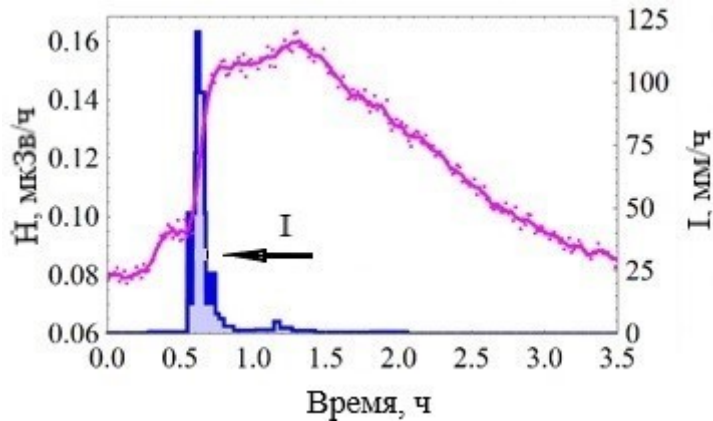


Рисунок 7 – Динамика мощности AMBIENTНОГО эквивалента дозы гамма-излучения и интенсивности осадков 25.06.2017

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

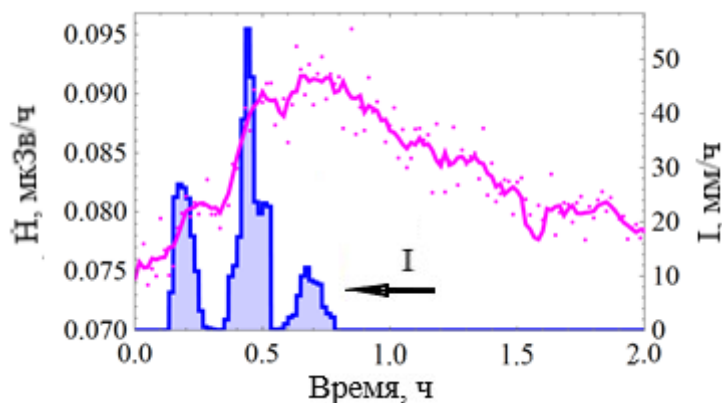


Рисунок 8 – Динамика мощности дозы гамма-излучения и интенсивности осадков 30.07.2017

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/м<sup>2</sup>с. Полученные методом переменные составили:  $t_{\text{end}}=48$  мин.;  $A_{\text{Po}}^h(t=0)=A_{\text{Bi}}^h(t=0) = 20$  кБк/м<sup>2</sup>;  $A_{\text{Po}}^h(t_{\text{end}}) = 3,7$  кБк/м<sup>2</sup>;  $A_{\text{Bi}}^h(t_{\text{end}}) = 3,1$  кБк/м<sup>2</sup>;  $\Delta \dot{H}_{\text{measured}} = 0,016$  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, 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 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  $\gamma$ -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  $\beta$ -and  $\gamma$ -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.