

под действием тепловых нейтронов, можно оценить по формуле

$$I = I_1 \Phi_n S \varphi(\text{Pu}^{233}\text{U}) p,$$

где I_1 — ионизационный ток в камере при единичном акте нейтронной конвертации (для осколков деления тяжелых ядер $I_1 \sim 4,3 \cdot 10^{-13}$ Кл); S — площадь радиатора, см^2 ; $\varphi(\text{Pu}^{233}\text{U})$ — собственная эффективность нейтронной конвертации ядер $^{239}\text{Pu}/^{233}\text{U}$; p — давление рабочего газа.

В большинстве случаев нижней границей чувствительности для аппаратуры обработки сигнала камер деления является ток $5 \cdot 10^{-13}$ Кл. Величина $\varphi(\text{Pu}^{233}\text{U})$ зависит от концентрации соответствующих ядер в радиаторе и увеличивается с течением времени, обуславливая изотопное отравление материала. Расчеты показывают, что в течение 3 лет эксплуатации камеры при потоке нейтронов плотностью до $10^{12} \text{ с}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$ количества ядер $^{239}\text{Pu}/^{233}\text{U}$ недостаточно для регистрации сигнала от их деления. Однако исходная примесь ^{235}U в урановом радиаторе приводит к шумовому сигналу $3 \cdot 10^{-13}$ Кл, что находится на границе чувствительности аппаратуры (см. табл. 3).

В заключение отметим области эффективного использования радиаторов на основе ^{232}Th и ^{238}U для обеспечения внутризонного нейтронного мониторинга. Малогабаритные камеры на основе ^{238}U целесообразны при единичном

кратковременном измерении потока быстрых нейтронов вследствие их относительно высокой чувствительности. Для систем длительного использования перспективны камеры на основе ThO_2 ввиду высокой степени селективности их сигнала (до 100%) и низкой интенсивности изотопного отравления.

Исследование и разработка новых типов радиаторов, технологии их получения и создание на их основе специальных ионизационных камер деления осуществлялись в рамках ФЦП «Ядерные энерготехнологии нового поколения на период 2010—2015 годов и на перспективу до 2020 года».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сахаров В.В., Фролов Н.Н., Басков П.Б. и др. Химико-материаловедческие аспекты термодеструкционного синтеза ураноксидных радиаторов камер деления. — Изв. вузов. Ядерная энергетика, 2014, № 3, с. 57—63.
2. Сахаров В.В., Басков П.Б., Мосягина И.В. и др. Химический синтез нейтрон-детектирующих ультратонких оптических материалов. — Там же, 2012, № 4, с. 130—142.
3. Сахаров В.В., Данилевич Т.И., Ключников В.М. и др. Топохимическое получение гидроокиси тория. — Радиохимия, 1974, т. 16, № 1, с. 74—80.
4. Егоров А.В., Басков П.Б., Сахаров В.В., Мосягина И.В. Ураноксидный радиатор ионизационной камеры деления. Патент РФ 152036, заявка 2014134956/07 от 26.08.2014, МПК H01J 47/02. — Бюл. «Изобретения. Полезные модели», 2015, № 12.

УДК 621.039.58

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА КОНТРОЛЯ РАДИАЦИОННОЙ ОБСТАНОВКИ В РАЙОНЕ РАЗМЕЩЕНИЯ АЭС КАК ИНСТРУМЕНТ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ

Коротков А.С., Турлова А.В. (ФГУП «ВНИИФТРИ», Менделеево, Московская обл.),
Косов А.Д., Орехов А.А. (АО «ВНИИАЭС», г. Москва)

В настоящее время радиационный контроль обеспечивается единой государственной автоматизированной системой мониторинга радиационной обстановки (ЕГАСМРО). Одной из ее составляющих является сеть автоматизированных систем контроля радиационной обстановки в районе расположения АЭС (АСКРО), которая функционирует при нормальной эксплуатации, нарушениях нормальной эксплуатации и авариях. Необходимость АСКРО стала очевидной после аварии на Чернобыльской АЭС, когда

решения по защите населения принимались в отсутствие исчерпывающей информации о радиационной обстановке на местности. Авария дала импульс к развитию систем поддержки принятия решений, основанных на модельных расчетах и автоматизированном контроле радиационной обстановки на местности, как в нашей стране, так и за рубежом.

Авария на АЭС «Фукусима-1» (Япония), приведшая к радиационному загрязнению окружающей среды и эвакуации населения, подтвер-

дила необходимость функционирования в районе размещения АЭС системы контроля радиационной обстановки, которая оперативно и автономно регистрирует радиационные показатели, необходимые для принятия решений о защите людей в случае аварий. Анализ этой аварии установил дополнительные требования к разработке подобных систем, которые должны быть учтены.

Задачи АСКРО и направления ее развития. Основными задачами АСКРО в соответствии с национальными регулирующими документами [1, 2] и рекомендациями МАГАТЭ [3—6] являются:

- измерение в автоматизированном режиме параметров, характеризующих радиационную обстановку в зоне наблюдения АЭС (радиационный контроль окружающей среды) при всех режимах эксплуатации и авариях;

- получение информации, которая необходима для восстановления активности радионуклидов, поступивших за пределы АЭС при запроектных авариях;

- информационная поддержка групп радиационной разведки;

- анализ метеорологического и радиационного контроля окружающей среды для составления карт плотности радиоактивных выпадений и дозы облучения населения с использованием соответствующих моделей и компьютерных средств;

- выявление областей, требующих эвакуации, переселения населения или ограничений в потреблении продуктов питания.

Согласно рекомендациям МАГАТЭ первичные меры защиты населения при аварии принимаются в зонах аварийного планирования, исходя из состояния реакторной установки (системы классификации аварии). Дальнейшее вмешательство основывается на данных об изменении радиационной обстановки. Таким образом, автоматизированной системе радиационного контроля и основанной на ее данных системе поддержки принятия решений отводится роль выявления приоритетных (первоочередных) направлений вмешательства и уточнения рекомендаций для защиты населения за пределами аварийных зон. Данный подход согласуется с отраслевым документом АО «Концерн Росэнергоатом» [7], согласно которому на первом этапе решения о защитных мерах принимаются на ос-

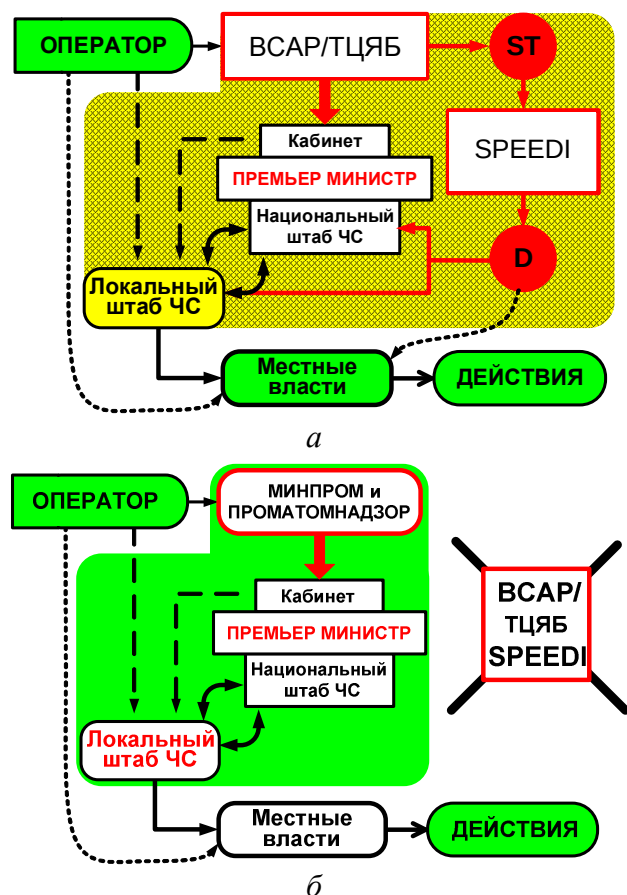
нове анализа нарушений безопасности энергоблока и оценки ожидаемого выброса радионуклидов в окружающую среду. На втором этапе подготовки защитных мер параметры источника выброса уточняются по данным АСКРО [8].

Системы поддержки принятия решений о защите населения в случае радиационной аварии, основанные на совместном использовании модельных расчетов и данных автоматизированной сети постов контроля, получили широкое применение за рубежом (RODOS, ARGOS, NARAC, MACCS2, SPEEDI). До аварии на АЭС «Фукусима-1» такие системы отработывались только в тестовом режиме или во время противоаварийных тренировок и учений. После 11 марта 2011 г. одна из таких систем поддержки принятия решений SPEEDI использовалась системой аварийного реагирования Японии на практике.

В соответствии с национальной системой аварийного реагирования Японии решения о защите населения должны были основываться на оценках прогнозируемой дозы облучения, рассчитываемой с помощью программно-технического комплекса SPEEDI (рис. 1, а). До землетрясения система насчитывала 218 постов наблюдения на всей территории, 23 из них располагались в префектуре Фукусима. С помощью комплекса SPEEDI в автоматическом режиме на серверах Технологического центра ядерной безопасности моделировалось распространение радиоактивного облака на основе параметров, полученных с использованием вспомогательной системы аварийного реагирования, и данных постов радиационного мониторинга.

В результате землетрясения 11 марта 2011 г. магнитудой 9 баллов по шкале Рихтера произошла потеря внешнего электроснабжения энергоблоков. Первые три энергоблока были остановлены, энергоснабжение внутренних нужд АЭС осуществлялось посредством резервных дизель-генераторов. Землетрясение вызвало цунами с высотой волны на побережье около 15 м, которое привело к затоплению и отказу в работе всех систем резервного электроснабжения.

Аппаратура системы радиационного контроля, расположенная на промплощадке АЭС «Фукусима-1», продолжала функционировать после землетрясения и до воздействия цунами. Однако после обрушения на объекты АЭС цунами почти все стационарные технические



Р и с. 1. Система аварийного реагирования до (а) и во время развития аварии на АЭС «Фукусима» (Япония) (б)

средства радиационного и метеоконтроля стали неработоспособны вследствие утраты источников питания. За счет автономных источников питания отдельная аппаратура проводила измерения до 12 марта.

В результате аварии данные вспомогательной системы аварийного реагирования с информацией о состоянии реакторной установки АЭС «Фукусима-1», включающие оценку источника выброса, перестали поступать в Технологический центр ядерной безопасности вследствие утраты внешнего энергоснабжения и отсутствия подключения к автономному источнику питания. Кроме того, менее чем через 2 ч после землетрясения по неизвестной причине произошел отказ канала связи между АЭС «Фукусима-1» и комплексом SPEEDI на участке между внестанционным аварийным центром и вспомогательной системой аварийного реагирования. Это привело к недостатку исходных данных для выполнения расчетов.

Проблемы с энергоснабжением также нарушили функционирование измерительной

аппаратуры, установленной на постах наблюдения системы SPEEDI. 11 марта 2011 г. непосредственно после землетрясения ни один из датчиков, расположенных в префектуре Фукусима и примыкающей к ней префектуре Мияги, не передавал информацию в систему. С учетом масштабов стихийного бедствия нельзя исключать, что массовый отказ технических средств на постах наблюдения системы SPEEDI был обусловлен в том числе повреждением измерительной аппаратуры и оборудования для передачи данных в результате сейсмического воздействия [9].

Отказ работы системы SPEEDI привел к тому, что решения об эвакуации и укрытии населения принимались на основе состояния станции, а не на прогнозируемой дозе облучения (см. рис. 1, а), как это было запланировано (рис. 1, б).

Анализ аварии на АЭС «Фукусима-1» показал, что система поддержки принятия решений, основанная на комплексе SPEEDI, оказалась неработоспособной по причине отсутствия надежных и автономных средств электропитания постов радиационного мониторинга, а также резервирования каналов связи и передачи данных между этими постами и сервером обработки данных. Следовательно, одним из приоритетных направлений развития систем поддержки принятия решений является повышение надежности и устойчивости АСКРО к природным и техногенным событиям. Требования относительно повышения надежности АСКРО к природным и техногенным событиям нашли свое отражение в отечественной нормативной базе [2], согласно которой она относится к системам, важным для безопасности. Эти системы должны быть устойчивы к природным (землетрясения, ураганы, смерчи, наводнения) и техногенным событиям, а также другим воздействиям, возможным в случае возникновения аварии на АЭС.

Принципиально важный аспект функционирования АСКРО — обработка получаемой измерительной информации в целях выработки рекомендаций для защиты населения и ориентации групп аварийного реагирования. Для этого необходима разработка соответствующего методического и программно-технического обеспечения поддержки принятия решений по защите населения, использующая данные АСКРО. Реализация такого мониторинга возможна толь-

ко при стратегическом расположении автоматических постов контроля с передачей данных в аварийный центр и наличии моделей прогнозирования, использующих результаты радиационного и метеорологического контроля в районе расположения АЭС [1, 6].

Не менее важен при проектировании и эксплуатации АСКРО правильный выбор измерительной задачи. В настоящее время единственной величиной, измеряемой на всех постах контроля АСКРО, является мощность дозы γ -излучения, что, очевидно, недостаточно для решения сформулированных пяти основных задач. Необходимый и достаточный перечень измеряемых радиационных параметров окружающей среды установлен документами [1, 10]:

- мощность амбиентного эквивалента дозы γ -излучения;

- плотность потока ионизирующих частиц;

- объемная активность радиоактивного аэрозоля (паров) в воздухе;

- объемная активность радиоактивных газов;

- удельная (объемная) активность радионуклидов в разных объектах окружающей среды;

- плотность выпадений радионуклидов на почву;

- энергетическое распределение ионизирующего излучения (спектрометрические измерения).

При этом для контроля территорий измеряются мощность амбиентного эквивалента дозы и плотность выпадений радионуклидов, атмосферного воздуха — объемная активность газов и аэрозолей, воды, почвы, растительности, продуктов питания — удельная или объемная активность радионуклидов. Измеренные величины могут дополнять одна другую для повышения оперативности и/или достоверности контроля, расширения диапазонов и снижения неопределенности измерений: для определения мощности амбиентного эквивалента дозы возможно применение γ -спектрометрических измерений, учитывающих фактическое энергетическое распределение излучения; результаты измерений мощности дозы могут использоваться для определения объемной или удельной активности радионуклидов при наличии соответствующей калибровки; плотность потока частиц измеряется при контроле плотности выпадений α - и β -излучающих радионуклидов. В автоматизированном режиме с учетом современных средств и мето-

дов в окружающей среде могут измеряться мощность амбиентного эквивалента дозы, плотность потока частиц, объемная активность аэрозолей и газов, энергетическое распределение излучения, плотность выпадений радионуклидов из атмосферы (при наличии необходимых средств отбора проб) [10—13].

Непрерывный контроль радиационной обстановки на местности и координация действий мобильных групп подразумевают измерение объемной активности аэрозолей и газов в приземном слое атмосферы и мощности дозы на постах контроля при условии их достаточного числа и равномерного размещения по территории зоны наблюдения АЭС. Задачи, связанные с поддержкой принятия решений о защите населения, требуют, помимо измерения мощности дозы и объемной активности, измерений плотности выпадений радионуклидов, их удельной активности в почве, воде, продуктах питания. При этом удельная активность радионуклидов в указанных объектах в автоматизированном режиме может лишь оцениваться по результатам измерения плотности выпадений.

Наиболее сложной с точки зрения метрологии представляется определение активности радионуклидов, поступивших за пределы АЭС с аварийным выбросом. Для этого могут использоваться измерения спектра γ -излучения радиоактивного облака с помощью блока детектирования гамма-спектрометра, оснащенного коллиматором, для исключения влияния излучения других объектов [11]. Для измерения указанных параметров необходимо оснащение АСКРО радиометрами и спектрометрами излучения, а также специализированными средствами отбора проб. При наличии информации о соотношении активности радионуклидов в выбросе АЭС можно ограничиться неразрушающими γ -спектрометрическими методами.

Для оценки эффективности применения γ -спектрометрических измерительных каналов в составе АСКРО выполнено сравнение спектрометрического и дозиметрического методов по чувствительности к регистрации радиоактивного облака (выброса) с использованием двух расчетных моделей. Первая упрощенная модель представляется точечными источниками ^{137}Cs (^{137}Ba), которые поочередно располагаются на расстоянии от 10 до 100 м от детектора. Необходимо отметить, что расстояние от детек-

тора до облака зависит как от высоты, так и от направления выброса. В качестве чувствительности метода принималась величина, обратная минимально регистрируемой активности облака.

Нижний предел измерений надфоновой мощности амбиентного эквивалента дозы дозиметрическим методом принимался равным 0,1 мкЗв/ч. Активность ^{137}Cs , соответствующая измеренной мощности дозы:

$$A = Dr^2 / \Gamma_G \exp(-\mu r), \quad (1)$$

где D — мощность амбиентного эквивалента дозы γ -излучения, измеряемая дозиметром, Зв/ч; Γ_G — γ -постоянная ^{137}Cs (^{137}Ba), Зв·м²/(с·Бк); μ — линейный коэффициент ослабления γ -излучения радионуклида в воздухе в зависимости от энергии, м⁻¹; r — расстояние от источника до детектора, м.

Нижний предел измерения активности радионуклида в облаке выброса спектрометрическим методом (путем регистрации спектра γ -излучения от облака) рассчитывался по формуле

$$A_{\min} = \frac{k f_q}{\epsilon Y_\gamma t G} \left[\left(2 N_\Phi t + \frac{f_q^2}{4} \right)^{1/2} + \frac{f_q}{2} \right], \quad (2)$$

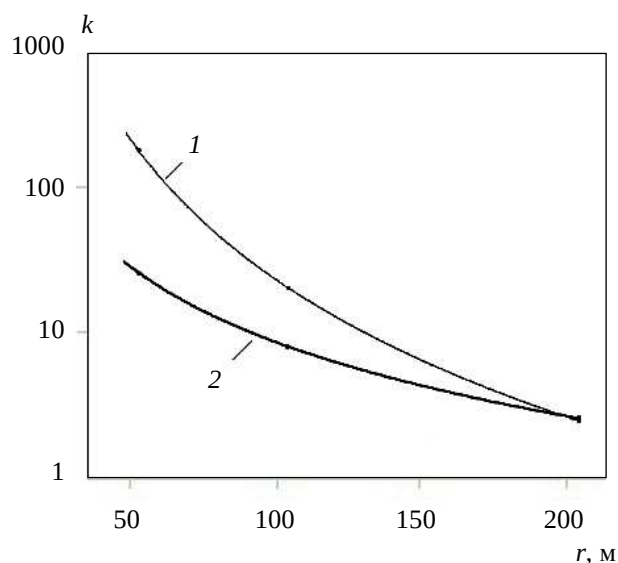
где k — коэффициент охвата (для нормального распределения $k = 2$ при доверительной вероятности $P = 0,95$); f_q определяется из выражения $\sigma = 1/f_q$, где σ — относительная стандартная неопределенность измерений надфоновой скорости счета для данного радионуклида, обусловленная вероятностным характером излучения; ϵ — эффективность регистрации радионуклида; Y_γ — квантовый выход; t — время измерения, с; G — коэффициент, зависящий от геометрии измерений, в данном случае определяется как $G = r^2 / 4R^2$, где r — радиус окна детектора; R — расстояние от источника до детектора; N_Φ — скорость счета импульсов в пике полного поглощения, с⁻¹.

Расчетами по формулам (1), (2) получено, что для модели точечного источника отношение чувствительности спектрометрического и дозиметрического методов составляет несколько сот раз при расстоянии до облака менее 100 м. С увеличением расстояния до облака разница между ними уменьшается (преимущество спектрометрического метода нивелируется).

Во второй расчетной модели радиоактивное облако представлялось в виде цилиндра с образующей 7,5 км. Размеры облака принимались, исходя из категории устойчивости атмосферы D , скорости ветра 5 м/с, длительности выброса 25 мин [12]. Перечень γ -излучающих радионуклидов принят, исходя из типичного состава аварийного выброса [14].

Оценка чувствительности спектрометрического и дозиметрического методов к регистрации облака в модели объемного источника выполнена методом Монте-Карло с помощью расчетного кода MCNP (рис. 2).

По результатам сравнения сделан вывод, что спектрометрический метод в отличие от дозиметрического более чувствителен к регистрации выброса при расстоянии менее 100 м от облака до детектора или небольшом размере облака (точечный источник или цилиндр диаметром ~100 м). Для большого расстояния и/или размера облака различия в чувствительности методов нивелируются в связи с преобладанием в регистрируемом спектре рассеянного γ -излучения. Таким образом, спектрометрические измерительные каналы могут иметь преимущество при регистрации радиоактивного выброса АЭС по сравнению с дозиметрическими только при их расположении вблизи источника выброса (~1 км от источника) — размер и высота облака при этом составляют ~100 м. Для обоснования возможности регистрации радиоактивного облака с



Р и с. 2. Зависимость отношения чувствительности дозиметрического и спектрометрического метода k от расстояния радиоактивного облака диаметром 150 (1) и 400 м (2) до детектора r

помощью спектрометрических каналов в составе АСКРО необходимы экспериментальные исследования, подтверждающие расчетные оценки. Требуется тщательная проработка методики расстановки постов АСКРО в районе размещения АЭС с учетом возможных активности, радионуклидного состава и конфигурации выброса, а также измерительных каналов для разного расстояния от радиоактивного облака.

Заключение. Развитие автоматизированной системы контроля радиационной обстановки должно быть направлено как на мониторинг окружающей среды, так и на поддержку принятия решений о защите населения при авариях. Согласно современным стандартам МАГАТЭ информация с постов радиационного контроля должна использоваться для уточнения первичных защитных мер, принимаемых на основании состояния реакторной установки.

Исходя из опыта эксплуатации АСКРО в нашей стране, требований отечественных регулирующих документов, стандартов МАГАТЭ, принципиально важным представляется решение следующих задач:

обоснование необходимого и достаточного перечня измеряемых величин для мониторинга (постановка измерительной задачи) с учетом их технической и методической реализации;

функционирование в условиях проектных, запроектных и тяжелых аварий на АЭС и экстремальных внешних воздействий (надежность);

работоспособность системы в целом даже при отказе отдельных элементов (гибкость);

обоснование конфигурации расположения постов радиационного контроля, обеспечивающей достаточный объем данных о радиационной обстановке на местности и гарантированное получение необходимой информации для принятия решений о защите населения (эффективность);

наличие программно-технических комплексов для поддержки принятия решений при радиационных авариях на АЭС на основе измерительной информации (оснащенность).

Наиболее сложной измерительной задачей АСКРО представляется регистрация облака радиоактивного выброса АЭС для уточнения параметров выброса. Решение этой задачи возможно с применением гамма-спектрометрических измерений, для чего необходима разработка измерительных процедур и их оформление в виде методического документа.

Развитие АСКРО как эффективного инструмента контроля радиационной обстановки и поддержки принятия решений о защите населения в случае радиационной аварии позволит повысить не только уровень безопасности населения при эксплуатации АЭС, но и конкурентоспособность отечественных АЭС на мировом рынке.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Санитарные** правила проектирования и эксплуатации атомных станций. СанПиН 2.6.1.24—03 (СП АС—03).
2. **Общие** положения обеспечения безопасности атомных станций. НП-001—15.
3. **Меры** по защите населения в случае тяжелой аварии на легководном реакторе. EPR-NPP 2013. Вена: МАГАТЭ, 2013.
4. **Мониторинг** окружающей среды и источников для целей радиационной защиты. RS-G-1.8. Вена: МАГАТЭ, 2016.
5. **Руководство** по мониторингу при ядерных или радиационных авариях. IAEA-TECDOC-1092/R. Вена: МАГАТЭ, 2002.
6. **Radiation** Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards. GSR-3. Vienna: IAEA, 2014.
7. **Порядок** применения критериев для принятия решений о мерах защиты персонала и населения в случае радиационной аварии на атомной станции на основе принципа оптимизации вмешательства. МУ 1.2.5.03.0035—2010. М., Росэнергоатом, 2010.
8. **Положения** о повышении точности прогностических оценок радиационных характеристик радиоактивного загрязнения окружающей среды и дозовых нагрузок на персонал и население. РБ-053—10. Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору, 2010.
9. **Арутюнян Р.В., Большов Л.А., Павловский О.А.** Актуальные задачи совершенствования готовности к реагированию на чрезвычайные ситуации радиационного характера. — В сб.: Авария на АЭС «Фукусима-1». Опыт реагирования и уроки. Труды ИБРАЭ. Вып. 13. М.: Наука, 2013.
10. **Контроль** радиационной обстановки. Общие требования. МУ 2.6.5.008—2016. ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России, 2016.
11. **Федеральный** информационный фонд по обеспечению единства измерений. Сведения об утвержденных типах средств измерений [Электронный ресурс]. М., Росстандарт, 2017.
12. **Королев С.А., Лаврухин Ю.Е., Румянцев О.В.** Метрологическое обеспечение спектрометрического канала АСКРО. — Атомная энергия, 2010, т. 109, вып. 1, с. 29—33.
13. **Берлянд М.Е.** Прогноз и регулирование загрязнения атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1985.
14. **Методические** рекомендации по выбору исходных данных и параметров при расчете радиационных последствий аварий на АЭС. М., Росэнергоатом, 2001.