

МЕТОДЫ АНАЛИЗА ОБЪЕМНОЙ АКТИВНОСТИ РАДИОАКТИВНЫХ АЭРОЗОЛЕЙ В АТМОСФЕРНОМ ВОЗДУХЕ

С. А. Калиниченко¹⁾, А. А. Суднеко²⁾

¹⁾ Государственное природоохранное научно-исследовательское учреждение «Полесский государственный радиационно-экологический заповедник»,
247618, г. Хойники, Гомельская область, Беларусь, s-a-k@list.ru

²⁾ Учреждение образования «Гомельский государственный медицинский университет»,
246000, г. Гомель, Беларусь, sudneko.a@yandex.ru

Атмосфера является мощным акцептором техногенных, в том числе и ядерно-энергетических, радиоактивных газо-аэрозольных выбросов как штатно-эксплуатационного, так и аварийного характера. Их последующее включение в потоки воздушных масс, рассеяние, медленная механическая седиментация ведут к относительно равномерному распределению фоновых загрязнений среды. К наиболее интенсивным атмосферным радиоактивным загрязнениям приводят наземные испытания ядерного и термоядерного оружия и аварийные ситуации на предприятиях ядерно-топливного цикла, сопровождающиеся выбросом ядерных делящихся материалов.

Ключевые слова: объемная активность; радиоактивные аэрозоли; вторичный ветровой перенос; трансурановые элементы; внутреннее облучение.

METHODS FOR ANALYZING THE VOLUMETRIC ACTIVITY OF RADIOACTIVE AEROSOLS IN ATMOSPHERIC AIR

S. A. Kalinichenko¹⁾, A. A. Sudneko²⁾

¹⁾ The State Environmental Scientific Research Institution «Polessky State Radiation and Ecological Reserve»,
247618, Hoiniki, Gomel region, Belarus, s-a-k@list.ru

²⁾ Educational Institution Gomel State Medical University, Gomel, Belarus, sudneko.a@yandex.ru

The atmosphere is a powerful acceptor of man-made, including nuclear energy, radioactive gas and aerosol emissions, both of a routine and emergency nature. Their subsequent incorporation into air mass flows, scattering, and slow mechanical sedimentation lead to a relatively uniform distribution of background environmental pollutants. Ground-based tests of nuclear and thermonuclear weapons and emergencies at nuclear fuel cycle enterprises, accompanied by the release of nuclear fissile materials, lead to the most intense atmospheric radioactive contamination.

Keywords: volumetric activity; radioactive aerosols; secondary wind transport; transuranic elements; internal irradiation.

<https://doi.org/10.46646/SAKH-2025-1-41-45>

Образующееся большое количество аэрозольных частиц, в том числе субмикронного размера, забрасывается на большие высоты и способно длительное время удерживаться в атмосфере и, в силу этого, способно распространяться в глобальных масштабах. В условиях аварийного выброса радиоактивных веществ одним из основных факторов, оказывающим вредное воздействие на людей, является внутреннее облучение, формируемое в результате ингаляционной инкорпорации продуктов выброса [1].

Вторичный ветровой перенос выпавших на почву радиоактивных веществ может произойти и в результате ветрового воздействия под влиянием деятельности человека, например, при проведении земляных работ, вспашке, севе, сборе урожая и т.п. Степень такого переноса важно учитывать при оценке облучения, вызванного ингаляционным поступлением радиону-

клиндов в составе аэрозолей, вследствие пребывания в условиях повышенных концентраций радиоактивных веществ во вдыхаемом воздухе.

Потенциально возможные выбросы ^{137}Cs в результате вероятных пожаров в лесах чернобыльской зоны отчуждения классифицируются как события высокой степени значимости, согласно Международной шкале ядерных и радиологических событий. Значимость лесных пожаров усугубляется наличием в лесных экосистемах тугоплавких трансурановых элементов (^{241}Am , ^{238}Pu , ^{239}Pu , ^{240}Pu), представляющих особую опасность при попадании внутрь организма и последующем внутреннем облучении. В этой связи важным элементом радиоэкологического мониторинга является контроль содержания радионуклидов ^{137}Cs , ^{90}Sr и трансурановых элементов $^{239+240}\text{Pu}$, ^{241}Am в атмосферном воздухе.

Для проведения мониторинга и оценки радиоактивного загрязнения атмосферного воздуха используются различные методы контроля. Оценка методов радиационного контроля и измерения содержания радиоактивных частиц в атмосферном воздухе имеет важное значение для обеспечения общественной безопасности и охраны окружающей среды.

Современные методы мониторинга, включая использование высокочувствительных фильтров, каскадных импакторов и анализаторов, обеспечивают надежные данные о концентрации радиоактивных изотопов в воздухе. Эти данные необходимы для оценки воздействия радиации на экосистемы, разработки стратегий по защите населения и планирования мероприятий по ликвидации последствий радиационных аварий [2].

Аэрозоли представляют собой твердые или жидкие частицы, взвешенные в газообразной среде. По механизму возникновения их разделяют на аэрозоли диспергации и аэрозоли конденсации. Диспергационные аэрозоли появляются при разбрызгивании жидкостей, измельчении твердых тел, взмучивании порошков и т.д. Конденсационные аэрозоли возникают при конденсации паров воды, металлов и их окислов и др.

Существующие в настоящее время методы определения объёмной активности радиоактивных аэрозолей в приземном слое атмосферы основываются на прокачке исследуемого воздуха через фильтр с последующим измерением активности осаждённого аэрозоля на радиометрической, либо спектрометрической установке. Для концентрирования радиоактивных аэрозолей из атмосферы отбор пробы воздуха осуществляется, как правило, на твёрдый фильтрующий материал, в качестве которого могут применяться хлопчатобумажная или стеклянная вата, минеральная шерсть, фильтровальная бумага. В отечественной практике аэрозольных измерений широко используют фильтры из тонковолокнистых полимерных материалов – аналитические аэрозольные фильтры Петрянова.

В основе методов количественного определения радиоактивных аэрозолей в воздухе лежит или косвенный способ, когда предварительно извлекают частицы из газовой среды с их последующим излучением, или прямой метод изучения радиоактивности и радионуклида в определенном объеме газовой среды. Методы, при которых твердая или жидкая фаза отделяется от газовой среды, чаще всего основаны на седиментации, фильтрации, инерционном и электрическом осаждении.

Седиментация – это процесс, при котором твердые частицы оседают в жидкости под действием силы тяжести. В контексте радиоактивных изотопов, седиментация может быть использована для отделения частиц, содержащих ^{137}Cs и ^{90}Sr , из газовой среды. Седиментационные методы определения содержания в воздухе аэрозолей условно можно разделить на две группы. Методы первой группы позволяют оценить содержание аэрозолей в ограниченном объеме. Седиментационные методы позволяют определить частицы размером от 1 до 30 мкм. Методы второй группы контролируют уровень радиационных выпадений из атмосферного воздуха. Для сбора атмосферных осадков используются кюветы с предварительно нанесенным на их дно тонким слоем глицерина. Сроки экспозиции при отборе проб осадков зависят в первую

очередь от уровня радиоактивности атмосферы и количества осадков. Обычно кюветы выставляют на срок, превышающий 1 месяц.

Фильтрация заключается в разделении фаз с использованием полупроницаемого материала. В контексте газовой среды важно учитывать скорость потока газа и его влияние на проницаемость фильтра. В случае радиоактивных изотопов, фильтрация может быть использована для удаления частиц, содержащих ^{241}Am , из газовой среды.

Инерционное осаждение используется для отделения частиц от газа за счёт их инерции. Этот метод полезен в системах, где требуется быстрое отделение мелких частиц от потока газа, например, в пылезащитных системах.

Электрическое осаждение базируется на использовании электрических полей для отделения заряженных частиц от газа. Этот метод эффективен в системах с высокой электропроводностью, таких как аэрозоли в производственных условиях. Электрическое осаждение использует электрические поля для отделения заряженных частиц от газа. Этот метод может быть эффективен для изотопов, обладающих зарядом, таких как ^{241}Am . Применение электрических полей позволяет улучшить эффективность отделения и снизить уровень радиоактивного загрязнения в газовой среде.

Методы электрического осаждения используют электрофильтры, механизм осаждения аэрозолей в которых состоит в том, что частицы в поле коронного разряда получают отрицательный заряд и оседают на мишени с положительным зарядом.

Наиболее подходящими методами для осаждения ^{137}Cs , ^{90}Sr , ^{239}Pu , ^{240}Pu в газовой среде являются фильтрация и инерционное осаждение. Эти методы обеспечивают высокую эффективность и скорость осаждения радиоактивных частиц. Наиболее подходящим методом осаждения ^{241}Am является метод электрического осаждения, поскольку радиоизотопы ^{241}Am в процессе ионизации приобретает положительный заряд. Вследствие чего для оценки концентрации радиоактивных аэрозолей и их аэродинамических диаметров используют импакторы, устройства, для осаждения радиоактивных частиц. Они работают на принципе инерционного осаждения, где частицы отделяются от потока воздуха при изменении направления его движения. При отборе аэрозольной пробы импакторами происходит ее разложение на отдельные фракции в зависимости от размера частиц. Далее находят распределение числа радиоактивных частиц и их активности по отдельным фракциям.

В современных импакторах имеется несколько каскадов, где воздух проходит через серию отверстий, и частицы осаждаются на различных пластинах в зависимости от их размера. Меньшие частицы могут проходить через несколько каскадов, в то время как более крупные осаждаются на первых уровнях. В случае использования фильтров с инерционным осаждением используется инерция частиц для их отделения от потока воздуха. Частицы, имеющие большую массу, не могут следовать за изменением направления потока и осаждаются на фильтре.

Использование каскадных импакторов типа MOUDI (Micro-Orifice Uniform Deposit Impactor) и фильтров с инерционным осаждением показала наибольшую эффективность в оценке состояния атмосферного воздуха в случае аварии на ЧАЭС и Фукусима-1. Фильтры с инерционным осаждением, используемые для мониторинга радиоактивных частиц в воздухе, могут включать различные модели и типы, например типа Millipore, Whatman, широко используются в научных исследованиях и могут быть применены для сбора радиоактивных частиц. Фильтры с инерционным осаждением типа PM10 и PM2.5 предназначены для захвата частиц определенного размера (10 мкм и 2,5 мкм) и могут использоваться для мониторинга загрязнения воздуха, включая радиоактивные частицы. Каскадные импакторы показали высокую эффективность в разделении частиц по размеру, что позволяло точно оценивать содержание крупных и мелких радиоактивных частиц. Это было особенно важно для анализа разных радионуклидов, и обеспечивает получение надежных данных для мониторинга радиационной обстановки и оценки воздействия на окружающую среду и здоровье населения.

Концентрацию аэрозолей оценивают методами сцинтилляционной спектрометрии, который основан на использовании сцинтилляторов – материалов, которые излучают свет (сцинтилляцию) при взаимодействии с ионизирующим излучением. Для улавливания аэрозолей и определения содержания радиоактивности йода и ртути в газовых средах в последнее время широко используют сорбционно-фильтрующие ленты типа СФА и аналитические фильтры типа аналитический фильтр аэрозольно-сорбционный. Сорбционно-фильтрующие ленты и фильтры разработаны на основе фильтрующего материала и мелкоизмельченного сорбента. Радиоактивность отбираемых проб измеряют непосредственно с поверхности лент и фильтров радиометрическими или спектрометрическими установками. Мембранные фильтры изготавливают на основе динитроцеллюлозы, объем пор составляет 70-80 % от объема всего фильтра. Их толщина 0,1 мм, средний размер составляет 0,3; 0,5; 0,7; 0,9; 1,2; 3 – 5 мкм [3].

Методика сцинтилляционной спектрометрии включает этапы подготовки образцов воздуха содержащих радиоизотопы. Образцы подготавливаются для анализа, что может включать фильтрацию, сушку и, при необходимости, химическую обработку для выделения целевых радионуклидов. Образец помещают в сцинтилляционный детектор, который может быть выполнен из различных материалов, таких как натрий йодид с добавлением таллия или органических сцинтилляторов. Эти материалы эффективно преобразуют ионизирующее излучение в видимый свет. Когда радиоактивные частицы взаимодействуют с сцинтиллятором, они вызывают его свечение. Это свечение собирается и преобразуется в электрические сигналы с помощью фотоэлектронного умножителя. Полученный электрический сигнал обрабатывается спектрометром, который анализирует их по энергии и количеству, что позволяет определить качественный состав радионуклидов в образце и их активности. Каждый радионуклид имеет характерный спектр излучения, позволяющий точно идентифицировать его (таблица).

Характеристика излучения отдельных радионуклидов

Характеристика	Радионуклид			
	Cs-137	Sr-90	Am-241	Pu-239
Тип излучения	Гамма-излучение 662 кэВ (основная линия) бета-излучение максимальная энергия около 1,17 МэВ	Бета-излучение максимальная энергия около 0,546 МэВ гамма-излучение (в меньшей степени)	Альфа-излучение 5,486 МэВ гамма-излучение 59,5 кэВ (основная линия)	Альфа-излучение 5,156 МэВ гамма-излучение 0,414 МэВ
Спектр	пик на 662 кэВ в гамма-спектре	бета-спектр 0,546 МэВ	Яркий пик на 59,5 кэВ в гамма-спектре	Яркий пик на 5,156 МэВ в альфа-спектре

С 2020 г. в рамках проекта технической помощи МАГАТЭ ВУЕ9024 лаборатория ПГРЭ использует высокопроизводительное воздухозаборное устройств VOPV-12, позволяющее осуществлять контроль содержания ^{137}Cs в аэрозолях приземного слоя атмосферы. Для получения количественных аналитических данных, характеризующих содержание радионуклидов в атмосферном воздухе применяются методики выполнения измерений, включённые в перечень методик радиационного контроля, действующих на территории Республики Беларусь: МВИ МН 3151 – 2009 Методика выполнения измерений удельной активности γ -излучающих радионуклидов ^{137}Cs и ^{241}Am в почве, донных отложениях и других объектах окружающей среды на γ -спектрометрах с полупроводниковыми детекторами с бериллиевым или композитным углеродным окном. Утв. 31.05.2010 зам. директора БелГим по науке Т.А. Коломийцом; Методические указания по определению удельной активности плутония в почве, растительности,

воде, осадках сточных вод и донных отложениях методом α -спектрометрии. Утв. 17.11.1997 ИРЭП НАН Беларуси [4].

В исследованиях отбор проб аэрозолей обеспечивался путём прокачки воздуха через аэрозольный фильтр FPM 1515 или FPM 1530 размером 270×230 мм (VFNuclear, Czech [9]), с помощью цифрового высокообъёмного воздухозаборного устройства VOPV-12 (VF Nuclear, Czech) (калибровка производителя – 2020 г.). Скорость потока воздуха колебалась от 100 до 130 м³/ч. Для уточнения скорости потока воздуха, прокаченного через фильтр, применялся анемометр Testo 410-2. Объём прокачанного воздуха (Q , м³), вычисляли по формуле:

$$Q=S \times V \times t,$$

где S – площадь поперечного сечения, м²; V – линейная скорость воздушного потока, м/с; t – время покачивания воздуха, с.

В полевых условиях установка размещалась на высоте около 0,4 м от подстилающей поверхности территории воздухозабора и обеспечивалась электропитанием от мобильного бензинового генератора. После окончания прокачки выполнялись измерения активности ¹³⁷Cs и других γ -излучающих радионуклидов в аэрозольных фильтрах на γ -спектрометре Canberra с использованием программного обеспечения Genie-2000 (набор и анализ γ -спектров). Для регистрации γ -излучения применялся блок детектирования на основе кристалла из особо чистого германия, с площадью рабочей поверхности 2000 мм² и толщиной чувствительной зоны 20 мм (BE2020), помещённый в свинцовую защиту массой 1 т.

Следующим этапом изучения аэрозольных фильтров является измерение суммарной α - и β -активности. Для решения этой задачи использовалась низкофоновая установка α - β - счёта LB4100 (Canberra), укомплектованная газоразрядными детекторами, работающими на проточной газовой смеси (90 % аргон × 10 % метан). Прибор характеризуется низким уровнем фона (не более 0,7 имп/мин для β - и 0,1 имп/мин для α -частиц) и высокой эффективностью регистрации (не менее 0,45 для β - (⁹⁰Sr+⁹⁰Y) и 0,35 для α -частиц (²⁴¹Am)). В связи с небольшим объёмом измерительной камеры и необходимостью измерения тонкослойных образцов, было выполнено сжигание аэрозольных фильтров в муфельной печи до золы при температуре не выше 450°C [5]. Результатом измерений низкофоновой установки являлся α -счёт и β -счёт в импульсах в минуту. После вычитания фона получали чистую скорость счёта от счётной мишени. Для расчёта активности использовались эффективности регистрации, полученные по результатам измерений стандартных источников аттестованных в БелГИМ.

Библиографические ссылки

1. Садовников Р. Н., Федосеев В. М. Сравнительная оценка опасности радионуклидов, поступающих в организм человека с продуктами питания // Экологические приборы и системы. 2004. № 6. С. 46–49.
2. Способ определения радиоактивного загрязнения приземного слоя атмосферы : пат. RU2547002C1 / Р. Н. Садовников, А. Ю. Бойко, П. Е. Шлыгин ; дата публ.: 04.10.2015.
3. Воробьев А. М. Методы определения радиоактивных веществ в воздухе. М.: Медицина, 1974. 136 с.
4. Кудако И. С., Кудако С. А., Калиниченко С. А. Радиоэкологический мониторинг ¹³⁷Cs в воздушных аэрозолях с использованием мобильной радиологической лаборатории // Генетические и радиационные технологии в сельском хозяйстве : сб. докл. материалов III Междунар. молодежной конф., Обнинск, 23-24 окт. 2024 г. / НИЦ «Курчатовский институт» ВНИИРАЭ, 2024. С. 226–228.
5. Оценка параметров дозы внутреннего облучения персонала за счёт ингаляционного поступления радионуклидов в организм на территории зоны отчуждения ЧАЭС / С.А. Калиниченко [и др.] // Веснік Мазырскага дзяржаўнага педагагічнага ўніверсітэта імя І. П. Шамякіна. 2024. № 2 (64). С. 15–22.