

На правах рукописи



**Майзик Алексей Борисович**

**Исследование проблем обеспечения радиационной безопасности  
персонала, населения и защиты окружающей среды при выводе из  
эксплуатации аварийных зданий и сооружений**

05.26.02 Безопасность в чрезвычайных ситуациях  
(ядерный топливно-энергетический комплекс)

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Москва 2022

Работа выполнена на базе Федерального государственного бюджетного учреждения «Государственный научный центр Российской Федерации – Федеральный медицинский биофизический центр им. А.И. Бурназяна»

**Научный руководитель:** Коренков Игорь Петрович - доктор биологических наук, кандидат технических наук, профессор, Лауреат Премии Правительства РФ, главный научный сотрудник лаборатории радиационной коммунальной гигиены Федерального государственного бюджетного учреждения «Государственный научный центр Российской Федерации – Федеральный медицинский биофизический центр им. А.И. Бурназяна»

**Оппоненты:**

Волков Виктор Глебович - доктор технических наук, заместитель начальника отдела по перспективному развитию вывода из эксплуатации Филиал АО «Концерн Росэнергоатом» «Опытно-демонстрационный инженерный центр»;

Самойлов Андрей Анатольевич - кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории комплексной оценки состояний радиационно опасных объектов Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт проблем безопасного развития атомной энергетики Российской академии наук».

**Ведущая организация:**

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина (ФГАОУ ВО «УрФУ имени первого Президента России Б. Н. Ельцина»)

Защита диссертации состоится « 14 » апреля 2022 года в 11 часов 00 минут на заседании Диссертационного совета Д 462.001.02 по адресу: 123182, Москва, ул. Живописная, д. 46, строение 8, Тел. +7(495)190-96-98

С диссертацией и авторефератом можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного учреждения «Государственный научный центр Российской Федерации – Федеральный медицинский биофизический центр им. А.И. Бурназяна» Федерального медико-биологического агентства России

Автореферат разослан « 14 » февраля 2022 г.

Ученый секретарь

Диссертационного совета Д 462.001.02,  
кандидат технических наук

А.А. Молоканов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы определяется необходимостью исследования актуальных проблем защиты персонала, населения и окружающей среды при выводе из эксплуатации радиационно опасных объектов (т.н. «ядерное наследие»). Эта большая проблема включает в себя рекультивацию загрязнённых техногенными радионуклидами земельных участков территорий промплощадок, санитарно-защитных зон и зон наблюдения, реабилитацию территорий, обращение с радиоактивными отходами, подлежащими изоляции, разработку и испытание различных технологий дезактивации (очистки загрязнённых грунтов и металлоконструкций).

Вывод из эксплуатации радиационно опасных объектов (ВЭ РОО) – процесс осуществления комплекса мероприятий, обеспечивающих безопасность персонала, населения и защиту окружающей среды. В настоящее время в России и во всем мире отмечаются большие трудности, связанные с принятием решений при выводе из эксплуатации заводов по переработке ядерного топлива, пунктов хранения радиоактивных отходов, атомных исследовательских центров и других объектов. Более 1500 предприятий ядерного комплекса, хранилищ радиоактивных отходов и предприятий, работающих с радиоактивными веществами, будут выводиться из эксплуатации, их производственные помещения дезактивироваться, а территории реабилитироваться. В долгосрочной перспективе значительные проблемы связаны с рекультивацией загрязнённых техногенными радионуклидами территорий промплощадок, санитарно-защитных зон (СЗЗ) и зон наблюдения РОО.

В соответствии с рекомендациями МАГАТЭ (IAEA, 2019) оценка риска при выводе из эксплуатации, необходимая для принятия решений по проводимым работам, как правило, включает в себя три основных компонента: разработка критериев риска, определение допустимых уровней и последующее ранжирование выявленных рисков (в значительной степени основанное на балльной оценке критериев и уровней риска). При выявлении рисков, которые могут быть более эффективно устранены другой организацией (например, переданы организацией по выводу из эксплуатации в распоряжение организации по управлению отходами), следует рассмотреть возможность создания совместного реестра рисков, чтобы все стороны понимали интерпретацию рисков и принимали соответствующую ответственность. Такой подход позволяет гарантировать подрядчикам возможность внесения значимого вклада в процесс рационального управления рисками. При определении базовых условий реализации проекта по выводу из эксплуатации возможность использования консервативного подхода может рассматриваться как часть общей стратегии по выявлению различных аспектов риска с целью снижения влияния консолидированного риска.

Следует особо подчеркнуть, что при ВЭ необходимы четкие рекомендации по организации комплексного взаимодействия между эксплуатирующей и специализированными организациями, о структуре взаимодействия и методах обеспечения радиационной безопасности. В результате данной работы автором были определены алгоритм и организационно-методические подходы к обеспечению взаимодействия в ходе выполнения комплекса работ по ВЭ РОО, предложены основные параметры оценки радиационно безопасного состояния помещений, проведено обоснование критериев радиационно безопасного состояния РОО и освобождения от контроля на основе значений допустимой остаточной активности грунтов и строительных материалов конструкций зданий и сооружений, в т.ч. контрольных уровней дезактивации рабочих поверхностей конструкций и оборудования.

Все этапы проекта организации работ по выводу из эксплуатации были построены с учетом их приоритетности, основанной на оценке состояния объекта и места его размещения. При выводе из эксплуатации таких ядерно и радиационно опасных объектов (ЯРОО), как правило, образуются значительные объемы радиоактивно загрязненного грунта (РЗГ), которые образуются при рекультивации загрязненных техногенными радионуклидами территорий промплощадок, санитарно-защитных зон (СЗЗ) и зон наблюдения РОО и порождают значительные проблемы в долгосрочной перспективе. В настоящее время ожидается образование большого количества РЗГ при выводе из эксплуатации объектов АО "ВНИИНМ", ПАО "МСЗ", а также при проведении масштабных работ по реабилитации территории на сублиматном производстве АО "АЭХК". Подобные объекты вместе с загрязненными в результате утечек и накопления опасных веществ слоями почвы, составляют сегодня объекты ядерного наследия.

Для территорий, загрязненных радиоактивными веществами в результате прошлой деятельности предприятий, официальные критерии реабилитации отсутствуют. В случае обнаружения локальных радиоактивных загрязнений в результате последствий прежней деятельности предприятий рекомендованы критерии Приложения 5 НРБ-99/2009.

Для целей категорирования и определения конечных объемов радиоактивных отходов (РАО) в местах образования на всех этапах работ по ВЭ РОО необходимы радиационные критерии, определяющие требования радиационной безопасности зданий и их территорий, разработка которых требует проведения тщательных и достоверных измерений характеристик радиоактивного загрязнения. Такие мероприятия позволяют не только определять объемы дезактивационных работ и объемы образования РАО, но и планировать распределение дозовых нагрузок на персонал, давать прогнозы изменения дозовых нагрузок. При оценке опыта ВЭ РОО в виде зданий и сооружений, расположенных в местах массового проживания населения, главная проблема состоит в отсутствии методических документов по установлению пространственного распределения радиоактивного загрязнения в помещениях, строительных конструкциях и на территории.

Как показала практика, при выводе из эксплуатации объектов, использующих радионуклиды в открытом виде, выявляются высокие (экстремальные) уровни загрязнения помещений, оборудования, рабочих поверхностей, что требует эффективных способов дезактивации. Этим вопросам до настоящего времени не уделялось должного внимания. Особенно остро стоит проблема вывода из эксплуатации помещений, загрязненных  $\alpha$ -излучающими радионуклидами, связанная как с их выявлением, так и с технологическими особенностями дезактивации. По этому вопросу есть несколько направлений, которые требуют решения: экспрессная идентификация содержания радионуклидов (Варлаков, А.П., 2020); эффективная технология удаления радионуклидов, позволяющая сократить объём образующихся отходов (Коренков, И.П., 2019); эффективная защита персонала при проведении таких работ (Уйба, В.В., 2017); надежная локализация образующихся отходов, а также соответствующее нормативно-правовое обеспечение этих работ (Цовьянов, А.Г., 2020; Ильин, Л.А., 2018; Лащенкова, Т.Н., 2017; Коренков, И.П., 2015).

В результате выполнения ФЦП «Обеспечение ядерной и радиационной безопасности на 2008 год и на период до 2015 года» к 2016 году в РФ переработано всего около 0,27 млн м<sup>3</sup> ЖРО с суммарной активностью  $5,29 \cdot 10^{18}$  Бк и 31,88 тыс. м<sup>3</sup> ТРО всех видов с суммарной

активностью  $2,00 \cdot 10^{14}$  Бк, а образовано около 0,72 млн м<sup>3</sup> ТРО всех видов общей активностью  $3,06 \cdot 10^{17}$  Бк и 0,80 млн м<sup>3</sup> ЖРО с суммарной активностью  $5,89 \cdot 10^{18}$  Бк.

В ходе реализации программы ФЦП ЯРБ-2 «Обеспечение ядерной и радиационной безопасности на 2016 – 2020 годы и на период до 2030 года» планируется вывести из эксплуатации 76 ЯРОО и реабилитировать большие площади загрязненных территорий (таблица 1, данные из Сводного информационно-аналитического материала «Итоги реализации федеральной целевой программы «Обеспечение ядерной и радиационной безопасности на 2016—2020 годы и на период до 2030 года» в 2016—2020 гг.». М.: Госкорпорация «Росатом». 2021).

Таблица 1 - Фактические показатели выполнения программы ФЦП ЯРБ-2 за 2016-2020 гг.

Показатель программы	Факт за 2016-2019 гг.	План на 2016-2030 гг.
Ввод в эксплуатацию объектов окончательной изоляции РАО, тыс. м <sup>3</sup>	39	367
Вызов на централизованное хранение ОТВС, тыс. штук	31	80
Переработка ОЯТ, тонн	483	2521
Вывод из эксплуатации ЯРОО, штук	35	76
Реабилитация территорий, тыс. м <sup>2</sup>	267	1304
Передано на захоронение РАО, тыс. м <sup>3</sup>	24	155
Оснащенность центров гигиены и эпидемиологии ФМБА	16	100

Следует подчеркнуть, что проблемам, связанным с дезактивацией объектов и территорий размещения РОО, загрязнённых техногенными радионуклидами, также посвящены исследования ученых, работающих в этой области от разных направлений и организаций: Былкин Б.К. (2018); Линге И.И., Абрамов А.А. (2017); Коренков И.П., Шандала Н.К., Лашенцова Т.Н. (2014); Соболев А.И. (2014) и другие.

**Целью** работы является исследование актуальных проблем обеспечения радиационной безопасности поверхностей помещений, инженерно-технических средств радиационной защиты и дезактивации для персонала и населения, охраны окружающей среды при выводе из эксплуатации радиационно опасных объектов.

Для достижения этой цели поставлены **следующие задачи**:

- Разработать подходы к обоснованию комплекса мероприятий по обеспечению радиационной безопасности персонала и охраны окружающей среды.
- Разработать алгоритм взаимодействия различных организаций, принимающих участие в процессе вывода из эксплуатации радиационно-опасных объектов.
- Разработать эффективный метод дезактивации различных поверхностей от радиоактивного загрязнения  $\alpha$ - и  $\beta$ -излучающих радионуклидов.

– Обосновать использование метода пылеподавления в процессе дезактивации помещений, различного оборудования, рабочих поверхностей в качестве рекомендаций к мероприятиям по защите персонала.

– Разработать рекомендации по обоснованию критериев приемлемости радиационно-безопасного состояния помещений, оборудования, материалов и территорий после окончания работ.

– Оценить вероятность возникновения радиационных аварий при выводе из эксплуатации РОО и их последствий для населения и окружающей среды.

#### **Научная новизна работы:**

1. Впервые разработан метод экспрессной оценки объемов образования РАО с помощью переносных  $\alpha$ - и  $\beta$ -спектрометров.

2. Показана возможность применения полевой гамма-спектрометрии для оценки поверхностной загрязненности объектов радионуклидами (уран и трансурановые элементы).

3. Разработана модель расчета ослабления потока  $\gamma$ -квантов за счёт экранирования плоскими источниками, позволяющая проводить поиск скрытых участков загрязнения.

4. Показана высокая эффективность метода дезактивации с помощью промышленного пылесоса поверхностей различных материалов, загрязненных  $\alpha$ - и  $\beta$ -активными нуклидами.

5. Обоснованы контрольные уровни радиационных параметров состояния помещений, оборудования и остаточной активности грунтов и строительных материалов, позволяющие оптимизировать объем проводимых дезактивационных работ.

6. Методами математической статистики по данным КИРО проведены анализ значений параметров радиационных факторов с последующим зонированием помещений по уровням радиоактивного загрязнения поверхностей с целью оптимизации объема радиационного контроля и применения средств радиационной защиты.

#### **Практическая значимость и внедрение результатов:**

– Разработаны «Методические рекомендации по проведению расчетной оценки удельной активности РАО, образующихся при дезактивационных работах в помещениях корпуса Б «АО «ВНИИНМ» от 26.12.2014 № В-853, утвержденные генеральным директором;

– Разработаны «Методические рекомендации по определению радионуклидных векторов при проведении сбора и категоризации РАО, образующихся при ВЭ корпуса Б АО «ВНИИНМ» от 26.12.2014 № В-854, утвержденные генеральным директором;

– Разработаны «Методические указания по проведению радиационного обследования и отбору проб, подтверждающих радиационно-безопасное состояние помещений и строительных конструкций», утвержденные 26.12.2014 генеральным директором;

– Разработан «Сборник инструкций по радиационному обследованию зданий, помещений, оборудования и отходов демонтажа для предварительной сортировки РАО по категориям и оценки их активности при выводе из эксплуатации ЯРОО» от 26.12.2014 № В-855, утвержденные генеральным директором;

– Разработан «План организации работ по проведению радиационного обследования в аварийных помещениях и помещениях 1 класса при проведении работ по ВЭ корпуса Б АО «ВНИИНМ», утвержденный 15.03.2014 Первым Заместителем Генерального директора по техническому обеспечению и реализации ФЦП ОАО «ВНИИНМ»;

– Разработаны «Методические рекомендации применения «сухого» метода дезактивации загрязненных помещений» от 11.03.2015 № В-113, утвержденные Заместителем Генерального директора - главным инженером АО «ВНИИНМ».

**Личный вклад автора.** При планировании, организации и проведении исследований по всем разделам и этапам работы доля участия автора составила 80 %. Анализ полученных материалов и обобщение результатов исследований полностью проведены автором.

1. Обеспечено взаимодействие между Заказчиком работ («Госкорпорация Росатом», эксплуатирующей организацией (АО «ВНИИНМ»), подрядными и субподрядными организациями, контролирующими и надзорными органами.

2. Опробован метод оценки объема РАО.

3. Обеспечена защита персонала, населения и ОС при проведении комплекса работ по ВЭ корпуса Б АО «ВНИИНМ».

**Публикации.** По теме диссертации было опубликовано 9 работ, из них в МБД - 4 работы, в журналах ВАК - 2 работы, по итогам участия в конференциях – 3 работы.

**Апробация работы.** Результаты исследования были представлены на:

- II Межрегиональной молодежной научной конференции «Достижения и перспективы молодых учёных» в 2019 году, название работы: «Обеспечение безопасности в чрезвычайных ситуациях при выводе из эксплуатации радиационно-опасных объектов на примере корпуса Б АО «ВНИИНМ», сооружения 227 АО «ГНЦ РФ ФЭИ»;

- Конференции ИБРАЭ РАН «Оптимизация решений по безопасности при выводе из эксплуатации объектов использования атомной энергии» в 2015 году, доклад на тему: «Вывод из эксплуатации корпуса Б АО «ВНИИНМ»;

- Международной конференции «Радиохимия-2018», постерный доклад;

- Конференции молодых ученых «Ильинские чтения» в 2019 году, доклад на тему: «Обеспечение радиационной безопасности при выводе из эксплуатации радиационно – опасных объектов»;

- III Международной (XVI Региональной) научной конференции «Техногенные системы и экологический риск» в 2020 году, публикация тезисов.

**Структура и объём диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, литературного обзора, методической части, 5 глав с изложением результатов экспериментальных методов и их обсуждением, выводов и списка литературы. Материалы работы изложены на 193 страницах и содержат 39 таблиц, 21 рисунок и 3 приложения. Список использованных источников содержит 119 наименований, из них 27 на иностранном языке.

**Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Методология экспрессной оценки объемов РАО с применением полевой альфа- и гамма-спектрометрии. Показана возможность использования переносных радиометров для определения поверхностной загрязненности и удельных активностей радионуклидов на загрязненных объектах с учетом их морфологии.

2. Моделирование пространственно-угловых энергетических параметров полевого  $\gamma$ -спектрометра и проверка адекватности модели с помощью тестовых измерений 20 различных геометрий.

3. Критерии радиационно-безопасного состояния объекта вывода из эксплуатации, установленные на основе анализа значений контрольных (допустимых) уровней и данных о фоновых параметрах радиационных факторов оборудования и в рабочих помещениях.

Зонирование загрязненных помещений по степени потенциальной опасности, позволяющее оптимизировать объем радиационного контроля с использованием критериев радиационной опасности, предложенных в результате анализа данных КИРО на основе значений уровней радиоактивного загрязнения в НРБ-99/2009 (таблица 8.9).

4. Обоснование минимально детектируемой активности  $\alpha$ -радионуклидов в слоях материалов различных толщины и загрязненности поверхности (дерево, штукатурка, кирпич, железе).

5. Метод вторичного пылеподавления путем осаждения аэрозольной фракции радиоактивного загрязнения с применением оборудования систем туманообразования при дезактивации: для повышения эффективности использования промышленных пылесосов и в целях обеспечения экологической безопасности (включая снижение нагрузки на системы спецвентиляции и конечных объемов РАО).

**Объектом** исследования является радиационно опасный объект использования атомной энергии, выводимый из эксплуатации на примере исследовательского корпуса «Б» Высокотехнологического научно-исследовательского института неорганических материалов имени академика А. А. Бочвара (АО «ВНИИНМ»).

**Предметом** исследований является радиационно-гигиеническая оценка состояния РОО и контроль радиационной обстановки при дезактивации и оценке объемов образования РАО в ходе проведения комплекса работ по ВЭ РОО.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Обзор литературы посвящен анализу выполнения итоговой программы ФЦП «Обеспечение радиационной и ядерной безопасности на 2016-2020 годы и на период до 2030 года», выводу из эксплуатации и реабилитации территории ЯРОО. Проанализированы технические и методические решения вопросов, связанных с выводом из эксплуатации следующих объектов:

– уран-графитовых реакторов и площадок завода АО «ОДЦ УГР» (г. Северск). В результате выполнения работы впервые в мире выведен из эксплуатации ПУГР по варианту захоронения на месте с созданием системы наземных изолирующих барьеров. Объекту присвоен статус пункта консервации особых РАО;

– реконструкция зданий, вывоз отработанного ядерного топлива с площадки АО ГНЦ РФГ ФЭИ (г. Обнинск). Создана структура, необходимая для обеспечения РБ при обращении с накопившимися отходами и его вывоза на переработку;

– обеспечение безопасного обращения с отработавшим ядерным топливом АО «ГНЦ НИИАР» (г. Димитровград). Создание инфраструктура для подготовки ОЯТ и пеналов с делящимися материалами к вывозу на переработку на «ПО «Маяк».

Основные результаты работ по реабилитации территорий приведены в **главе 1**. По представленным материалам можно сделать вывод, при выведении из эксплуатации РОО существуют следующие проблемы, не имеющие необходимого решения на данный момент:

– вывод из эксплуатации объекта, работающего с  $\alpha$ -радионуклидами и расположенного в центре мегаполиса;

– отсутствие алгоритма взаимодействия различных ведомств, распределяющих функциональные обязанности и зоны ответственности;



- отсутствие экспрессных методов определения  $\alpha$ -загрязнения поверхностей, строительных материалов;

- отсутствие предлагаемых эффективных методов дезактивации помещений.

МАГАТЭ по вопросам реабилитации территорий разработало ряд документов:

- Environmental and Source Monitoring for Purposes of Radiation Protection. IAEA safety standards series no. RS-G-1.8;

- Release of sites from regulatory control on termination of practices: Safety guide. IAEA safety standards series no. WS-G-5.10;

- Compliance monitoring for remediated sites. IAEA- TECDOC-1118;

- Surveillance and monitoring of near surface disposal facilities for radioactive waste. Safety reports series, ISSN 1020-6450.

Эти документы содержат ряд требований по оптимизации защиты, оценки безопасности, рекомендации к правительству и регулирующим органам.

Документы ЕС затрагивают вопросы дальнейшего использования зданий и материалов, образующихся при демонтаже сооружений, загрязненных радионуклидами.

Помимо рекомендации по различным сценариям облучения и методам расчета индивидуальных и коллективных доз облучения, в них приводятся критерии освобождения от регулирующего контроля в виде удельной активности радионуклидов, уровни освобождения получены для критического сценария 10 мкЗв/год или 50мкЗв/год на кожу.

Далее в главе представлены критерии реабилитации, принятые в США, Великобритании, Франции, Канаде, Австралии и ряде других стран. В качестве примера приводятся уровни загрязнения, до которых проводят очистку в Канаде.

#### **Критерии реабилитации территорий в РФ**

Критерии реабилитации представлены в СП 2.62.1292-2003 для предприятий, в результате деятельности которых возможно образование производственных отходов с повышенным содержанием природных радионуклидов: эффективная доза дополнительного облучения критической группы населения, проживающего на территории после ее реабилитации, не должна превышать 100 мкЗв/год.

Для территорий, загрязненных радиоактивными веществами в результате прошлой деятельности предприятий, официальные критерии реабилитации отсутствуют. В НРБ-99/2009 (Приложение 5) в случае обнаружения локальных радиоактивных загрязнений в результате последствий прежней деятельности предприятий рекомендованы следующие критерии:

- уровень исследования: от 0,01 до 0,3 мЗв/год. Это такой уровень радиационного воздействия источника на население, при достижении которого требуется выполнить исследование источника с целью уточнения оценки величины годовой эффективной дозы и определения величины дозы, ожидаемой за 70 лет;

- уровень вмешательства: более 0,3 мЗв/год. Это такой уровень радиационного воздействия, при превышении которого требуется проведение защитных мероприятий с целью ограничения облучения населения. Масштабы и характер мероприятий определяют с учетом интенсивности радиационного воздействия на население по величине ожидаемой коллективной эффективной дозы за 70 лет.

Учитывая изложенное, можно сделать вывод, что проблемы, связанные с выводом из эксплуатации радиационно-опасного объекта, расположенного в центре мегаполиса, и рекультивацией его территории, требует дальнейшего решения.

## Материалы, методы и объём исследования

### Радиометрические методы

Радиометрические методы применялись для оценки уровней альфа- и бета-загрязнений:

- поверхностной загрязненности и удельной активности радионуклидов (прямые методы);
- уровня снимаемого загрязнения (косвенный метод мазков).

При прямых измерениях использовался блок детектирования БДПА-01 с детектором ZnS(Ag) диаметром 60 мм, диапазон измерения плотности потока  $\alpha$ -частиц  $0,1-10^5$  частиц/см<sup>2</sup>·мин, погрешность  $\pm 20\%$ .

Градуировка блока детектирования выполнялась с помощью градуировочного источника, например на основе гипса (водного сульфата кальция), содержащего какой-либо альфа-излучающий радионуклид, например, <sup>241</sup>Am с удельной активностью порядка 500 Бк/кг.

Также использовался альфа-спектрометрический комплекс AlphaDHO с вакуумной системой, двумя камерами с полупроводниковыми блоками детектирования площадью 400 мм<sup>2</sup> и 900 мм<sup>2</sup>. Разрешение по линии <sup>239</sup>Pu 18 кэВ.

При жидкостной спектрометрии применялся счетчик TRI-CARB Perkn-Elmer, модели 3100 и 3170 (низкофоновая модификация).

Системы полевой гамма-спектрометрии комплектуются программным обеспечением ISOCS для анализа объектов сложной формы. Программное обеспечение позволяет проводить расчет эффективности регистрации для широкого спектра геометрий без применения калибровочных источников с точностью порядка нескольких процентов.

Для расчета эффективности регистрации осуществляли моделирование пространственно-энергетических параметров конкретного детектора методом Монте-Карло, проверка адекватности модели с помощью тестовых измерений и собственно расчеты кривых эффективности. Для упрощения этой задачи нами в программу расчета калибровочных кривых было введено 20 шаблонов геометрий, применяющихся в полевой гамма-спектрометрии (прямоугольной, цилиндрической, конической, сферической и других форм).

Используя математический аппарат, была проведена достаточно корректная оценка загрязнений (плотности распределения радионуклидов) практически для любых объектов сложной геометрии, если с помощью коллиматора (возможны варианты с телесным углом 30° и 90°) проводить измерения отдельных фрагментов такого объекта.

Ограничивающими условиями такого подхода являются:

- знание реальной зависимости распределения радионуклидов по глубине (экспоненциальное распределение вблизи поверхности, равномерное распределение, наличие активного слоя, экранированного условно-чистым материалом с обеих сторон и т.д.);
- необходимость использования «радионуклидных векторов» - изотопных соотношений в пробах для экспрессного расчета загрязнения отходов радионуклидами плутония.

Самым надежным реперным радионуклидом для этих целей может служить <sup>241</sup>Am, который в различных материалах и отходах связан с плутонием, т.к. является дочерним продуктом его изотопа <sup>241</sup>Pu.

В этом случае ключевыми стадиями обследования помещений с точки зрения загрязнения наиболее трудно определяемыми альфа-излучающими радионуклидами являются следующие:

- детектирование актинидных элементов, прежде всего  $^{241}\text{Am}$  передвижным гамма спектрометром в режиме сканирования (без свинцового коллиматора);
- стационарные измерения загрязнения поверхности в местах их локализации по выбранным гамма-линиям;
- послойный отбор проб по регулярной сетке в выявленных местах локализации загрязнений с целью определения характера распределения контролируемых радионуклидов по глубине и определение радионуклидного вектора (подход к характеристике РАО, основанный на установлении корреляционных зависимостей между активностями радионуклидов в заданном потоке РАО), для уточненного расчета суммарной активности радионуклидов по спектрам, полученным при стационарных измерениях.

#### **Определение мощности амбиентного эквивалента дозы гамма-излучения**

Измерение мощности доз  $\gamma$ -излучения проводилось по регулярной сетке методом конверта на расстоянии 10 см. Для осуществления привязки мест измерений и отбора проб при радиационных обследованиях, подготавливались картограммы помещений – копии строительных чертежей с разметкой в виде прямоугольной сетки с размерами 1м x 1м с присвоением индивидуального номера каждому квадрату сетки.

В качестве детектора использовался дозиметр-радиометр МКС-АТ-1117 с блоком детектирования БДКГ-01. Контроль индивидуальных доз облучения персонала осуществлялся с помощью дозиметра ДТЛ-02 на основе LiF с нижним порогом регистрации 0,05 мЗв.

#### **Объемы исследований**

Совокупный объем комплексных инженерно-радиационных обследований, приведен в таблице 2.

Таблица 2 - Объем радиационного и дозиметрического контроля (2015-2016 гг.)

Наименование исследований	Количество измерений, точек/образцов		
	$\gamma$ -излучение	$\alpha$ -излучение	$\beta$ -излучение
Радиометрические	-	5546	5546
Жидкосцинтилляционная спектрометрия	-	21	21
Радиохимические (анализ мазков, в т.ч. определение радионуклидных векторов)	740	148	148
МАЭД	5719	-	-
Активность радионуклидов в пробах материалов и грунта	140	1154	1154
ИДК	260		

Исследовались следующие параметры остаточного радиоактивного загрязнения, которые в полной мере характеризуют эффективность проведенных дезактивационных работ:

- уровни  $\alpha$ - и  $\beta$ - загрязнения поверхностей помещений (стены, полы);
- величина МАЭД в помещениях, в шурфах, пробуренных на глубине 5-10 см в строительных конструкциях;

– остаточная удельная активность радионуклидов в строительных материалах.

### Методы оценки удельной активности РАО

Удельная активность РАО оценивалась с использованием радионуклидных векторов по активности  $\alpha$ - и  $\beta$ -излучателя и на основе лабораторного анализа отобранных проб. Пробы РАО отбирались непосредственно из стандартных 200 литровых бочек, прошедших процедуру характеристики. Отбор проб проводился из каждой 10-й бочки.

Цель отбора проб и их последующего лабораторного анализа - проверка результатов определения удельной активности РАО по данным гамма-спектрометрических измерений реперных радионуклидов.

**В главе 3** приводится обоснование решений основных проблем вывода из эксплуатации РОО.

Первая проблема – отсутствие референтных (производных) уровней:

- остаточной активности рабочих поверхностей после дезактивации;
- МАЭД территории и помещений;
- принятие решений по оптимальному варианту вывода.

Вторая проблема – экономическая.

Автором разработана схема принятия управленческих, экономических решений, приведенная на рисунке 1.

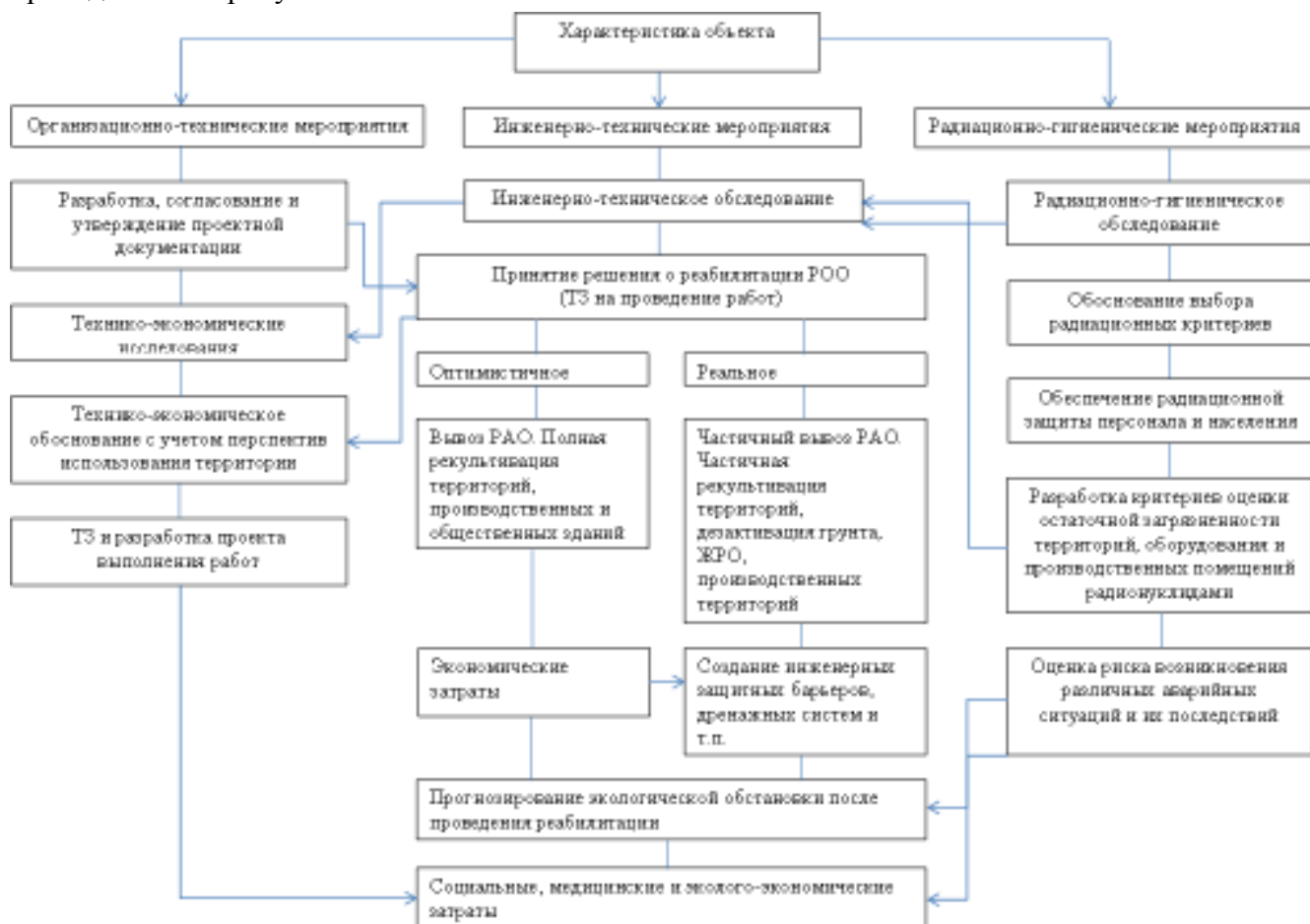


Рисунок 1 - Схема принятия управленческих и экономических решений при выводе из эксплуатации РОО

Данная схема включает: организационно-технические, инженерно-технические и радиационно-гигиенические мероприятия (радиационная оценка состояния технологических

помещений, оборудования, крупномасштабных конструкций, уровней снимаемых и фиксированных загрязнений полов, стен, определение радионуклидного состава загрязнений); оценка возможного использования «чистых помещений» при проведении дезактивационных и рекультивационных работ, оценка гидрогеологических параметров и грунтовых вод для прогноза миграции радионуклидов.

#### **Характеристика объекта исследований**

Корпус Б АО «ВНИИНМ» расположен в густонаселенном районе г. Москвы и окружен плотной жилой застройкой. Эксплуатация корпуса осуществлялась более 60 лет, в течение которых выполнялись лабораторные работы с использованием ядерных материалов и радиоактивных веществ (Th-232, U-235, Np-237, U-238, Pu-239, Am-241, Co-60, Sr-90, Tc-99, Ru-106, Cs-137 и другие радионуклиды).

Рассматривались три варианта вывода из эксплуатации: консервация, реновация и ликвидация. Был выбран вариант ликвидации с реабилитацией территории застройки до состояния, обеспечивающего использование территории без ограничений.

#### **Результаты комплексного инженерно-радиационного обследования**

Анализ результатов показал наличие множества участков, помещений и технологического оборудования, имеющих значительные загрязнения  $\alpha$ -излучающими нуклидами и прежде всего плутонием -239.

Из результатов оценки состояния альфа-загрязнения помещений каждого этажа корпуса следует, что на ~ 60-80 % площади альфа-загрязнение не обнаружено, на ~ 20-40 % имеется загрязненность в пределах 1-5 част/(мин·см<sup>2</sup>), на ~ 1-4 % загрязненность составляет 5-20 част/(мин·см<sup>2</sup>), на ~ 1-3 % площади – 20-50 част/(мин·см<sup>2</sup>), на ~ 1 % площади – более 50 част/(мин·см<sup>2</sup>).

Суммарная площадь «условно чистых» помещений составляет ~ 5000 м<sup>2</sup>, с нарушенной радиационной обстановкой ~ 2500 м<sup>2</sup>. В помещениях преимущественно преобладает снимаемое поверхностное радиоактивное загрязнение, в коридорах – неснимаемое.

#### **Специфика радионуклидного загрязнения помещений**

В 50 % помещений проводились работы с ураном с различными изотопными соотношениями, 24 % - плутонием и америцием, 17% - с плутонием и 9% с гамма-активными нуклидами (<sup>137</sup>Cs, <sup>152</sup>Eu, <sup>154</sup>Eu, <sup>60</sup>Co).

Следовательно, основной проблемой характеристики радионуклидного состава является разработка экспрессных методов определения содержания в них альфа-излучающих радионуклидов.

Результаты проведенных нами измерений активности <sup>239</sup>Pu, <sup>241</sup>Pu и накопления <sup>241</sup>Am, а также отношений активностей <sup>239</sup>Pu/<sup>241</sup>Am приведены на рисунке 2.

Из представленных данных следует, что для оценки содержания плутония в РАО, как наиболее вероятного, можно использовать соотношение <sup>239</sup>Pu/<sup>241</sup>Am в интервале 5-10.

Этот параметр уточнен нами с применением альфа-спектрометрического и радиохимического методов и жидкостной спектрометрии.

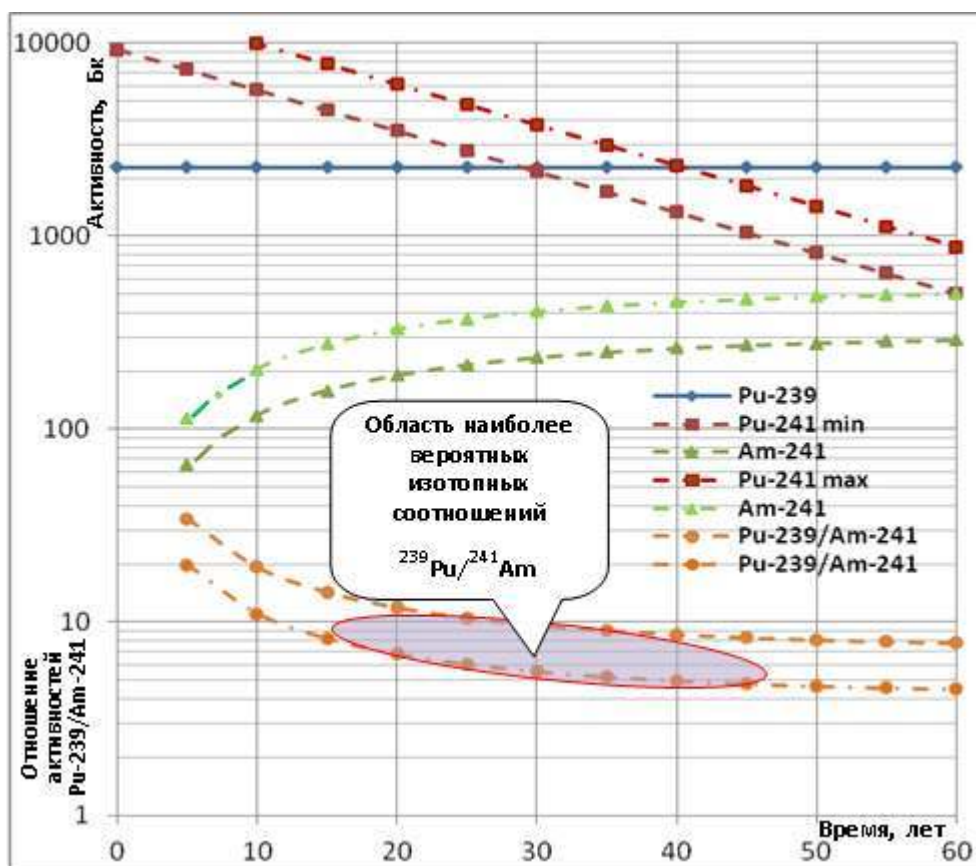


Рисунок 2 - Изменение активностей изотопов плутония, (массовая доля  $^{241}\text{Pu}$  – 0,23 и 0,40%,  $^{240}\text{Pu}$  – 5,0%), накопление  $^{241}\text{Am}$  и изменение изотопных соотношений  $^{239}\text{Pu}/^{241}\text{Am}$

### Оценка активности радионуклидов в различных материалах переносными радиометрами: моделирование прохождения, расчет эффективности регистрации $\alpha$ -частиц

Модель, представляющей регистрацию альфа-частиц детектором, по которой проводили расчеты эффективности регистрации для различных условий (радионуклидный состав альфа-излучателей, вещественный состав счетного образца, толщина излучающего слоя, наличие дополнительной защитной пленки на блоке детектирования), представлена на рисунке 3.

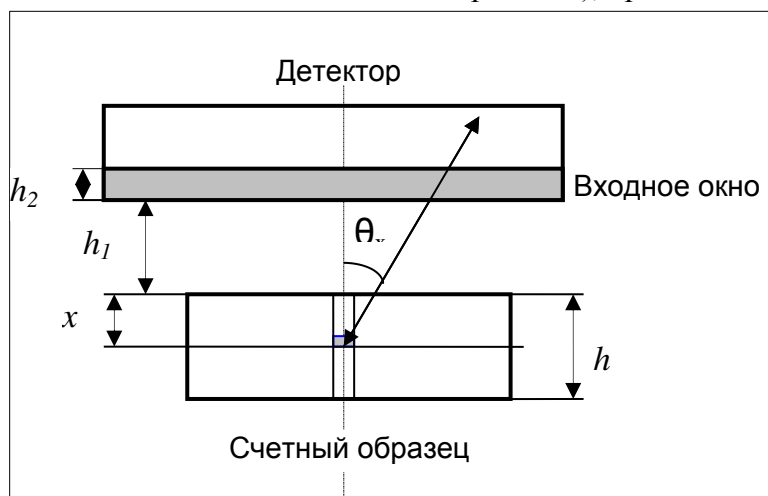


Рисунок 3 - Модель, учитывающая типы взаимодействия альфа-частиц, излучаемых счетным образцом, до момента регистрации детектором

Исходные условия: имеется счетный образец из какого-либо вещества в виде диска радиусом  $r_c$  толщиной  $h$ , над которым находится детектор альфа-частиц радиусом  $r_d$ . Входное

окно детектора альфа-частиц представляет собой тонкий слой вещества толщиной  $h_2$ . Между счетным образцом и входным окном детектора имеется слой воздуха толщиной  $h_1$ . В счетном образце равномерно распределен радионуклид, испускающий альфа-частицы с энергией  $E$ .

Требуется определить эффективность регистрации альфа-частиц, образовавшихся в счетном образце. Поставленная задача имеет аналитическое решение при следующих дополнительных условиях:

средний пробег альфа-частиц с энергией  $E$  в веществе счетного образца равен  $R$ , а в воздухе и в веществе входного окна  $R_i$ ;

$$\text{средняя тормозная способность вещества счетного образца } \left[ \frac{dE}{dx} \right]_2 = \frac{E}{R_2};$$

потери энергии  $\Delta E$  при прохождении альфа-частицы в счетном образце, воздухе и входном окне прямо пропорциональны средним тормозным способностям вещества счетного образца  $\left[ \frac{dE}{dx} \right]$ , воздуха  $\left[ \frac{dE}{dx} \right]_1$  и вещества входного окна  $\left[ \frac{dE}{dx} \right]_2$  соответственно.

Альфа-частица, образовавшаяся в счетном образце на расстоянии  $x$  от поверхности счетного образца (Рисунок 3), попадет в чувствительный объем детектора и будет зарегистрирована, если выполняется условие:

$$\frac{x}{\cos \theta_x} \cdot \left[ \frac{dE}{dx} \right] + \frac{h_1}{\cos \theta_x} \cdot \left[ \frac{dE}{dx} \right]_1 + \frac{h_2}{\cos \theta_x} \cdot \left[ \frac{dE}{dx} \right]_2 \leq \alpha \cdot E \quad (1),$$

где  $x$  – расстояние от точки, в которой образовалась альфа-частица, до поверхности счетного образца;

$h_1$  и  $h_2$  – толщины слоя воздуха и входного окна детектора альфа-частиц соответственно;

$\theta_x$  – угол между нормалью к поверхности счетного образца и направлением вектора скорости альфа-частицы;

$\alpha = \frac{E - E_n}{E}$  – отношение суммарной допустимой потери энергии альфа-частицы в

счетном образце, слое воздуха и входном окне детектора к начальной энергии альфа-частицы;

$E_n$  – порог дискриминации счетного устройства, МэВ.

Применительно к измерениям поверхностного загрязнения альфа-излучающими радионуклидами для счетного образца с известным элементарным составом эффективность регистрации альфа-частиц  $\varepsilon_j$  с энергией  $E_j$  может быть представлена в виде:

$$\varepsilon_j = k_G \cdot \varepsilon(R_i, d, l_i, E_n) \quad (2),$$

где:  $k_G$  – коэффициент, учитывающий влияние геометрических размеров участка поверхности, с которого регистрируются альфа-частицы (далее счетного образца), детектора и расстояния между поверхностью счетного образца и входным окном детектора альфа-частиц (геометрический фактор);

$\varepsilon(R_i, d, l_i, E_n)$  – эффективность регистрации альфа-частиц с энергией  $E_j$  для условно бесконечного детектора, когда счетным устройством альфа-радиометра регистрируются все альфа-частицы для которых выполняется условие регистрации.

После ряда преобразований получаем формулу:

$$d_{\max} = R \cdot \left( 1 - \frac{l_1 - d \cdot \rho_a}{R_1 \rho} - \frac{l_2}{R_2} \right) \quad (3)$$

где:  $R$ ,  $R_1$  и  $R_2$  - средние пробеги альфа-частиц с энергией  $E_\alpha$  в веществе счетного образца, воздухе и веществе входного окна детектора соответственно, мг/см<sup>2</sup>;

$d$  - поверхностная плотность счетного образца, мг/см<sup>2</sup>

$l_1$  - плотность слоя воздуха между поверхностью счетного образца и входным окном детектора, мг/см<sup>2</sup>;

$l_2$  поверхностная плотность входного окна детектора, мг/см<sup>2</sup>;

$\rho_a$  - плотность воздуха, г/см<sup>3</sup>;

$\rho$  - плотность счетного образца, г/см<sup>3</sup>.

$d_{\max}$  - поверхностная плотность счетного образца, является наибольшей поверхностной плотностью, при которой образовавшиеся в счетном образце альфа-частицы еще могут быть зарегистрированы счетным устройством радиометра.

Расчёты выполнены для случаев загрязнения радионуклидами <sup>238</sup>U, <sup>234</sup>U, <sup>235</sup>U и естественной смеси <sup>238</sup>U + <sup>234</sup>U + <sup>235</sup>U, а также <sup>239</sup>Pu и <sup>241</sup>Am. В качестве модельных материалов взяты: штукатурка, дерево, кирпич, окись железа.

Полученные в графическом виде зависимости по активности (плотности загрязнения) альфа-излучателями с различной энергией приведены на рисунках 4.1-4.3.

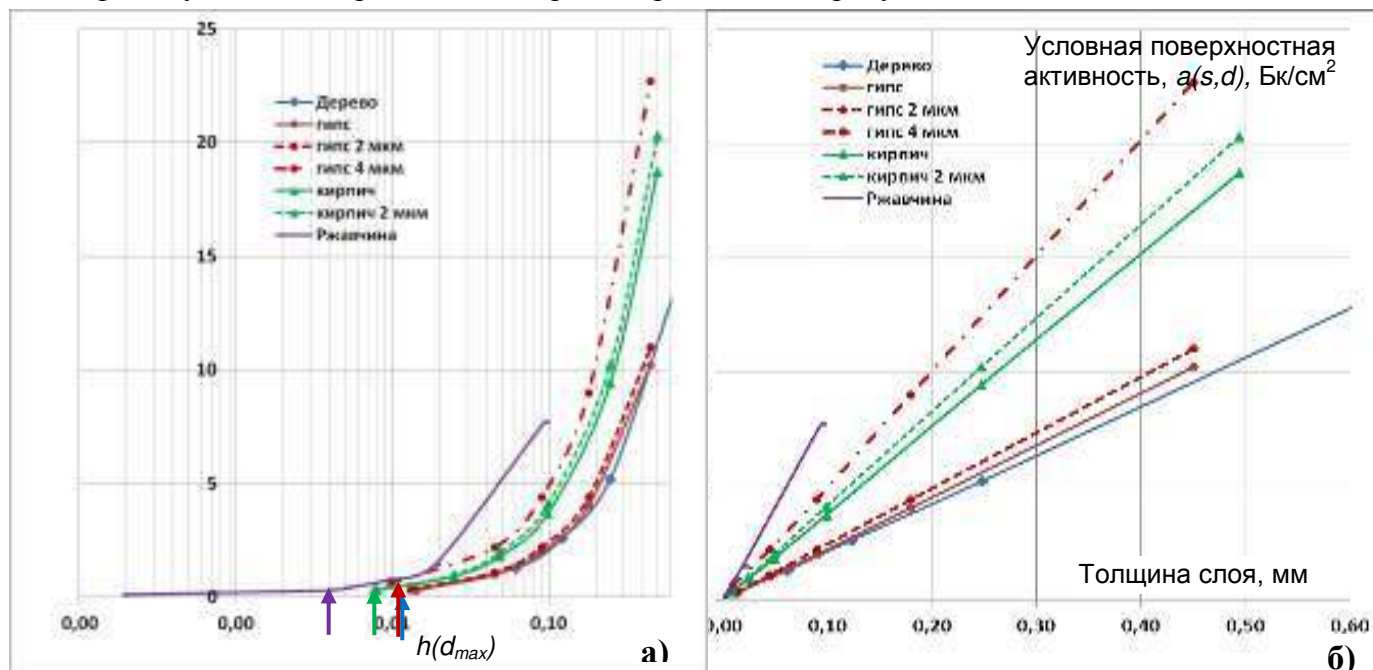


Рисунок 4.1 - Условная поверхностная активность различных материалов при загрязнении радионуклидами урана в природном соотношении, а) логарифмическая б) линейная шкала отображения  $h(d)$  - толщины активного слоя. Величина 2 мкм и 4 мкм в легенде к графикам – толщина дополнительной защитной пленки на окне детектора



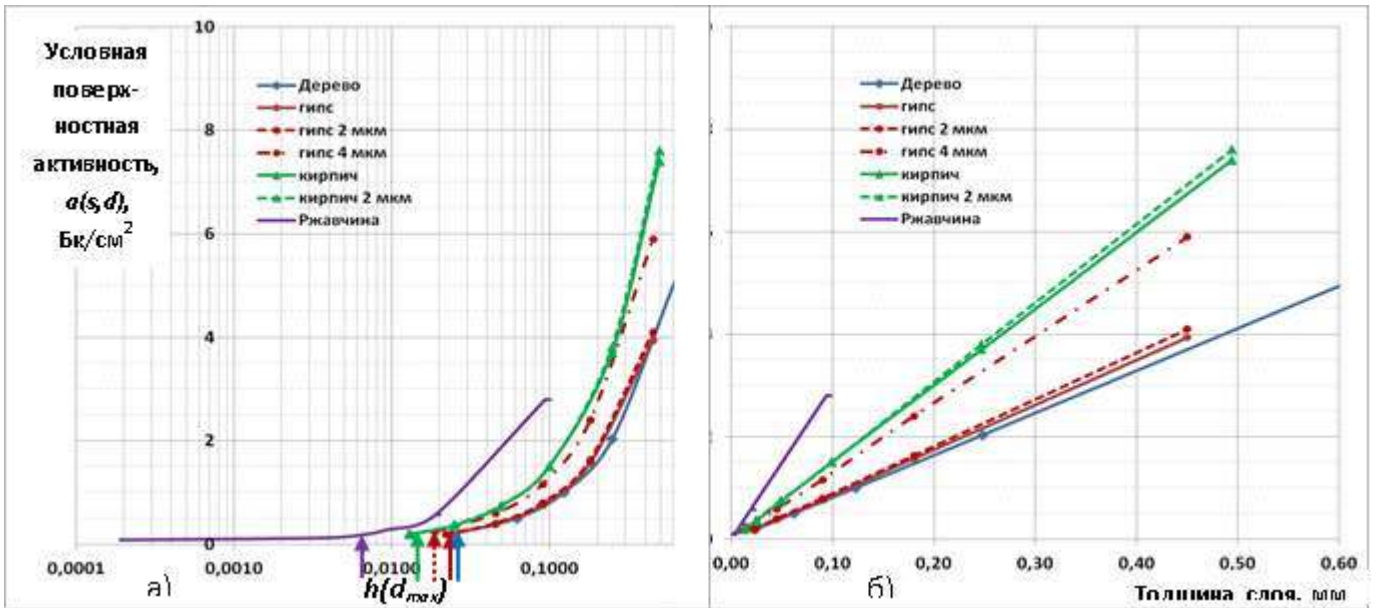


Рисунок 4.2 - Условная поверхностная активность различных материалов при загрязнении Pu-239, а) логарифмическая б) линейная шкала  $h(d)$  - толщины активного слоя. Величина 2 мкм и 4 мкм в легенде к графикам – толщина дополнительной защитной пленки на окне детектора

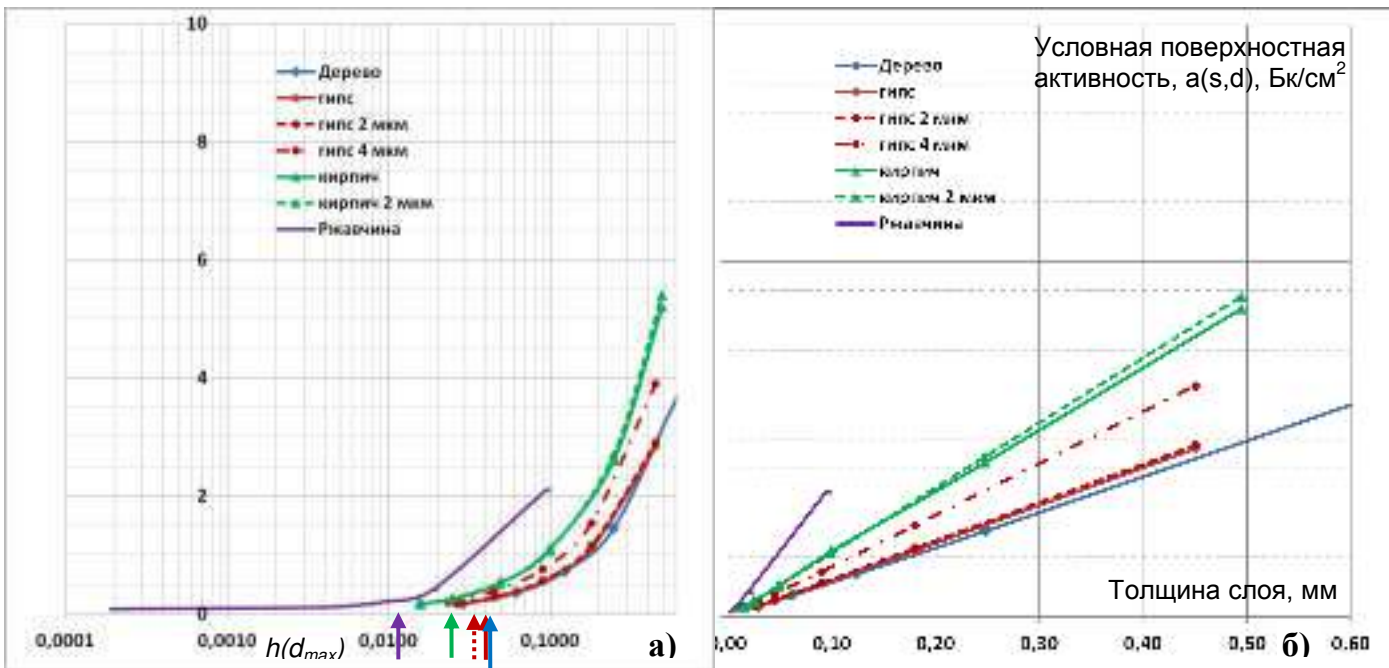


Рисунок 4.3 - Условная поверхностная активность различных материалов при загрязнении Am-241, а) логарифмическая б) линейная шкала  $h(d)$  - толщины активного слоя. Величина 2 мкм и 4 мкм в легенде к графикам – толщина дополнительной защитной пленки на окне детектора

Из представленных материалов следует, что при измерении поверхностного загрязнения с неизвестным радионуклидным составом с использованием радиометра наибольшее влияние на результаты измерений оказывают:

- энергия альфа-излучателя;
- плотность исследуемого материала;
- наличие и толщина защитной пленки.

Характер распределения радиоактивного вещества по глубине поверхностного слоя можно предположить априори, исходя из пористости материала. Так, с учетом морфологии РАО, можно сделать следующие допущения, касающиеся особенностей источника:

- металл, крашеное дерево, стекло – тонкий слой;
- пластик, резина – промежуточный слой;
- дерево, бумага, резина, ткань, бетон, кирпич, штукатурка – толстый слой.

Оценка суммарной активности радионуклидов и соответственно расчет удельной активности загрязненных объектов подробно приводятся в **главе 3**.

Исходя из зависимостей, представленных в графическом виде на рисунках 4.1-4.3, можно сделать вывод о возможности интерпретации оценки загрязнения альфа-излучателями с различной энергией пористых материалов различной плотности.

Так, при толщине слоя строительного материала (гипс, кирпич, плотность 1,1 – 2,0 г/см<sup>3</sup>), равномерно загрязненного альфа-излучателями, равной 0,5 мм, и скорости счета - 1 имп/мин см<sup>2</sup>, поверхностная плотность при загрязнении: природным ураном соответствует 12÷18 Бк/см<sup>2</sup>, для Pu-239 – 5÷7 Бк/см<sup>2</sup> и Am-241 – 3÷5 Бк/см<sup>2</sup>.

При снятии слоя такого материала размером 100x100 см (1 м<sup>2</sup>) толщиной 3 см получаем 30 л отходов массой 40-50 кг с удельной активностью около 1000 Бк/кг (или 1 Бк/г) в случае загрязнения <sup>239</sup>Pu или <sup>241</sup>Am.

В таблице 3 приведены расчетные значения поверхностной плотности загрязнения различных материалов. Поверхностная активность оценивается согласно соотношению:

$$a_{\max} = 1,72 \cdot a(d_{\max}) \quad (4)$$

Таблица 3 - Расчетные значения поверхностной плотности загрязнения различных материалов при экспоненциальном уменьшении активности по глубине

	Радионуклид					
	<sup>238</sup> U+ <sup>234</sup> U+ <sup>235</sup> U (природный)		<sup>239</sup> Pu		<sup>241</sup> Am	
Материал	10 h(d <sub>max</sub> ), мм	Поверхностная активность a(s,d), Бк/см <sup>2</sup>	10 h(d <sub>max</sub> ), мм	Поверхностная активность a(s,d), Бк/см <sup>2</sup>	10 h(d <sub>max</sub> ), мм	Поверхностная активность a(s,d), Бк/см <sup>2</sup>
Пластик	0,142	0,55	0,238	0,33	0,289	0,29
Пигмент	0,080	0,55	0,132	0,33	0,159	0,29
Ржавчина	0,039	0,55	0,065	0,33	0,078	0,29

Для материалов с малой способностью проникновения загрязнения в глубь материала оценка поверхностного загрязнения и, следовательно, удельной активности величин может рассчитываться достаточно корректно. Так, для плоского материала размером 40x70 см и массой 5 кг при показаниях радиометра 1 имп/мин см<sup>2</sup> при измерении неснимаемого загрязнения общую активность <sup>239</sup>Pu или <sup>241</sup>Am можно оценить в пределах 300-1000 Бк и удельную, соответственно 60-200 Бк/кг.

Для оценки чувствительности гамма-спектрометра с точки зрения контроля альфа-излучающих радионуклидов мы воспользовались приведенной эффективностью регистрации по их ключевым гамма-линиям (рисунок 5), допуская, что фон (обусловленный в основном Комптон-эффектом) в интервале энергий 60-200 кэВ можно считать постоянным.

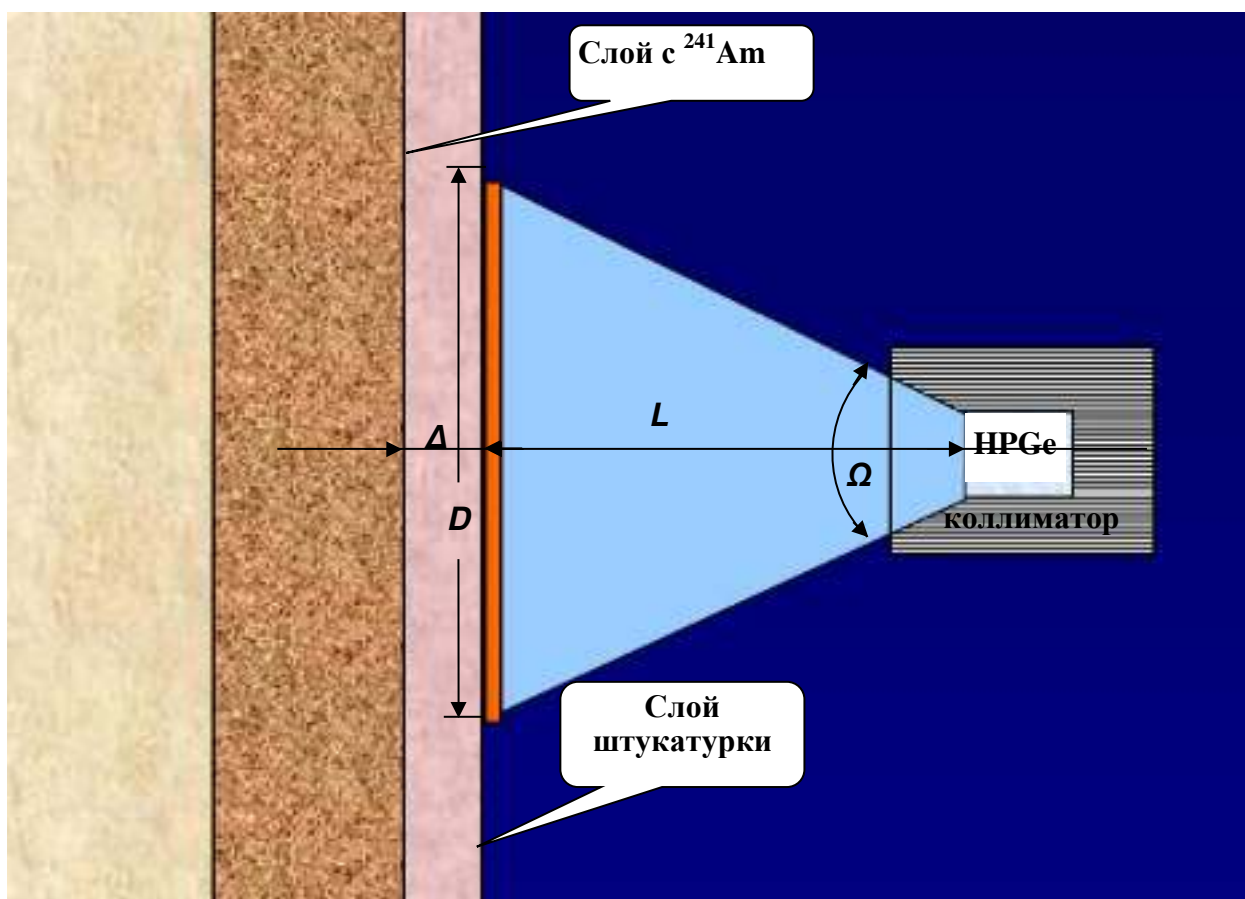


Рисунок 5 - Модель для расчета ослабления потока (изменения реальной эффективности регистрации) гамма-квантов за счет экранирования плоского источника

Эта величина будет характеризовать относительную чувствительность спектрометра при измерениях различных альфа-излучателей. Рассчитанные параметры представлены в таблице 4.

Для оценки суммарной активности радионуклидов в дезактивируемом слое и обнаружении «скрытых» загрязнений нами при расчете заданы следующие исходные условия:

*Условие 1.* Загрязнение равномерно распределено;

*Условие 2.* Слой малой толщины заштукатурен (толщина -  $\Delta$ ), материал гипс.

Получено, что объем штукатурки 223 л и практически равен объему контейнера. Для железа объем составляет 15 % от объема 200 литровой бочки, что необходимо учитывать при дальнейших работах.

На основании полученных результатов расчетов удельной и поверхностной активности альфа-излучающих радионуклидов для различных загрязненных материалов показано, что для таких материалов, как пластик, резина, металл, крашеное дерево радиометрические измерения переносным прибором при условии соблюдения геометрических факторов (расстояние до детектора, площадь источника, качество поверхности) дают достаточно корректную оценку суммарной активности радионуклидов.

Таблица 4 - Эффективность регистрации основных альфа-излучателей, присутствующих в РАО

Радионуклид (ДП)	Энергия гамма-излучения, кэВ радионуклид	Относительная эффективность регистрации, %	Выход на распад, %	Приведенная эффективность регистрации, % [ $\cdot 10^2$ ]
Th-232	238,6 (Pb -212)	3,6	43,6	1,57
U-235	185,7 (U-235)	4,2	57,0	2,39

Продолжение таблицы 4

Радионуклид (ДП)	Энергия гамма-излучения, кэВ радионуклид	Относительная* эффективность регистрации, %	Выход на распад, %	Приведенная эффективность регистрации, % [ $\cdot 10^2$ ]
U-238	63,3 (Th-234)	3,7	3,7	0,14
Np-237	86,5 (Np-237)	8,5	12,4	1,05
	98,4 (Pa-233)	8,2	16,9	1,39
Pu-238	99,9 (Pu-238)	8,2	$7,3 \cdot 10^{-3}$	$6,0 \cdot 10^{-4}$
Pu-239	51,6 (Pu-239)	8,5	$2,7 \cdot 10^{-2}$	$22,9 \cdot 10^{-4}$
Pu-240	104,2 (Pu-240)	7,8	$7,1 \cdot 10^{-3}$	$5,5 \cdot 10^{-4}$
Am-241	59,5 (Pu-238)	8,5	35,9	3,05

Исследованы возможности полевой  $\gamma$ -спектрометрии для оценки поверхностной плотности загрязнения объектов радионуклидами урана и трансурановых элементов. При наличии в составе гамма-спектрометра ОЧГ-детектора с расширенным в низкоэнергетической области диапазоном регистрации гамма-квантов, такие радионуклиды как  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{237}\text{Np}$ ,  $^{241}\text{Am}$  определяются с высокой чувствительностью по собственному излучению или по дочерним продуктам. «Проблемным» элементом является плутоний, для экспресс-оценки которого предлагается использовать  $^{241}\text{Am}$ , накапливающийся при  $\beta$ -распаде  $^{241}\text{Pu}$ . По расчетам, наиболее вероятное значение отношения активностей  $^{239}\text{Pu}/^{241}\text{Am}$  (в нашем случае – «радионуклидный вектор») варьирует в интервале от 5,0 до 10,0.

Далее в **главе 3** приводится программа радиационного обследования, разработанная по результатам радиационной оценки состояния объекта, обоснован необходимый объем инструментальных и лабораторных исследований.

Для защиты персонала и окружающей среды нами предложено зонирование радиационно опасных работ в зависимости от степени альфа- и (или) бета-загрязнения поверхностей оборудования и строительных конструкций, мощности амбиентной эквивалентной дозы в помещениях, что дало возможность оптимизировать объем радиационного контроля, рассчитать время нахождения персонала в различных зонах и обосновать применение дополнительных средств индивидуальной и коллективной защиты. Было выделено четыре зоны: чистая (фоновая), условно чистая, загрязненная и опасная (грязная) (таблица 5).

Таблица 5 - Уровни радиоактивного загрязнения поверхностей оборудования и (или) строительных конструкций, определяющие разделение помещений корпуса на зоны

Номер зоны	$\alpha$ - частиц $\cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{мин}^{-1}$	$\beta$ - частиц $\cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{мин}^{-1}$	Мощность эквивалентной дозы, мкЗв/ч	Средства индивидуальной и коллективной защиты
IV (чистая)	не более 1	не более 50	не более 0,3	Рабочая спецодежда
III (условно чистая)	от 1 до 5	от 50 до 2 000	от 0,3 до 0,6	Рабочая спецодежда, бахилы, лепесток
II (загрязненная)	от 5 до 50	от 2 000 до 10000	от 0,6 до 2,4	бахилы, лепесток, изолирующий костюм
Ia (опасная)	от 50 до 100	от 10 000 до 50 000	от 2,4 до 9,6	Однокамерный саншлюз. изолирующая маска, изолирующий костюм

Номер зоны	$\alpha$ - частиц · см <sup>-2</sup> ·мин <sup>-1</sup>	$\beta$ - частиц · см <sup>-2</sup> ·мин <sup>-1</sup>	Мощность эквивалентной дозы, мкЗв/ч	Средства индивидуальной и коллективной защиты
Ив (чрезвычайно опасная)	от 100 до 1000	от 50 000 до 100 000	более 9,6	Двухкамерный саншлюз, изолирующая маска, изолирующий костюм
Ис (аварийная)	более 1000	Более 100 000	более 9,6	Трехкамерный саншлюз с вентиляцией, изолирующие костюмы с подачей воздуха, дезактивационная кабина

\*Примечания:

- нормируется общее (снимаемое и неснимаемое) загрязнение;
- при отнесении помещения к той или иной зоне критерием является максимальный уровень локального загрязнения по альфа- или бета-излучающим нуклидам, обнаруженного в пределах помещения;
- в зонах I и II присутствует нефиксированное загрязнение.

На основе полученных данных по загрязнению напольных покрытий, стен, оборудования в помещениях, были построены картограммы, которые характеризуют пространственное распределение  $\alpha$ - и  $\beta$ -радионуклидов, а также уровень МАЭД гамма излучения. Пример построения картограммы приведен на рисунке 6. Схемы зонирования помещений корпуса «Б» по уровням радиоактивного загрязнения приведены в Приложении 1.

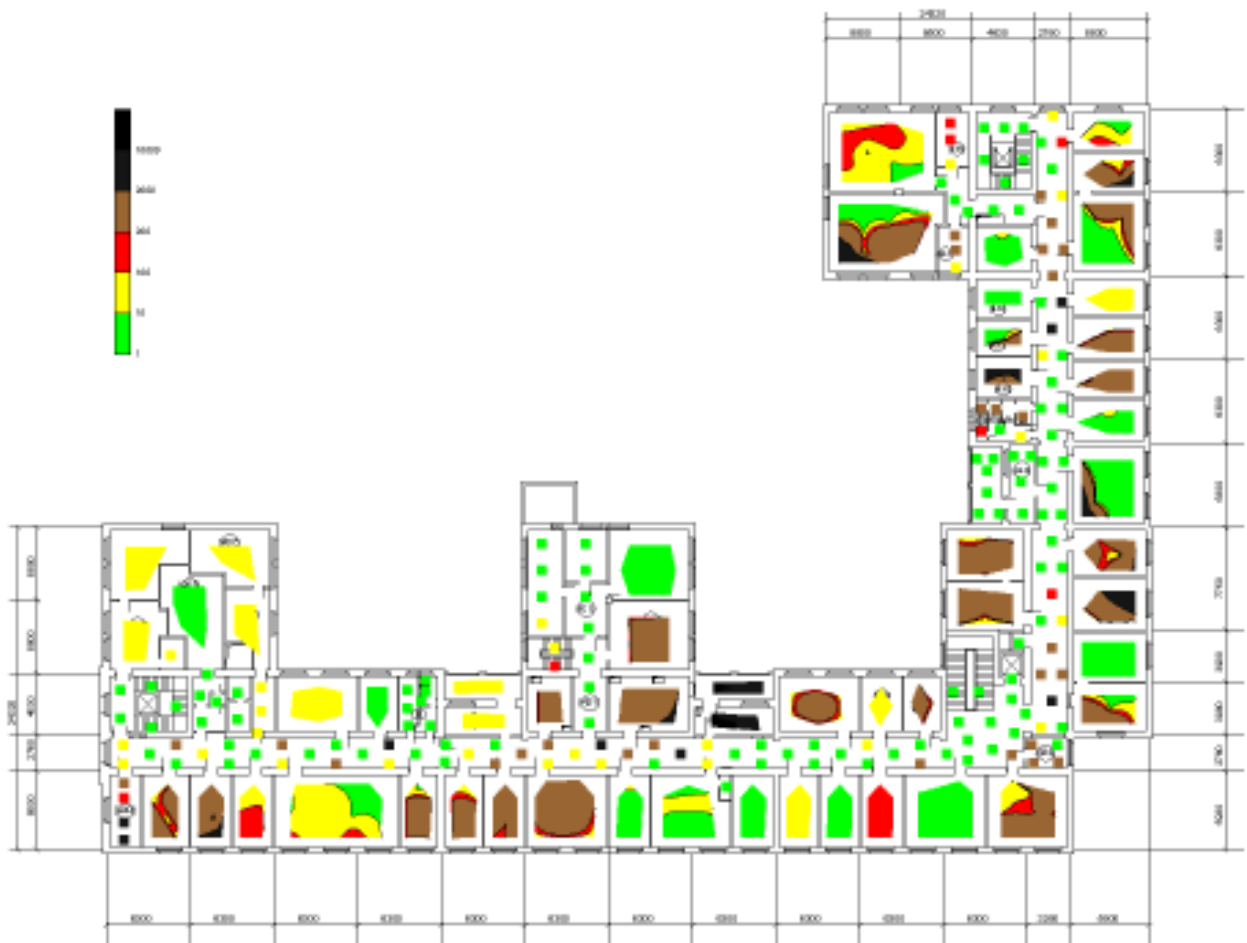


Рисунок 6 - Зонирование поверхностного радиоактивного загрязнения помещений 4 этажа по уровню загрязнения бета - излучающими радионуклидами

Далее в **главе 3** приводятся результаты практических работ по ограничению распространения радиоактивного загрязнения путем осаждения аэрозолей фракции пыли с каплями водяного тумана. На рисунке 7 приведена зависимость скорости седиментации от размера частиц воды.

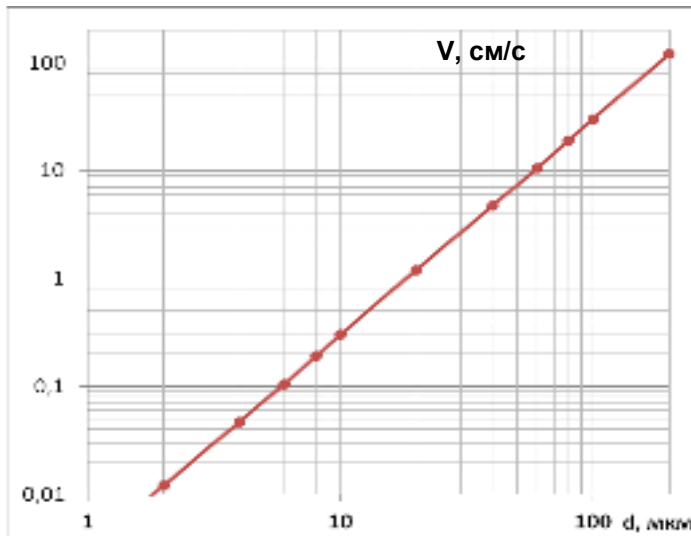


Рисунок 7 - Зависимость скорости осаждения капель воды от их размера ( $\rho = 1 \text{ г/см}^3$ )

Из диаграммы следует, что для частиц диаметром менее 60 мкм скорость оседания оценивается менее 10 см/с, это означает, что вертикальная составляющая их перемещения уже не является доминирующей и при интенсивном движении в таких помещениях конвекционные потоки вносят более существенный вклад. Расчеты показывают, что частицы плутония микронных размеров несут на себе активность порядка от 1 до 10 Бк, как правило, они ассоциированы с частицами материала значительно меньшей плотности («наездники»).

Также отметим, что при локализации в загрязненном помещении весовых количеств плутония (миллиграммы) наблюдается его повышенная мобильность в виде аэрозоля ассоциатов частиц порошка металла или безводных диспергированных соединений («наездники») с частицами материала меньшей плотности, возникающая за счет ядер отдачи и образования заряда большой плотности на траектории. Поэтому для эффективного пылеподавления необходимо проводить распыление водного аэрозоля с размером капель не менее 100 мкм. Эти мероприятия позволяют существенно понизить содержание в воздухе рабочей зоны мелкой фракции микронных размеров до допустимого содержания.

Далее в **главе 3** дается обоснование критериев радиационного состояния объекта и рекомендуются уровни остаточного загрязнения и мощности амбиентной эквивалентной дозы. Рекомендованный уровень приведен в таблице 6.

Таблица 6 - Рекомендуемый допустимый уровень МЭД в помещениях здания, выводимого из эксплуатации за счет техногенных источников излучения

Категория облучаемых лиц	Категория помещений и территорий	Допустимый уровень МЭД от техногенных источников в производственных условиях выводимых из эксплуатации объектов для населения, мкЗв/ч
Население	Любые помещения и территории, кроме помещений и территорий, предназначенных для работы персонала группы А и Б	0,06



Рекомендуемая остаточная активность радионуклидов в отходах для содержания  $^{241}\text{Am}$  и альфа-излучающих радионуклидов плутония в грунтах, строительном мусоре, металлических изделиях, равная 100 Бк/кг.

Критерием отнесения к очень низкоактивным отходам, производимых при дезактивации лабораторного корпуса «Б», являются величины удельных активностей отходов:

$$100 \leq \sum A_{\text{уд.}TRU_i} \leq 1000 \text{ Бк/кг},$$

где  $A_{\text{уд.}TRU_i}$  – удельные активности альфа-излучающих радионуклидов трансурановых элементов в строительных конструкциях внутри помещений корпуса «Б».

В главе также приводятся критерии приемлемости радиационно-безопасного состояния помещений (МАЭД, плотности потока альфа и бета-излучающих радионуклидов в строительных материалах). Критерии приемлемости и рекомендуемые уровни приведены в таблице 7.

Таблица 7 - Критерии приемлемости и рекомендуемые допустимые уровни после проведения дезактивационных работ с учетом средне-фоновых значений

Параметры контроля	Рекомендуемые допустимые уровни	Критерии приемлемости помещений
Мощность амбиентного эквивалента дозы гамма-излучения на расстоянии 0,1 м от обследуемой поверхности, мкЗв/ч	$DU_\gamma = P_\phi - 2\sigma_{\phi\gamma} + 0,06$	$P_{\text{приемл.}} \leq P_\phi - 2\sigma_{\phi\gamma} + 0,06$
Плотность потока альфа-частиц от обследуемой поверхности, $\text{мин}^{-1}\text{см}^{-2}$	$DU_\alpha = N_{\alpha\phi} - 2\sigma_{\phi\alpha} + 1,2$	$N_{\alpha\text{ приемл.}} \leq N_{\alpha\phi} - 2\sigma_{\phi\alpha} + 1,2$
Плотность потока бета-частиц, $\text{мин}^{-1}\text{см}^{-2}$	$DU_\beta = N_{\beta\phi} - 2\sigma_{\phi\beta} + 12$	$N_{\beta\text{ приемл.}} \leq N_{\beta\phi} - 2\sigma_{\phi\beta} + 12$
Удельная активность альфа-излучающих радионуклидов в строительных материалах, Бк/кг	$DU_{\text{уд.}} = A_{\text{ест}} - 2\sigma_{\text{ест}} + 400$	$A_{\text{приемл.}} \leq A_{\text{ест}} - 2\sigma_{\text{ест}} + 400$

Далее в главе 3 проводилась оценка воздействия при аварийных ситуациях при следующих условиях:

- обрушение корпуса с образованием завалов высотой 3,2 м;
- образование пылевого облака с активностью 10% от активности РАО

Результаты расчётов приведены на рисунке 8 и таблице 8.

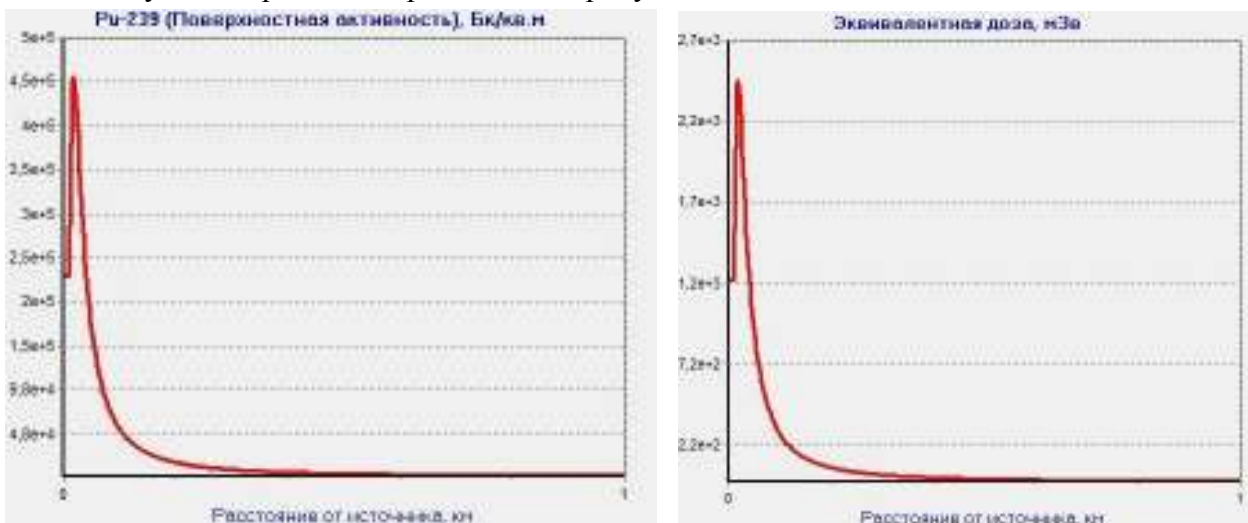


Рисунок 8 - Результаты расчета радиологических последствий

Таблица 8 - Прогнозируемые дозы для населения

Расстояние, км	Прогнозируемая доза за первые 2 суток, Гр			Прогнозируемая доза за первые 10 суток, мЗв		
	щитовидная железа (взрослые)	щитовидная железа (дети)	все тело	щитовидная железа	щитовидная железа (дети)	все тело
1	0,0014	0,0013	0,0012	1,4	1,3	4
2	0,00042	0,00041	0,00038	0,42	0,41	1,2
3	0,00022	0,00021	0,0002	0,22	0,21	0,64
4	0,00014	0,00013	0,00013	0,14	0,13	0,41
5	9,9e-05	9,5e-05	8,9e-05	0,099	0,095	0,29
6	7,5e-05	7,2e-05	6,8e-05	0,075	0,072	0,22
7	6e-05	5,8e-05	5,4e-05	0,06	0,058	0,18
8	5e-05	4,8e-05	4,5e-05	0,05	0,048	0,14
10	3,6e-05	3,5e-05	3,3e-05	0,036	0,035	0,11
12	2,8e-05	2,7e-05	2,5e-05	0,028	0,027	0,082
14	2,3e-05	2,2e-05	2,1e-05	0,023	0,022	0,067
16	1,9e-05	1,9e-05	1,7e-05	0,019	0,019	0,056
20	1,4e-05	1,4e-05	1,3e-05	0,014	0,014	0,042
25	1,1e-05	1,1e-05	9,8e-06	0,011	0,011	0,032
30	8,7e-06	8,4e-06	7,9e-06	0,0087	0,0084	0,025
40	6,2e-06	6e-06	5,6e-06	0,0062	0,006	0,018
50	4,8e-06	4,6e-06	4,3e-06	0,0048	0,0046	0,014

В главе 4 приводятся данные по эффективности метода дезактивации различных поверхностей с помощью промышленных пылесосов NILFISK 3707/10 и DELFIN DG 200 (таблица 9).

Таблица 9 - Эффективность дезактивации поверхностного альфа-загрязнения с применением промышленного пылесоса

Тип покрытия	Поверхностное загрязнение $\alpha$ -излучающими нуклидами, част/см <sup>2</sup> ·мин.		К <sub>д</sub> *, %
	До дезактивации ( $A_{до}$ )	После дезактивации ( $A_{после}$ )	
Бетонная стяжка	4,0·10 <sup>4</sup>	3,7·10 <sup>3</sup>	90,8
	4,5·10 <sup>4</sup>	4,0·10 <sup>3</sup>	91,1
	5,5·10 <sup>4</sup>	3,0·10 <sup>3</sup>	94,5
	8,0·10 <sup>4</sup>	1,8·10 <sup>3</sup>	97,8
Кирпич	3,0·10 <sup>4</sup>	4,2·10 <sup>3</sup>	86,0
	3,5·10 <sup>4</sup>	5,2·10 <sup>3</sup>	85,1
Дерево	3,7·10 <sup>4</sup>	1,5·10 <sup>4</sup>	59,5
	14,7·10 <sup>4</sup>	9,0·10 <sup>4</sup>	38,8
Ламинат	4,5·10 <sup>3</sup>	2,5·10 <sup>3</sup>	44,4
Метлахская плитка	3,7·10 <sup>3</sup>	2,8·10 <sup>3</sup>	24,3
	9,2·10 <sup>3</sup>	6,5·10 <sup>3</sup>	29,3
Мастичное покрытие	4,3·10 <sup>3</sup>	3,3·10 <sup>3</sup>	23,3
	4,7·10 <sup>3</sup>	3,7·10 <sup>3</sup>	22,3
	3,7·10 <sup>3</sup>	2,6·10 <sup>3</sup>	28,8
Битум	170	143	15,9
	240	192	20,0

\* Примечание: К<sub>д</sub> – коэффициент эффективности дезактивации,  $K_d = 100 \cdot (A_{до} - A_{после}) / A_{до}$



Установлено влияние величины исходного загрязнения  $\alpha$ -излучающими радионуклидами на эффективность дезактивации в зависимости от типа материала. Например, для дезактивации бетонных покрытий с различным загрязнением (от  $4,0 \cdot 10^4$  до  $8,0 \cdot 10^4$   $\alpha$ -част/см<sup>2</sup>·мин) характерно высокое значение эффективности дезактивации с ее соответствующим ростом (от 90,8 до 97,8 %); для кирпича, напротив, с увеличением загрязнения наблюдается незначительное снижение при сохранении достаточного уровня эффективности (от 86 до 85 %). Для дерева эффективность невысока и существенно снижается (от 59,9 до 38,8 %) при увеличении загрязнения (от  $3,7 \cdot 10^4$  до  $1,4 \cdot 10^5$  част/см<sup>2</sup>·мин). Для поверхностей типа мастичных, битумных покрытий и метлахской плитки эффективность такой дезактивации практически отсутствует (менее 30% за одну обработку поверхности).

Показано, что применение данного метода дезактивации обеспечивает эффективность от 38,8% до 97,8 % за одну обработку поверхности.

Далее в **главе 4** дается оценка воздействия на окружающую среду при нормальных условиях вывода из эксплуатации и при возможных аварийных ситуациях. Рассматриваются характеристики выбросов и их количество, и дается расчет эффективной дозы облучения населения ( $1,3 \cdot 10^{-4}$  мЗв/год) на расстоянии в 10 м от источника выбросов.

В конце **главы 4** приводятся практические рекомендации и характеристики основных типов отходов (морфологический состав) и обосновано сокращение объемов РАО в результате разработанных решений.

В **главе 5** представлено практическое внедрение результатов работы. Основные положения по внедрению результатов нашли отражение в утвержденных в АО «ВНИИНМ» документах.

## ВЫВОДЫ

1. Разработана методология экспрессной оценки объемов РАО с помощью альфа- и гамма-спектрометрии. Показана возможность использования переносных радиометров для определения поверхностной загрязненности и удельных активностей радионуклидов на загрязненных объектах с учетом их морфологии.

2. Исследованы возможности полевой гамма-спектрометрии для оценки поверхностной плотности загрязнения объектов радионуклидами урана и трансурановых элементов. Проведены расчет эффективности регистрации основных альфа-излучателей путем моделирования пространственно-энергетических параметров конкретного гамма-спектрометрического детектора методом Монте-Карло, проверка адекватности модели с помощью тестовых измерений и собственно расчет кривых эффективности. «Проблемным» элементом является плутоний, для экспресс-оценки которого предлагается использовать <sup>241</sup>Am, накапливающийся при  $\beta$ -распаде <sup>241</sup>Pu. По расчетам, наиболее вероятное значение отношения активностей <sup>239</sup>Pu/<sup>241</sup>Am («радионуклидный вектор») варьирует в интервале от 5,0 до 9,0.

3. На основании экспериментальных гамма-спектрометрических исследований с применением различных шаблонов геометрических объектов (параллелепипед, цилиндр, конус, полностью/частично заполненные активным материалом; профили в виде трубы, уголка, швеллера, двутавра, короба с поверхностным загрязнением; сферические и плоские поверхности (в т.ч. многослойные), плоские поверхности с экспоненциальным распределением активности) получены значения радионуклидных векторов (отношения активностей):

$^{239}\text{Pu}/^{241}\text{Am}$ ;  $(^{239}\text{Pu}+^{240}\text{Pu})/^{241}\text{Am}$ ;  $(^{238}\text{Pu}+^{239}\text{Pu}+^{240}\text{Pu})/^{241}\text{Am}$ ;  $(^{238}\text{Pu}+^{239}\text{Pu}+^{240}\text{Pu}+^{241}\text{Am})/^{241}\text{Am}$ ;  $(^{238}\text{Pu}+^{239}\text{Pu}+^{240}\text{Pu}+^{241}\text{Am}+^{237}\text{Np})/^{241}\text{Am}$ .

4. Выявленные уровни радиоактивного загрязнения рабочих поверхностей различных материалов и оборудования, позволяют разделить помещения корпуса «Б» на четыре зоны:

IV зона - соответствует фоновым значениям поверхностей рабочих помещений.

III зона – это уровень загрязнения  $\alpha$ -радионуклидами поверхностей помещения, оборудования, который соответствует 5 частицам/см<sup>2</sup>·мин и 2000 частицам/см<sup>2</sup>·мин для  $\beta$ -радионуклидов.

II зона соответствует значениям поверхностного помещений периодического пребывания персонала и находящегося в них оборудования, и не должны превышать 50 для  $\alpha$ -радионуклидов и 10 000  $\beta$ - радионуклидов частиц/см<sup>2</sup>·мин.

Выше этих значений, это опасное загрязнение помещений, оборудования, разделенное по три подзоны (опасная, чрезвычайно опасная, аварийная) – I зона.

Впервые проведено зонирование помещений и территории РОО на категории: чистая (фоновая), условно чистая, загрязненная и опасная (чрезвычайно опасная, аварийная) зоны, - что позволило определить время нахождения персонала в дезактивируемых помещениях и обосновать применение средств индивидуальной и коллективной защиты.

5. В ходе комплекса работ по выводу из эксплуатации радиационно-опасного объекта обоснованы и успешно реализованы система взаимодействия эксплуатирующей организации, организации-исполнителя работ, надзорных органов, комплекс защитных барьеров и мероприятий по предотвращению распространения радиоактивного загрязнения, что позволило обеспечить радиационную безопасность персонала и населения, экологическую безопасность.

6. Обосновано применение метода дезактивации промышленными пылесосами, обеспечивающего эффективность дезактивации более 80,0% за одну обработку поверхности некоторых материалов (бетон, кирпич). Для бетонных покрытий с различным загрязнением (от  $4,0 \cdot 10^4$  до  $8,0 \cdot 10^4$   $\alpha$ -част/см<sup>2</sup>·мин) характерно высокое значение эффективности дезактивации (от 90,8 до 97,8 %); для кирпича наблюдается незначительное снижение при сохранении достаточного уровня эффективности (от 86 до 85 %). Для дерева эффективность невысока и существенно снижается (от 59,9 до 38,8 %) при увеличении загрязнения (от  $3,7 \cdot 10^4$  до  $1,4 \cdot 10^5$  част/см<sup>2</sup>·мин). Таким образом, применение метода дезактивации с помощью промышленных пылесосов оправдано для пористых материалов и гладких поверхностей. На поверхностях типа мастичных, битумных покрытий и метлахской плитки эффективность метода дезактивации с помощью промышленных пылесосов не достаточна (менее 30% за одну обработку поверхности).

7. В результате внедрения рекомендаций в практику итоговый объем РАО (по сравнению с проектными значениями) сокращен на 40 % и составил  $1603,2 \text{ м}^3$  суммарной активностью  $7,76 \cdot 10^{10}$  Бк.

8. Для повышения эффективности подавления образования ресуспендированной в объеме дезактивируемого помещения тонкодисперсной (аэрозольной) фракции пыли необходимо предварительное распыление водного аэрозоля с размером капель от 100 до 400 мкм с последующим нанесением на горизонтальную поверхность слоя кварцевого песка (фракции 100-200 мкм) из расчета 200-400 г на 1 м<sup>2</sup>.

9. Разработаны мероприятия по подавлению пылеобразования в помещениях опасной («грязной») зоны с экстремально высокими уровнями загрязнения. Данные мероприятия

включали: дезактивацию промышленными пылесосами типа NILFISK 3707/10 и DELFIN DG 200 с HEPA-фильтрами; организацию трехсекционных шлюзов с «мокрой» дезактивацией на границах помещений; фиксацию загрязнения в форме тонкодисперсных фракций пыли с помощью систем туманообразования путем соосаждения с водным аэрозолем на подготовленную поверхность.

10. На основе анализа значений контрольных (допустимых) уровней, преимущественно установленных требованиями нормативных документов к защите населения, и данных о фоновых параметрах радиационных факторов рабочих помещений и оборудования обоснованы критерии радиационно-безопасного состояния объекта вывода из эксплуатации. Разработанные критерии позволяют оптимизировать объемы и технологию дезактивационных работ, включая необходимость дополнительной дезактивации помещений и оборудования.

11. Показано, что в случае радиационной аварии данное событие характеризуется Уровнем 2 (Инцидент) по Международной шкале ядерных событий (Таблица 5 INES), при этом радиологический эквивалент выброса составит 54,7 ТБк I-131.

12. При выводе объекта из эксплуатации требуется осуществление радиационного контроля воздуха рабочей зоны и выбросов в атмосферу, в частности, системы вытяжной вентиляции В1 (мощность дозы гамма-излучения, содержание и радионуклидный состав аэрозолей до и после очистки воздуха, уровень поверхностного загрязнения фильтров). При нормальных условиях вывода из эксплуатации РОО ожидаемая суммарная доза радионуклидов значительно ниже основных пределов доз (НРБ-99/2009, п.3.1.4) и регламентируемого ОСПОРБ-99/2010 предела дозы облучения населения обусловленной радиоактивными отходами (ОСПОРБ-99/2010, п. 3.12.19).

13. Вследствие близкого расположения объектов жилой застройки в случае радиационной аварии в результате обрушения здания РОО необходимо проведение укрытия населения по критерию предотвращаемой дозы за первые 10 суток на всё тело по уровню А (таблица 6.3 НРБ-99/2009).

**СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

Автором опубликовано 6 работ.

**Статьи в журналах, включенных в перечень ВАК и МБД:**

1. Ермаков, А.И. Радиационно-гигиенические подходы при выводе из эксплуатации объектов, загрязнённых техногенными альфа-излучателями [Текст] /Семеновых, И.П. Коренков, Т.Н. Лащенко, А.Б. Майзик // АНРИ. –2015. – №4. – С. 58–64.
2. Майзик, А.Б. Организационно-методические подходы при выводе из эксплуатации радиационно-опасных объектов [Текст] / А.Ю. Кузнецов, А.Г. Цовьянов, И.П. Коренков, Т.Н. Лащенко // АНРИ. –2017. – №1. – С. 2–8.
3. Майзик, А.Б. Комплексные организационные и методические подходы к выводу из эксплуатации хранилищ РАО [Текст] / И.П. Коренков, А.Г. Цовьянов, Т.Н. Лащенко, В.Н. Клочков. // Медицинская радиология и радиационная безопасность. –2019. – №64. – С. 32–39.
4. Коренков, И.П. Оценка эффективности сухого метода дезактивации поверхностного загрязнения альфа-излучающими радионуклидами [Текст] / Т.Н. Лащенко, Н.К. Шандала, А.Б. Майзик // Гигиена и санитария. –2019. – №8. – С. 878-884.
5. Коренков, И.П. Оценка объемной активности радиоактивных отходов по поверхностной и удельной  $\alpha$ -загрязненности методом переносной  $\gamma$ -спектрометрии [Текст] / А.И. Ермаков, Т.Н. Лащенко, А.Б. Майзик, В.Н. Клочков, А.Ю. Бушманов // Медицина труда и промышленная экология. –2020. – Т.60. № 7. С. 468-473.
6. Майзик, А.Б. Защита персонала от аэрозольных выбросов при проведении дезактивационных работ при выводе из эксплуатации радиационно опасных объектов [Текст] / А.Г. Цовьянов, И.П. Коренков, Т.Н. Лащенко// АНРИ. –2020. – №4. – С. 36-45.

Подписано в печать – 11.02.2022 г.

Формат 60x84/16

Бумага офсетная. Печать цифровая.

Тираж 100 экз.

Отпечатано в типографии АО «ВНИИНМ»