



ПОПОВ ВЛАДИМИР ЮРЬЕВИЧ

**Использование комплекса измерения объёмных активностей
ксенона (ARIX-02) для задач мониторинга и прогнозирования
чрезвычайных ситуаций на ядерных энергетических объектах**

Специальность 05.26.02 – Безопасность в чрезвычайных ситуациях
(энергетика)

**Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук**

Санкт-Петербург - 2012

Работа выполнена в Федеральном Государственном Бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования (ФГБОУ ВПО) "Санкт-Петербургский государственный политехнический университет" на кафедре "Управление и защита в чрезвычайных ситуациях"

Научный руководитель
– доктор техн. наук, профессор

Гуменюк Василий Иванович

Официальные оппоненты:

Кармишин Александр Михайлович – доктор техн. наук, профессор, Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, профессор

Федорович Евгений Данилович – доктор техн. наук, профессор ФГБОУ ВПО "Санкт-Петербургский государственный политехнический университет", профессор

Ведущая организация – ФГУП "НПО Радиевый институт им. В.Г. Хлопина", г. Санкт-Петербург.

Защита диссертации состоится «24» апреля 2012 г. в 16:00 на заседании диссертационного совета Д 212.229.04 в ФГБОУ ВПО "Санкт-Петербургский государственный политехнический университет" по адресу:

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, в аудитории 411 ПГК

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ФГБОУ ВПО "Санкт-Петербургский государственный политехнический университет"

Автореферат разослан 23 марта 2012 г.

Отзыв на автореферат, заверенный печатью учреждения, в двух экземплярах просим направить по вышеуказанному адресу на имя учёного секретаря диссертационного совета.

Факс: (812)-297- 5744

E-mail: kg1210@mail.ru

Учёный секретарь
диссертационного совета



К.А. Григорьев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Мониторинг и прогнозирование чрезвычайных ситуаций (ЧС) направлены на максимально возможное уменьшение риска возникновения ЧС, сохранение жизни и здоровья людей, снижение размеров ущерба окружающей среде и материальных потерь в случае их возникновения. Важнейшим условием эффективного прогнозирования ЧС является информационное обеспечение указанной деятельности. Информационное обеспечение прогнозирования ЧС предполагает наличие и функционирование автоматизированной информационно-управляющей системы, представляющей собой совокупность технических систем, средств связи и оповещения, автоматизации и информационных ресурсов, обеспечивающей обмен данными, подготовку, сбор, хранение, обработку, анализ и передачу информации.

Данная работа посвящена мониторингу и прогнозированию ЧС на ядерных энергетических объектах (ЯЭО) с помощью информационных ресурсов, ранее не используемых для данной задачи, – объёмной активности изотопов ксенона (ОА ИК), а также техническим средствам необходимым для их определения.

Образование изотопов ксенона в основном имеет техногенную природу и происходит в результате деятельности атомных электростанций, радиохимических предприятий по переработке ядерных отходов, исследовательских реакторов и несанкционированной ядерной деятельности.

Диагностировать аварийные и предаварийные состояния на ЯЭО по анализу объёмной активности изотопов ксенона весьма удобно, так как ксенон является благородным газом и при обычных условиях не вступает в химические реакции с другими элементами и химическими соединениями.

Не смотря на все предпринятые меры защиты, значительная часть радиоактивных благородных газов (РБГ) попадает в окружающую среду и позволяет производить измерения объёмных концентраций изотопов ксенона на значительном расстоянии от точки инъекции.

К сожалению, в настоящее время мониторинг изотопов ксенона в РФ производится только для задач договора о всеобщем запрещении ядерных испытаний (ДВЗЯИ).

Созданная ранее аппаратура, российского (советского) производства, не удовлетворяла критериям, предъявляемым к автоматическим комплексам мониторинга ксенона.

Таким образом, тема диссертационной работы, посвящённая использованию комплекса измерения объёмных активностей ксенона (ARIX-02) для задач мониторинга и прогнозирования ЧС на ЯЭО является актуальной.

Целью работы являются измерения объёмной активности изотопов ксенона для задач мониторинга и прогнозирования ЧС на ЯЭО и создание технических средств необходимых для его проведения.

Научная задача работы. На основе анализа физических и технологических процессов функционирования ЯЭО разработать модель мониторинга и прогнозирования ЧС на них, осуществляя измерения объёмной активности

изотопов ксенона. Создать и произвести опытную эксплуатацию технических средств, необходимых для проведения мониторинга.

Объект исследования. Мониторинг и прогнозирование как система наблюдения на объектах ядерной энергетики, технические средства мониторинга. Анализ спектрометрической информации средств мониторинга.

Предмет исследования. Анализ закономерностей, раскрывающих зависимость между функционированием ЯЭО и выбросами радиоактивных изотопов ксенона в атмосферу. Технические средства мониторинга изотопов ксенона.

Метод исследования. Методы математической статистики, алгебры логики и логического анализа физических закономерностей.

Научная новизна.

1. Обоснована целесообразность проведения мониторинга ИК для задач определения ЧС на ЯЭО с использованием стационарного и мобильного ксенонового оборудования.

2. Разработан алгоритм прогнозирования ЧС на ЯЭО, по результатам анализа измеренных объёмных концентраций изотопов ксенона, в приземном слое атмосферного воздуха.

3. Разработан и изготовлен аппаратный комплекс ARIX-02 для задач измерения ОА ИК. Технические характеристики комплекса сопоставимы с существующими зарубежными аналогами, а по некоторым из них он значительно их превосходит.

4. Разработан и реализован на практике метод комплексного анализа спектров β - γ совпадений. Данный метод позволяет одновременно определять объёмные концентрации четырёх, необходимых для мониторинга, изотопов ксенона, значительно понизив их минимальную детектируемую концентрацию (МДК) по сравнению с определением их по γ спектру. Определение четырёх изотопов позволяет определять состояние технологического процесса ЯЭО дополнительно к факту диагностирования ЧС.

5. Впервые, в результате опытной эксплуатации комплекса ARIX-02, получен большой массив данных по объёмным концентрациям изотопов ксенона, подтверждены его технические характеристики и целесообразность использования для задач мониторинга и прогнозирования ЧС на ЯЭО.

Практическая ценность работы заключается в том, что обоснована целесообразность и разработана модель новой важной информационной составляющей мониторинга и прогнозирования ЧС на ЯЭО – объёмных концентраций изотопов ксенона. Создана и проведена опытная эксплуатация технических средств мониторинга.

Реализация результатов работы. Результатом диссертационной работы явилось создание и опытная эксплуатация комплекса ARIX-02. На момент написания работы комплексы ARIX установлены и успешно функционируют на трёх станциях международной системы мониторинга по договору о всеобъемлющем запрещении ядерных испытаний.

Достоверность полученных результатов обусловлена использованием известного и апробированного математического аппарата, достоверных физических закономерностей и опытом эксплуатации аппаратного комплекса ARIX-02 (пробы, отобранные комплексом и помещённые в архивные контейнеры,

неоднократно повторно измерялись в сертифицированных лабораториях Австрии и Германии).

На защиту выносятся:

1. Модель мониторинга и прогнозирования чрезвычайных ситуаций на ядерных энергетических объектах, функционирующая на основе анализа, объёмных активностей изотопов ксенона.

2. Технические средства измерения объёмных активностей изотопов ксенона, предназначенные для задач мониторинга и прогнозирования чрезвычайных ситуаций на ядерных энергетических объектах.

3. Метод комплексного анализа спектров бета-гамма совпадений, применяемый при вычислениях объёмных активностей изотопов ксенона, используемых для задач мониторинга и прогнозирования чрезвычайных ситуаций на ядерных энергетических объектах.

4. Практические рекомендации использования комплекса ARIX-02 для задач мониторинга и прогнозирования чрезвычайных ситуаций на ядерных энергетических объектах.

Апробация работы. Материалы диссертационной работы докладывались автором на 8 конференциях по мониторингу изотопов ксенона в интересах ДВЗЯИ (Фрайбург, Германия, май 2000г, Страсолдо, Италия, август 2004г, Стокгольм, Швеция, ноябрь 2005г, Мельбурн, Австралия, ноябрь 2006г, Лас-Вегас, США, ноябрь 2007г, Санкт-Петербург, октябрь 2008г., Буэнос-Айрес, Аргентина, ноябрь 2010г, Джакарта, Индонезия, декабрь 2011), на конференции «Мониторинг благородных газов для задач безопасности» (МАГАТЭ, Вена, Австрия, сентябрь 2005 г), на конференции «Существующие технологии измерения благородных газов» (Сайберсдорф, Австрия, сентябрь 2006г), 5 и 4 Международном Ядерном форуме (Санкт-Петербург, 2009 – 2010г.).

Личный вклад автора. Автор обосновал целесообразность мониторинга ОА изотопов ксенона для задач прогнозирования ЧС на ЯЭО. Автором предложена модель мониторинга ИК, определён и алгоритмизирован потенциальный уровень ЧС по результатам анализа ОА изотопов ксенона. Автором совместно с творческим коллективом лаборатории «ФГУП НПО им. В.Г. Хлопина» был разработан и создан малогабаритный аппаратный комплекс ARIX-02, предназначенный для определения фоновых концентраций изотопов ксенона в приземном слое атмосферного воздуха. Автором работы были созданы алгоритмы управления технологическими процессами комплекса. Автор принимал активное участие в создании комплексного метода обработки спектров β - γ совпадений. В результате создания данного метода стало возможным определение метастабильных изотопов ксенона, используя для анализа спектры β - γ совпадений. Автор осуществил обработку результатов, полученных в результате опытной эксплуатации комплекса ARIX-02.

Публикации по теме диссертации. По результатам выполненных исследований опубликовано 8 печатных работ, пять из них в изданиях, рекомендованных ВАК.

Структура и объём диссертационной работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы. Работа включает в себя 127 страниц текста, 36 рисунков, 14 таблиц, список литературы из 57 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цели и задачи работы, научная новизна и практическая ценность полученных результатов.

В **первой главе** представлены данные о радиоактивном ксеноне в окружающей среде, как важном информационном ресурсе для проведения мониторинга и прогнозирования ЧС на ЯЭО. В главе дано описание физико-химических свойств ксенона, представлен список всех его существующих изотопов.

Проанализировав периоды полураспада ИК, сделан вывод о возможности производить измерения только 8 из них. Четверо из них не образуются в процессе деления ядерных материалов это: ^{122}Xe , ^{125}Xe , ^{127}Xe и $^{129\text{m}}\text{Xe}$. Таким образом, для задач мониторинга, прогнозирования ЧС на ЯЭО могут использоваться оставшиеся четыре изотопа: $^{131\text{m}}\text{Xe}$, $^{133\text{m}}\text{Xe}$, ^{133}Xe и ^{135}Xe .

Спектрометрические измерения данных изотопов целесообразно производить в режиме β - γ совпадений, так как их суммарный квантовый выход весьма высок, а фоновая составляющая при работе спектрометра в данном режиме в сотни раз меньше, чем измерение β или γ спектров независимо друг от друга. Так как фон спектрометра в основном определяет минимальную детектируемую активность (МДА) и минимальную детектируемую концентрацию (МДК) интересующих изотопов, а это ключевой параметр для систем мониторинга изотопов ксенона, то для комплекса АRIХ-02 был использован спектрометр, работающий по схеме β - γ совпадений.

Основными источниками, определяющими глобальный фон интересующих изотопов ксенона в атмосфере, являются природные процессы, работа атомных электростанций, предприятия по наработке изотопов, исследовательские реакторы. Природные процессы практически не влияют на глобальный ксеноновый фон. Таким образом, основными источниками определяющие глобальный ксеноновый фон являются, атомные электростанции, исследовательские реакторы и предприятия по наработке изотопов. На пример, атомные электростанции и реакторы выбрасывают ежегодно (на момент написания работы):

- $\text{Xe}^{131\text{m}} = 44\ 000$ ГБк;
- $\text{Xe}^{133} = 740\ 000$ ГБк;
- $\text{Xe}^{133\text{m}} = 16\ 000$ ГБк;
- $\text{Xe}^{135} = 514\ 000$ ГБк.

На данный момент средний уровень фоновой объемной активности Xe^{133} в европейской части РФ составляет ≈ 1 мБк/м³ (объемная фоновая активность $\text{Xe}^{131\text{m}}$, $\text{Xe}^{133\text{m}}$, Xe^{135} значительно меньше).

В главе приведен обзор мониторинга ИК, который производился в странах западной Европы и Северной Америке. На рис.1 представлена длительная временная серия измерения объемной активности Xe^{133} в регионе г. Фрайбург и факт более чем тысячекратного превышения фонового значения объемной активности Xe^{133} , зарегистрированного после аварии на Чернобыльской АЭС.

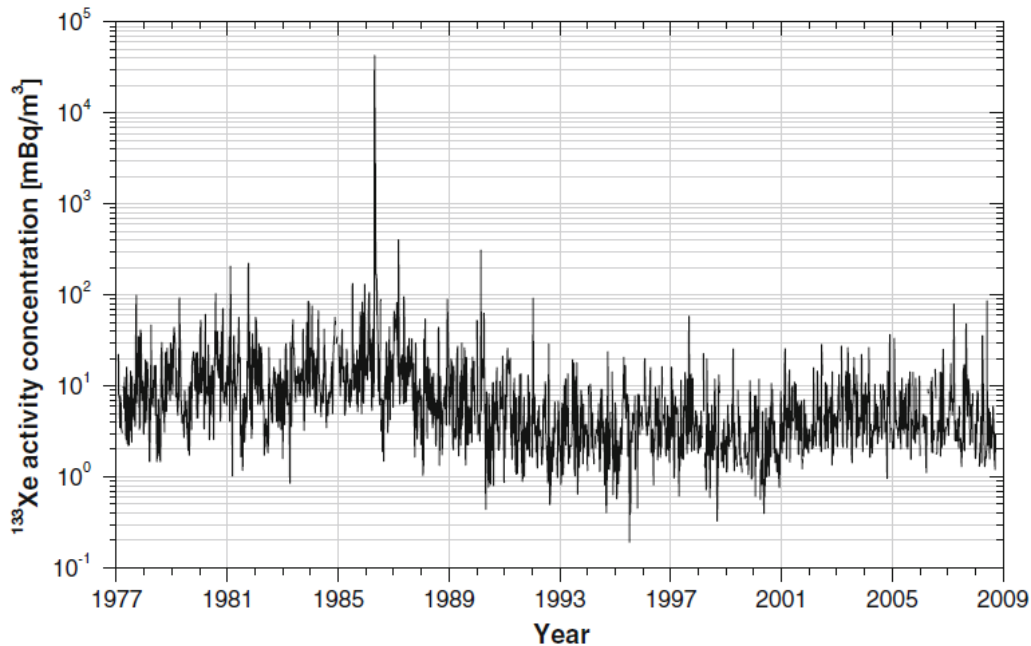


Рис. 1. Результаты измерения ОА Xe^{133} в регионе г. Фрайбург

Во **второй главе** представлены исследования возможностей ксенонового метода для задач проведения мониторинга и прогнозирования чрезвычайных ситуаций на ЯЭО. Предложена система мониторинга и прогнозирования чрезвычайных ситуаций на ядерных энергетических объектах, функционирующая на основе анализа, объёмных активностей изотопов ксенона.

На рисунке 2 представлен график зависимости количества образования ядер от их массы, в результате деления U^{238} при его взаимодействии с тепловыми нейтронами. Глядя на график видно, что его максимумы приходятся на ядра с атомными массами равными 90 и 140 соответственно. В регионе представленных максимумов два благородных газа криптон и ксенон имеет свои изотопы. На основании анализа графиков, представленных на рис. 1 и 3 становится очевидным, что в результате деятельности ЯЭО образуется значительное количество изотопов ксенона, которые являются важным информационным фактором их функционирования.

По соотношению объёмной активности изотопов ксенона ($\text{Xe}^{131\text{m}}$, $\text{Xe}^{133\text{m}}$, Xe^{131} , Xe^{135}) можно диагностировать режимы работы реактора. На графике (рис.3) показан годовой цикл образования изотопов ксенона в реакторе типа ВВЭР (топливо 3.2% обогащённый U^{235}). При нормальной работе, запущенного реактора соотношение изотопов соответствует точке равновесия (метка 2, графика, рис.3). Если отношение находится справа от линии раздела, то это может свидетельствовать о неконтролируемой цепной реакции. На представленном рисунке видно, что в данном домене реактор находится только во время запуска со свежим топливом (участок кривой 1. рис. 3.). Если измеренная ОА Xe^{133} и одного из метастабильных изотопов больше МДК то для оценки состояния ЯЭО можно использовать МДК необнаруженных изотопов.

К сожалению, прямой метод измерения ксенона на данный момент на ЯЭО РФ не применяется. Оценка выбросов ксенона производится косвенным путём при помощи соотнесения расчётных данных с измеренной мощностью дозы. Измеряя

объёмные активности изотопов ксенона в системе вентиляции реакторного зала, можно также точно определять уровень выбросов I^{131} , I^{133} , а также аэрозольные выбросы изотопов стронция - St^{89} , St^{90} , Cs^{134} и Cs^{137} , которые являются продуктами распада газообразных нуклидов и являются основным фактором, влияющим на радиационную обстановку вблизи АЭС.

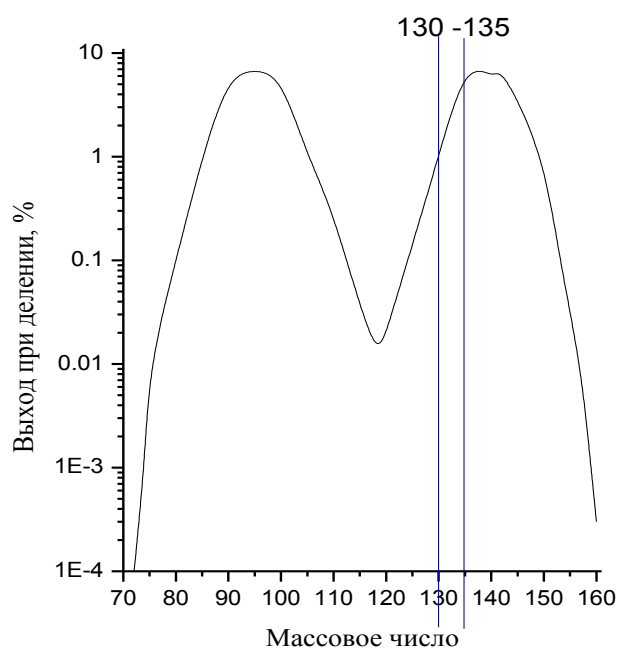


Рис. 2. Зависимость образования ядер от их массы (тепловое деление U^{235})

Данные, полученные со станций международной системы мониторинга (МСМ) ДВЗЯИ демонстрируют практическую возможность определения текущего состояния ЯЭО по анализу объёмной активности изотопов ксенона на и удалении от ЯЭО. Таким образом, измеряя изотопы ксенона в и на значительном удалении от ЯЭО можно решать следующие задачи:

Производить проверку текущего состояние реактора (подтверждение его точки равновесия или определение текущего технологического процесса);

По величине объёмной активности изотопов ксенона определять радиационное состояние активной зоны реактора (наличие трещин в твелах, герметичности контура охлаждения и т.д.);

При аварии на ЯЭО, определять радиационную обстановку вблизи и на удалении от ЯЭО;

Регистрация значительного превышения хотя бы одного изотопа ксенона с большой вероятностью свидетельствует об аварии на ЯЭО;

Факт, обнаружения превышения объёмной активности изотопов ксенона, при известной априорной информации об аварии на ЯЭО, является индикатором прихода радиоактивных аэрозолей и возможного радиационного загрязнения местности.

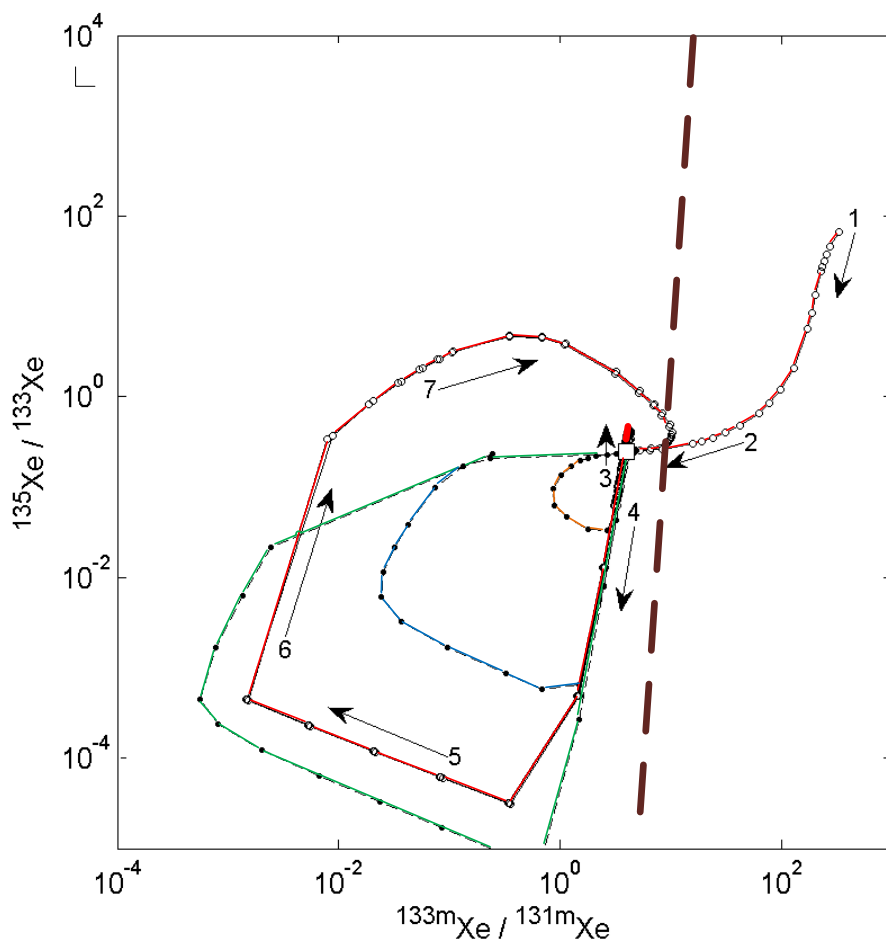


Рис. 3. Годовой цикл образования изотопов ксенона в реакторе типа ВВЭР

Как было отмечено ранее, наиболее целесообразно проводить мониторинг ксенона непосредственно на ЯЭО. При отборе пробы из системы вентиляции практически всегда можно определить объёмные концентрации всех интересующих изотопов ксенона в виду их высокой концентрации. Недостатками данного решения является возможное искажение реальной информации из-за отраслевых интересов и потребность в большом количестве установок, так как на каждом объекте должна быть установлена своя система мониторинга.

Мониторинг ксенона на удалении от ЯЭО предъявляет более высокие требования к техническим параметрам ксенонового оборудования, но позволяет контролировать состояние нескольких ЯЭО. При установке оборудования за пределами ЯЭО так же необходимо проводить непрерывный мониторинг метеоусловий с высоким шагом разрешения. На данный момент созданы и опробованы на практике модели переноса воздушных масс, позволяющие с большой вероятностью определять предполагаемые координаты точки инъекции ксенона. Дополнительно данный подход позволяет контролировать объекты за пределами РФ а также в некоторых случаях производить контроль за несанкционированной деятельностью других стран тем самым расширяя текущую сеть мониторинга в интересах ДВЗЯИ. Так, например, установка станции мониторинга в Санкт-Петербурге позволит производить мониторинг 3 Российских и 2 иностранных АЭС (рис. 4) а также исследовательского реактора в г. Гатчине.



Рис. 4. Пример, расположения станции мониторинга

В случае измерения комплексом, установленным вне ЯЭО, значительного превышения объёмной активности изотопов ксенона желательно произвести повторные измерения как можно ближе или на самом предполагаемом объекте выброса благородных газов. Для выполнения этой задачи желательно иметь мобильное оборудование отбора и измерения проб. Автор данной работы принимал активное участие в создании и тестировании подобного оборудования в интересах ДВЗЯИ (комплекс ARIX-3F) для задач инспекции на местах. Данный комплекс должен иметь компактные габариты и схожие со стационарным оборудованием технические характеристики, такие как МДК, степень очистки от радона и т.д..

Хочется отметить, что для построения глобальной сети мониторинга изотопов ксенона в РФ необходимо комбинировать различные типы установки и использовать мобильные и стационарные комплексы. При построении глобальной сети мониторинга изотопов ксенона целесообразно учитывать следующие рекомендации:

1. Предпочтительно оснастить стационарным ксеноновым оборудованием все предприятия первой степени радиационной опасности при аварийных ситуациях, принятую МАГАТЭ. Фактически к предприятиям первой категории планирования относятся все атомные электростанции и предприятия, связанные с переработкой облучённого ядерного топлива или располагающие промышленными реакторами. При развёртывании сети мониторинга предпочтение в установке имеют ЯЭО с длительным сроком эксплуатации. Целесообразно интегрировать АК для измерения ИК в существующую сеть АСКРО (на основе единого подхода и информационной совместимости).

2. Стационарные комплексы мониторинга ИК расположенные на удалении от ЯЭО рекомендуется устанавливать с учётом возможности производить мониторинг как минимум нескольких ЯЭО первой категории. Целесообразно производить установки данных АК на базе станций Росгидромета.

3. МЧС каждого федерального округа, при наличии в нем ЯЭО, желательно оснастить мобильным оборудованием для мониторинга изотопов ксенона.

4. Все данные получаемые АК измерения ИК должны передаваться для дальнейшей обработки и прогнозирования возможности ЧС в центр МЧС «Антистихия».

Структурная схема размещения АК для задач мониторинга ЯЭО представлена на рис 5.

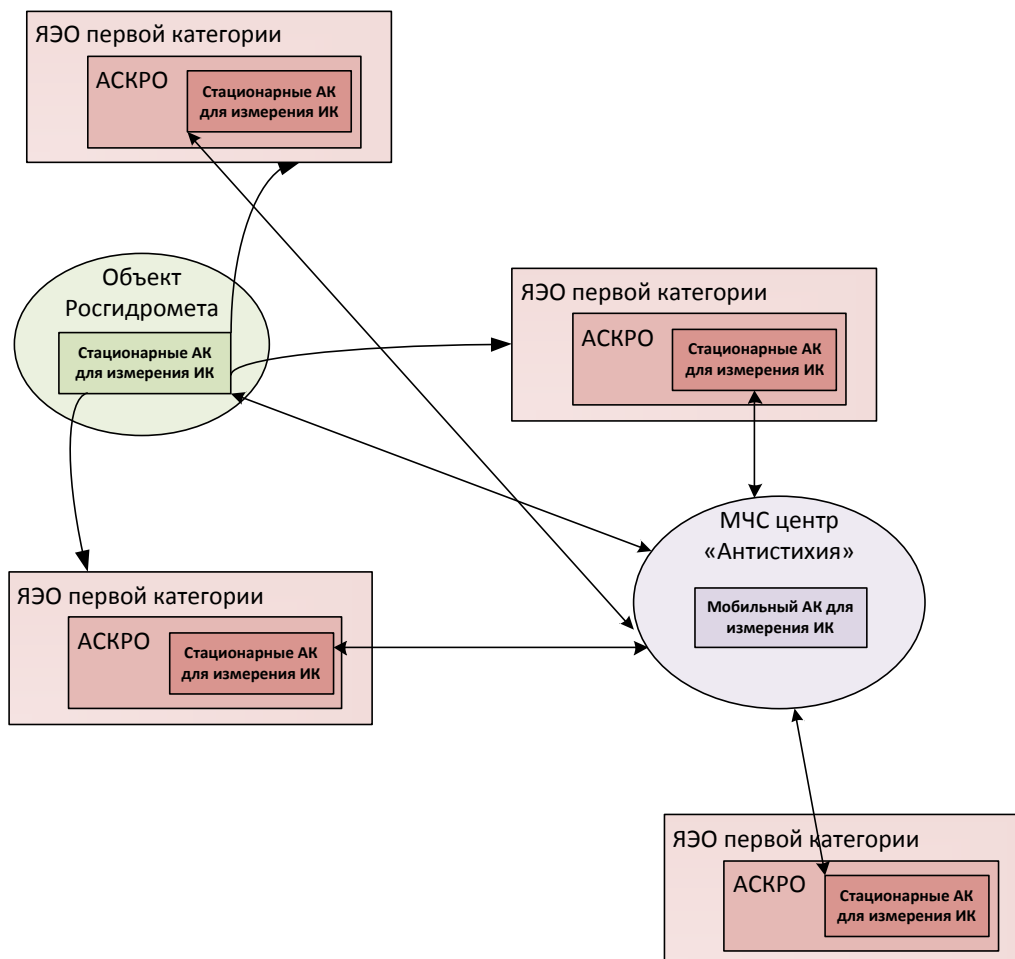


Рис. 5. Структурная схема сети мониторинга.

На рис. 6 представлен алгоритм определения ЧС для оборудования, установленного на удалении от ЯЭО. Хотелось отметить, что для оценки текущего состояния ЯЭО, радиационной обстановки вблизи него и возможного радиационного загрязнения местности, по измеренной ОА изотопов ксенона, для каждого типа ядерного объекта должна быть разработана своя модель прогнозирования.

При регистрации объёмной активности, значительно превышающей фоновые значения для каждого объекта выбросов нужно определять коэффициент объекта ($K_{об}$). Данный коэффициент является функцией расстояния от станции мониторинга до предполагаемого объекта выбросов и динамикой воздушных масс. То есть для определения пороговых характеристик в соответствии с предложенным алгоритмом необходимо иметь хорошее метеорологическое обеспечение для успешного проведения мониторинга.

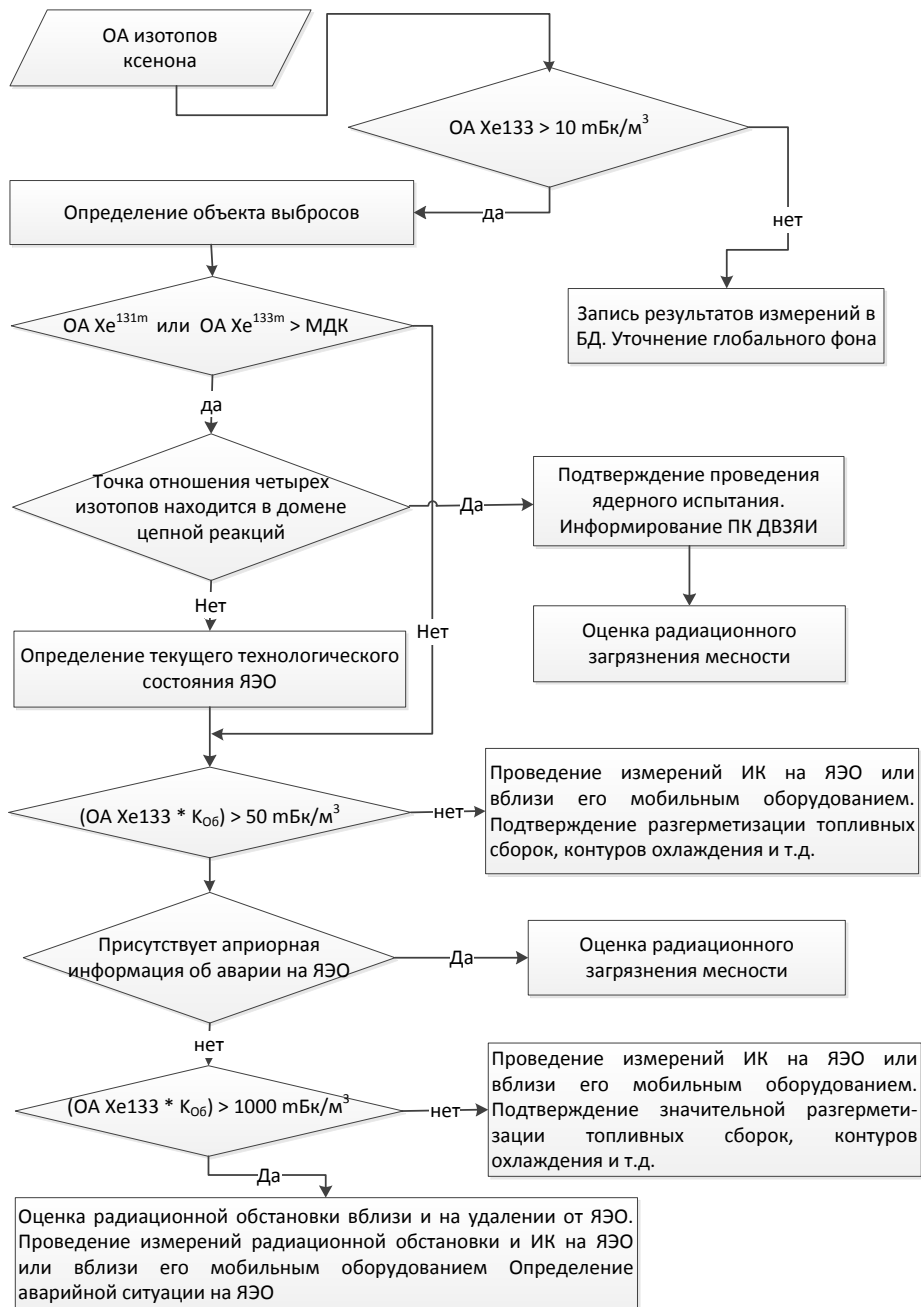


Рис. 6. Алгоритм прогнозирования ЧС

В **третьей** главе представлены технические средства измерения объёмных активностей изотопов ксенона, предназначенные для задач мониторинга и прогнозирования ЧС на ядерных энергетических объектах. В главе приведена детальная информация об устройстве комплекса ARIX-02, взаимодействии его узлов и блоков, принципы работы и организация управления технологическими процессами.

В главе рассмотрены комплексы производства США (ARSA), Швеции (SAUNA), Франции (SPALAX) и России (ARIX-02), способные осуществлять мониторинг ксенона и прогнозировать ЧС на удалении от ЯЭО. Проанализированы принципы работы каждого из указанных комплексов, представлены их технические характеристики.

Анализатор радиоактивных изотопов ксенона, комплекс ARIX-02, предназначен для автоматического измерения объёмной активности

(концентрации) радиоизотопов ^{131m}Xe , ^{133m}Xe , ^{133}Xe , ^{135}Xe в атмосферном воздухе. Данный комплекс был создан в ФГУП «НПО РИ им. В.Г. Хлопина». Автор данной работы принимал активное участие в разработке, изготовлении комплекса и его опытной эксплуатации. Внешний вид комплекса и его структурная схема представлены на рис.7. Основные характеристики комплекса представлены в таблице 3.

Измерение ксенона является весьма сложной технической задачей в связи с тем, что его концентрация в атмосферном воздухе весьма незначительна и составляет 0,0087%. Необходимо отметить, что другой значительной проблемой является очистка от мешающих примесей. Например, спектрометрический препарат должен быть очищен от Rn более чем в 10^7 раз. Причина кроется в том, что Rn имеет близкие энергии β и γ распада и фоновая активность его на порядки больше активности изотопов ксенона.

Отбор атмосферного воздуха осуществляется системой пробоотбора, в которой получается концентрат ксенона на базе низкотемпературной сорбции. Переработка концентрата ведётся в Устройстве переработки пробы, основанном на термической десорбции концентрата ксенона с угля адсорбера и последующем переносе его потоком газа-носителя в систему ловушек с углём. В результате получается препарат ксенона, пригодный для спектрометрических измерений радиоизотопов ксенона ^{131m}Xe , ^{133m}Xe , ^{133}Xe и ^{135}Xe в системе детектирования.

Таблица 3 Основные технические характеристики комплекса ARIX-02

Технические характеристики	Параметры
Производительность по отбору воздуха	2.0 м ³ /ч
Стандартный режим пробоотбора	непрерывный
Параметры режима пробоотбора для одного канала: - время пробоотбора; - суммарный объем отобранного воздуха.	12 ч 20м ³
Время переработки одной пробы атмосферного воздуха для получения спектрометрического и хроматогра-фического препарата ксенона	4 ч
Время измерения препарата ксенона в спектрометре	18 ч
Время до доклада	34 ч
Частота доклада	дважды в день
Методы измерения - концентрации ксенона - активности ^{131m}Xe , ^{133m}Xe , ^{133}Xe , ^{135}Xe	газовая хроматография сцинтилляционный, γ - спектрометр β - γ -совпадений
Минимальная детектируемая концентрация (МДК) при стандартном режиме пробоотбора и измерения при доверительном уровне $P=0.95/P=0.68$: - для ^{131m}Xe - для ^{133m}Xe - для ^{133}Xe - для ^{135}Xe	0.3/0.1 мБк/м ³ 0.4/0.1 мБк/м ³ 0.2/0.1 мБк/м ³ 0.9/0.3 мБк/м ³
Средняя мощность, потребляемая от трехфазной сети 380±38 В, 50±2.5 Гц и однофазной сети 220±22В, 50±2.5 Гц	6.2 кВА

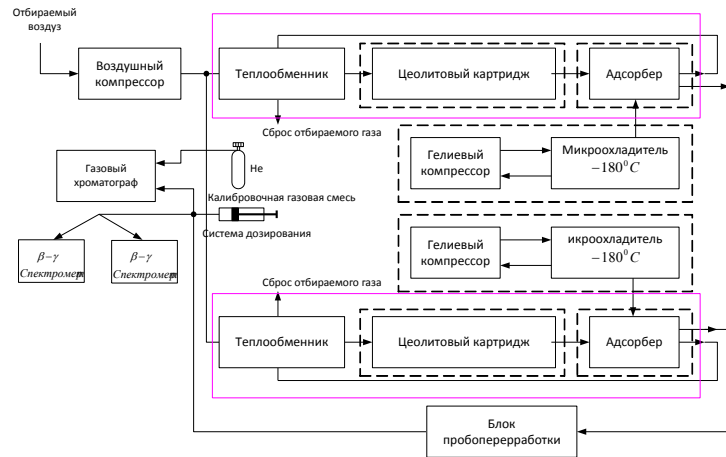


Рис. 7. Внешний вид комплекса ARIX-02 и его структурная схема

Полученный препарат частично используется ($\approx 10\%$) для определения концентрации ксенона в Газовом анализаторе, основанном на хроматографическом разделении газовой смеси во время её движения вдоль слоя сорбента в потоке газ-носителя с последующим анализом разделённых компонентов в детекторе по теплопроводности.

В результате гамма-спектрометрических измерений по схеме β - γ -совпадений в Системе детектирования определяется активность ^{131m}Xe , ^{133m}Xe , ^{133}Xe , ^{135}Xe в анализируемой пробе. После отнесения этих активностей к объёму отобранного воздуха определяются концентрации заданных радиоактивных изотопов ксенона в атмосферном воздухе.

Система автоматики обеспечивает автоматическую работу комплекса ARIX-02, производит запись спектрометрической и телеметрической информации и её отправку в центр обработки данных.

В главе подробно рассмотрено функционирование и устройство всех составных частей комплекса ARIX-02, описаны технические решения, осуществлённые автором для функционирования комплекса в автоматическом режиме. Приведена принципиальная схема управления комплексом.

Одним из главных требований к комплексу ARIX-02 является непрерывность отбора пробы и её одинаковая продолжительность на каждой ветке системы. Данный критерий определяет организацию взаимодействия между технологическими процессами комплекса. Каждый процесс пробоотбора запускает аналогичный процесс на противоположной стороне комплекса. Временная диаграмма работы комплекса представлена на рис. 8. На временной диаграмме показаны основные технологические процессы комплекса. Всего полный функционал системы осуществляется при помощи 42 технологических процессов и реализуется 42 программными утилитами соответственно.

Процесс записи спектрометрической информации каждые два часа сохраняет предварительные спектры и осуществляет их передачу в центр обработки данных. После окончания спектрометрических измерений оператор комплекса, используя специальное программное обеспечение, производит расчёт

объёмной активности изотопов ксенона и производит отправку полученных данных в центр обработки.

Во время создания данного комплекса автор данной работы производил оптимизацию параметров технологических процессов с целью:

- стабильности работы комплекса и отсутствия сбоев в его работе;
- увеличения коэффициента извлечения стабильного ксенона;
- снижения количества потребления расходных материалов, необходимых для работы комплекса;
- сокращение продолжительности процессов регенерации сорбционных элементов, при условии сохранения качества её проведения. В результате опытной эксплуатации модифицировались процессы регенерации цеолитовых картриджей, угля на адсорберах и ловушках системы обогащения пробы.

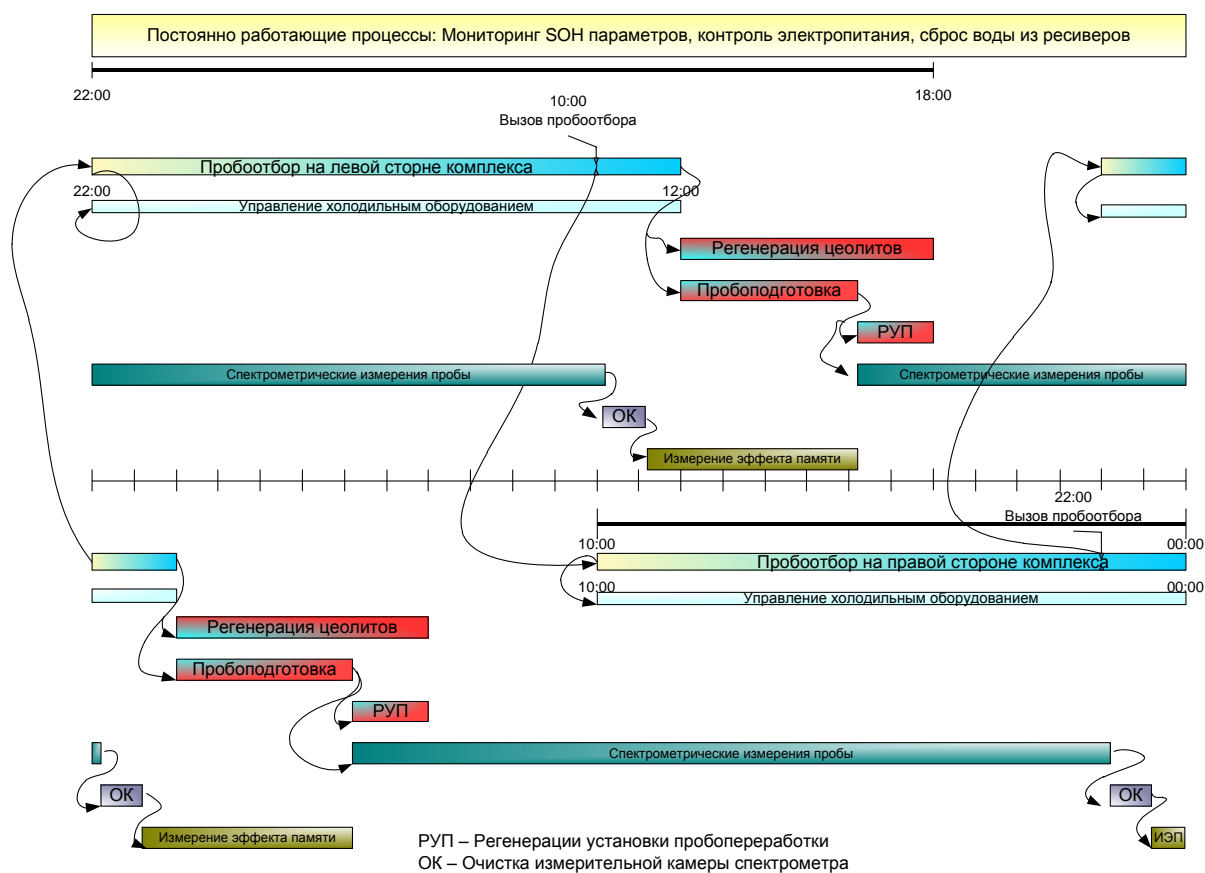


Рис. 8. Временная диаграмма работы комплекса

В результате данной оптимизации удалось достичь высокий коэффициент извлечения стабильного ксенона для каждой из ветвей комплекса. Данный коэффициент находится в диапазоне 92 -97%. Доля ошибок в программном обеспечении комплекса, зарегистрированным по результатам его опытной эксплуатации не превышает 4%. Время безотказной работы комплекса во время опытной тестовой эксплуатации комплекса превысило 95%.

Специальное программное обеспечение было разработано автором для осуществления мониторинга состояния комплекса. Программная утилита мониторинга каждые десять минут осуществляет запись значений входных сигналов со всех датчиков комплекса (датчиков температуры, давления, расхода и положения) и управляющих сигналов на его цифровых выходах (состояние

клапанов, нагревателей и т.д.). Для цифровых выходов также записывается источник воздействия на них (ПО или оператор комплекса). Каждые два часа файл с телеметрической информацией записывается на жёсткий диск компьютера и одновременно передаётся в центр обработки данных. Если какой либо из параметров комплекса находится вне допустимого диапазона то ПО создаёт и отправляет тревожное сообщение в центр обработки данных.

В четвертой главе представлен метод комплексного анализа спектров бета-гамма совпадений, применяемый при вычислениях объёмных активностей изотопов ксенона, используемых для задач мониторинга и прогнозирования ЧС на ядерных энергетических объектах.

Так как измерения ОА проводимые комплексом ARIX-02 происходят на уровне близко к фоновому то очень важным для расчёта ОА ИК является понятие минимально детектируемой активности.

Оценка минимально детектируемой активности и концентрации основана на оценке предела детектирования (L_D) и критического уровня детектирования (L_C). L_D - это уровень сигнала, при котором можно ожидать, что он приведет к детектированию, т.е. он рассматривается как минимальный уровень, на котором сигнал может быть надежно оценен количественно.

$$L_D = f(L_C)$$

L_C - это критический уровень сигнала, на котором сигнал не может быть надежно оценен количественно. Оба параметра, L_D и L_C , могут быть рассчитаны для нуклидов, не найденных в спектре, так же как и для нуклидов, которые найдены.

$$L_D = L_C + k_\beta \cdot \sigma_D$$

где $L_C = k_\alpha \cdot \sigma_0$,

k_α и k_β - квантили Нормального распределения,

σ_D - стандартное отклонение сигнала, когда его истинное значение равно L_D ,

σ_0 - стандартное отклонение наблюдаемого сигнала.

Приемлемые вероятности для ошибок первого и второго рода (т.е. ошибочного детектирования и пропуска фотопика) полагаются равными, $\alpha = \beta$. При $\alpha = \beta$ $k_\alpha = k_\beta = k$.

Для доверительного уровня 0.95 $\alpha = \beta = 0.05$ и $k = 1.645$.

Наблюдаемый сигнал S_Σ включает счет от анализируемого нуклида S , счет от интерферирующего нуклида S_I и счет от фона S_B :

$$S_\Sigma = S + S_I + S_B,$$

из чего следует

$$S = S_\Sigma - S_I - S_B$$

$$\text{и } \sigma_S^2 = \sigma_\Sigma^2 + \sigma_I^2 + \sigma_B^2$$

Поскольку сигнал S_Σ можно рассматривать случайной величиной, распределённой по Пуассону, σ_Σ^2 может быть аппроксимирована "истинным средним значением" (математическим ожиданием) m_Σ . Поэтому

$$\sigma_S^2 = m_\Sigma + \sigma_I^2 + \sigma_B^2 = m_S + m_I + m_B + \sigma_I^2 + \sigma_B^2$$

Если $m_S = 0$, то дисперсия наблюдаемого сигнала равна

$$\sigma_0^2 = m_I + m_B + \sigma_I^2 + \sigma_B^2$$

Если $m_S = L_D$, то дисперсия истинного сигнала равна

$$\sigma_D^2 = L_D + m_I + m_B + \sigma_I^2 + \sigma_B^2$$

Преобразуя выше приведенные уравнения в выражения для L_D и L_C , получаем:

$$L_D = L_C + k \cdot \sigma_D = L_C + k \sqrt{L_D + m_1 + m_B + \sigma_1^2 + \sigma_B^2}$$

$$L_C = k \cdot \sigma_D = k \sqrt{m_1 + m_B + \sigma_1^2 + \sigma_B^2}$$

Из совместного их решения для L_D получаем:

$$L_D = k^2 + 2 L_C.$$

Метод определения ОА ИК основан на определении превышения счета, в характерном для каждого радионуклида энергетическом диапазоне, его предела детектирования. Если такое превышение регистрируется, то принимается решение о присутствии радионуклида в пробе и осуществляется расчёт его ОА.

Энергетический диапазон 250 кэВ является характеристическим для Xe^{135} , 80 кэВ – для Xe^{133} . Более трудным для анализа является энергетический диапазон 30 кэВ, в него делают вклад три изотопа Xe^{133} , Xe^{131m} и Xe^{133m} . Вклад Xe^{133} определяется по его счёту в энергетическом диапазоне 80 кэВ. Два оставшихся метастабильных изотопа различаются благодаря различным периодам полураспада.

Для расчёта числа отсчётов метастабильных изотопов выполняются ниже перечисленные процедуры

(а) Рассчитываются значения фона в области 30 кэВ для частичных спектров, т.е.

$$S_{B30} (2h), S_{B30} (4h), \dots S_{B30} (16h)$$

(б) Рассчитываются интенсивности отсчетов от ^{133}Xe на момент начала измерения в области 80 кэВ соответственно $I_o^{133} = S_{80}^{133} \cdot \lambda_{133} / (1 - e^{-\lambda_{133} t_s})$,

где - λ_{135} , λ_{133} – постоянные распада нуклидов ^{135}Xe и ^{133}Xe ,
- $t_s = 18$ ч.

(в) Составляется матричное уравнение

$$\begin{pmatrix} F_{11} & F_{13} \\ F_{21} & F_{23} \\ F_{31} & F_{33} \\ F_{41} & F_{43} \\ F_{51} & F_{53} \\ F_{61} & F_{63} \\ F_{71} & F_{73} \\ F_{81} & F_{83} \\ F_{91} & F_{93} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} I_1 \\ I_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \\ S_5 \\ S_6 \\ S_7 \\ S_8 \\ S_9 \end{pmatrix},$$

или в сокращённом виде $\bar{F} \cdot \bar{I} = \bar{S}$,

где

$$I_1 \equiv I_0^{131m},$$

$$I_2 \equiv I_0^{133m},$$

$$F_{11} \equiv F(\lambda_{131m}, 2h) = (1 - e^{-\lambda_{131m} \cdot 2h}) / \lambda_{131m},$$

$$F_{91} \equiv F(\lambda_{131m}, 18h) = (1 - e^{-\lambda_{131m} \cdot 18h}) / \lambda_{131m},$$

$$F_{13} \equiv F(\lambda_{133m}, 2h) = (1 - e^{-\lambda_{133m} \cdot 2h}) / \lambda_{133m},$$

$$F_{93} \equiv F(\lambda_{133m}, 18h) = (1 - e^{-\lambda_{133m} \cdot 18h}) / \lambda_{133m},$$

$$S_1 \equiv S_{30}^{13lm\&133m}(2h) = S_{30}^{\Sigma}(2h) - S_{B30}(2h) - K_0 \cdot S_{80}^{133}(2h) =$$

$$= S_{30}^{\Sigma}(2h) - S_{B30}(2h) - K_0 I_0^{133} \cdot \frac{1 - e^{-\lambda_{133} \cdot 2h}}{\lambda_{133}} \quad ..$$

$$S_9 \equiv S_{30}^{13lm\&133m}(18h) \equiv S_{30}^{13lm\&133m}.$$

Решая матричное уравнение методом наименьших квадратов определяются интенсивности для каждого метастабильного изотопа. Если они положительны и больше порога детектирования то производится расчет их ОА.

Расчёт погрешностей, учёт эффекта памяти от предыдущего измерения, а также проверка присутствия радона в спектре в автореферате не приводится.

В **пятой главе** представлены результаты исследования и практические рекомендации использования комплекса ARIX-02 для задач мониторинга и прогнозирования чрезвычайных ситуаций на ядерных энергетических объектах.

Приведены результаты ОА ИК в регионе Санкт-Петербурга и Буэнос-Айреса. Для расчёта объёмной активности использовалось программное обеспечение (ПО), разработанное автором в соответствии с алгоритмом, представленным в главе 4. Данное ПО также установлено на станции мониторинга. Представленные данные содержат более 2000 значений концентраций изотопов ксенона.

В регионе Санкт-Петербурга (по результатам месячного теста) в 17 пробах из 63 циклов был зафиксирован ^{135}Xe . Значительных превышений ОА не было зафиксировано.

В регионе Буэнос-Айреса представленные данные наглядно демонстрируют, значительные превышения объёмных концентраций изотопов ксенона. В среднем раз в два месяца были зарегистрированы тысячекратные превышения объёмной активности Xe^{133} и Xe^{135} . Значительные превышения изотопов ксенона регистрировались еженедельно. Источником радиоактивных выбросов является исследовательский реактор RA-3, расположенный в 30 км от станции мониторинга. Данный реактор был создан в Аргентине и относится к легководяному типу с топливом на низкообогащённом уране. Мощность реактора составляет 4,5 МВт. Основное предназначение реактора является производство изотопов. На рис.9 представлены значительные превышения объёмной активности Xe^{133} в регионе Буэнос Айреса.

В ближайшее время планируется увеличить мощность реактора до 10МВт, установить дополнительные фильтровальные установки в системе вентиляции, а также производить мониторинг ксенона в непосредственной близости от реактора.

По результатам опытной эксплуатации комплекса ARIX-02 фон Xe^{133} в регионе Буэнос-Айреса составил 0,6 мБк/м³.

На рис 10. представлены данные, где мы имели возможность использовать метод четырёх изотопов. Все точки, представленные на графике, находятся левее линии раздела и принадлежат домену ядерного реактора.

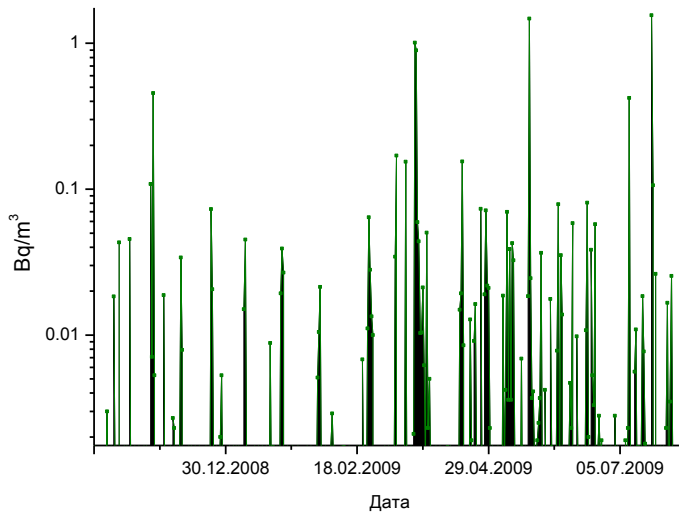


Рис.9. Объемная активность Xe^{133} , измеренная комплексом ARIX-02, в период его опытной эксплуатации станция MCM - RN01, Буэнос - Айрес, Аргентина

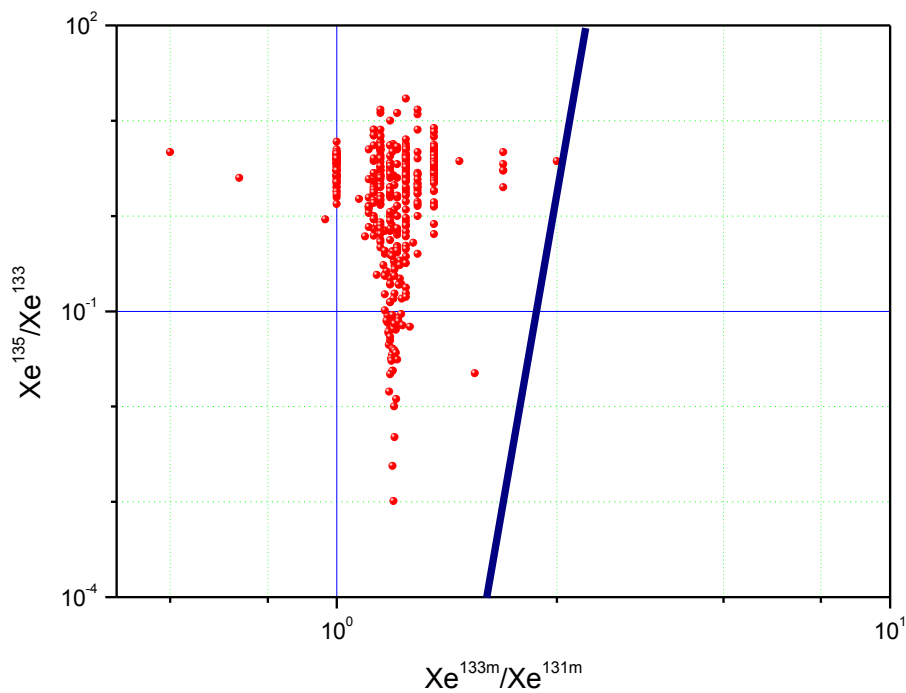


Рис.10. Данные по соотношениям объемных активностей четырех изотопов ксенона (по данным измеренным комплексом ARIX-02 на станции RN01, Буэнос-Айрес, Аргентина)

Высокий антропогенный фон объёмной активности изотопов ксенона в районе станции MCM RN01 делает неэффективным размещение на ней ксенонового оборудования для задач ДВЗЯИ. В то же время, полученные данные, подтверждают способность комплекса ARIX-02 производить мониторинг аварийных состояний на ЯЭО и целесообразность его использования для этих задач. Хочется отметить, что для каждого типа ядерного объекта необходима своя

модель определения его текущего состояния по результатам мониторинга изотопов ксенона.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

По результатам данной работы соискателем были выполнены следующие научно-технические задачи:

1) Обоснована целесообразность и высокая эффективность проведения мониторинга и прогнозирования чрезвычайных ситуаций на ядерных энергетических объектах, функционирующая на основе анализа, объёмных активностей изотопов ксенона.

2) Впервые в РФ предложена модель мониторинга изотопов ксенона, определён и алгоритмизирован потенциальный уровень прогнозирования чрезвычайных ситуаций по результатам анализа объёмных активностей изотопов ксенона.

3) Определены и обоснованы требования и технические характеристики, предъявляемые к оборудованию, предназначенному для задач мониторинга изотопов ксенона с целью определения аварийных и предаварийных ситуаций на ядерных энергетических объектах.

4) Соискателем совместно с творческим коллективом лаборатории «ФГУП НПО им. В.Г. Хлопина» был разработан и создан малогабаритный аппаратный комплекс ARIX-02, предназначенный для определения фоновых концентраций изотопов ксенона в приземном слое атмосферного воздуха. Автором работы были созданы алгоритмы управления технологическими процессами комплекса. Данные алгоритмы были оптимизированы и программно реализованы соискателем.

5) Разработан метод комплексной обработки спектров β - γ совпадений. В результате его создания стало возможным определение метастабильных изотопов ксенона, используя для анализа спектры β - γ совпадений. На основе данного алгоритма соискателем было создано программное обеспечение.

6) По результатам опытной эксплуатации комплекса ARIX-02 был получен большой массив данных, подтвердивший его технические характеристики и целесообразность его применения для задач мониторинга и прогнозирования чрезвычайных ситуаций на ядерных энергетических объектах.

Полученные в диссертационной работе результаты отвечают требованиям новизны, теоретической и практической значимости. В работе обоснована необходимость мониторинга и модель его реализации, для задач прогнозирования чрезвычайных ситуаций на ядерных энергетических объектах, с помощью анализа объёмных активностей изотопов ксенона. Созданные средства мониторинга - аппаратный комплекс ARIX-02 и результаты его опытной эксплуатации показали целесообразность его использования для задач мониторинга и прогнозирования чрезвычайных ситуаций на ядерных энергетических объектах.

Основным направлениями дальнейших исследований следует считать разработку научно-методического аппарата обеспечения мониторинга изотопов ксенона и совершенствованию технических средств его проведения.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Попов, В.Ю. Мониторинг изотопов ксенона для задач определения аварийных и предаварийных состояний на ядерных энергетических объектах / В.Ю. Попов, М.Е. Федосовский, А.Ю. Туманов// Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2012. № 1 (142). С. 235-244. – 0,38 п.л. (в т.ч. автора (0.25 п.л.).
2. Попов, В. Ю. ^{133}Xe в приземном слое воздуха Санкт-Петербурга /Ю.С. Попов, Ю. В. Дубасов, В.Ю. Попов, Н.М. Казаринов, В.В. Мишурицкий, Н.В. Скирда// Радиохимия, 2005, т. 47, N 5, С. 472-475
3. Попов, В. Ю. Измерение низких активностей ксенона осколочного происхождения методом β - γ совпадений / Ю.С. Попов, Н.М. Казаринов, В.Ю. Попов, Ю.М. Рыков, Н.В. Скирда// Приборы и техника эксперимента, 2005, № 2, С. 1-7.
4. Попов, В. Ю. Автоматическая установка АРИКС-01 для измерения концентраций радиоактивных изотопов ксенона в атмосферном воздухе / Ю. В. Дубасов, Ю.С. Попов, В.В. Преловский, А.Ю. Донец, Н.М. Казаринов, В.В. Мишурицкий, В.Ю.Попов, Ю.М. Рыков, Н.В. Скирда// Приборы и техника эксперимента, 2005, № 3, С. 108-104.
5. Попов, В. Ю. Мобильная полуавтоматическая установка АРИКС-03П для измерения низких концентраций радиоактивных изотопов ксенона в воздухе и почвенном газе /В.В. Преловский, Н.М. Казаринов, А.Ю. Донец, В.Ю. Попов, И.Ю. Попов, Н.В. Скирда // Приборы и техника эксперимента, 2007, № 3, С. 117-121.
6. Попов, В.Ю. Environmental Radioxenon Levels in Europe: a comprehensive overview /Paul R.J. Saey, Clemens Schlosser, Pascal Achim, Matthias Auer, Anders Axelsson, Andreas Becker, Xavier Blanchard, Guy Brachet, Luis Cella, Lars-Erik De Geer, Martin B. Kalinowski, Gilbert Le Petit, Jenny Peterson, Vladimir Popov, Yury Popov, Anders Ringbom, Hartmut Sartorius, Thomas Taffary, and Matthias Zahringer// Pure and Applied Geophysics, 2010, Basel, Switzerland, DOI 10.1007/s00024-009-0034-z
7. Попов, В.Ю. Получение источников $^{133,131\text{m}}\text{Xe}$ для калибровки оборудования по измерению благородных газов в задачах инспекции на месте/Попов В.Ю., Казаринов Н.М., Преловский В.В. // Вестник НЯЦ РК, выпуск 2(18), июнь 2004г., С. 131 -133.
8. Попов, В.Ю. Обработка результатов спектрометрических измерений радиоизотопов ксенона по схеме β - γ совпадений в комплексе АРИХ-3Ф при решении задач инспекции на месте. / Попов В.Ю., Рыков Ю.М., // Вестник НЯЦ РК, выпуск 2(18), июнь 2004г., С. 128 -130.
9. Заявка на изобретение "Спектрометр для обнаружения радионуклидов ксенона", номер заявки 2011149375.