На правах рукописи

Чижов Константин Алексеевич

ОБЕСПЕЧЕНИЕ МОНИТОРИНГА ДОЗ ВНЕШНЕГО ОБЛУЧЕНИЯ ПЕРСОНАЛА С ПОМОЩЬЮ ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Специальность 03.01.01 – Радиобиология

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата биологических наук

Москва – 2018

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении «Государственный Научный Центр Российской Федерации – Федеральный медицинский биофизический центр имени А.И. Бурназяна (ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России).

Научный руководитель: **Крючков Виктор Петрович**,
кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России.

Официальные оппоненты: **Панов Алексей Валерьевич**,
доктор биологических наук, профессор РАН, Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии» Заместитель директора по научно-организационной и инновационной деятельности.

Степаненко Валерий Федорович,
доктор биологических наук, профессор, Медицинский радиологический научный центр им. А.Ф. Цыба – филиал Федерального государственного бюджетного учреждения «Национальный медицинский исследовательский центр радиологии» Министерства здравоохранения Российской Федерации, заведующий лабораторией.

Ведущая организация: Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (г. Москва).

Защита состоится «_20_» _сентября_ 2018 года в 10.00 часов на заседании диссертационного совета Д462.001.04 при Федеральном государственном бюджетном учреждении «Государственный Научный Центр Российской Федерации – Федеральный медицинский биофизический центр имени А.И. Бурназяна» по адресу: 123182, г. Москва, ул. Живописная, д. 46, корп. 8а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России по адресу: 123182, Москва, ул. Живописная, д. 46.

Автореферат разослан «_18_» _июля_ 2018 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор медицинских наук Шандала Наталия Константиновна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Активное развитие во второй половине XX века ядерного оружейного комплекса и атомной энергетической промышленности СССР, а затем и Российской Федерации привели к образованию более $5 \cdot 10^8$ т радиоактивных отходов (РАО), главным образом в результате оборонной деятельности (Большов, 2013), и $18{,}8 \cdot 10^3$ т отработавшего ядерного топлива (ОЯТ) (Лебедев, 2011). Отсутствие правовых требований по захоронению накопленных и вновь образующихся РАО, необходимой инфраструктуры, отсутствие значимых стимулов к снижению образования РАО привели к тому, что подавляющая часть накопленных РАО до сих пор хранится в местах их образования (Большов, 2013).

В настоящее время ведутся работы по реабилитации объектов ядерного наследия, как в Российской Федерации, так и за рубежом (Большов, 2012, 2013, 2015, Шандала, 2013). В нашей стране обеспечение радиационной безопасности персонала при таких работах должно выполняться в соответствии с санитарными правилами и нормами (ОСПОРБ-99/2010, НРБ-99/2009), а также в соответствии с рекомендациями Международной комиссии по радиационной защите (МКРЗ). Ситуация облучения на объектах ядерного наследия характеризуется как смесь ситуации существующего облучения и ситуации планируемого профессионального облучения (Sneve, 2018). Для обеспечения радиационной безопасности персонала в ситуации существующего облучения МКРЗ рекомендует, чтобы референтные уровни, установленные по индивидуальной дозе облучения, использовались в сочетании с внедрением процесса оптимизации. Более того, принципы защиты в ситуациях планируемого облучения применимы и к плановым работам, выполняемым в связи с ситуациями существующего облучения и аварийными ситуациями с того момента, как аварийная ситуация была взята под контроль (Публикации МКРЗ №103, 2007), т.е. при ликвидации последствий крупной аварии в отдалённый период времени: на средней (промежуточной) и поздней фазах развития радиационной аварии (Ильин, 2005).

В ситуациях существующего облучения эффективность обеспечения радиационной безопасности персонала, а также точность оценки индивидуальных доз облучения персонала, могут быть существенно повышены с использованием специализированных компьютерных программ – информационно-аналитических систем (ИАС). Существующие ИАС решают в основном задачу восстановления характеристик радиационных полей (дозы и мощности дозы облучения, уровней радиоактивного загрязнения) по результатам измерений, выполненных в реперных точках для всех зон и территорий, подвергшихся радиационному загрязнению, включая рабочие помещения радиационно опасного объекта (Подберезный, 2005; Kryuchkov, 2009; Труды ИБРАЭ РАН, 2013). При этом для решения задачи построения карты радиационной обстановки (РО) выбор метода интерполяции результатов радиометрического обследования (РМО) требует серьезного обоснования с учётом радиационного объекта и условий его размещения. Даже в пределах одной территории значения контролируемых радиационных параметров могут варьировать в широких пределах.

Опыт показывает, что внешнее облучение часто вносит существенный вклад в дозы персонала, участвующего в реабилитационных работах на радиоактивно загрязненной территории (Kryuchkov, 2009; Шандала 2013). Поэтому важной задачей является разработка и внедрение методов минимизации доз внешнего облучения персонала, проводящего реабилитационные работы, в соответствии с принципом ALARA (Simakov, 2008). Актуальным является решение задачи о поиске оптимальных маршрутов перемещения персонала (Глушкова, 1998; Liu, 2016). Например, во время ликвидации последствий аварии на ЧАЭС передвижение групп ликвидаторов по кратчайшему маршруту не являлось оптимальным, что привело к набору более 70% коллективной дозы на средней фазе аварии, так как выбранный маршрут пересекал след от выброса (Крючков, 2011).

Практическое применение ИАС актуально для объекта ядерного наследия: Центра по обращению с радиоактивными отходами – отделения губа Андреева Северо-Западного центра по обращению с радиоактивными отходами «СевРАО» – филиала Федерального государственного унитарного предприятия «Предприятие по обращению с радиоактивными отходами

«РосРАО» (отделение губа Андреева СЗЦ «СевРАО»). В феврале 1982 г. на данном объекте произошла радиационная авария – утечка радиоактивной воды из бассейна хранилища отработавших тепловыделяющих сборок. Ликвидация аварии проводилась с 1983 по 1989 гг., за это время в Баренцево море поступило несколько тысяч тонн радиоактивной воды. В 2002 г., на момент начала работ по реабилитации, практически все здания и сооружения объекта были аварийными, находились в процессе деградации и непрерывно загрязняли окружающую среду (Шандала, 2013). Реабилитация объекта продолжается и в настоящее время (Dowdall, 2009; Sneve, 2015; Романович, 2017), создаётся соответствующая инфраструктура для вывоза ОЯТ и РАО. Изучение опыта работ, проводимых для реабилитации отделения губа Андреева СЗЦ «СевРАО», а также методов радиационного мониторинга на предприятии позволило сформулировать цель исследования.

Целью исследования является дальнейшее развитие методов радиационного мониторинга и контроля радиационной обстановки, обеспечение радиационной безопасности персонала при обращении с РАО и ОЯТ.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие **задачи**:

1. Разработать метод оптимальной локализации точек радиационного контроля и мониторинга.
2. Разработать метод поиска участков на маршрутах передвижения персонала, вносящих максимальный вклад в коллективную дозу;
3. Разработать метод минимизации доз внешнего облучения персонала в ситуациях существующего облучения с применением теории графов;
4. Проанализировать динамику радиационной обстановки на радиоактивно загрязнённой территории с помощью метода декомпозиции временного ряда интеграла мощности амбиентного эквивалента дозы (МАЭД);
5. Построить карты плотности поверхностного радиоактивного загрязнения в рабочих помещениях и на промышленной площадке радиационно опасного объекта по измерениям МАЭД;

6. Разработать процедуру оптимизации радиационной защиты персонала при обращении с РАО и ОЯТ.

Объект исследования: информационно-аналитические системы и методы обеспечения радиационной безопасности персонала при обращении с РАО и ОЯТ на предприятиях ядерного топливного цикла.

Предмет исследования: оценка доз внешнего облучения персонала при обращении с РАО и ОЯТ для обеспечения требований радиационной безопасности по данным мониторинга и радиационного контроля.

Научная новизна:

1. Впервые разработан метод оптимальной локализации точек радиационного контроля и мониторинга поиском локальных максимумов градиента грида радиационной обстановки и кросс-валидацией.

2. Впервые для ситуаций существующего облучения построена тепловая карта распределения коллективной дозы по маршрутам передвижения персонала путём фрагментации маршрутов на элементарные ячейки с определённой дозой облучения.

3. Впервые для ситуации существующего облучения разработан метод минимизации доз внешнего облучения персонала путём нахождения оптимальных маршрутов передвижения персонала.

4. Впервые применение метода декомпозиции временных рядов для анализа радиационной обстановки позволило выявить трендовую, сезонную и остаточную компоненты временного ряда интеграла МАЭД.

5. Впервые путём численного решения уравнения Фредгольма 1-го рода методом регуляризации Тихонова решена задача построения карт плотности поверхностного радиоактивного загрязнения в рабочих помещениях и на промышленной площадке радиационно опасного объекта по результатам измерений МАЭД.

6. Впервые разработана процедура оптимизации радиационной защиты персонала при обращении с РАО и ОЯТ путём динамического трёхмерного моделирования радиационной обстановки в виртуальной среде.

Практическая значимость работы. Результаты диссертационного исследования применены при оптимизации радиационного контроля и мониторинга, минимизации доз облучения персонала при проведении работ в

рамках Российско-Норвежского сотрудничества на объектах ядерного наследия в Северо-Западном регионе России, а также показаны в исследовательских противоаварийных учениях «Организация медико-санитарного обеспечения и проведения аварийно-спасательных и других неотложных работ по ликвидации последствий радиационной аварии при обращении и транспортировке отработавшего ядерного топлива» в отделении губа Андреева СЗЦ «СевРАО», проведённых 1-3 июня 2016 г.

Разработанные методы и процедуры вошли в Методические указания МУ 2.6.5.054–2017 «Оптимизация радиационной защиты персонала предприятий ГК «Росатом». Разработанное программное обеспечение Rockville (сертификат соответствия ГОСТ Р № 0629667), EasyRAD (сертификат соответствия ГОСТ Р № 1564318) и Andreeva Planner внедрено в отделение губа Андреева СЗЦ «СевРАО» (протоколы установки программного обеспечения от 19 декабря 2013 г. и 19 мая 2014 г.), Межрегиональное управление №120 ФМБА России (акты внедрения от 20 декабря 2013 г. и 28 мая 2014 г.) и в Аварийный медицинский радиационно-дозиметрический центр ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России. Программное обеспечение Rockville использовалось в эпидемиологических исследованиях Национального института рака, США (письмо от начальника отдела исследования аварии на ЧАЭС Киохико Мабучи, 7 февраля 2017 г.).

Методология и методы исследования. Для построения карт РО по данным радиационного контроля и мониторинга использованы методы нелинейной интерполяции данных (Демьянов, 2010), для построения карт плотности поверхностного радиоактивного загрязнения – алгоритм численного решения уравнения Фредгольма 1-го рода методом регуляризации Тихонова (Тихонов, 1965). Оценка неопределенности полученных карт РО и доз облучения, выражена через величину геометрического стандартного отклонения (ГСО) в соответствии с методологией RADRUE (Kryuchkov, 2009). Метод минимизации доз внешнего облучения персонала при передвижении по загрязнённой территории разработан на основе теории графов (Харари, 1973), оценка неопределённости выполнена с применением теории нечётких множеств (Chuang, 2005). Для анализа динамики РО

использовался метод декомпозиции временных рядов процедурой сезонно трендовой декомпозиции на основе локальных полиномиальных регрессий (Cleveland, 1990). Приведённые методы и алгоритмы реализованы в виде компьютерных программ на современных языках программирования. Для планирования работ по обращению с РАО и ОЯТ с применением технологии динамического трёхмерного моделирования сценариев в виртуальной среде использована компьютерная программа Andreeva Planner (Szöke, 2014).

Достоверность результатов работы обусловлена корректным использованием математического аппарата, адекватностью разработанных методов, которые подтверждены результатами сравнений расчётов в компьютерных программах с данными инструментальной дозиметрии сотрудников отделения губа Андреева СЗЦ «СевРАО».

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. В соответствии с формулой специальности 03.01.01 «Радиобиология», охватывающей проблемы последствий ядерных катастроф (п. 9), принципы и методы радиационного мониторинга, а также проблемы радиационной безопасности (п. 10), в диссертационном исследовании представлены методы, позволяющие обеспечить требования к радиационной безопасности персонала при обращении с РАО и ОЯТ.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Локализация точек радиационного контроля и мониторинга в локальных максимумах градиента грида радиационной обстановки и точках с максимальной ошибкой кросс-валидации позволяет строить карты радиационной обстановки с высокой корреляцией между измеренными и интерполированными значениями.

2. Тепловая карта распределения коллективной дозы персонала, полученная фрагментацией маршрутов на элементарные ячейки с определенной дозой облучения, позволяет находить участки, вносящие максимальный вклад в коллективную дозу.

3. Метод минимизации доз внешнего облучения, основанный на теории графов, позволяет в ситуациях существующего облучения выявить оптимальные маршруты передвижения персонала на реабилитируемой территории.

4. Декомпозиция временного ряда интеграла МАЭД на трендовую, сезонную и остаточную компоненты позволяет детально проанализировать динамику радиационной обстановки на радиоактивно загрязнённой территории.

5. Карты плотности поверхностного радиоактивного загрязнения в рабочих помещениях и на промышленной площадке радиационно опасного объекта могут быть построены по результатам измерений МАЭД путём численного решения уравнения Фредгольма 1-го рода методом регуляризации Тихонова.

6. Процедура оптимизации радиационной защиты персонала, основанная на технологии динамического трёхмерного моделирования радиационной обстановки в виртуальной среде, позволяет обеспечить радиационную безопасность персонала при обращении с радиоактивными отходами и отработавшим ядерным топливом.

Связь темы диссертации с плановой тематикой научно-исследовательской работы учреждения. Исследования проводились в рамках Российско-Норвежского сотрудничества на объектах ядерного наследия в Северо-Западном регионе России: «DATAMAP-GIS» № M13-10/14, «DOSEMAP-2» № M13-10/15, «DOSEMAP-3» № M15-12/25, «DOSEMAP-4» № M17-14/25, «Docking» № M17-14/24, «DRIVE» № МИДН RUS-10/0059, в которых автор диссертационной работы являлся соисполнителем.

Личный вклад соискателя. При планировании, организации и проведении исследований по всем разделам и этапам работы доля участия соискателя составила не менее 80%. Основные научные результаты и выводы, содержащиеся в диссертации, получены автором самостоятельно.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационного исследования доложены и обсуждены на международных и российских научных конференциях, симпозиумах и семинарах, в том числе: 13th International Congress of the International Radiation Protection Association (Глазго, Великобритания, 2012), The R User Conference (Альбасете, Испания, 2013), Waste Management Symposium (Финикс, США, 2013 и 2014), International Conference on Radioecology and Environmental Radioactivity

(Барселона, Испания, 2014), 3-е расширенное заседание Совета проектировщиков ОАО «Концерн Росэнергоатом» и других объектов атомной отрасли (Санкт-Петербург, Россия, 2014), 14th International Congress of the International Radiation Protection Association (Кейптаун, ЮАР, 2016), Научно-практический форум «Ядерные технологии на страже здоровья» (Москва, Россия, 2016), Conference on Radiation & Health (Вайколоа Вилладж, США, 2016), 42nd Annual Meeting of the European Radiation Research Society (Амстердам, Голландия, 2016), Current and Emerging Methods for Optimizing Safety and Efficiency in Nuclear Decommissioning (Сарпсборг, Норвегия, 2017), ConRad 2017 – Global Conference on Radiation Topics – Preparedness, Response, Protection and Research (Мюнхен, Германия, 2017), 4th International Conference on Radioecology and Environmental Radioactivity (Берлин, Германия, 2017).

Апробация диссертационной работы проведена 13 декабря 2017 г. на заседании секции № 3 Ученого совета ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России, протокол № 11.

Публикации. Основные материалы диссертационной работы содержатся в 15-ти опубликованных работах, из них – 5 статей в отечественных журналах списка ВАК, 3 статьи – в иностранном журнале, входящем в Scopus и Web of Science.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, шести глав, выводов, списка принятых сокращений, списка использованной литературы, трёх приложений. Основное содержание диссертации включает текст, 48 рисунков, 11 таблиц, 29 формул, общим объемом 144 страницы. Список литературы включает 145 библиографических ссылок, в том числе 72 – в отечественных изданиях и 73 – в зарубежных. Приложения занимают 10 страниц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность решаемой проблемы, дана характеристика научной новизны, обоснована практическая значимость работы, представлен личный вклад соискателя. Сформулированы цель и задачи исследования.

В первой главе диссертации приведён обзор научной литературы о современном состоянии исследований в области разработки информационно-

аналитических систем по обеспечению радиационной безопасности персонала ИАС РБП. Рассмотрены применяемые в настоящее время методы мониторинга, радиационного контроля, обеспечения радиационной безопасности персонала при обращении с РАО и ОЯТ. Проведён анализ документов, нормативов и государственных стандартов по теме диссертационной работы.

Во второй главе диссертации представлен объём, методология и методы исследования. Обосновано создание ИАС РБП и приведено решение аналитических задач: оценка доз облучения персонала; визуализация контрольных уровней облучения; оптимизация локализации точек радиационного контроля и мониторинга для уменьшения погрешностей в расчёте доз облучения; поиск участков на маршрутах передвижения персонала, вносящих максимальный вклад в коллективную дозу.

Объём исследования включает базу данных радиационного контроля и мониторинга отделения губа Андреева СЗЦ «СевРАО», содержащую дозы облучения персонала и более 130 000 радиометрических измерений за период с 01.07.2002 по 06.02.2016, 22 анкеты ликвидаторов и 1135 карт РО в зоне аварии на ЧАЭС с 26.04.1986 по 31.12.1993.

Для исследуемой группы, состоящей из 22 ликвидаторов аварии на ЧАЭС, определён участок территории, нахождение в котором дало 10% (460 мГр, ГСО=3,0) коллективной дозы. Этот участок расположен на дороге, ведущей от г. Припять к ЧАЭС, и на нём сосредоточены $8 \cdot 10^{-4}$% маршрутов передвижения ликвидаторов, (Рисунок 1).

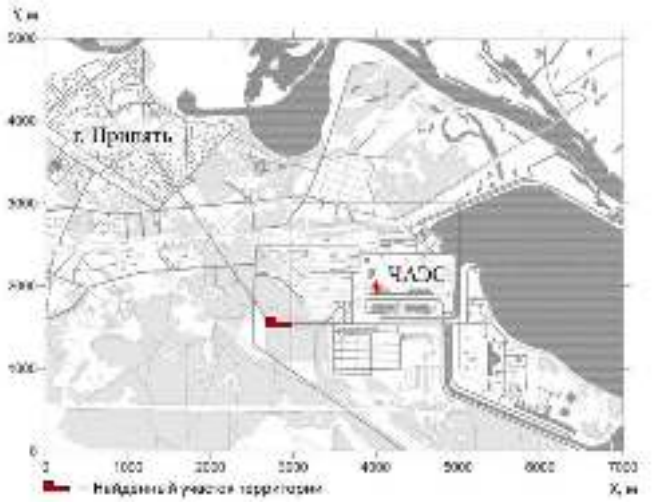

Рисунок 1 − участок территории, нахождение в котором дало 10% коллективной дозы для исследуемой группы ликвидаторов аварии на ЧАЭС

Разработанным методом оптимизации локализации точек радиационного контроля и мониторинга найдено оптимальное расположение 37 точек радиационного контроля для промышленной площадки отделения

губа Андреева СЗЦ «СевРАО», что позволило построить карты РО с высокой корреляцией между измеренными и интерполированными значениями (R=0,71) по сравнению с ранее используемой схемой, дающей среднюю корреляцию (R=0,58).

В третьей главе диссертации для ситуаций планируемого облучения разработан метод минимизации доз внешнего облучения персонала при передвижении по радиоактивно загрязнённой территории. В диссертации сформулированы и решены три «транспортные» задачи, как в пределах существующей дорожной сети, так и с построением дополнительных дорог: поиск маршрута передвижения из одного пункта в другой по территории объекта с получением наименьшей дозы внешнего облучения; поиск маршрута обхода точек радиационного контроля и мониторинга с получением минимально возможной дозы внешнего облучения; поиск маршрута обхода всей дорожной сети с получением минимально возможной дозы внешнего облучения. Каждая «транспортная» задача рассмотрена как четырёхслойный объект, Рисунок 2.

На нижнем (первом) слое Рисунка 2 представлена топографическая основа территории объекта. Второй слой, называемый «маской», является чёрно-белой схемой объекта, на которой чёрным цветом отмечены запрещённые для посещения места, а белым – разрешённые. Грид, представляющий собой таблицу значений МАЭД с координатной привязкой к схеме территории объекта, изображён на третьем слое. Четвёртый слой – граф в виде регулярной решётки, вершины которого совпадают с узлами грида. Каждая вершина графа соединена восемью ребрами с ближайшими вершинами, каждому ребру присвоен вес, численно равный дозе облучения работника при перемещении вдоль этого ребра. Для построения маршрута с минимальной дозой был использован алгоритм Дейкстры.

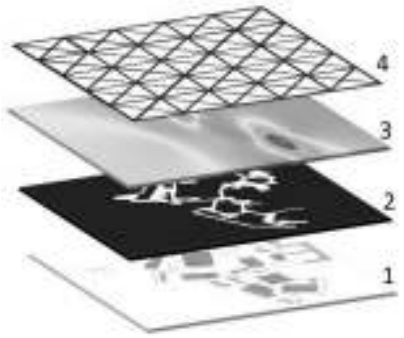

Рисунок 2– Представление «транспортной» задачи в виде четырёхслойного объекта

Разработанный метод решает задачу определения оптимальных маршрутов передвижения в условиях погрешности данных РМО, которая

существует и в ситуациях планируемого облучения, но существенно более значима в аварийных ситуациях. Корректный учёт неопределённости продемонстрирован с помощью подхода, основанного на применении теории нечётких множеств, который является общепринятым в задачах многофакторного планирования.

Для отделения губа Андреева СЗЦ «СевРАО» проведено сравнение с дозиметрическими измерениями расчётов в компьютерной программе, созданной по разработанному в диссертации методу. По условиям эксперимента, для одного из сооружений объекта была найдена оптимальная последовательность обхода точек радиационного контроля – маршрут с наименьшей дозой внешнего облучения, Рисунок 3.

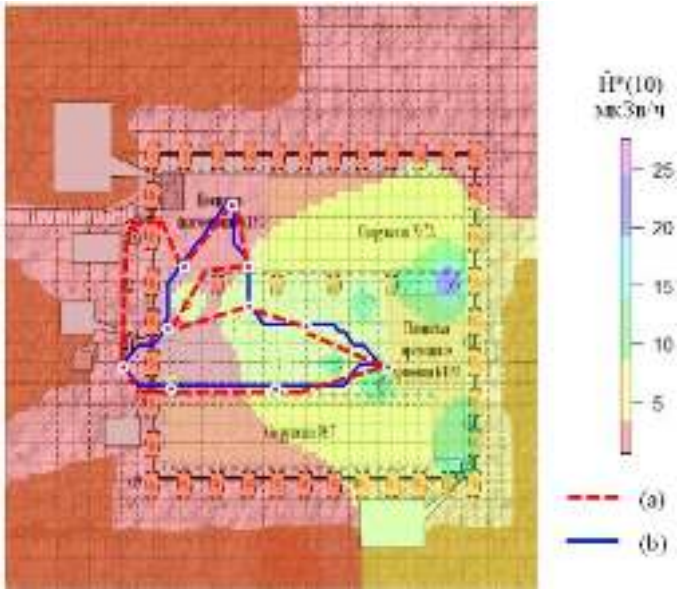

Рисунок 3 − Маршрут дозиметриста (a); маршрут, рассчитанный в программе (b). Размер карты территории: 106,5 х 85,5 м, шаг сетки: 3 м

На маршруте, пройденном дозиметристом, индивидуальный эквивалент дозы был равен $H_p(10) = 4{,}5 \pm 0{,}7$ мкЗв по показанию индивидуального дозиметра, а исходя из расчёта в программе $H_p(10) = 2{,}6$ мкЗв (ГСО = 1,7). $H_p(10)$ на оптимальном маршруте, предложенном программой, составил $2{,}8 \pm 0{,}4$ мкЗв по показанию индивидуального дозиметра, и $H_p(10) = 2{,}2$ мкЗв (ГСО = 1,7), при расчёте в программе. Таким образом, прохождение по маршруту, предложенному программой, позволяет сократить $H_p(10)$ на маршруте в 1,6 раза.

В четвёртой главе диссертации приведён детальный анализ динамики РО на промышленной площадке в губе Андреева за период подготовки к

активной фазе работ по реабилитации – вывозу ОЯТ и РАО с территории объекта. В рамках исследования по данным РМО за период с 01.07.2002 по 06.02.2016 было построено 4970 карт РО на промышленной площадке и в помещениях объекта. В качестве обобщённого показателя для анализа был использован интеграл МАЭД на промышленной площадке, вычисляемый как объём под двумерной поверхностью карты РО. В помещениях объекта РО за исследуемый период практически не изменилась, за исключением блока сухого хранения, где МАЭД над ёмкостями была снижена до 12 мкЗв/ч.

Методом сезонно-трендовой декомпозиции временного ряда интеграла МАЭД было оценено снижение данного показателя на промышленной площадке объекта, Рисунок 4. В исследовании были выделены тренд (*t*), сезонная (*s*) и остаточная (*r*) компоненты мультипликативной модели временного ряда интеграла МАЭД ($I_{\dot{H}_p(10)}$), выражение (1).

$$I_{\dot{H}_p(10)} = t * s * r \quad (1)$$

Получено, что тренд интеграла МАЭД на промышленной площадке представляет собой монотонно спадающую функцию. Начальное и конечное значения тренда интеграла МАЭД отличаются в 28 раз, Рисунок 4(b). Учитывая, что основным дозообразующим радионуклидом является ^{137}Cs, за счет его распада интеграл МАЭД уменьшился в 1,4 раза. Незначительная доля ^{137}Cs была вымыта с промышленной площадки, т.к. согласно исследованиям (Шандала, 2013; Филонова, 2014) подвижность ^{137}Cs в почве в губе Андреева составляет от 2,5 до 11,2%. Следовательно, на долю реабилитационных мероприятий приходится двадцатикратное снижение интеграла МАЭД.

С помощью сезонной составляющей показано, что из-за выпадения снега интеграл МАЭД в течение года варьирует в 2 раза, Рисунок 4(c). Остаточная компонента временного ряда интеграла МАЭД представлена в виде суперпозиции стохастической кривой, колеблющейся вокруг единичного значения и пяти пиков, Рисунок 4(d). Показано, что стохастическая кривая отражает неопределённость вычисления интеграла МАЭД, а пики на Рисунке 4(d) отмечают время проведения работ по обращению с РАО и ОЯТ.

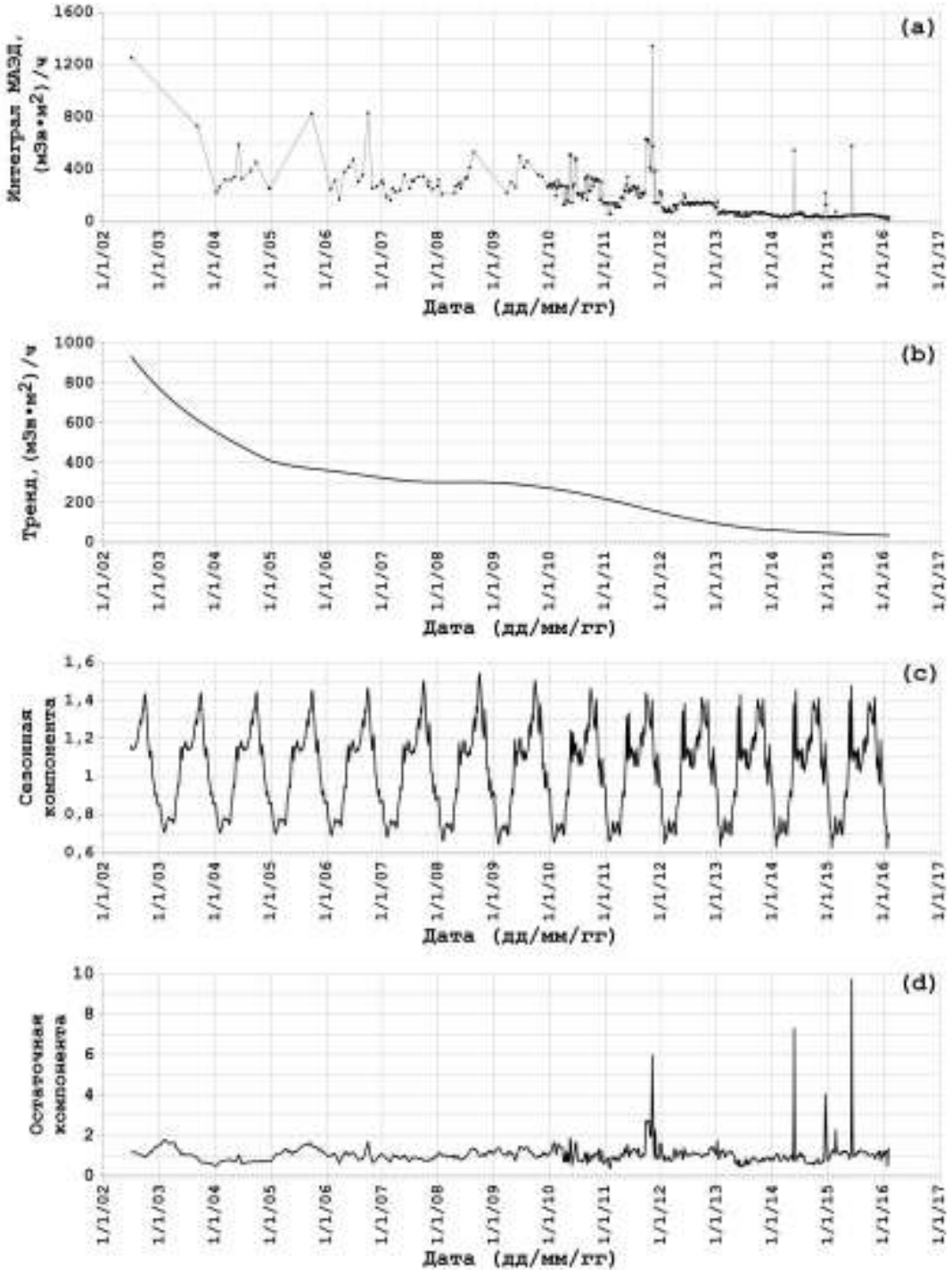

Рисунок 4 − Мультипликативная декомпозиция временного ряда интеграла МАЭД на промышленной площадке в губе Андреева в период 2002-2016 гг. (a) – исходный временной ряд, (b) – трендовая, (c) – сезонная (безразмерная величина), (d) – остаточная (безразмерная величина) компоненты исходного временного ряда

В 2008 г. были разработаны Методические указания МУ 2.6.5.05–08 «Особенности применения принципа ALARA при обращении с ОЯТ и РАО в СЗЦ «СевРАО», которые сформулировали требования по обеспечению радиационной безопасности при организации и проведении работ. Основные положения МУ 2.6.5.05–08 были практически реализованы в программах

Rockville, EasyRAD и Andreeva planner. С 2009 года применение данных программ службой радиационной безопасности объекта способствовало оптимизации реабилитационных работ. За период с 01.01.2009 по 06.02.2016 тренд интеграла МАЭД снизился в 9 раз. С учётом распада радионуклида ^{137}Cs, реабилитационные мероприятия, проведённые персоналом, привели к снижению тренда интеграла МАЭД в 7,6, при этом средняя индивидуальная доза внешнего облучения персонала за календарный год была снижена с 1,2 до 0,5 мЗв, а годовая коллективная доза – с 0,07 до 0,03 чел.·Зв.

Пятая глава диссертации посвящена решению задачи построения карты плотности поверхностного радиоактивного загрязнения (ППРЗ) в рабочих помещениях и на промышленной площадке радиационно опасного объекта по результатам измерений МАЭД.

Контроль РО включает в себя измерение МАЭД γ-излучения на рабочих местах и на территории объекта, а также измерение уровней радиоактивного загрязнения территории санитарно-защитной зоны и зоны наблюдения, радиоактивного загрязнения поверхностей рабочих помещений и оборудования (ОСПОРБ-99/2010). Результатом измерений радиоактивного загрязнения и радиоактивного загрязнения поверхностей являются значения плотности потока α- и β-частиц [част/(см^2·мин)], которую путём простого пересчёта можно представить, как ППРЗ [Бк/м^2].

ППРЗ и МАЭД как пространственные переменные имеют различную опору измерений, т.е. физический объём, подвергнутый измерению (Демьянов, 2010). Для МАЭД на высоте 1 м опорой измерений можно считать диск, в центре которого расположен детектор γ-излучения, с радиусом в несколько десятков метров. Напротив, ППРЗ имеет опору измерений, близкую к габаритным размерам детектора β-частиц (100 см^2) (МУК 2.6.1.016-99). Таким образом, оценить значение ППРЗ в любой точке контролируемого пространства по данным отдельных, достаточно редких измерений не представляется возможным.

Задача построения карты ППРЗ решается путём перехода от грида МАЭД к гриду ППРЗ. В отличие от метода конверсионных коэффициентов (МКК) (Панченко, 2016), основанного на переходе от ППРЗ к мощности воздушной кермы с использованием коэффициентов перехода, дающего

корректный результат только в случае медленно изменяющейся ППРЗ, в настоящей работе решение задачи основано на численном решении уравнения Фредгольма 1-го рода, который применим для произвольного распределения ППРЗ. Чтобы от известных значений МАЭД перейти к удельной поверхностной активности, нужно решить уравнение Фредгольма 1-го рода:

$$\dot{H}(x,y) = W \cdot \int\int \dot{Q}(x,y,\acute{x},\acute{y}) \cdot A(\acute{x},\acute{y})\, d\acute{x}d\acute{y}, \qquad (2)$$

где W [Зв/аГр] – нормировочный коэффициент (ICRP Publication 74, 1997), $\dot{H}(x,y)$ [Зв/с] – МАЭД в точке с координатами (x,y) на высоте H [м] над поверхностью земли, просуммированная по всем точечным источникам активностью $A(\acute{x},\acute{y})d\acute{x}d\acute{y}$ [Бк], расположенным на обследуемой территории в точках с координатами ($\acute{x},y\acute{}$) [м]; $\dot{Q}$ [Зв/с] – МАЭД в точке с координатами (x,y) на высоте H [м] над поверхностью земли от точечного изотропного источника с координатами ($\acute{x},y\acute{}$), создающего единичную плотность поверхностного загрязнения:

$$\dot{Q}(x,y,\acute{x},\acute{y}) = \frac{K_\gamma}{H^2+(x-\acute{x})^2+(y-\acute{y})^2}, \qquad (3)$$

где K_γ[(аГр·м^2)/(с·Бк)] – керма-постоянная радионуклида, обуславливающего ППРЗ, Н [м] – высота проведения измерений. Уравнения (2) и (3) соответствуют случаю, когда вся ППРЗ обусловлена наличием в загрязнении только одного радионуклида.

В настоящей работе уравнение (2) решено численными методами, путём его сведения к системе линейных алгебраических уравнений (4). При этом территория была представлена в виде сетки, состоящей из M·N квадратных ячеек.

$$\dot{H}(x_m,y_n) = \sum_{j=1}^{M}\sum_{i=1}^{N} \dot{Q}\left(x_m,y_n,\acute{x}_i,\acute{y}_j\right) \cdot \Delta\acute{x} \cdot \Delta\acute{y} \cdot A\left(\acute{x}_i,\acute{y}_j\right), \qquad (4)$$

где $\dot{H}(x_m,y_n)$ – МАЭД в ячейке (x_m,y_n) [Зв/с]; $\dot{Q}\left(x_m,y_n,\acute{x}_i,\acute{y}_j\right)$ [Зв/с] – МАЭД в ячейке (x_m,y_n) от точечного источника с ППРЗ $A\left(\acute{x}_i,\acute{y}_j\right)$ [Бк/м^2], находящегося в ячейке $(\acute{x}_i,\acute{y}_j)$; $\Delta\acute{x}$ и $\Delta\acute{y}$ [м] – линейный размер ячейки по осям X и Y, соответственно.

Поскольку данные инструментальных измерений всегда содержат погрешность, система линейных алгебраических уравнений (4) является некорректной, и для её решения был применён метод регуляризации Тихонова.

ППРЗ была рассчитана для основного дозообразующего радионуклида ^{137}Cs по массиву измерений МАЭД на высоте H = 1 м от поверхности земли для четырёх фрагментов промышленной площадки отделения губа Андреева СЗЦ «СевРАО»: для ручья, вытекавшего из-под здания №5; для площадки твёрдых радиоактивных отходов; для участка территории, где расположено здание №5 и блок сухого хранения; для участка промышленной площадки в районе причала. Результаты по зоне ручья, вытекавшего из-под здания № 5, показаны на Рисунке 5.

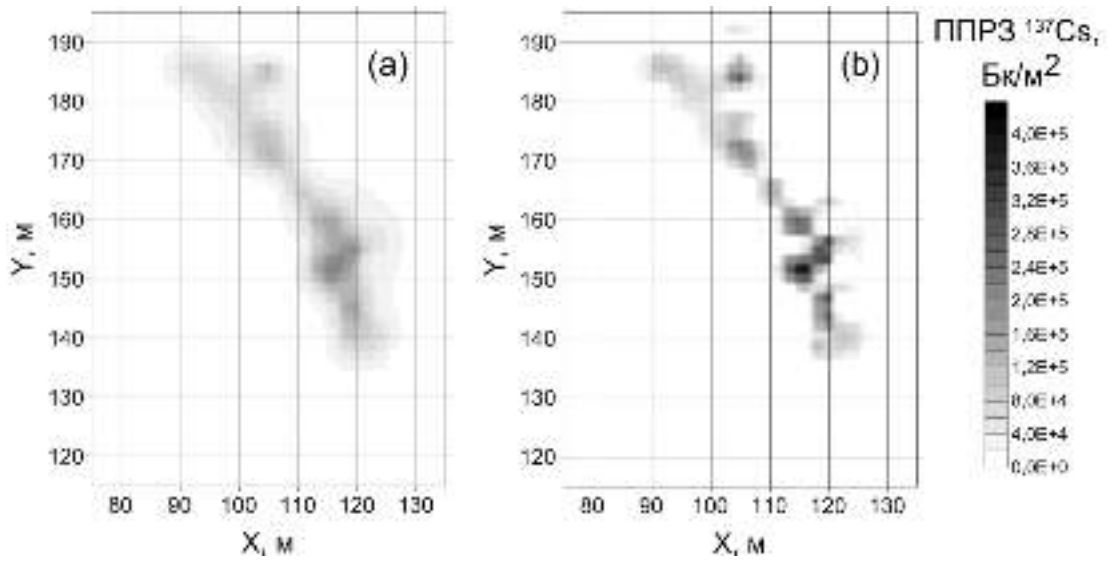

Рисунок 5 − Результаты восстановления ППРЗ ^{137}Cs по МАЭД в зоне ручья: по МКК (a), решением уравнения Фредгольма 1-го рода (b)

Получено, что площадь участков, загрязненных ^{137}Cs, определяемая по предложенному в диссертации методу в 2-4 раза меньше, чем площадь, определяемая по МКК, для которого характерно «размывание» ППРЗ в силу присущего МКК сглаживанию. Следовательно, разработанный в диссертации метод даёт более чёткое представление о площади загрязнённых участков, что позволяет значительно сократить объём работ по реабилитации.

Валидация предложенного метода восстановления ППРЗ выполнена по 245 измерениям удельной активности ^{137}Cs в пробах грунта на промышленной площадке в губе Андреева. На Рисунке 6 представлены результаты измерения удельной активности ^{137}Cs в пробах грунта в районе ручья, вытекавшего из-под здания №5 (чёрные, тёмно-серые и светло-серые квадраты), результаты расчёта ППРЗ по МКК (светло-серая зона) и по методу настоящей работы (тёмно-серая зона).

В зону ручья попали 38 из 245 спектрометрических измерений удельной активности проб грунта, причём девять измерений, отмеченных чёрным цветом, дают в сумме 82% активности по всем измерениям в зоне ручья, что практически совпадает с результатами расчётов, т.к. внутри изолиний, ограничивающих зону ППРЗ, локализовано 80% поверхностного загрязнения. Информационный коэффициент корреляции (Linfoot, 1957) между расчетными и измеренными значениями составил R = 0,68, что также доказывает адекватность метода с точки зрения реальной ППРЗ.

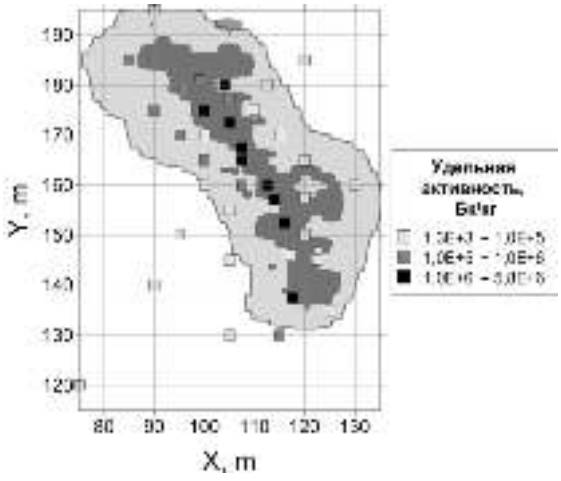

Рисунок 6 − Результаты сравнения по ^{137}Cs для ППРЗ и удельной активности в зоне ручья

В шестой главе предложена процедура оптимизации радиационной защиты персонала при обращении с РАО и ОЯТ, основанная на технологии динамического трёхмерного моделирования в компьютерной программе Andreeva Planner. Уникальность данной технологии состоит в объединении радиологической информации с трёхмерными моделями оборудования и рабочих помещений объекта. Система динамической визуализации РО в реальном времени позволяет рассматривать различные сценарии проведения работы с проспективной оценкой доз облучения персонала. Расчёт значения МАЭД в каждой точке пространства сценария происходит в реальном времени, основываясь на модели точечного ядра.

Процедура оптимизации радиационной защиты персонала при помощи Andreeva Planner включает: выбор различных маршрутов и времени

нахождения персонала в определённых секторах рабочей зоны, выбор параметров и расположения защиты, выбор числа участников работ.

Программа Andreeva planner применена в исследовательских противоаварийных учениях в отделении губа Андреева СЗЦ «СевРАО». Сценарий учений заключался в следующем: во время перевозки транспортного упаковочного комплекта на него падает вертолёт, возникает пожар и последующий выброс в атмосферу радиоактивной дисперсии с известным радионуклидным составом. При этом отсутствуют повреждения зданий, расположенных вблизи места аварии. На основании результатов моделирования РО, выполненного в пределах промышленной площадки объекта с учётом влияния, как промышленной застройки, так и состояния атмосферы (различная стратификация, сила ветра), подготовлен тридцатиминутный виртуальный сценарий работы спасателей, дозиметристов и пожарных. Помимо моделирования перемещений оборудования, техники и персонала в трёхмерном пространстве, в программе визуализировано динамическое пространственное распределение поля МАЭД вблизи места аварии с оценкой доз облучения участников сценария. Показано, что доза внешнего облучения персонала не превысит 22 мкЗв, ГСО = 3,5.

ВЫВОДЫ

1. Разработан метод оптимальной локализации точек радиационного контроля и мониторинга поиском локальных максимумов градиента грида радиационной обстановки и кросс-валидацией. Найдено оптимальное расположение 37 точек радиационного контроля для промышленной площадки отделения губа Андреева СЗЦ «СевРАО», что позволило построить карты радиационной обстановки с высокой корреляцией между измеренными и интерполированными значениями ($R = 0,71$) по сравнению с ранее используемой схемой, дающей среднюю корреляцию ($R = 0,58$).

2. Разработан метод поиска участков на маршрутах передвижения персонала, вносящих максимальный вклад в коллективную дозу путем фрагментации маршрутов на элементарные ячейки с определенной дозой облучения. Для исследуемой группы, состоящей из 22 ликвидаторов аварии на ЧАЭС, определён участок, составляющий $8 \cdot 10^{-4}$% от всех маршрутов

передвижения группы, но на котором ликвидаторами было получено 10% коллективной дозы. Дезактивацию этого участка необходимо было проводить в 1-ю очередь для минимизации доз облучения ликвидаторов.

3. Разработан метод минимизации доз внешнего облучения персонала в ситуациях существующего облучения с применением теории графов. Для здания-укрытия комплекса по обращению с твёрдыми радиоактивными отходами отделения губа Андреева СЗЦ «СевРАО» доза внешнего облучения дозиметристов при проведении радиационного контроля снижена в 1,6 раза, благодаря найденному оптимальному маршруту передвижения.

4. Применение метода декомпозиции временных рядов для анализа динамики радиационной обстановки позволило выявить трендовую, сезонную и остаточную компоненты временного ряда интеграла МАЭД на промышленной площадке отделения губа Андреева СЗЦ «СевРАО». Показано, что реабилитационные мероприятия, проводившиеся в период с 01.01.2009 по 06.02.2016 с применением разработанных в диссертации компьютерных программ, привели к снижению интеграла МАЭД в 7,6, при этом средняя индивидуальная доза внешнего облучения персонала за календарный год была снижена с 1,2 до 0,5 мЗв, а годовая коллективная доза – с 0,07 до 0,03 чел.·Зв.

5. Карты плотности поверхностного радиоактивного загрязнения радионуклида ^{137}Cs, построенные по результатам измерений МАЭД путём численного решения уравнения Фредгольма 1-го рода методом регуляризации Тихонова, позволили с приемлемой точностью оценить плотность поверхностного радиоактивного загрязнения промышленной площадки отделения губа Андреева СЗЦ «СевРАО» радионуклидом ^{137}Cs, не увеличивая объёма проводимых измерений. Для уточнения соответствия расчетных и измеренных значений плотности поверхностного радиоактивного загрязнения ^{137}Cs, вычислен информационный коэффициент корреляции. Для грунта в зоне ручья, вытекавшего из-под здания № 5 на промышленной площадке отделения губа Андреева СЗЦ «СевРАО» он составил R = 0,68, что говорит о средней корреляции данных и применимости разработанного метода.

6. Разработана процедура оптимизации радиационной защиты

персонала, основанная на технологии динамического трёхмерного моделирования радиационной обстановки в виртуальной среде, которая позволила смоделировать сценарий исследовательских противоаварийных учений, проведённых в отделении губа Андреева СЗЦ «СевРАО». Рассчитаны возможные дозы внешнего облучения персонала, оптимизирована работа спасателей, дозиметристов и пожарных. Показано, что доза внешнего облучения персонала не превысит 22 мкЗв, неопределённость оценки выражена через величину геометрического стандартного отклонения ГСО = 3,5.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Работы, опубликованные в ведущих реферируемых отечественных журналах из списка, рекомендованного ВАК при Минобрнауки России:

1. Uiba V.V., Sneve M.K., Samoylov A.S., Shandala N.K., Simakov A.V., Kiselev S.M., Siegien-Iwaniuk K., Semenova M.P., Belskikh Y.S., Kryuchkov V.P., **Chizhov K.A.**, Smith G.M. Regulation of the Spent Nuclear Fuel Management at the Andreeva Bay Site for Temporary Storage on the Kola Peninsula // Медицинская радиология и радиационная безопасность. – 2017. – Т.62. – №4.—С.12–16.

2. **Чижов К.А.**, Мазур И.К., Кудрин И.Д., Шинкарев С.М., Цовьянов А.Г., Крючков В.П., Кемский И.А. Информационно-аналитическая система по обеспечению радиационной безопасности персонала // Аппаратура и новости радиационных измерений. – 2016. – № 2(85)—С. 41–47.

3. **Чижов К.А.**, Симаков А.В., Сзоке И., Мазур И.К., Марк Н.-К., Кудрин И.Д., Шандала Н.К., Краснощёков А.Н., Косников А.С., Кемский И.А., Сневе М., Смит Г., Крючков В.П. Виртуальная реальность как инструмент повышения культуры безопасности при обращении с источниками ионизирующего излучения // Медицинская радиология и радиационная безопасность. – 2015. – Т. 60.– № 3—С. 32–40.

4. **Чижов К.А.** Программы трёхмерного моделирования для оптимизации дозовых нагрузок персонала при проведении радиационно-опасных работ // Технологии техносферной безопасности. – 2014. – № 3(55)—С. 22.

5. **Чижов К.А.**, Симаков А.В., Крючков В.П. Метод решения аналитических задач для обеспечения радиационной безопасности персонала

при планировании работ по ликвидации последствий аварии на основе интерполяции дозиметрических данных // Аппаратура и новости радиационных измерений. – 2013. – № 2(73)—С. 70–76.

Другие публикации:

6. **Chizhov K.**, Sneve M.K., Shandala N., Siegien-Iwaniuk K., Smith G., Krasnoschekov A., Kosnikov A., Grigoriev A., Simakov A., Kemsky I., Kryuchkov V. Radiation situation dynamics at the Andreeva Bay site for temporary storage of spent nuclear fuel and radioactive waste over the period 2002–2016 // J. Radiol. Prot. – 2018. – V. 38. – №2—P. 480–509.

7. **Chizhov K.**, Sneve M.K., Shinkarev S., Tsovyanov A., Smith G.M., Krasnoschekov A., Kosnikov A., Kemsky I., Kryuchkov V. Methods of Minimising Doses Incurred by External Exposure While Moving in Radiation Hazardous Areas // J. Radiol. Prot. – 2017. – V. 37. – №3—P. 697–714.

8. **Chizhov K.**, Kryuchkov V., Mark N.K., Szoeke I., Sneve M.K., Smith G. Surface contamination activity reconstruction based on measurements of ambient dose equivalent rate (NEA-RWMC-WPDD--2017-02) / Workshop on Current and Emerging methods for Optimising Safety and Efficiency in Nuclear Decommissioning. – Sarpsborg, Norway, February 7-9, 2017.—19 p.

9. **Chizhov K.**, Sneve M.K., Szőke I., Mazur I., Mark N.-K., Kudrin I., Shandala N., Simakov A., Smith G.M., Krasnoschekov A., Kosnikov A., Kemsky I., Kryuchkov V. 3D Simulation as a Tool for Improving the Safety Culture During Remediation Work at Andreeva Bay // J. Radiol. Prot. – 2014. – V. 34. – №4—P. 755–773.

10. **Chizhov K.**, Mazur I., Kryuchkov V., Kurdin I., Sneve M.K. User Interface Features of Information-Analytical System for Radiation Safety of Personnel on the Example of Northwest Center for Radioactive Waste Management "SevRAO" / Waste Management symposium. – Phoenix, USA, March 2–6, 2014.—13 p.

11. **Chizhov K.**, Simakov A., Seregin V., Kudrin I., Shandala N., Tsovyanov A., Kryuchkov V., Krasnoschekov A., Kosnikov A., Kemsky I., Sneve M. Implementation of Information Management System for Radiation Safety of Personnel at the Russian Northwest Center for Radioactive Waste Management

"SevRAO" / Waste Management symposium. – Phoenix, USA, February 24–28 2013.—10 p.

12. **Chizhov K.**, Kudrin I., Bakhanova E., Bondarenko P., Golovanov I., Drozdovitch V., Chumak V., Kryuchkov V. Method of comparison of actions of the liquidators of the accident on Chernobyl Nuclear Power Plant on the basis of fragmentation of their routes and encryption it in a form similar to the DNA //The R User Conference. – Albacete, Spain, July 10–12, 2013. – V. 10. – №. 30. – P. 19.

13. Крючков В.П., Кочетков О.А., Цовьянов А.Г., Симаков А.В., Кухта Б.А., Панфилов А.П., Тимофеев Л.В., Мазурик В.К., Голованов И.А., **Чижов К.А.** Авария на ЧАЭС: Дозы облучения участников ЛПА: аварийный контроль, ретроспективная оценка — М.: Типография ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России. 2011.—280 с.

14. Mark N.-K., Szöke I., Gustavsen M., Nystad E., Bratteli J., Bryntesen, S.T. Edvardsen T.-R., Kryuchkov V., **Chizhov K.**, Tesnov I., Sneve M.K. Use of Virtual Reality Technology for Radiation Visualisation and Real-Time Dose Calculation during the Remediation at Andreeva Bay in Russia / Enlarged Halden Programme Group Meeting. – Sandefjord, Norway, October 2–7, 2011.—11 p.

15. Симаков А.В., Абрамов Ю.В., Крючков В.П., **Чижов К.А.** Вопросы обеспечения радиационной безопасности при выводе из эксплуатации радиационных объектов // Международный научно-практический журнал «Безопасность ядерных технологий и окружающей среды» – 2011. – № 3.—С. 110-112.