ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
«ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ –
ФЕДЕРАЛЬНЫЙ МЕДИЦИНСКИЙ БИОФИЗИЧЕСКИЙ ЦЕНТР
ИМЕНИ А.И. БУРНАЗЯНА»

На правах рукописи

Чижов Константин Алексеевич

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

Специальность 03.01.01 – Радиобиология

Диссертация

на соискание ученой степени
кандидата биологических наук

Научный руководитель:
кандидат физико-математических наук
Крючков Виктор Петрович

Москва – 2018

ОГЛАВЛЕНИЕ

ОГЛАВЛЕНИЕ 2

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ 7

ВВЕДЕНИЕ 11

ГЛАВА 1. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ 20

1.1 Обеспечение радиационной безопасности персонала при ликвидации последствий радиационных аварий и на объектах ядерного энергетического комплекса 20

1.2 Применение информационно-аналитических систем для поддержки принятия решений экспертами служб радиационной безопасности 21

1.3 Существующие информационно-аналитические системы, применяемые для радиационного мониторинга и аварийного реагирования 23

1.4 Радиационный мониторинг в проекте INTAMAP 24

1.5 Оценка доз внешнего облучения участников ликвидации последствий аварии на ЧАЭС по методологии RADRUE 25

1.5.1 Оценка неопределённости доз внешнего облучения участников ликвидации последствий аварии на ЧАЭС по методологии RADRUE 27

1.6 Обзор применения математического аппарата теории графов в обеспечении радиационной безопасности 28

1.6.1 Анализ математических моделей нахождения оптимальных путей передвижения персонала и населения по радиоактивно загрязнённой территории 28

1.7 Алгоритмы оценки доз внешнего облучения персонала и их применение в компьютерных программах трёхмерного моделирования 32

1.8 Взаимное применение методов, основанных на результатах измерений мощности амбиентного эквивалента дозы и плотности поверхностного радиоактивного загрязнения 33

1.9 Заключение 34

ГЛАВА 2. ОБЪЁМ, МЕТОДОЛОГИЯ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ 36

2.1. Объём исследования 36

2.2 Методология и методы исследования 37

2.3 Информационно-аналитические системы по обеспечению радиационной безопасности персонала Rockville и EasyRAD 39

2.4 Обоснование создания информационно-аналитической системы для отделения губа Андреева СЗЦ «СевРАО» 39

2.5 Построение грида радиационной обстановки по результатам измерений мощности амбиентного эквивалента дозы 41

2.5.1 Проверка качества интерполяции при построении грида радиационной обстановки 42

2.5.2 Построение грида радиационной обстановки нелинейной интерполяцией методом кригинг 43

2.6 Радиационная обстановка в отделении губа Андреева СЗЦ «СевРАО» в 2002 году 43

2.7 Поиск оптимального расположения контрольных точек 46

2.8 Визуализация контрольных уровней на карте радиационной обстановки ... 47

2.9 Алгоритмы поиска критических областей 49

2.10 Поиск участков маршрута, вносящих максимальный вклад в коллективную дозу 51

2.11 Выводы 53

ГЛАВА 3. МИНИМИЗАЦИЯ ДОЗ ВНЕШНЕГО ОБЛУЧЕНИЯ В СИТУАЦИЯХ СУЩЕСТВУЮЩЕГО ОБЛУЧЕНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ АЛГОРИТМОВ ТЕОРИИ ГРАФОВ 55

3.1 Постановка задач минимизации доз внешнего облучения персонала 55

3.2 Решение задач перемещения по радиоактивно загрязнённой территории с применением теории графов 58

3.3.1 Оценка неопределённости найденного маршрута 62

3.3.2 Задача поиска маршрута с наименьшей возможной дозой внешнего облучения 69

3.3.3 Задача поиска маршрута оптимальной последовательности посещения контрольных точек 71

3.3.4 Задача оптимального покрытия дорожной сети 73

3.4 Экспериментальная оценка индивидуальной эквивалентной дозы дозиметристов при проведении радиационного контроля 76

3.5 Обсуждение полученных результатов 78

3.6 Выводы 79

ГЛАВА 4. АНАЛИЗ РАДИАЦИОННОЙ ОБСТАНОВКИ НА ЗАГРЯЗНЁННОЙ ТЕРРИТОРИИ С ПОМОЩЬЮ МЕТОДА ДЕКОМПОЗИЦИИ ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ ИНТЕГРАЛА МОЩНОСТИ АМБИЕНТНОГО ЭКВИВАЛЕНТА ДОЗЫ80

4.1 Характеристика отделения губа Андреева СЗЦ «СевРАО» до начала реабилитации 80

4.2 Динамика радиационной обстановки на промышленной площадке отделения губа Андреева СЗЦ «СевРАО» за период с 01.07.2002 по 06.02.2016 85

4.3 Декомпозиция временных рядов измерений мощности амбиентного эквивалента дозы на промышленной площадке отделения губа Андреева СЗЦ «СевРАО» 92

4.4 Обсуждение полученных результатов 96

4.5 Выводы 98

ГЛАВА 5. ПОСТРОЕНИЕ КАРТ ПЛОТНОСТИ ПОВЕРХНОСТНОГО РАДИОАКТИВНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПО ИЗМЕРЕННЫМ ЗНАЧЕНИЯМ МОЩНОСТИ АМБИЕНТНОГО ЭКВИВАЛЕНТА ДОЗЫ 99

5.1 Отличие мощности амбиентного эквивалента дозы от плотности поверхностного радиоактивного загрязнения 99

5.2 Плотность поверхностного радиоактивного загрязнения и мощность амбиентного эквивалента дозы как пространственно распределенные данные 100

5.3 Метод построения карт плотности поверхностного радиоактивного загрязнения 103

5.3.1 Алгоритм решения задачи методом регуляризации Тихонова 104

5.4 Результаты для модельного примера 106

5.5 Результаты для отделения губа Андреева СЗЦ «СевРАО» 106

5.6 Валидация метода 111

5.7 Выводы 114

6.1 Применение технологии динамического трёхмерного моделирования радиационной обстановки в виртуальной среде для обеспечения радиационной безопасности персонала 116

6.2 Реализация принципа оптимизации с помощью технологии динамического трёхмерного моделирования радиационной обстановки в виртуальной среде 118

6.3 Применение Andreeva Planner в противоаварийных исследовательских учениях 121

6.3.1 Исходные данные 122

6.3.2 Оценка доз облучения 124

6.4 Применение Andreeva Planner для оценки доз в нештатной ситуации 124

6.5 Выводы 125

ВЫВОДЫ ИЗ ДИССЕРТАЦИИ 127

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ..... 129

ПРИЛОЖЕНИЕ А. АКТЫ ВНЕДРЕНИЯ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ 145

ПРИЛОЖЕНИЕ Б. СЕРТИФИКАТЫ СООТВЕТСТВИЯ ГОСТ Р ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ 151

ПРИЛОЖЕНИЕ В. ПИСЬМО-ПОДТВЕРЖДЕНИЕ ОТ НАЦИОНАЛЬНОГО ИНСТИТУТА РАКА 153

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

3D	Трёхмерный
ALAP	As Low As Possible – настолько низко, насколько это достижимо.
ALARA	As Low As Reasonable Achievable – настолько низко, насколько это разумно достижимо.
AP	Andreeva Planner
EURDEP	Европейская платформа обмена радиологическими данными
HP	Halden Planner
IAEA	International Atomic Energy Agency – Международное агентство по атомной энергии
IFE	Институт Энергетических Технологий
INTAMAP	Interoperability and Automated Mapping – Взаимодействие и автоматическое сопоставление
LOESS	Метод локальных регрессий
NRPA	Государственное управление Норвегии по ядерной и радиационной безопасности
OLAP	Online analytical processing – интерактивная аналитическая обработка
RADRUE	Realistic Analytical Dose Reconstruction with Uncertainty Estimates – Реалистичная аналитическая реконструкция доз с оценкой неопределенности
STL	Seasonal Trend Decomposition using Loess – Процедура сезонно трендовой декомпозиции на основе локальных полиномиальных регрессий
АПЛ	Атомная подводная лодка
АЭС	Атомная электростанция
БД	База данных
Бк	Беккерель

БСХ	Блок сухого хранения
БТБ	Береговая техническая база
ВАК	Высшая аттестационная комиссия
ВМФ	Военно-Морской Флот
ВР	Виртуальная реальность
гб.	губа
ГИС	Геоинформационная система
ГК	Государственная корпорация
ГНЦ	Государственный научный центр
Гр	Грей, единица поглощённой дозы ионизирующего излучения в Международной системе единиц (СИ).
Зв	Зиверт, единица измерения эффективной и эквивалентной доз ионизирующего излучения в Международной системе единиц (СИ), используется с 1979 г.
ЖРО	Жидкие радиоактивные отходы
ИАС	Информационно-аналитическая система
ИАС РБП	Информационно-аналитическая система по радиационной безопасности персонала
ИБРАЭ	Институт проблем безопасного развития атомной энергетики
ИН	Идентификационный номер
ЛПА	Ликвидация последствий аварии
МАГАТЭ	Международное агентство по атомной энергии
МАЭД	Мощность амбиентного эквивалента дозы
МВК	Мощность воздушной кермы
МКК	Метод конверсионных коэффициентов
МКРЗ	Международная комиссия по радиологической защите
МР	Методические рекомендации
МРУ	Межрегиональное Управление
МРУФ	Метод решения уравнения Фредгольма 1-го рода

МУ	Методические указания
МУК	Методические указания
МЭД	Мощность эффективной дозы
НИКИЭТ	Научно-исследовательский и конструкторский институт энерготехники имени дважды Героя Социалистического Труда академика Николая Антоновича Доллежаля
НКП	Нечёткий кратчайший путь
НПО	Научно-производственное объединение
НРБ	Нормы радиационной безопасности
ОАО	Открытое акционерное общество
ОВОС	Оценка воздействия окружающей среды
ОСПОРБ	Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности
ОТВС	Отработавшая тепловыделяющая сборка
ОЯТ	Отработавшее ядерное топливо
ПВХ	Пункт временного хранения
ПО	Программное обеспечение
ПОВР	Программное обеспечение по созданию виртуальной реальности
ППРЗ	Плотность поверхностного радиоактивного загрязнения
ПТБ	Плавучая техническая база
РАН	Российская академия наук
РАО	Радиоактивные отходы
РБ	Радиационная безопасность
РЗ	Радиоактивное загрязнение
РЗП	Радиоактивное загрязнение поверхностей
РК	Радиационный контроль
РМО	Радиометрическое обследование
РО	Радиационная обстановка

РОР	Радиационно опасные работы
РТП	Ремонтно-технологическое предприятие
РФ	Российская Федерация
САБ	Спасательная аварийная бригада
СЗЦ	Северо-Западный центр
СИ	Международная система единиц
СССР	Союз Советских Социалистических Республик
СФ	Северный флот
СЦР	Самопроизвольная цепная реакция
США	Соединённые Штаты Америки
ТВС	Тепловыделяющая сборка
ТК	Транспортный контейнер
ТРО	Твёрдые радиоактивные отходы
ТУК	Транспортный упаковочный комплект
ФГБУ	Федеральное государственное бюджетное учреждение
ФГУП	Федеральное государственное унитарное предприятие
ФМБА	Федеральное медико-биологическое агентство
ФМБЦ	Федеральный медицинский биофизический центр
ФЦП	Федеральная целевая программа
ЧАЭС	Чернобыльская АЭС
ЧС	Чрезвычайная ситуация
ЯЭУ	Ядерные энергетические установки

ВВЕДЕНИЕ

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.

ГЛАВА 1. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

1.1 Обеспечение радиационной безопасности персонала при ликвидации последствий радиационных аварий и на объектах ядерного энергетического комплекса

Инциденты и аварии на предприятиях атомной промышленности показали необходимость принятия специальных мер по сохранению здоровья лиц, работающих с радиоактивными веществами [1-4]. Были выявлены последствия облучения персонала от радионуклидов и способы защиты [5]. Вопросами обеспечения и нормативно-правового регулирования радиационной безопасности [6, 7] человечество стало заниматься сразу после первых крупных аварий: на производственном объединении "Маяк" (СССР, 1957 г.) [8], в Уиндскейле (Великобритания, 1957 г.) [9], на АЭС Три-Майл-Айленд (США,1979 г.) [10] и др. [8].

Авария на Чернобыльской АЭС [11] в 1986 году (7 баллов по шкале INES [12]) оказала сильнейшее влияние на развитие методов оценки последствий радиологических аварий и методов их ликвидации. К сожалению, несмотря на развитие технологий обеспечения радиационной безопасности, в 2011 году произошла авария на АЭС Фукусима-1 [13] (7 баллов по шкале INES). Но методы, разработанные за 25 лет после аварии на ЧАЭС, способствовали более эффективной организации ликвидации последствий аварий (включая мониторинг и оценку доз облучения ликвидаторов и населения).

Помимо ликвидации последствий радиационных аварий, необходимо обеспечивать специальные меры на объектах ядерного энергетического комплекса. Основным принципом обеспечения ядерной безопасности на хранилищах РАО и ОЯТ является предотвращение возникновения самоподдерживающейся цепной реакции (СЦР) при нормальной эксплуатации и отклонениях от нормальной эксплуатации [14]. Обеспечение радиационной безопасности организуется и осуществляется с целью предотвращения недопустимого (выше установленных норм) воздействия источников

ионизирующих излучений, используемых на объектах, на персонал, население, окружающую среду [15].

Основными международными площадками для обсуждения задач радиационной безопасности являются Международная комиссия по радиационной защите (МКРЗ) и Международное агентство по атомной энергии (МАГАТЭ). МКРЗ разрабатывает рекомендации по нормированию и научному сопровождению в качестве помощи в руководстве и реализации мер радиационной защиты. Несмотря на то, что МКРЗ не имеет формального права навязывать свои предложения кому-либо, практическое законодательство в большинстве стран в основном следует ее рекомендациям. В 103-й публикации МКРЗ [16] дан общий обзор рекомендаций по оптимизации радиационной защиты. Одной из функций МАГАТЭ является разработка, установление и адаптация норм в области здравоохранения и безопасности [17].

В Российской Федерации радиационная безопасность персонала, населения и окружающей среды считается обеспеченной, если соблюдаются основные принципы радиационной безопасности и требования радиационной защиты, установленные Федеральным законом «О радиационной безопасности населения» [18], НРБ-99/2009 [15] и действующими санитарными правилами [19, 20].

На предприятиях, как правило, используются методические издания, содержащие комплекс кратких и четко сформулированных предложений по внедрению в практику эффективных методов организации труда [21]. Создание информационно-аналитической системы в виде компьютерной программы, реализующей такие рекомендации на практике, безусловно, полезно для предприятий.

1.2 Применение информационно-аналитических систем для поддержки принятия решений экспертами служб радиационной безопасности

Основополагающую роль в подготовке принятия решений играет их обоснование информацией, имеющейся у эксперта. Объемы информации, необходимой и используемой при принятии решений, достигают десятков и сотен

мегабайт, а в крупных корпоративных и общегосударственных системах – десятки терабайт [22]. Информация характеризуется многоплановостью, сложностью отображаемых объектов и систем, а также связей между объектами, явлениями и процессами, скрытостью закономерностей. Эти обстоятельства вынуждают использовать разнообразные программно-технические средства. Проблема анализа исходной информации для принятия решений оказалась настолько серьезной, что появилось отдельное направление или вид информационных систем, под которыми понимают комплекс аппаратных, программных средств, информационных ресурсов, методик, которые используются для обеспечения автоматизации аналитических работ в целях обоснования принятия управленческих решений и других возможных применений.

Основы проектирования и применения информационно-аналитических систем (ИАС) представлены в книге [22]. С точки зрения диссертационной работы рассматривается применение ИАС для поддержки принятия управленческих решений экспертами служб радиационной безопасности. Поддержка экспертов может осуществляться в следующих режимах:

- режим детализированных данных;
- режим агрегированных показателей;
- режим закономерностей.

Анализ детализированных данных и агрегированных показателей относится к оперативному или OLAP-анализу (On-Line Analytical Processing). Сфера закономерностей связана или основана на интеллектуальной обработке данных [23]. Главной задачей здесь выступает выявление закономерностей в исследуемых процессах, взаимосвязей и взаимовлияния различных факторов, поиск крупных «непривычных» отклонений, прогноз хода различных существенных процессов.

Алгоритм аналитической подготовки принятия решений имеет следующие аспекты:

- извлечение из многих источников разнородных данных, представленных в различных форматах и приведение их к единому формату и единой структуре;

- организация хранения и предоставления пользователям необходимой для принятия решений информации;
- анализ, в том числе оперативный и интеллектуальный, и подготовка плановой или регулярной оценки состояния управляемого объекта в виде бумажных документов или экранных форм;
- подготовка результатов оперативного и интеллектуального анализа для эффективного их восприятия потребителями и принятия на основе адекватных решений.

ИАС развиваются, и в последние годы в них стали использоваться и возможности геоинформационных систем [24].

1.3 Существующие информационно-аналитические системы, применяемые для радиационного мониторинга и аварийного реагирования

В обзоре систем аварийного реагирования и радиационного мониторинга [25] представлены системы, применяемые в Российской Федерации, а также системы обеспечения аварийного реагирования и примеры реализации территориальных систем аварийного реагирования и радиационного мониторинга в субъектах Российской Федерации.

Научно-техническую и экспертную поддержку территориальных систем в области оценки и прогнозирования развития ситуации, выработки рекомендаций по мерам защиты населения и территорий субъектов Российской Федерации в случае радиационных аварий и инцидентов обеспечивают центры научно-технической поддержки (например: Технический кризисный центр Институт проблем безопасного развития атомной энергетики Российской академии наук (ИБРАЭ РАН), Аварийный медицинский радиационный дозиметрический центр ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России (АМРДЦ) [26, 27]). В таких центрах используется следующее ПО: «Чистый воздух – расчет рассеяния» [28], «Гарант универсал» [29], «RECASS» [30], «SULTAN» [31], «Доза» [32], «GENGAUSS» [33], «Призма» [34], «Нострадамус» [35], «ReSCA» [36], «АРИА» [37], «СОКРАТ» [38]. В соответствии с методикой

МАГАТЭ «Общие инструкции оценки и реагирования на радиологические аварийные ситуации» [39], при ЧС необходимо рассчитывать следующие целевые функции: дозы от облака, поверхности, ингаляционную, внешнюю, полную; мощность дозы от облака, от поверхности, внешнего γ-облучения, полную; приземные концентрации радионуклидов; интегралы приземных концентраций; поверхностное загрязнение земной поверхности (плотность выпадений радионуклидов).

1.4 Радиационный мониторинг в проекте INTAMAP

Проект INTAMAP [40] является проектом по разработке системы для автоматического отображения критических параметров окружающей среды в реальном времени, используя пространственно-статистические методы и открытые веб-стандарты обмена данными и визуализации. Проект состоит из 2-х частей: программы расчёта карт интерполяции и интерфейса пользователя.

Данные в систему INTAMAP поступают из европейской платформы обмена радиологическими данными (EURDEP) [40]. На данных момент EURDEP включает 33 европейские страны. Частота обновления данных – не реже чем 1 раз в сутки, а при аварии – не реже одного раза в 2 часа. На практике, для многих станций мониторинга, возможно ежечасное поступление новых данных. Суммарно во всей сети находится более 4000 станций [40, 41].

Карты территорий хранятся на сервере. Интерполяция данных происходит методом «обычный кригинг» [42] в статистическом пакете R, код интерполяции написан разработчиками [40]. Интерполированные данные сохраняются в виде изображений на сервере и по запросу клиента отображаются через веб-интерфейс. В системе отсутствует расчёт доз по маршрутам и набор аналитических задач для принятия решений.

1.5 Оценка доз внешнего облучения участников ликвидации последствий аварии на ЧАЭС по методологии RADRUE

Задача реконструкции доз, т.е. их определение спустя длительное время (месяцы, годы и десятки лет) после облучения, имеет исключительно важное социальное значение для адресной реабилитации пострадавшего персонала и населения. Кроме того, она необходима для эпидемиологических исследований, когда изучается связь между уровнем заболеваемости и величиной полученной дозы [43].

Для ретроспективной оценки доз внешнего облучения участников ликвидации последствий аварии на ЧАЭС была разработана методология реконструкции доз аналитическими методами с оценкой неопределенности RADRUE [44]. Она была применена для дозиметрического обеспечения исследований по лейкозам и другим злокачественным заболеваниям крови.

Методология RADRUE использовалась для оценки доз внешнего облучения, поскольку определяющим радиационным фактором воздействия на участников ликвидации аварии на ЧАЭС являлось внешнее γ- и β-излучение [45]. Главная идея разработки метода проста и состоит в определении дозы внешнего облучения как произведения мощности дозы излучения, воздействующего на человека, на время его облучения (метод «time and motion»). Доза внешнего облучения *D,* набранная ликвидатором за некоторое время при нахождении в поле излучения, может быть представлена как сумма произведений нескольких величин:

$$D = C\sum_{i=1}^{n} P(x(t_i), y(t_i), t_i) \cdot \Delta t_i \cdot L_i \ , \qquad (1)$$

где $P(x(t_i),y(t_i),t_i)$ – мощность экспозиционной дозы (мР·ч$^{-1}$) в месте, где находился ликвидатор в момент времени t_i. C – коэффициент перехода от экспозиционной дозы к интересующей нас величине, например к поглощенной дозе в красном костном мозге. Координаты $x(t_i)$, $y(t_i)$ описывают локализацию ликвидатора в

момент времени t_i; n – число временных интервалов (не обязательно равных) $\Delta t_{i,}$ в течение которых мощность дозы можно считать постоянной. L_i – фактор места.

Вычисление неопределенностей в RADRUE выполняется через статистическое моделирование, когда первичные значения параметров из формулы (1): t, x, y и P рассматриваются как стохастические величины, а результирующее распределение дозовых оценок по формуле (1) получается как результат повторяющихся вычислений со случайными значениями параметров. Подчеркнем, что здесь речь идет только о неопределенностях величин, которые входят в формулу (1). Помимо этого, есть неопределенности, связанные с полнотой информации о действиях ликвидатора. Переход от экспозиционной дозы к дозе на органы в формуле (1) совершается с помощью соответствующих переходных коэффициентов [46].

Входные данные для расчета методом RADRUE:

- база данных карт радиационной обстановки;
- база данных по выпадению радионуклидов в почве по 30-км зоне отчуждения;
- аналитические формулы для расчета мощностей доз, выведенных для территорий, по которым нельзя воспользоваться картами радиационной обстановки;
- база данных прямых и косвенных поправок (фактор места, уровень неопределённости);
- данные из анкет ликвидаторов (периоды и места пребывания в зонах повышенного облучения и другие существенные сведения, влияющие на уровень поглощенной дозы).

Вычислительный модуль RADRUE позволяет оценить дозы облучения при выполнении сколь угодно сложной работы путем расщепления этой работы на последовательность элементарных действий, в ходе которой атрибуты, характеризующие эту работу (коэффициенты защиты, радиационная обстановка), остаются неизменными [47].

Таким образом, для оценки доз методом RADRUE возможно использовать как набор измеренных в результате проведения РМО, например, значений мощности дозы облучения, так и значения, рассчитанные в другой ИАС.

1.5.1 Оценка неопределённости доз внешнего облучения участников ликвидации последствий аварии на ЧАЭС по методологии RADRUE

В диссертационной работе для оценки неопределённости грида и неопределённости дозы, полученной при прохождении маршрута, была использована методология RADRUE.

Ключевым предположением при оценке неопределенностей в значениях мощности эффективной дозы (МЭД), либо мощности амбиентного эквивалента дозы γ-излучения МАЭД (в соответствии с рекомендациями Публикации №103 МКРЗ [16]), является предположение о логнормальном законе распределения МЭД в любой точке, где ликвидатор мог выполнять работу. Это предположение остается в силе независимо от того, каким методом была выполнена реконструкция МЭД: с помощью метода интерполяции кригинг, рассчитана по известным выпадениям радионуклидов, интерполяции или экстраполяции. В соответствии со сделанным предположением оценка неопределенности реконструированных значений МЭД сводилась к определению величины геометрического стандартного отклонения (ГСО), β_g [44]. Из каждого файла данных с измерениями РО последовательно исключалось одно измерение МЭД. Затем значение МЭД реконструировалось в исключённой точке методом интерполяции по оставшимся данным. После этого реконструированное значение МЭД сравнивалось с измеренным значением МЭД и определялась разность между измеренным и реконструированным значениями логарифма дозы. Затем процедура повторялась сначала уже для другой точки из файла данных до тех пор, пока процедура не была выполнена для всех точек рассматриваемого файла данных. В результате, если файл данных содержал *n* экспериментальных точек, то образовывалась выборка из *n* разностей. Для этой выборки определялось значение

ГСО, которое затем и приписывалось распределению возможных доз в каждой точке топоосновы, которой соответствовал использованный файл данных. Так как неопределенность измеренного значения МЭД в точке существенно ниже, чем неопределенность реконструированного значения МЭД, то такая процедура была вполне оправдана.

1.6 Обзор применения математического аппарата теории графов в обеспечении радиационной безопасности

После аварий на ядерных объектах с выбросом радиоактивных материалов за пределы объекта огромную роль играет правильное и своевременное проведение контрмер [48]. Одной из важнейших проблем при ликвидации последствий ядерных аварий является проблема эвакуации населения. В зависимости от эффективности проводимой эвакуации будет зависеть доза, полученная населением, и воздействие (эффекты), оказываемое на здоровье.

При создании программных систем, моделирующих и просчитывающих различные варианты проведения защитных мероприятий, главным критерием является здоровье людей, поэтому в данной работе под оптимизацией мы подразумеваем минимизацию доз, не рассматривая стоимость проведения защитных мероприятий [48].

1.6.1 Анализ математических моделей нахождения оптимальных путей передвижения персонала и населения по радиоактивно загрязнённой территории

В работе [49] проведен анализ существующих моделей нахождения оптимальных путей экстренной эвакуации населения. Анализ продемонстрировал отсутствие моделей, позволяющих в континуальной (нерешёточной) постановке найти оптимальные маршруты полной экстренной эвакуации населения из динамической зоны ЧС, когда часть или вся дорожная сеть оказывается недоступной и когда скорость перемещения эвакуируемых колонн зависит от степени воздействия на нее агрессивной среды [50]. Не получила решения задача

оперативного выбора маршрутов эвакуации как по доступной динамичной транспортной сети, так и в условиях бездорожья.

В работе [49] рассматривается величина накопления воздействия агрессивной среды на человека, такой величиной в условиях радиационной аварии выступает доза облучения. Помимо алгоритма Дейкстры [48], рассмотрены алгоритмы поиска оптимального маршрута по цифровой (растровой карте) местности [51] и методом эволюционного моделирования [52].

Развитие алгоритма Дейкстры под названием A* [53] (алгоритм поиска по первому наилучшему совпадению на графе, который находит маршрут с наименьшей стоимостью от начальной вершины до конечной) представлено в статьях [54, 55]. Алгоритмы, описанные в обзоре, разработаны для движения с постоянной скоростью по территории с неизменной радиационной обстановкой, представленной в виде сетки значений (грида) с равномерным шагом по осям.

Учёт наличия зон запрета для движения осуществляется с помощью специального «слоя препятствий». Такой слой представляет собой матрицу с такими же размерами, как и у матрицы грида, содержащую значения 1 или 0 (где 1 – обозначает препятствие, 0 – свободное пространство). Движение между узлами двумерной сетки осуществляется в 8-ми направлениях: вперёд, назад, влево, вправо и по 4-м диагоналям (Рисунок 1).

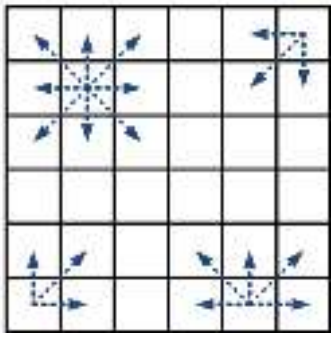


Рисунок 1 – Движение по двумерной сетке

Формула расчёта дозы облучения на маршруте из статьи [55] приведена в выражении (2)

$$D \approx \sum_{k=1}^{n-1}(R_k\,(i,j) + R_{k+1}(i,j)) \times l \times \frac{x_k}{2v} \qquad (2)$$

$$x_k = \begin{cases} 1.4, \text{ если участок маршрута } (P) - \text{это диагональ в гриде } k \\ 1 \text{ , в ином случае} \end{cases},$$

где D – доза облучения на маршруте, v – постоянная скорость движения, $R_k(i,j)$–мощность дозы в ячейки грида с координатами (i,j), l – длина стороны ячейки грида, n–номер узла грида.

Развитием ИАС является включение аналитических алгоритмов в системы трёхмерной динамической визуализации. С развитием компьютерной техники повышаются вычислительные мощности, поэтому и возрастают возможности для моделирования. Примеры таких 3D-систем рассмотрены в публикациях [55-57]. В данных публикациях рассматриваются возможности применения таких виртуальных систем в качестве тренажёров для тренировки персонала. Психологические аспекты тренировки персонала на объектах ядерного наследия на виртуальных тренажёрах изложены в публикации [58].

Методы теории графов используются в системе RODOS [59, 60], предназначенной для управления последствиями чрезвычайных ситуаций, вызываемых радиационными авариями. Одной из основных целей системы является моделирование аварийных контрмер (укрытие, эвакуация, дезактивация и т.д.) и оценка радиологических и экономических последствий при принятии мер и без них.

Дозы облучения в RODOS вычисляются отдельно тремя способами (от облака, облучение от земли, ингаляционный путь поступления), а затем суммируются по этим трем показателям. Определение доз варьируется для взрослых и детей, а также для органов: доза, получаемая легкими, костным мозгом, щитовидной железой, половыми органами и всем телом.

В работе сделаны допущения:

- область загрязнения и сеть автодорог являются неизменными за время проведения эвакуации, т.е. расчет происходит на основе ретроспективной, а не прогностической информации.

- имеется стационарная зараженная зона, из которой надлежит провести эвакуацию;
- имеется карта дорог и населенных пунктов, где произошла авария;
- заданы типы дорог (грунтовые, шоссейные) и их пропускная способность;
- заданы количество населения и их распределение по возрастным группам.

Таким образом, система RODOS предназначена для решения задач организованной [48] эвакуации трех типов:

- Задача 1. Задача коммивояжера. Оптимизация может проводиться как по длине маршрута, так и по времени, а также по дозе, полученной автобусом, и, соответственно, людьми, в нём находящимся.
- Задача 2. Необходимо определить такой маршрут транспортного средства, при котором доза, получаемая людьми в дороге, будет минимальной. С математической точки зрения эта задача соответствует задаче нахождения кратчайшего пути на графе.
- Задача 3. Здесь необходимо учитывать возможности пересечения маршрутов различных колонн транспорта по времени и по дорогам, необходимо учитывать время, затрачиваемое на посадку, пропускные способности дорог и их распределение по типам (грунтовые, шоссейные) и т.д. С точки зрения математической постановки эти задачи используют аппарат теории расписаний.

Программа RODOS работает с сеткой 41x41, где одна ячейка – это квадрат со стороной 1 км. Такой размер сетки может быть недостаточным для адекватной оценки дозы вблизи эпицентра аварии.

Необходимо отметить, что уровни доз изменяются во времени и RODOS получает информацию об уровнях доз в дискретные интервалы времени. Алгоритмы расчёта выбраны такие, чтобы время их работы было сравнимо с интервалами изменения доз. Это условие важно для таких задач, как задача коммивояжера, которая является NP-полной (NP-полнота означает, что вычислительное время алгоритма возрастает экспоненциально с возрастанием числа узлов графа). Начальные условия для решения задачи таковы: заданы типы

дорог (грунтовые, шоссейные) и их пропускная способность, заданы количество населения в населенных пунктах и их распределение по возрастным группам.

1.7 Алгоритмы оценки доз внешнего облучения персонала и их применение в компьютерных программах трёхмерного моделирования

В предыдущих разделах были проанализированы ИАС, проводящие расчёты на основе данных измерений либо вычислений МАЭД. Существуют также методы оценки доз внешнего облучения персонала на основании информации о радиоактивных источниках (активность источника и его местоположение) [61].

С 1997 года в Институте Энергетических Технологий (IFE) исследуется применение технологий виртуальной реальности для обучения персонала. Одна из технологий – это программное средство для динамического трёхмерного моделирования радиационно опасных работ с визуализацией радиационной обстановки в реальном времени, и расчётом доз участников работ, Halden Planner (HP). HP применяется для:

- Создания детального сценария проведения работы в 3D с привязкой ко времени;
- 3D-визуализации радиационного поля в реальном времени;
- Оценки доз персонала;
- Моделирования различных вариантов работы и выбор оптимального;
- Тренировки персонала.

При проведении радиационно опасных работ человек с помощью органов чувств не может адекватно оценить уровень воздействия на него радиации, т.е. она выступает в роли невидимого психологического стрессора. Поэтому крайне необходимо разработать технологии и эффективные программы тренировки для повышения безопасности персонала. В 2004 году разработана технология для отображения уровней радиационного облучения в виртуальной среде [62]. В 2013 году разработан навигационный алгоритм для минимизации дозы, построенный на основе беспроводной сети сенсорных устройств [63]. В 2014 году разработаны

системы тренировки персонала в работах по выводу из эксплуатации ядерных объектов [64], основанные на применении очков виртуальной реальности.

HP, NARVEOS [65] и другое программное обеспечение (ПО) [56, 57, 66, 67] для расчётов использует алгоритм точечного ядра и факторы накопления [68, 69]. Это позволяет проводить расчёты и визуализировать радиационную обстановку в реальном времени.

Однако платой за быстроту является качество расчёта. Поэтому, для адекватной проверки результатов рекомендуется использовать метод Монте-Карло, реализованный в программах MCNP [70] или GEANT4 [71]. Не будем исключать и возможного появления в будущем систем, позволяющих с достаточной точностью проводить расчёты методом Монте-Карло в реальном времени [72].

1.8 Взаимное применение методов, основанных на результатах измерений мощности амбиентного эквивалента дозы и плотности поверхностного радиоактивного загрязнения

Расчёт МАЭД на основе карт плотности поверхностного радиоактивного загрязнения (ППРЗ) всегда может быть произведён на основе известных формул [73], как для помещений [69], так и для загрязнённых территорий [74, 75, 76]. Обратная задача восстановления ППРЗ на открытых площадках и в помещениях радиационно опасного объекта по данным измерений МАЭД является нетривиальной. Решение данной задачи позволяет осуществить взаимодействие ПО, основанного на различных методах оценки доз облучения (разделы диссертации 1.4 и 1.5 с одной стороны и 1.7 – с другой), а значит, усилить возможности служб РБ.

В презентации [77] приведён инструмент оценки загрязнённости грунта, основанный на определении соотношений между МАЭД и поверхностным загрязнением в тех местах, где имеются данные как по МАЭД, так и по радионуклидам. Такой инструмент позволяет оценить удельную концентрацию нуклидов в тех точках, где была измерена только МАЭД. В статье [78]

представлен вариант решения задачи о восстановления активности и радионуклидного состава источника по измерениям мощности дозы γ-излучения для аварии на АЭС «Фукусима-1».

Существуют модели реконструкции полей радиоактивного загрязнения территорий, основанные на данных измерений МАЭД и решении уравнений переноса и диффузии примеси в атмосфере [79]. Хотя применение методов прямого моделирования переноса загрязняющих примесей даёт возможность вполне корректного описания полей концентраций, но в ряде случаев этот подход сталкивается со значительными затруднениями. В первую очередь – это возможность обеспечения используемых моделей необходимой входной информацией, так как практически всегда существует неопределённость в высоте и мощности взрыва, распределении радиоактивных частиц по размерам, определении текущих метеорологических условий. Привлечение же дополнительной экспериментальной информации о полях радиоактивного загрязнения приводит к необходимости создания моделей реконструкции [80]. Принципы построения такого типа моделей достаточно разнообразны и носят обычно компромиссный характер между модельными описаниями процессов загрязнения и данными наблюдений [81].

В основном применяются метод конверсионных коэффициентов (МКК), основанный на переходе от ППРЗ к мощности воздушной кермы (МВК) [82] или к МАЭД [75,83] с использованием соответствующих коэффициентов перехода. Однако МКК можно применять только в условиях медленно меняющейся по поверхности ППРЗ. В иных случаях, когда МКК не обеспечивает необходимой точности пересчета, необходим более эффективный метод перехода от МВК (либо МАЭД) к ППРЗ. Такой метод был разработан в рамках диссертационной работы.

1.9 Заключение

ИАС РБП в настоящее время используются персоналом предприятий для поддержки принятий решений при обращении с РАО и ОЯТ, реабилитации радиоактивно загрязнённой территории, проведении радиационного контроля и

мониторинга. Для повышения эффективности в процессе принятия решений необходимо расширить такие системы путём разработки и внедрения новых методов и методологий оценки и прогнозирования доз внешнего облучения.

После анализа современной литературы и применяемых ИАС РБП, сформулирована цель и задачи исследования. Решение задач исследования представлено в последующих главах.

ГЛАВА 2. ОБЪЁМ, МЕТОДОЛОГИЯ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

2.1. Объём исследования

Для организации сбора и структурирования данных радиационного контроля и мониторинга радиационной обстановки в отделении губа Андреева СЗЦ «СевРАО» была разработана база данных и специализированный интерфейс (Рисунок 2). Затем, архив данных радиационного контроля и мониторинга был переведён в электронную базу данных, что упростило работу с ним. В интерфейсе базы данных организована удобная навигация по разделам, расстановка точек контроля производится непосредственно на выбранной схеме.

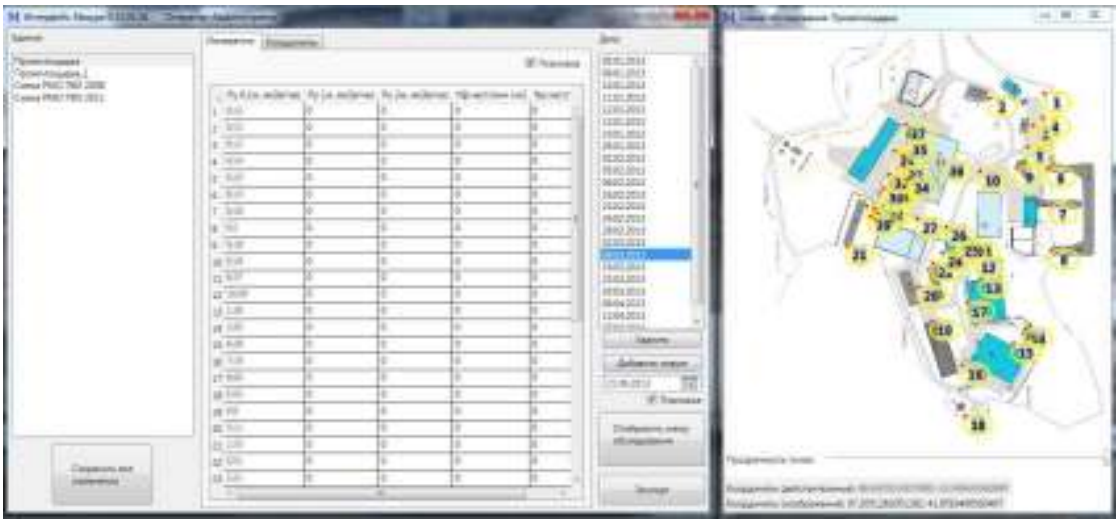


Рисунок 2 – Интерфейс ввода данных ПО EasyRAD

В программу Rockville из программы RADRUE была экспортирована БД, содержащая маршруты передвижения ликвидаторов аварии на ЧАЭС и карты радиационной обстановки. Затем, для обработки базы данных, в программу Rockville были добавлены новые аналитические задачи, их подробное описание представлено ниже.

В итоге, 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.

2.2 Методология и методы исследования

В основе применяемых в диссертационной работе методов лежит грид радиационной обстановки (РО), представляющий собой таблицу значений параметра РО с координатной привязкой к схеме территории. Визуальное отображение грида – это карта РО, где области с различными значениями параметра РО разделены изодозовыми кривыми. Для построения карт радиационной обстановки по данным радиационного контроля и мониторинга использованы методы нелинейной интерполяции данных, в частности, логнормальный кригинг [84]. Оценка неопределенности полученных карт РО и доз облучения, выражена через величину геометрического стандартного отклонения (ГСО) в соответствии с методологией RADRUE [44].

Методология и методы исследования диссертации на рисунке 3 представлены в виде пятислойной карты. 1-й слой – это карта территории или схема помещения; 2-й слой – это траектории перемещения персонала; 3-й слой – «маска» препятствий, ограничивающая зону, доступную для перемещений персонала; 4-й слой – грид радиационной обстановки; 5-й слой – решётка графа.

Во 2-й главе приведено решение аналитических задач, основанное на использовании первых четырёх слоёв Рисунка 3: 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.

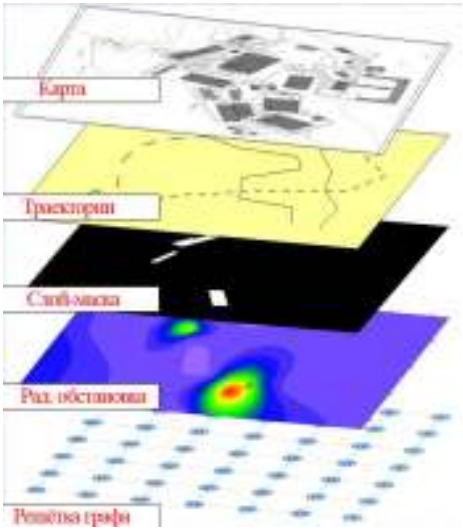


Рисунок 3 – Пятислойная карта, используемая для решения аналитических задач

Метод минимизации доз внешнего облучения персонала при передвижении по радиоактивно загрязнённой территории, представленный в 3-й главе, использует 5-й слой Рисунка 3 – решётку графа. Он разработан на основе теории графов [85], для нахождения маршрута с минимальной дозой использован алгоритм Дейкстры [86].

В 4-й главе, для анализа динамики радиационной обстановки использован метод декомпозиции временных рядов процедурой сезонно трендовой декомпозиции на основе локальных полиномиальных регрессий [87].

В 5-й главе, для решения задачи построения карты ППРЗ на промышленной площадке радиационно опасного объекта по результатам измерений МАЭД применён алгоритм численного решения уравнения Фредгольма 1-го рода методом регуляризации Тихонова [88].

В 6-й главе, для планирования работ по обращению с РАО и ОЯТ с применением технологии динамического трёхмерного моделирования сценариев в виртуальной среде использована компьютерная программа Andreeva Planner [69].

Вышеперечисленные методы были реализованы в виде компьютерных программ на современных языках программирования и позволили решить

поставленные в диссертации задачи. Более подробно описание каждого из методов приведено в этой и последующих главах.

2.3 Информационно-аналитические системы по обеспечению радиационной безопасности персонала Rockville и EasyRAD

На базе методологии RADRUE было разработано ПО Rockville, а затем ПО EasyRAD. Данные программы обеспечивают структурированное накопление данных, их анализ и визуализацию результатов. Развитие данного ПО относительно RADRUE – это предоставление ряда аналитических инструментов для помощи в оперативном принятии решений. Программы Rockville и EasyRAD разрабатывалась для экспертной оценки РО в отделения губа Андреева СЗЦ «СевРАО» и для анализа ЛПА на ЧАЭС специалистами ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России. Программа EasyRAD непосредственно разрабатывалась для её применения персоналом службы РБ отделения губа Андреева СЗЦ «СевРАО».

Основные предназначения программ:

- ведение базы данных (БД) РМО;
- расчёт радиационных полей мощности дозы;
- просмотр радиационных полей;
- помощь в принятии решений специалистам РБ на основании имеющихся в программах аналитических инструментов.

2.4 Обоснование создания информационно-аналитической системы для отделения губа Андреева СЗЦ «СевРАО»

На Северо-Западе территории России по различным критериям оценки (величине радиационного потенциала, радиационному риску, риску с учетом интегрального ущерба и интегральной экспертной оценке) наибольшую степень опасности [89] представляет пункт временного хранения (ПВХ) РАО и ОЯТ − бывшая береговая техническая база Северного флота №569 (БТБ №569) [90] (в настоящее время – Центр по обращению с радиоактивными отходами – отделение

губа Андреева Северо-Западного центра по обращению с радиоактивными отходами «СевРАО» – филиал Федерального государственного унитарного предприятия (ФГУП) «Предприятие по обращению с радиоактивными отходами «РосРАО», далее по тексту – отделение губа Андреева СЗЦ «СевРАО»).

В работах [91-94] показано, что потенциально наиболее опасными для персонала СЗЦ «СевРАО» являются технологические операции по обращению с ОЯТ и высокоактивными РАО. Данное обстоятельство вызвано следующими специфическими условиями, сложившимися в отделении губа Андреева СЗЦ «СевРАО» к началу работ по вывозу ОЯТ и реабилитации загрязненных участков, в том числе:

- недостаточным объемом информации о радиационном и физическом состоянии ОЯТ и высокоактивных РАО, находящихся в бывшем хранилище ОЯТ. Данное обстоятельство требует проведения дополнительных исследований до планирования и проведения работ по удалению высокоактивных ядерных материалов из здания и его последующего вывода из эксплуатации;
- вынужденным перемещением ОЯТ из хранилища ОЯТ в БСХ (сооружения, по проекту не предназначенные для этих целей);
- недостаточным объемом информации о наличии дефектных сборок с ОЯТ;
- наличием на территории ПВХ, в производственных зданиях и сооружениях повышенных уровней содержания техногенных радионуклидов и внешнего γ-излучения;
- уникальным характером проектируемых технологий и оборудования по обращению с ОЯТ и РАО. Предполагается частичное использование нестандартного оборудования и приспособлений, не имеющего аналогов на других предприятиях атомной промышленности;
- необходимостью практически одновременного проведения работ на загрязненных территориях по выводу из эксплуатации ряда зданий и сооружений или их реконструкции и строительства новых производственных зданий, предназначенных для проведения работ по обращению с ОЯТ и переработке РАО;

- небезопасным (аварийным) состоянием строительных конструкций ряда зданий и сооружений;
- необходимостью использования специальных средств индивидуальной защиты персонала, проведением части радиационно опасных работ в неблагоприятных метеорологических условиях на открытой местности;
- отсутствием достаточного количества квалифицированного персонала;
- необходимостью использования специальных средств коллективной защиты персонала при обращении с ОЯТ и РАО.

Экологическая реабилитация площадки объекта проводилась в рамках Федеральной целевой программы (ФЦП) «Обеспечение ядерной и радиационной безопасности на 2008 год и на период до 2015 года» [95] и в настоящее продолжается в рамках ФЦП «Обеспечение ядерной и радиационной безопасности на 2016 — 2020 годы и на период до 2030 года» [96]. Также реабилитация объекта проходит при поддержке программы сотрудничества между ФМБА России и Государственным управлением Норвегии по ядерной и радиационной безопасности (NRPA). Одним из направлений совместной деятельности являются мониторинг радиоэкологической обстановки, повышение уровня защиты персонала и совершенствование регулирующего надзора со стороны ФМБА России [97].

Первым результатом этой работы стали методические указания [98]. Следующим этапом стала разработка информационно-аналитической системы по обеспечению радиационной безопасности персонала (ИАС РБП), имеющей необходимые инструменты анализа и оценки дозы облучения. В рамках настоящей диссертации был разработан функционал данной системы.

2.5 Построение грида радиационной обстановки по результатам измерений мощности амбиентного эквивалента дозы

В основе разработанных в диссертации методов лежит грид радиационной обстановки – сетка с постоянным шагом по двум осям на плоскости (или широте

и долготе для поверхности Земли) и значением МАЭД в узлах сетки. Для его создания используются различные методы интерполяции. В основном, нами использовался кригинг [99], в котором при интерполяции распределение объектов в пространстве анализируется статистическими методами, в основе которых лежит вариограммный анализ [99], позволяющий определить зависимость между предполагаемым положением промежуточной точки и расстояниями.

Метод кригинга не применим для экстраполяции, т.е. нельзя считать достоверными результаты, которые он даёт за пределами области, в которой расположены экспериментальные точки.

2.5.1 Проверка качества интерполяции при построении грида радиационной обстановки

Для оценки погрешности интерполяции и качества построенного грида в работе предложено использовать метод кросс-валидации [100]. Расчёт проводился по результатам измерений МАЭД в определённых точках промышленной площадки СЗЦ «СевРАО». Были вычислены медиана, средняя, максимальная и минимальная ошибки интерполяции данных при построении грида различными методами [101]: метод обратно-взвешенных расстояний, кригинг, метод минимальной кривизны, метод Шепарда, метод ближайших соседей, метод полиномиальной регрессии, метод базовых радиальных функций, метод триангуляция с линейной интерполяцией, метод скользящего среднего, локальный полиноминальный метод. При сравнении методов кригинг показал наилучшие результаты, с минимальным из всех методов расхождением измеренного и интерполированного значений для каждого узла грида. Суммарная ошибка по всему гриду была также наименьшей. Поэтому преимущественно этот метод и был использован для создания гридов. Для оценки неопределённости грида использовалась методология RADRUE [44].

2.5.2 Построение грида радиационной обстановки нелинейной интерполяцией методом кригинг

Методом кросс-валидации было выполнено сравнение качества интерполяции МАЭД и логарифма МАЭД. Было получено, что логнормальный кригинг, т.е. интерполяция логарифма значения с последующим экспоненцированием грида, даёт меньшую ошибку, чем просто интерполяция значения. Также логнормальный кригинг эффективен в использовании для данных, где значения различаются на порядки [99], иначе сильное различие не дает возможности получить модель пространственной корреляции. Нелинейное логарифмическое преобразование делает данные пригодными для геостатистики. Поэтому для создания карт РО в работе был использован логнормальный кригинг.

2.6 Радиационная обстановка в отделении губа Андреева СЗЦ «СевРАО» в 2002 году

В 2002 г. было закончено комплексное радиационное обследование территории и Здания №5 ПВХ в гб. Андреева [102]. Речь идет о массиве данных, который был получен сотрудниками Научно-исследовательского и конструкторского института энерготехники имени Н.А. Доллежаля (НИКИЭТ) в 2001 и 2002 гг. во время обследования ПВХ в гб. Андреева, см. Рисунок 4. Места измерений показаны точками. Шаг сетки составлял 10 м, в некоторых местах с большим градиентом мощности дозы – до пяти метров. В данном исследовании измерялось значение МАЭД в 1036 точках контроля на высоте 1 м.

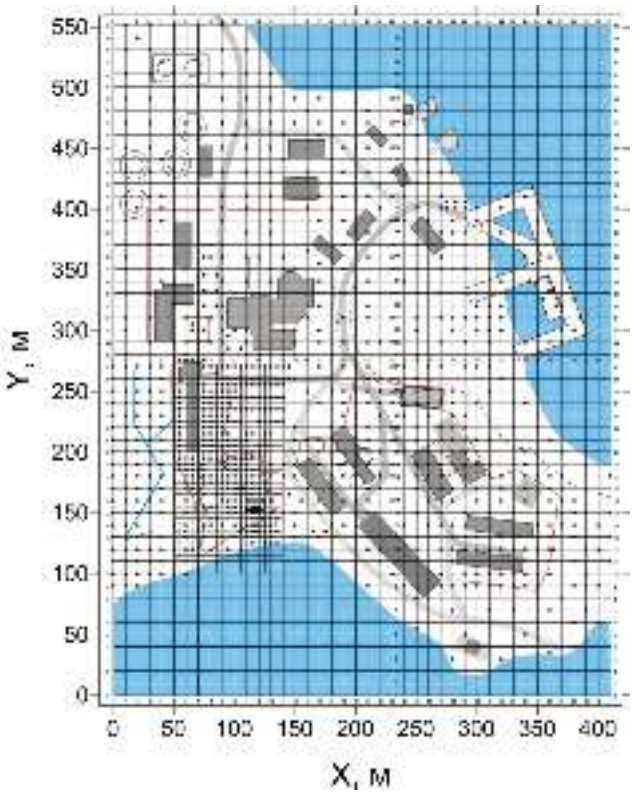


Рисунок 4 – Схема расположения реперных точек измерения МАЭД при радиационном обследовании территории ПВХ в губе Андреева в 2001–2002 гг.

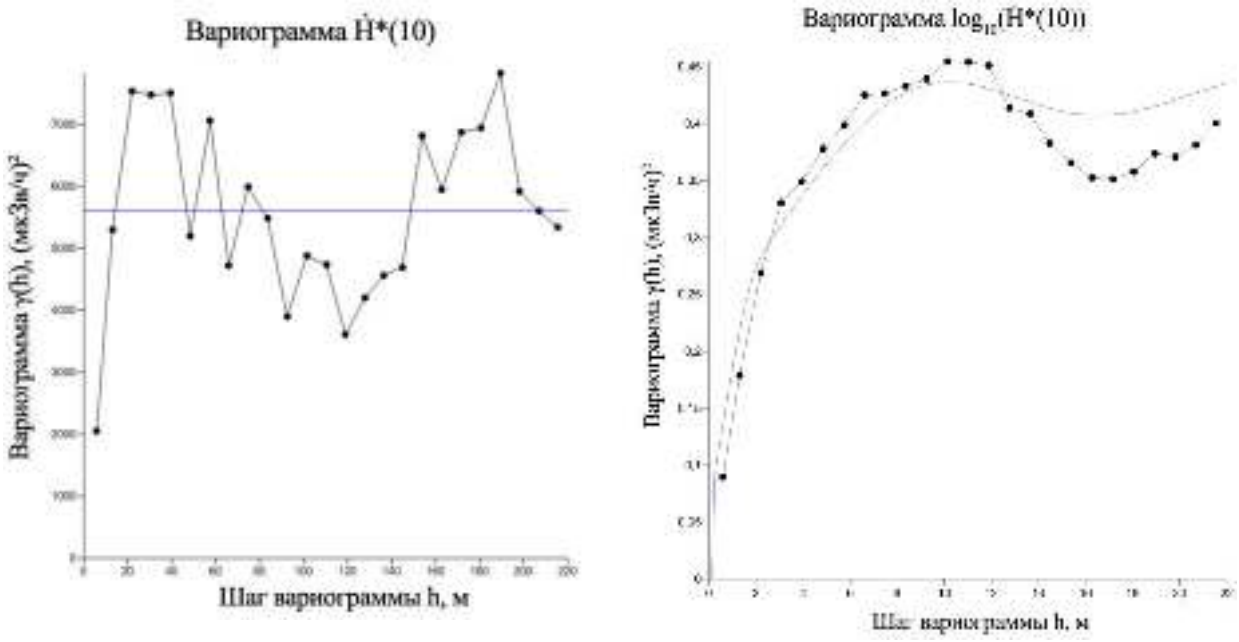
Данный набор представляет собой значительную ценность по двум причинам:

1. исчерпывающая характеристика РО на территории ПВХ в гб. Андреева,
2. прекрасная модель для решения задач геостатистики.

Значения МАЭД изменяются в пределах территории ПВХ на три с половиной порядка. Построение вариограммы [103] по МАЭД показывает отсутствие корреляции в данных (Рисунок 5(a)), следовательно, такой набор данных не может быть использован для построения карты РО. Напротив, вариограмма десятичного логарифма МАЭД показывает адекватность выбранной модели, Рисунок 5(b). Поэтому, для построения карты РО был использован метод – логнормальный кригинг, Рисунок 5(b).

Для интерполяции радиационной обстановки (построения гридов МАЭД) мы использовали компьютерную программу Surfer v.12 [101], где процедура выполнения логнормального кригинга реализована как штатная опция. Однако мы не использовали при построении модель вариограммы, изображенную на

Рисунке 5(b), а использовали параметры вариограммы по умолчанию. Такой выбор был оправдан тем, что для набора из 1036 измерений на регулярной решетке, нюансы выбора параметров метода интерполяции имеют второстепенное значение. С другой стороны, имелось в виду применение метода интерполяции к наборам данных оперативного контроля, объем которых составлял несколько десятков измерений, когда о построении модели вариограммы не могло быть и речи.



(a) (b)

Рисунок 5 – (a) – Вариограмма МАЭД [103], построенная по результатам измерений из [102]. (b) – Вариограмма десятичного логарифма МАЭД, построенная по тому же набору данных [102]

Представленная на Рисунке 6 карта РО условно отнесена к 1 июля 2002 г., хотя измерения проводились в течение нескольких предшествовавших месяцев до этой даты. Можно предполагать, что в предшествовавшие годы радиационная обстановка была несколько хуже, чем представленная на Рисунке 6, т.к. к этому времени некоторые участки хранения радиоактивных отходов на территории ПВХ в гб. Андреева были уже ликвидированы. Например, в 2001 г. была очищена площадка у радиохимической лаборатории (вывезено около 217 м^3 или 521 т ТРО).

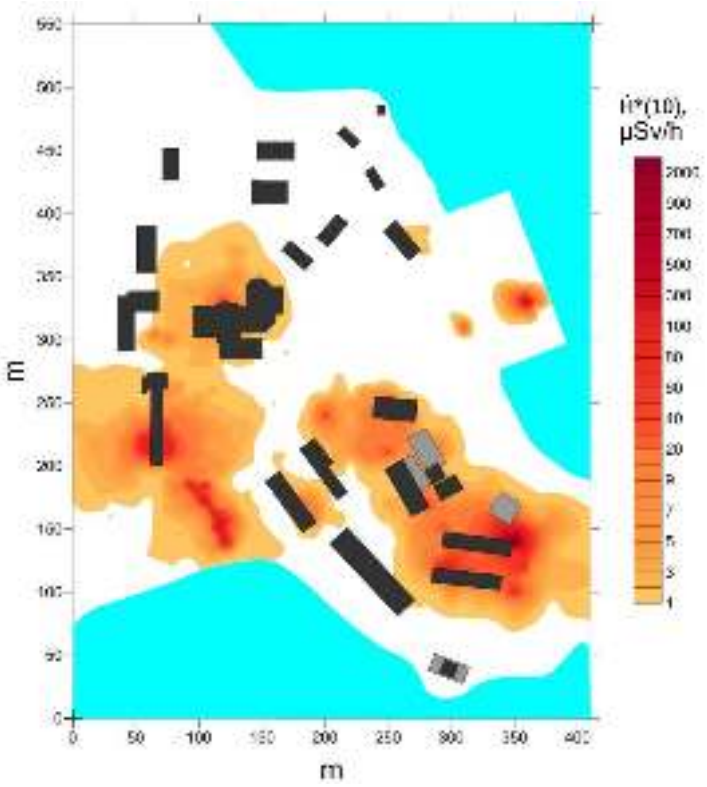
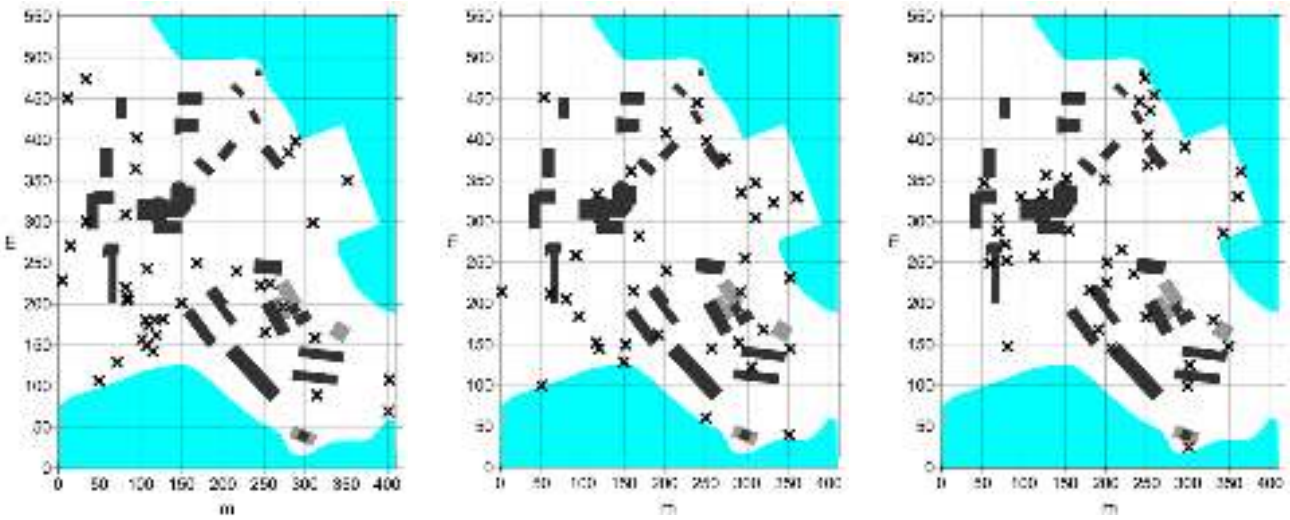


Рисунок 6 – Значения МАЭД (мкЗв/ч) на территории ПВХ в гб. Андреева на 01.07.2002 [102]

2.7 Поиск оптимального расположения контрольных точек

Необходимое число точек контроля, где производятся регулярные измерения МАЭД, не является постоянной величиной, а зависит от сложности РО. В данной главе предложен метод оптимальной локализации точек радиационного контроля и мониторинга поиском локальных максимумов градиента грида радиационной обстановки и кросс-валидацией. Для проверки предложенного метода рассмотрим разные варианты расположения точек.

На Рисунке 7 рассмотрены три варианта расположения 36 контрольных точек на промышленной площадке ПВХ в гб. Андреева. В первом случае точки выбраны случайным образом из массива НИКИЭТ, насчитывающего 1036 точек измерений [102]. Во втором случае точки выбраны в местах с нулевым градиентом МАЭД. В третьем случае расположение точек было идентичным тому, какое реально использует отдел радиационной безопасности отделения губа Андреева СЗЦ «СевРАО».



(a) (b) (c)

Рисунок 7 – Три набора из 37 контрольных точек для промышленной площадки в отделении губа Андреева СЗЦ «СевРАО», (a) – случайный выбор, (b) – предложенным методом, (c) – используемый в настоящее время

Для каждого из наборов точек, представленных на Рисунке 7, были построены гриды радиационной обстановки и рассчитаны коэффициенты корреляции между интерполированными и измеренными значениями (по данным из [102]). При локализации контрольных точек по предложенному методу (Рисунок 7(b)) была получена высокая корреляция (R = 0,71), по сравнению с используемой схемой (Рисунок 7(c)), дающей среднюю корреляцию (R = 0,58). Схема со случайным расположением точек (Рисунок 7(a)) даёт слабую корреляцию, R = 0,25.

Таким образом, было показано, что 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.

2.8 Визуализация контрольных уровней на карте радиационной обстановки

Для обеспечения задачи мониторинга РО и радиационной безопасности персонала отделения губа Андреева СЗЦ «СевРАО» службой РБ контролируется

около 250 параметров. Из них 76 – это перечень контрольных точек и контрольных значений МАЭД в этих точках для технической территории, зданий и сооружений. Для каждой точки приводятся два контрольных значения – МАЭД в состоянии покоя и при проведении работ.

Такое большое число параметров, представленное в виде таблиц значений, сложно контролировать службам радиационной безопасности. Поэтому было принято решение разработать программу, позволяющую автоматизировать сбор, анализ и контроль параметров радиационной обстановки, а также способную представлять информацию в наиболее удобном для пользователя виде.

Одна из основных функций EasyRAD – расчёт полей МАЭД и их визуализация (Рисунок 8). Далее, исходя из рассчитанного поля, программа позволяет оценивать дозы персонала и решать другие аналитические задачи.

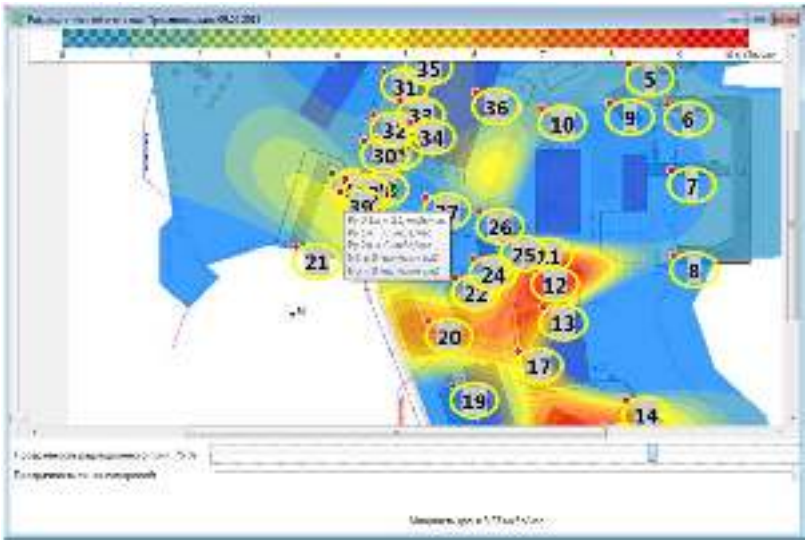


Рисунок 8 – Пример карты радиационной обстановки

Этапом планирования радиационно опасных работ является разделение места проведения работ на зоны в соответствии с уровнем МАЭД. Границы зон должны быть четко видны лицам, принимающим решения, для осознанного планирования работы, определения оптимальных рабочих маршрутов. Инструмент «карта контрольных уровней» позволяет строить карту отношения рассчитанных значений МАЭД к установленным контрольным уровням. Таким

образом, по карте контрольных уровней можно наглядно судить о приближении значений МАЭД к контрольным, либо об их превышении (Рисунок 9).

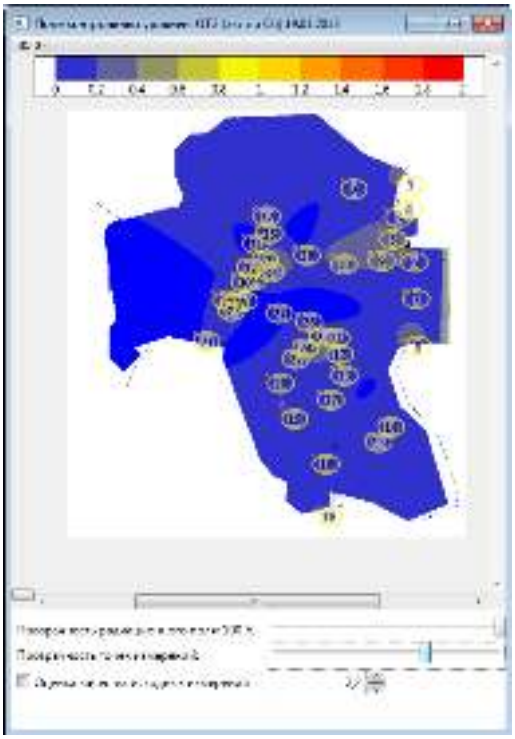


Рисунок 9 – Инструмент «Карта контрольных уровней»

2.9 Алгоритмы поиска критических областей

Алгоритмы поиска критических областей показывает те точки, в которых необходимо провести дополнительные измерения радиационной обстановки для уменьшения ошибки при расчете доз облучения (Рисунок 10).

Первый метод нахождения критических областей базируется на поиске областей карты с максимальным изменением величины градиента грида. Градиент вычисляется как разница значений в 2-х соседних узлах по вертикали и по горизонтали. В результате расчетов программа отображает карту с искомыми областями. Чем больше размер точки на карте, тем большее значение градиента в ней, а значит в данной области в первую очередь необходимо проведение дополнительного РМО.

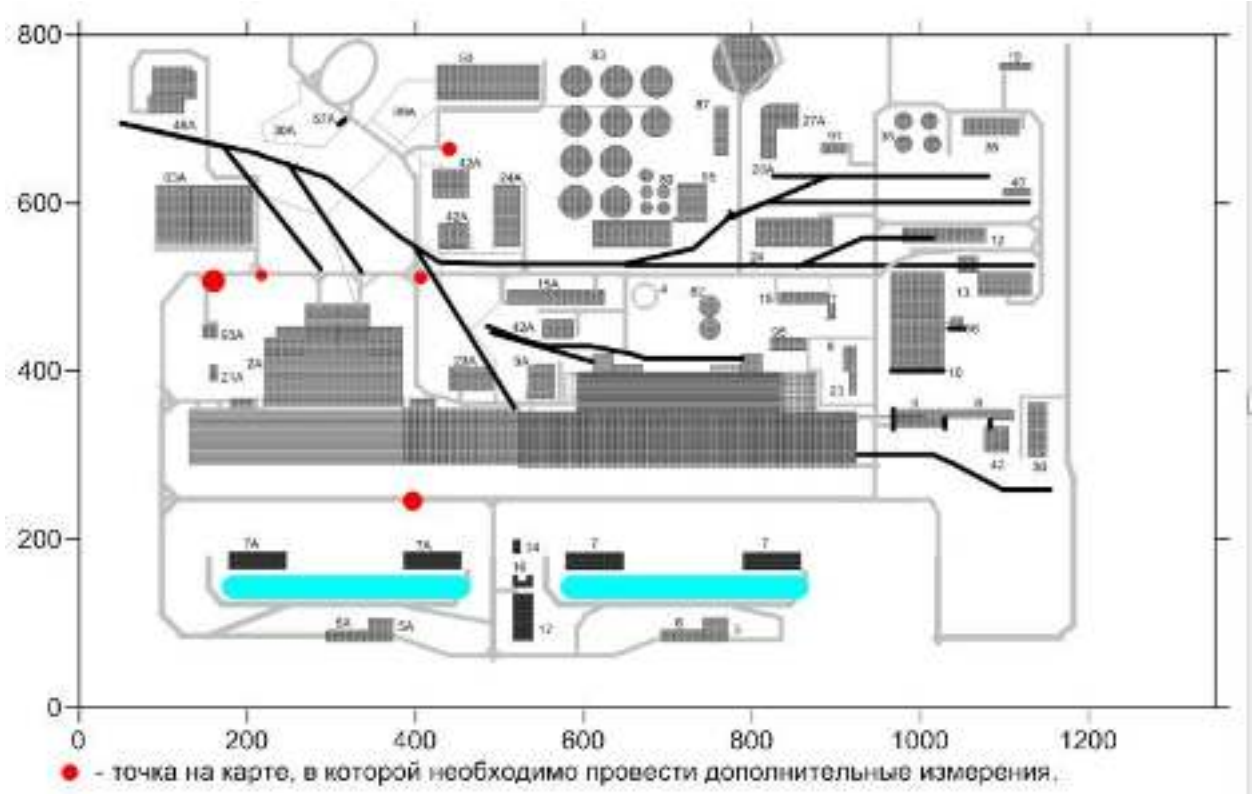


Рисунок 10 – Результат поиска критических областей для промышленной площадки ЧАЭС

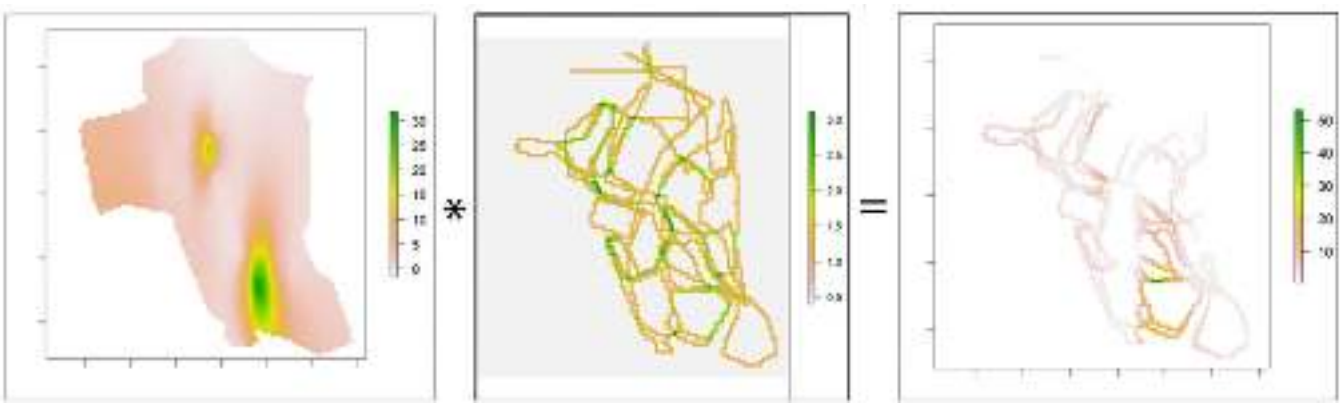
Второй метод нахождения критических областей базируется на вычислении максимальных ошибок интерполированных и измеренных значений. Алгоритм, используемый здесь, сравним с кросс-валидацией. Для каждого узла грида рассчитывается разница между измеренным в данной точке значением и величиной, полученной при интерполяции всех данных измерений за исключением искомой точки. Затем на экран выводится карта территории с отмеченными на ней точками, размер которых прямо пропорционален величине ошибки.

Заметим, что не следует проводить дополнительные измерения сразу во всех найденных точках. Эффективнее заново исследовать территорию с помощью данной программы после уточнения информации в трёх-пяти точках.

2.10 Поиск участков маршрута, вносящих максимальный вклад в коллективную дозу

Часто наибольший вклад в коллективную дозу облучения вносят участки радиоактивно загрязнённой территории с не самой высокой МАЭД. Примером такой ситуации может быть периодическое прохождение больших групп персонала вблизи источника, либо постоянное нахождение рядом с источником на рабочем месте. Выявление таких участков является существенным шагом к уменьшению дозовых нагрузок.

Алгоритм решения данной задачи таков: в базу данных заносятся все маршруты персонала с учетом их распределения по времени и территории объекта, и проводится анализ. Территория объекта разбивается на равные квадратные ячейки. Их количество может регулировать пользователь (по умолчанию ширина ячейки равна шагу грида). Для каждой ячейки рассчитывается общее количество человек, проходящих через неё за выбранный период времени, общее время нахождения персонала в ней и МАЭД. Затем мы получаем список наиболее опасных участков маршрута. Схема расчёта представлена на Рисунке 11.



Грид МАЭД на промышленной площадке, мкЗв/ч.	Траектории перемещения персонала по промплощадке. Тепловая карта показывает частоту пребывания персонала в ячейках.	Распределение коллективной дозы по фрагментам территории промплощадки, чел.·мкЗв. Белый цвет соответствует нулевой дозе (персонал в этом фрагменте территории не был).

Рисунок 11 – Расчет коллективной дозы по фрагментам топоосновы

Данный алгоритм был применён группы, состоящей из 22 ликвидаторов аварии на ЧАЭС. В группу вошли ранние ликвидаторы аварии, персонал ЧАЭС, работавшие в первые дни после аварии (идентификационные номера (ИН) в Таблице 1 с 001 по 013), а также «прикомандированные», работавшие в период 1986-1989 (идентификационные номера (ИН) в Таблице 1 с 021 по 031). Данные ликвидаторы были выбраны, т.к. для каждого их них было проведено интервьюирование и составлена анкета с подробным описанием местонахождения и действий при ликвидации последствий аварии [41, 104]. На основе такой анкеты, по методологии RADRUE [44] была восстановлена их доза внешнего облучения.

Таблица 1 – Дозы внешнего облучения для исследуемой группы ликвидаторов аварии на ЧАЭС, восстановленные по методологии RADRUE.

№	ИН	D, мГр	№	ИН	D, мГр	№	ИН	D, мГр
1	001	326,1	9	009	389,7	17	026	41,0
2	002	131,5	10	010	203,2	18	027	85,3
3	003	245,7	11	011	147,2	19	028	19,5
4	004	64,4	12	012	508,8	20	029	183,7
5	005	421,3	13	013	1049,8	21	030	24,1
6	006	151,3	14	021	160,9	22	031	811,0
7	007	470,4	15	022	26,8			
8	008	90,4	16	024	30,2			

Для исследуемой группы построены тепловые карты распределения коллективной дозы (Рисунок 8) и определён участок территории, нахождение в котором дало 10% (460 мГр, ГСО=3,0) коллективной дозы группы. Этот участок расположен на дороге, ведущей от г. Припять к ЧАЭС, и на нём сосредоточены $8 \cdot 10^{-4}$ % маршрутов передвижения ликвидаторов (Рисунок 12). Таким образом, дезактивацию этого участка необходимо было проводить в первую очередь для минимизации доз облучения исследуемой группы ликвидаторов.

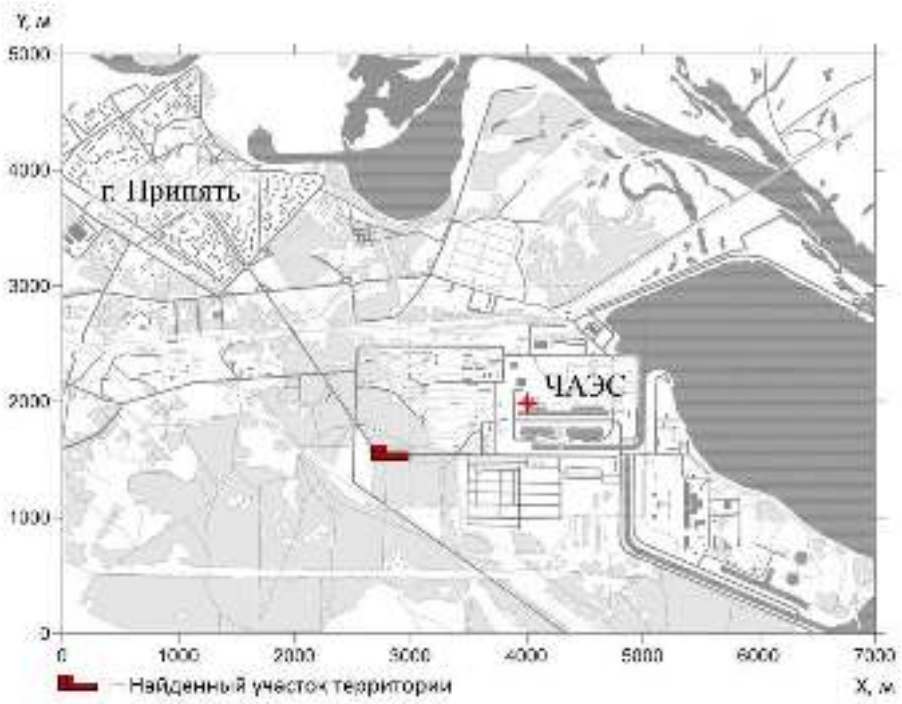


Рисунок 12 – Участок территории, нахождение в котором дало 10% коллективной дозы исследуемой группы ликвидаторов аварии на ЧАЭС

2.11 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 промплощадки 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 исследуемой группой ликвидаторов было получено 10% коллективной дозы. Дезактивацию этого участка необходимо было

проводить в 1-ю очередь для минимизации доз облучения ликвидаторов из исследуемой группы.

3. Нелинейное логарифмическое преобразование делает данные радиационного контроля пригодными для геостатистики, таким образом для создания карт радиационной обстановки использован логнормальный кригинг. Методология Rockville использована для оценки неопределённости грида.

4. Карта отношения рассчитанных значений МАЭД к установленным контрольным уровням позволяет наглядно представить информацию о приближении значений МАЭД на исследуемой территории к контрольным уровням, либо об их превышении.

ГЛАВА 3. МИНИМИЗАЦИЯ ДОЗ ВНЕШНЕГО ОБЛУЧЕНИЯ В СИТУАЦИЯХ СУЩЕСТВУЮЩЕГО ОБЛУЧЕНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ АЛГОРИТМОВ ТЕОРИИ ГРАФОВ

3.1 Постановка задач минимизации доз внешнего облучения персонала

В ситуациях существующего облучения, в которые входит реабилитация объектов ядерного наследия, Публикация МКРЗ №103 [16] рекомендует, чтобы референтные уровни, установленные по индивидуальной дозе облучения, использовались в сочетании с внедрением процесса оптимизации. Целью в этом случае является внедрение оптимизированных стратегий защиты или разработка последовательности таких стратегий, которые снизят индивидуальные дозы облучения ниже референтного уровня. При разработке стратегии защиты действия персонала рассматривается как набор элементарных событий в различных точках, условиях, с учётом продолжительности и типа облучения, полученной дозы и т.д., в соответствии с порядком применения принципа оптимизации [15].

В случае возникновения в результате аварийной ситуации долгосрочного загрязнения, т.е. при ликвидации последствий крупной аварии в отдалённый период времени (на промежуточной (средней) и поздней фазах развития радиационной аварии [105]), защитные мероприятия организуются, как для ситуаций существующего облучения.

Опыт показывает, что внешнее облучение часто вносит существенный вклад в дозы работников, участвующих в реабилитационных (восстановительных) работах на загрязненных территориях [44, 106-108]. В данной главе основное внимание уделяется дозам внешнего облучения: полученным на месте работы и связанным с перемещением персонала к месту работы или от него (существует исключение, когда сотрудник предприятия является водителем транспортного средства, перевозящего источник излучения). В первом случае положение работника в поле излучения почти не изменяется, а во втором случае оно может значительно изменяться в течение пройденного пути.

Для ситуаций планового профессионального облучения, на этапе разработки проекта предприятия (проектный инжиниринг) проводится оптимизация защиты персонала для штатного режима работы, в соответствии с регламентом [17]. Поэтому действия, выполняемые на рабочем месте, дают основной вклад в дозу внешнего облучения работника, в то время как перемещение рабочего не оказывает существенного влияния на дозу, полученную работником, поскольку такое воздействие исключается в планируемом проекте.

Но в ситуациях существующего облучения, это не так. Дозы облучения, которые могут быть получены рабочими при перемещении к месту работы, могут быть значительными из-за загрязнения помещений и территорий радиоактивными веществами. Например, на промежуточной фазе развития радиационной аварии на Чернобыльской АЭС средний вклад в дозу, полученную при перемещении ликвидатора из города Припяти до места аварии на Чернобыльской АЭС и обратно, составлял около 80% от общей суточной дозы [108]. Другой пример: при работе на крышах зданий второй очереди Чернобыльской АЭС в августе 1986 года ограничение суточной дозы было увеличено до 200 мЗв в основном из-за того, что ликвидаторы аварии не могли попасть на работу из-за ранее принятых ограничений суточных доз облучения (10 мЗв) [108].

Приведенные выше примеры показывают важность облучения персонала при передвижении в радиоактивно загрязненных районах к местам выполнения рабочих задач. Как правило, существует несколько альтернативных маршрутов, по которым рабочие могут перемещаться в радиационных полях. Очевидно, что при перемещении по различным маршрутам будут получены разные дозы облучения. Таким образом, выбор маршрута передвижения является одной из наиболее важных процедур, направленных на реализацию принципа оптимизации.

Более тщательный анализ маршрутов передвижения персонала позволяет установить как минимум три самостоятельные «транспортные» задачи:

- задача поиска маршрута с наименьшей возможной дозой: перемещение из точки *A* в точку *B* по территории и/или помещению объекта, получив при этом минимально возможную дозу внешнего облучения;
- задача поиска оптимального обхода контрольных точек: обход выбранных точек на территории и/или в помещениях объекта с получением минимально возможной дозы облучения;
- задача оптимального покрытия дорожной сети: на известной транспортной сети выбрать такой маршрут, чтобы пройти по каждой дороге хотя бы один раз и получить при этом минимально возможную дозу облучения.

Первая из трех задач не требует каких-либо дополнительных комментариев. Вторая задача отличается от первой тем, что необходимо не только найти оптимальные маршруты для перемещения между точками, но и установить оптимальный порядок их обхода. Что касается третьей задачи, её практическое значение основывается на потребности дезактивации дорожной сети, когда требуется избежать многократной очистки одних и тех же дорог.

Существуют две версии «транспортной» задачи для обеспечения радиационной безопасности: одна в пределах существующей дорожной сети, другая – с построением дополнительной дорожной сети. Первый случай применяется для минимизации доз облучения персонала во время передвижения по территории или эвакуации. Второй случай является минимизацией доз облучения путём нахождения новых маршрутов.

Другой пример действий по ликвидации последствий аварии на Чернобыльской АЭС приводится ниже для подтверждения практической значимости второго варианта «транспортной» задачи. В июне 1986 года на участке «Копачи – административное здание-1» на ЧАЭС было завершено строительство объездной дороги, которая значительно уменьшила дозу за одну поездку от Чернобыля до места аварии на Чернобыльской АЭС. Когда ликвидаторы двигались по старой дороге, то полученная доза в течение одной поездки составляла 2,75 мГр на 10 июня. Двигаясь по «новому» маршруту,

ликвидаторы получали лишь 0,07 мГр. На 26 апреля 1986 года эти дозы составили бы 8,9 и 0,1 мГр, соответственно, если бы «новая» дорога была построена. Данные оценки дозы получены по методологии RADRUE на основе ПО Rockville [44].

В данной главе описываются алгоритмы для решения трех вышеупомянутых «транспортных» задач в терминах теории графов [85]. Граф представляет собой набор вершин и множество ребер, соединяющих их. Рёбра могут быть как направленные, так и ненаправленные. Каждому ребру ставится в соответствии число, называемое весом ребра. Ориентированный граф (Рисунок 13) содержит направленные ребра, неориентированный граф не имеет таких ребер.

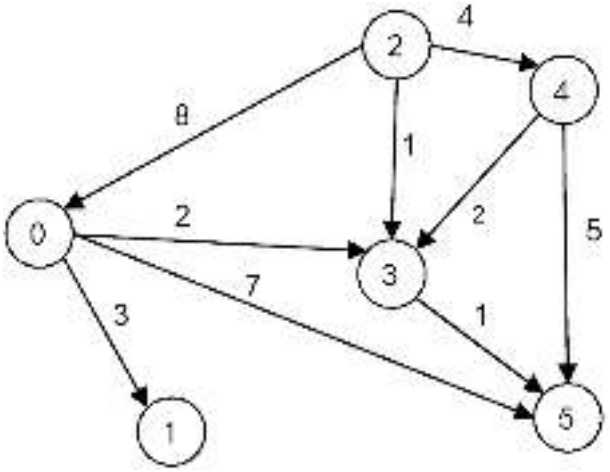


Рисунок 13 – Ориентированный граф с 6-ю вершинами и 9-ю ребрами

3.2 Решение задач перемещения по радиоактивно загрязнённой территории с применением теории графов

Оценка масштабов и уровней радиоактивного загрязнения осуществляется с помощью воздушного и наземного мониторинга. Одним из параметров такой оценки является МАЭД [16]. Эти данные могут быть дополнены информацией о радионуклидном составе и использоваться для составления карт МАЭД на поверхности земли с учетом прогнозирования динамики изменения с течением времени. Результаты мониторинга радиационной обстановки на радиоактивно загрязненной территории могут быть широко использованы для оценки прогнозируемых и предотвращённых доз внешнего облучения персонала. В

ситуациях существующего облучения эта модель может быть использована для планирования реабилитационных работ.

Данные РМО предоставляют информацию об измеряемом параметре только в тех точках, где проводились измерения. Методы интерполяции данных измерений (например, кригинг [47]) позволяют получить информацию об искомых параметрах в каждой точке территории радиационного объекта [44] и построить карту радиационной обстановки.

При таком подходе карта радиационной обстановки представляет собой двухслойный графический объект. Нижний слой является топографической основой, т.е. картой участка местности или схемой помещения. Верхний слой – это карта (грид) радиационной обстановки (Рисунок 14).

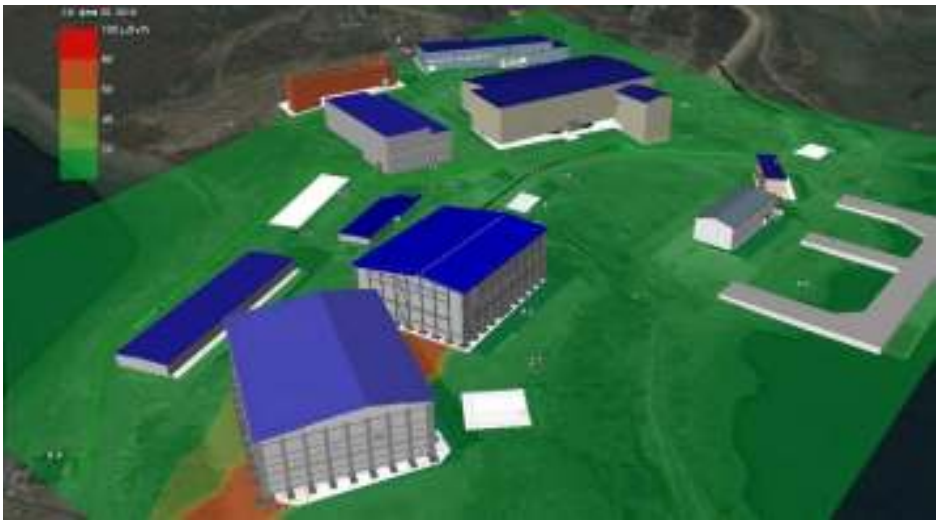


Рисунок 14 – Техническая территория Северо-Западного Центра «СевРАО» в губе Андреева с трёхмерными моделями зданий, двумерными схемами помещений и наложенной картой радиационной обстановки

Путём совмещения грида и топоосновы, радиационная обстановка соотносится с выбранным участком территории объекта. На Рисунке 15(а) знак "+" обозначает точку карты (узел грида), число рядом с "+" представляет собой рассчитанное с помощью интерполяции значение соответствующего параметра радиационной обстановки, в данном случае МАЭД в мкЗв/ч. Значение в точке, не совпадающей с узлами грида, может быть получено путем линейной интерполяции значений в точках, ближайших к выбранной. Линия на Рисунке

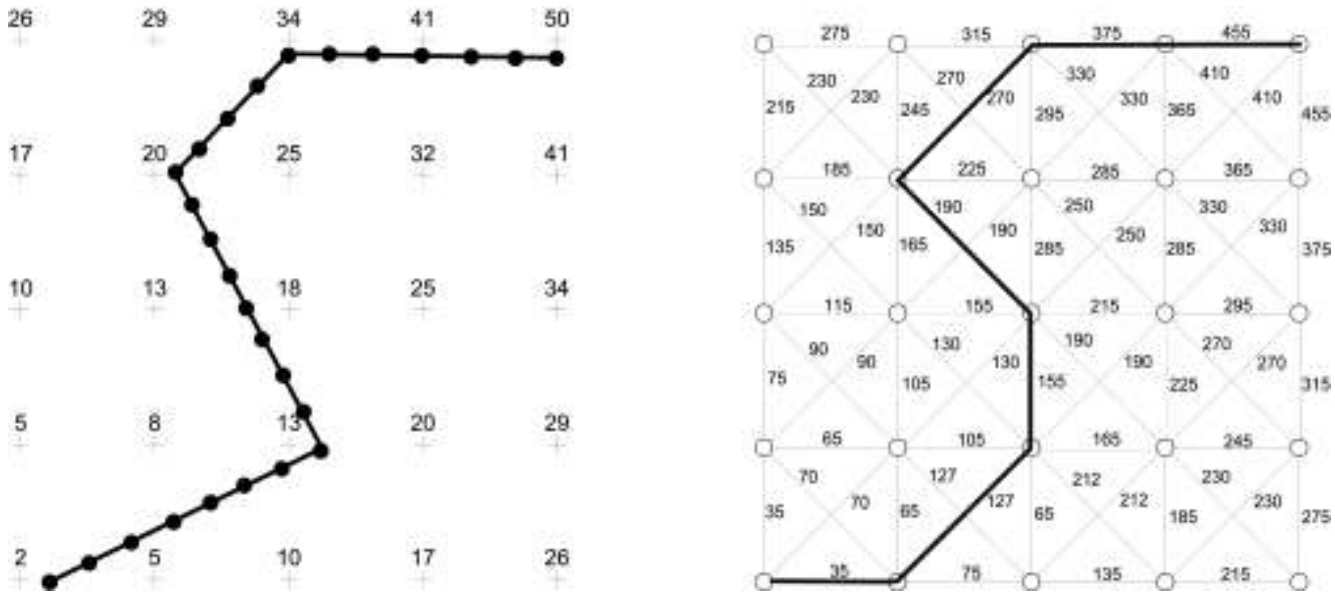
15(a) показывает маршрут работника в поле излучения. Если предположить, что скорость движения работника является постоянной и использовать результаты линейной интерполяции в точках, равномерно распределенных по ломаной линии, то доза внешнего облучения, обусловленная прохождением работника по заданному маршруту с заданной скоростью, может быть рассчитана [44, 109].

Однако использование только грида РО не позволяет решить задачу минимизации доз персонала при движении по загрязнённой территории, поскольку, в этом случае возможно рассматривать только случайно сгенерированные траектории. Применение графа радиационной обстановки вместо грида радиационной обстановки преодолевает это ограничение. Решётка графа, изображенная на Рисунке 15(b), является наиболее подходящей моделью для решения данной задачи.

У графа на Рисунке 15(b) вершины совпадают с узлами грида радиационной обстановки. Каждая вершина графа соединена через восемь неориентированных ребер с восемью ближайшими вершинами. Каждое из ребер имеет вес, равный дозе, которую аварийный работник получит при перемещении вдоль этого ребра. Значения веса зависит от МАЭД в узле грида и времени, необходимого для прохождения ребра. Время прохождения ребра рассчитывается из известного расстояния между узлами грида и скорости перемещения объекта. Для диагонального ребра время прохождения по нему в $\sqrt{2}$ раз больше, чем для прохождения по горизонтальному или вертикальному. Для повышения скорости вычислений число $\sqrt{2}$ было округлено до 1,41. Скорость передвижения персонала принята постоянной.

Движение по модели графа РО возможно только по рёбрам. Таким образом, траектория, показанная на гриде РО (Рисунок 15(a)), на графе РО имеет несколько иной вид (Рисунок 15(b)). Таким образом, при переходе от грида РО к графу РО происходит дискретизация сетки. Погрешность дискретизации сетки РО может быть уменьшена за счет увеличения детализации грида РО.

Трансформация грида РО в граф РО, показанная на Рисунке 10, соответствует второму варианту «транспортной» задачи, поскольку вид графа показывает, что не существует никаких ограничений на передвижение от любой вершины графа к любой другой последующей вершине этого графа, независимо от связи с реальной транспортной сетью объекта.



(a) (b)

Рисунок 15 – (a) – Линией обозначен маршрут персонала на гриде радиационной обстановки. Символом "+" обозначен узел грида, число рядом с "+" – это рассчитанное с помощью метода интерполяции значение соответствующего параметра радиационной обстановки, в данном случае МАЭД в мкЗв/ч. (b) – Трансформация маршрута персонала, показанного на рисунке 15(a), под решётку графа радиационной обстановки. Жирная линия – это маршрут персонала, тонкими линиями показаны рёбра графа, кругами обозначены узлы графа, числами вдоль рёбер графа указаны веса рёбер в нЗв.

Рисунок 16 показывает, что несложно перейти от второго варианта «транспортной» задачи к первому варианту, учитывая оптимизацию перемещения только вдоль существующей транспортной сети объекта. На Рисунке 16 показан тот же граф радиационной обстановки, что и на Рисунке 15, а также два возможных пути из точки *A* в точку *B*. Для того чтобы перейти от второго варианта транспортной задачи к первому варианту, следует оставить

существующие веса ребер, принадлежащих двум возможным дорогам, а вес остальных ребер установить равным бесконечности.

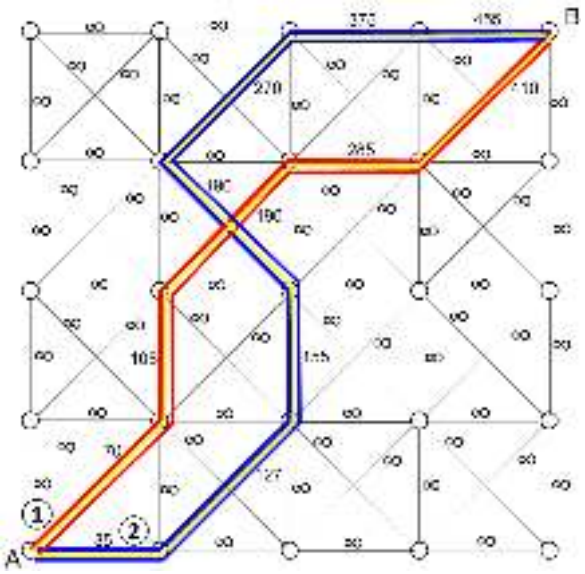


Рисунок 16 – Граф радиационной обстановки для первого варианта «транспортной» задачи

Аналогичный метод (присвоение бесконечного веса некоторым рёбрам графа радиационной обстановки) следует использовать для второго варианта «транспортной» задачи, если существуют естественные препятствия на промышленной площадке объекта, такие как здания, заборы или водные преграды (пруды-охладители, впускные и выпускные каналы) и т.д. В этом случае бесконечно большие веса должны быть заданы только по рёбрам, которые находятся в пределах естественных препятствий.

Конструктивно более информативно рассматривать карту РО, как пятислойный графический объект (Рисунок 3), содержащий топографическую основу, грид радиационной обстановки, граф радиационной обстановки, слой-маску и слой траекторий.

3.3.1 Оценка неопределённости найденного маршрута

Для нахождения маршрута с минимальной дозой был использован алгоритм Дейкстры [86]. Он применим для графа, в котором веса рёбер – это действительные положительные числа. Но на практике веса не могут быть

определены точно, поскольку МАЭД на территории и в помещениях производственных объектов известна с существенной неопределенностью. Поэтому для описания весов рёбер была применена теория нечётких множеств [110], и решена задача о нечётком кратчайшем пути (НКП) [111] методом Чжуана и Кунга [112]. По [113] вес каждого ребра представляется как треугольное нечеткое множество, $L(i, j) = (a, b, c)$, где $a \leq b \leq c$ (Рисунок 17), выражение (3).

$$\mu_{L(i,j)}(x) = \begin{cases} \frac{x-a}{b-a}, a \leq x \leq b \\ \frac{x-c}{b-c}, b \leq x \leq c \\ 0, \text{иначе} \end{cases}, \quad (3)$$

где $\mu_{L(i,j)}(x)$ – функция принадлежности, b – это мода или четкое значение нечеткого треугольного числа, числа a и c характеризуют степень размытости четкого числа.

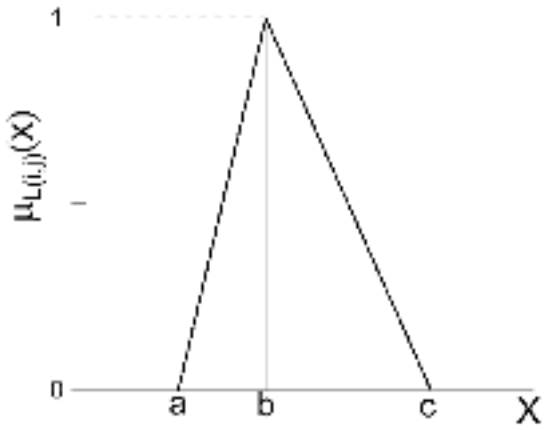


Рисунок 17 – Функция принадлежности нечеткого треугольного числа L(i; j) – длина нечёткого пути от вершины графа i в вершину j

При поиске маршрута с минимальной дозой мы используем гриды МАЭД, которые получены путем интерполяции данных измерений по территории предприятия. Неопределенность интерполяции МАЭД выражается через параметр β_g и оценивается методом кросс-валидации, а само интерполированное значение мощности дозы P рассматривается как модальное значение (мода) [44]. Тогда каждое интерполированное значение МАЭД представимо как треугольное нечеткое число $\tilde{P}$, выражение (4).

$$\tilde{P} = (P/\beta_g,\ P,\ P \cdot \beta_g) \quad (4)$$

Допустим, мы имеем четыре пути перемещения персонала по загрязненной территории из точки *A* в точку *B*, каждое из которых сопровождается облучением перемещающегося человека. Допустим также, что неопределенность радиационной обстановки характеризуется значением ГСО = 2,0, а пути перемещения сопровождаются получением следующих доз облучения: 6, 4, 10 и 8. Тогда, с учетом неопределенности, дозы, полученные по разным путям, можно представить как следующие нечёткие треугольные числа: (3,6,12); (2,4,8); (5,10,20); (4,8,16). В результате применения алгоритма поиска пути с наименьшей дозой, будет найден путь с дозой равной 4, соответствующей четкой моде нечеткого числа (2,4,8).

Выполним алгоритм Чжуана и Кунга [112]:

Шаг 1: расположим вышеперечисленные четыре кортежа из трех чисел в порядке возрастания модальных значений и дадим им соответствующие обозначения, Рисунок 18: D_1=(2,4,8); D_2=(3,6,12); D_3=(4,8,16); D_4=(5,10,20).

Шаг 2: $D_{min}=D_1=(2,4,8)$

Шаг 3: $i=2$

Шаг 4: Рассчитываем (a,b,c):

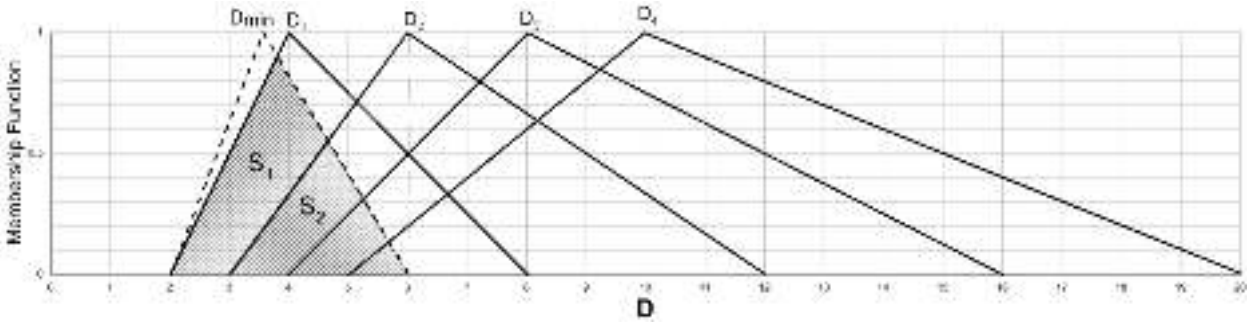


Рисунок 18 – Пример поиска НКП для 4-х нечётких маршрутов, по оси абсцисс – доза облучения, по оси ординат – функция принадлежности

$$b = \frac{(4\cdot 6)-(2\cdot 3)}{(4+6)-(2+3)} = 3{,}6;\ a = \min(2{,}3) = 2\,;\ c(8{,}6) = 6 \quad (5)$$

Шаг 5: $D_{min}=(2,\ 3{,}6,\ 6)$

Шаг 6: i=3; b=3,6; a_3=4; $b \le a_3$ и $b=b$; Процедура окончена.

В результате применения эвристической процедуры поиска НКП D_{min} среди всех возможных путей в графе мы нашли, что D_{min}=(2, 3,6, 6), выражение (5). Теперь найдем, какой из путей обладает наибольшим подобием к НКП. Для этого необходимо воспользоваться выражением (6), имея в виду под L_{min} минимальную дозу D_{min}, а под L_i -дозу D_i по пути i:

$$s_i = area(L_i \cap L_{min}) = \begin{cases} 0, if\ L_i \cap L_{min} = \varnothing \\ \frac{(c-a_i)^2}{2[(c-b)+(b_i-a_i)]} \quad , if\ L_i \cap L_{min} \neq \varnothing, \end{cases} \qquad (6)$$

где s_i – степень подобия между L_i и L_{min}, $\varnothing$ – пустое множество, $L_i = (a_i, b_i, c_i)$ – i-я длина нечеткого пути, L_{min} – НКП. Следует отметить, что a, b и c всегда меньше или равны a_i, b_i и c_i, соответственно.

В нашем примере можно ограничиться графическим представлением дозовых функций принадлежности. Как следует из Рисунка 13,

$$s_1 = D_{min} \cap D_1 = S_1 + S_2, \qquad (7)$$

$$s_2 = D_{min} \cap D_2 = S_2, \qquad (8)$$

где S_1 и S_2– площади заштрихованных четырехугольника и треугольника, Рисунок 18. Из Рисунка 18 видно, что степень подобия между НКП и путём D_1 больше чем между НКП и путём D_2. Таким образом, следует выбрать путь 1.

Путь 1, который был найден как путь с минимальной дозой для случая точно известных весов ребер по алгоритму Дейкстры, совпал с результатом решения задачи поиска пути с минимальной дозой для случая неопределенностей в дозах по ребрам графа. Такой результат является следствием выбора вида функции принадлежности по выражению (6). Иными словами, возрастающая последовательность модальных значений b_i нечетких доз, которые будут получены по i-м путям, не отличается от возрастающей последовательности для a_i и c_i – нижней и верхней границ.

Вид выбранной функции принадлежности представляется обоснованным, т.к. он базируется на опыте применения теории нечетких множеств в области

радиационной безопасности [108] и анализе радиационных полей при ЛПА на ЧАЭС.

Полученный нами результат означает, что путь 1 более предпочтителен, чем путь 2, но доза облучения по пути 1 при некоторых реализациях может быть больше, чем доза облучения по пути 2. В этом заключается принципиальное отличие результата рассмотренной задачи о поиске путей с минимальной дозой облучения в условиях неопределенности от задачи с точно известными весами рёбер.

Была рассмотрена задача поиска пути с минимальной дозой для пяти гридов мощности дозы на промышленной площадке СЗЦ «СевРАО» в губе Андреева. Каждый из гридов построен по данным еженедельных измерений в период с 18.12.2010 по 15.01.2011. Для двух гридов за даты 01.01.2011 и 08.01.2011 в Таблице 2 показаны результаты измерений МАЭД на технической территории. Также в Таблице 2 показана локализация точек измерений (Рисунок 19).

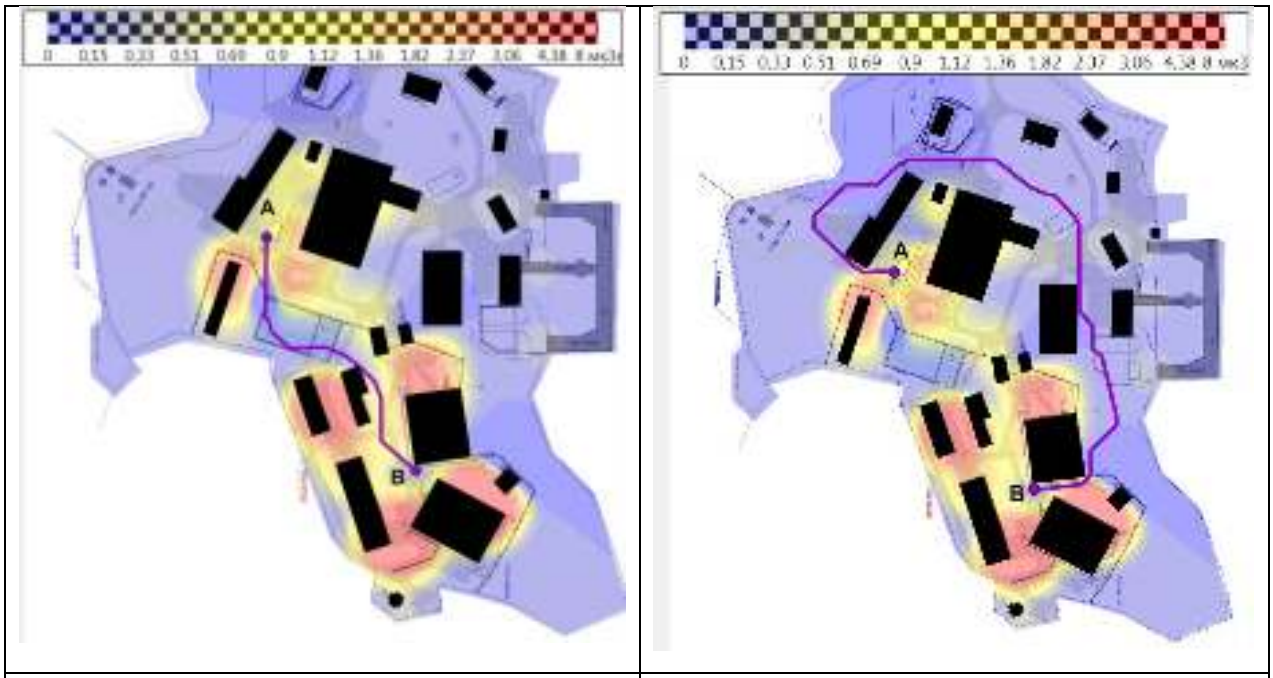
Таблица 2 – Измеренные значения МАЭД на промышленной площадке СЗЦ «СевРАО» в губе Андреева за даты 01.01.2011 и 08.01.2011, мкЗв/ч

Схема размещения точек измерения	№ точки	01.01. 2011	08.01. 2011	№ точки	01.01. 2011	08.01. 2011
	1	0,12	0,12	**20**	10,24	10,25
	2	0,12	0,12	**21**	0,46	0,45
	3	0,13	0,12	**22**	0,51	0,47
	4	0,11	0,14	**23**	3,14	3,25
	5	0,18	0,16	**24**	0,62	0,58
	6	0,22	0,19	**25**	0,54	0,51
	7	0,21	0,21	**26**	0,99	0,85
	8	0,31	0,28	**27**	0,96	0,95
	9	0,27	0,23	**28**	0,98	0,9
Рисунок 19 – Схема точек РМО, снимок экрана интерфейса ввода данных ПО EasyRAD	**10**	0,38	0,38	**29**	1,14	1,2
	11	0,56	0,55	**30**	0,73	0,65
	12	4,2	4,5	**31**	0,69	1,1

Схема размещения точек измерения	№ точки	01.01. 2011	08.01. 2011	№ точки	01.01. 2011	08.01. 2011
	13	4,68	4,7	**32**	1	1,25
	14	1,87	1,96	**33**	1,02	1,23
	15	20,96	21,15	**34**	2,14	3,55
	16	17,18	17,25	**35**	1,12	1,25
	17	1,72	1,65	**36**	1,16	1,18
	18	0,54	0,45	**37**	0,35	0,35
	19	2,15	2,3			

В этот период никакие работы на промышленной площадке не выполнялись, поэтому можно считать, что радиационная обстановка на ней изменялась слабо, а отличия, которые мы видим в отдельных точках измерений, обусловлены случайными факторами. Все пять гридов мощности дозы на указанные даты также визуально не отличаются друг от друга; примером этого могут служить два грида на Рисунке 20.

К каждому из пяти гридов был применен алгоритм поиска пути с минимальной дозой. Поскольку гриды незначительно отличаются, то маршрут с минимальной дозой для гридов варьировался – либо это был маршрут №1, либо маршрут №2 (Рисунок 20). В результате Маршрут №1 был построен для трех, а маршрут №2 для двух гридов, см. Таблицу 3. Также для каждого грида были рассчитаны дозы внешнего облучения при прохождении маршрутов №1 и №2, для их сравнения.



Маршрут №1, длиной 267 м.	Маршрут №2, длиной 611 м.

Рисунок 20 – Маршруты №1 и №2 из точки А в точку В. Шкала грида радиационной обстановки в мкЗв/ч. Скриншот из ПО EasyRAD.

Таблица 3 – Сравнение доз внешнего облучения персонала на маршрутах №1 и №2 для пяти гридов радиационной обстановки на промышленной площадке отделения губа Андреева СЗЦ «СевРАО». Серым цветом обозначен маршрут с минимальной дозой внешнего облучения персонала для каждого грида.

№ грида	Дата проведения РМО	Доза на маршруте №1, мкЗв/ч	Доза на маршруте №2, мкЗв/ч
1	18.12.2010	3,25	3,39
2	25.12.2010	3,39	3,33
3	01.01.2011	3,47	3,25
4	08.01.2011	3,31	3,50
5	15.01.2011	3,36	3,53

Для каждого грида МАЭД путь с минимальной дозой находился по алгоритму поиска пути для точно известных весов ребер, независимо от того, какой маршрут – №1 или №2 находился в результате применения алгоритма. Вместе с тем знание нескольких путей с дозами облучения, близкими к минимальной дозе, имеет большое практическое значение, хотя бы из-за наличия

альтернативы – следовать ли по длинному маршруту с низкими значениями доз и меньшей неопределенностью[1] или отправиться по другому маршруту, где доза окажется всего на несколько процентов ниже, но малейшее отклонение от траектории движения может привести к значительному возрастанию дозы по маршруту (маршрут №1 вблизи точки В на Рисунке 20).

3.3.2 Задача поиска маршрута с наименьшей возможной дозой внешнего облучения

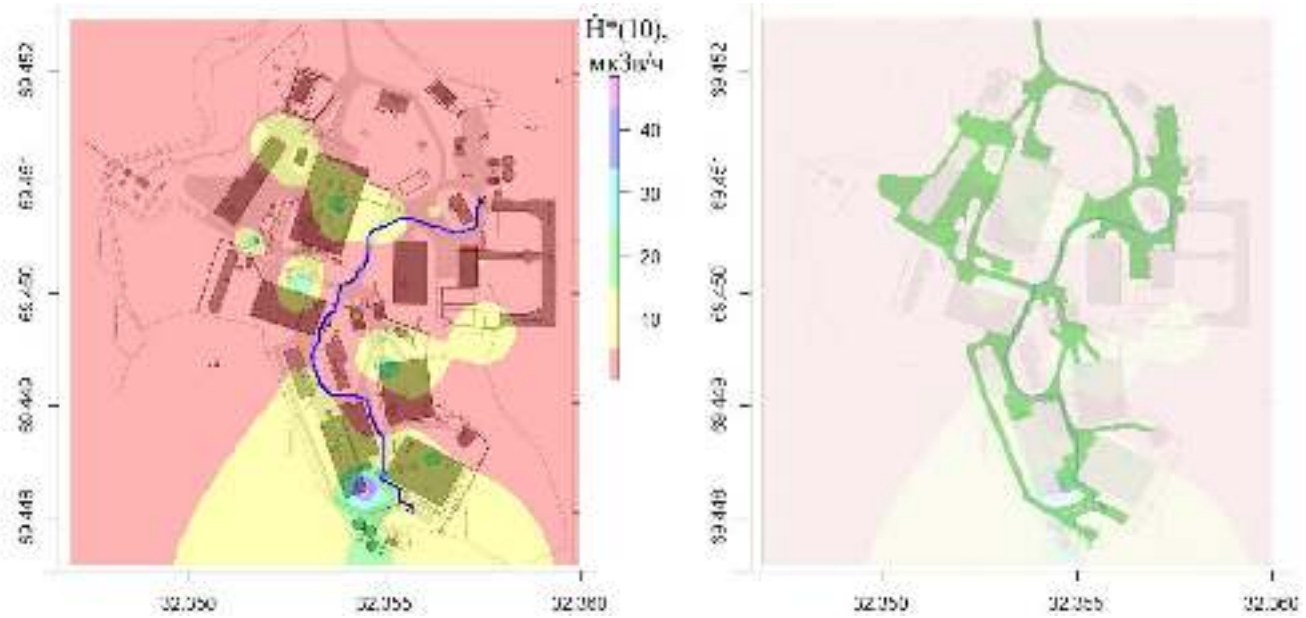
Задача поиска маршрута с наименьшей возможной дозой внешнего облучения заключается в том, чтобы найти на взвешенном графе радиационной обстановки последовательность прохождения рёбер графа с минимальным общим весом. Эта задача применима в ситуациях существующего облучения, в частности на средней и поздней фазах радиационной аварии при планировании маршрутов движения персонала при ликвидации последствий аварии, а также для оценки целесообразности эвакуации населения и сравнения путей эвакуации.

Для поиска пути с минимальной дозой использован алгоритм Дейкстры [86, 113]. На вход алгоритма подаётся взвешенный неориентированный граф с рёбрами неотрицательного веса. На выходе алгоритм даёт набор кратчайших путей от выбранной вершины до всех остальных.

Результат работы алгоритма с учётом движения только по дорогам показан на Рисунке 21 для промышленной площадки в губе Андреева. Шаг сетки грида по вертикали и горизонтали – 2 метра, скорость движения – 1 м/с, время в пути – 22 минуты, на маршруте $H_p(10)$ = 1,52 мкЗв/ч, СГО = 1,96. В данном примере грид МАЭД построен по модельным значениям, близким к реальным результатам измерений (Таблица 4).

---

[1]Согласно расчетам, выполненным в ИАС РБП, при неопределенности грида МАЭД равной ГСО = 2,54, неопределенность по маршруту №1 составила ГСО = 1,91, по маршруту №2 – ГСО = 1,78.



(a) (b)

Рисунок 21 – (a) – Синий линией обозначен маршрут с минимальной дозой внешнего облучения на промышленной площадке отделения губа Андреева СЗЦ «СевРАО», по осям заданы условные координаты, грид МАЭД – в мкЗв/ч. (b) – Используемая в расчёте маршрута маска дорог, зелёным цветом обозначена зона, в которой возможно передвижение.

Таблица 4 – Данные РМО для задачи поиска пути с минимальной дозой внешнего облучения, показанной на Рисунке 21, номера точек указаны в соответствии с Рисунком 19

№ точки	МАЭД, мкЗв/ч	№ точки	МАЭД, мкЗв/ч
1	0,14	21	3
2	2	22	1,15
3	1	23	2,6
4	0,15	24	4,85
5	0,25	25	5,45
6	0,35	26	1,35
7	5	27	34
8	8	28	1,98
9	6	29	2,24
10	13	30	45
11	0,65	31	3,99

№ точки	МАЭД, мкЗв/ч	№ точки	МАЭД, мкЗв/ч
12	18,55	32	1,35
13	30	33	2
14	1,19	34	3,19
15	18,95	35	6,67
16	48,55	36	22
17	0,78	37	10
18	19		
19	15		
20	6,35		

3.3.3 Задача поиска маршрута оптимальной последовательности посещения контрольных точек

На промышленной площадке и в производственных помещениях существует определённый набор точек, в которых необходимо последовательное пребывание персонала, т.е. их последовательный обход. Это могут быть контрольные точки для проведения измерений, места расположения пробоотборников, места производственных операций, либо места расположения оборудования. Задача состоит в том, чтобы найти маршрут посещения этих точек, при котором человек получит минимально возможную дозу.

Алгоритм решения показан на примере четырех контрольных точек графа радиационной обстановки (Рисунок 22). Маршрут обхода начинается и заканчивается в контрольной точке 1. В графе радиационной обстановки выбираются контрольные точки 1, 2, 3 и 4 (Рисунок 22А). Полный граф состоит из вершин в выбранных точках 1, 2, 3 и 4, а веса ребер равны весу кратчайшего пути между этими точками. Полный граф для случая четырех контрольных точек показан на Рисунке 22В.

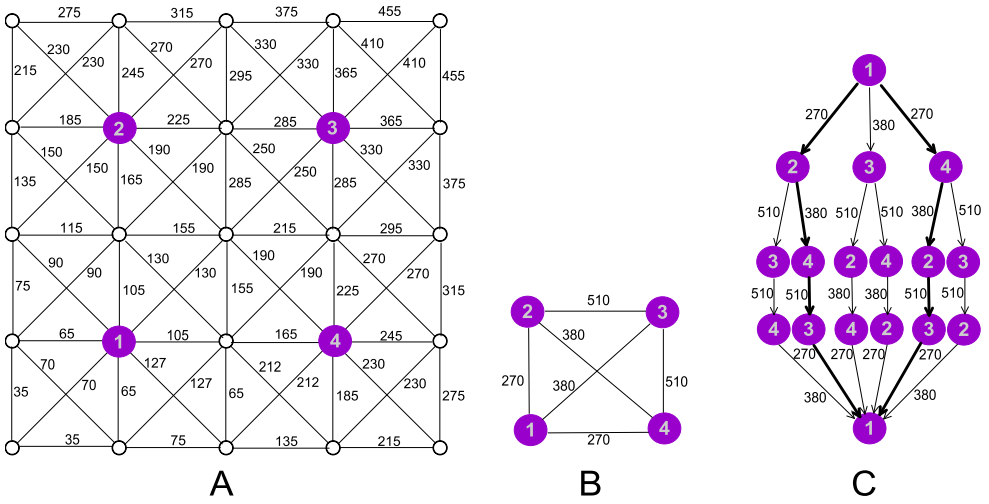


Рисунок 22 – Пример поиска маршрута оптимальной последовательности посещения четырёх контрольных точек, обозначенных на рисунке цифрой в фиолетовом кругу. А – граф радиационной обстановки, В – полный граф для случая четырех контрольных точек, С – вспомогательный древовидный граф. Рядом с рёбрами графа указан их вес в нЗв.

Веса кратчайших путей находятся с помощью алгоритма Дейкстры. Затем подготавливается вспомогательный древовидный граф (этот граф для четырех точек 1, 2, 3 и 4 показан на Рисунке 22С). После того, как граф построен, к нему также применяется алгоритм Дейкстры, чтобы найти кратчайший путь от вершины 1 до вершины 1. Такой замкнутый маршрут будет определять порядок прохождения точек, что соответствует минимальной полученной дозе. Этот подход также применим в случае, когда начальная точка обхода не соответствует конечной. В рамках диссертации были решены задачи обхода максимум для 11-ти точек. На персональном компьютере с тактовой частотой процессора 2,6 ГГц и оперативной памятью 8 Гб задача для 11-ти точек решалась за несколько часов. При большом числе обходных точек, с целью уменьшения время вычислений, в литературе [114] предложено использовать метод ветвей и границ.

На Рисунке 23 показан пример работы системы при поиске оптимальной последовательности обхода данного набора из пяти контрольных точек на промышленной площадке в губе Андреева, по условию задачи перемещение было разрешено работнику по всех территории, а не только по дорогам, исключая

переходы через здания. Шаг сетки грида по вертикали и горизонтали – 5 метров, скорость движения – 1 м/с, на маршруте $H_p(10) = 0{,}96$ мкЗв/ч, СГО = 1,96. В данном примере грид МАЭД построен по модельным значениям результатов измерения МАЭД, приближенным к реальным (Таблица 4).

Рисунок 23 – Результат решения задачи об оптимальном маршруте посещения заданного набора из пяти контрольных точек для промышленной площадки отделения губа Андреева СЗЦ «СевРАО»

3.3.4 Задача оптимального покрытия дорожной сети

Задача оптимального покрытия дорожной сети: на известной транспортной сети выбрать такой маршрут, чтобы пройти по каждой дороге хотя бы один раз и получить при этом минимально возможную дозу. Решение этой задачи может привести к снижению облучения персонала при дезактивации дорожного покрытия и доз, полученных водителями, работающими на радиоактивно загрязненных участках.

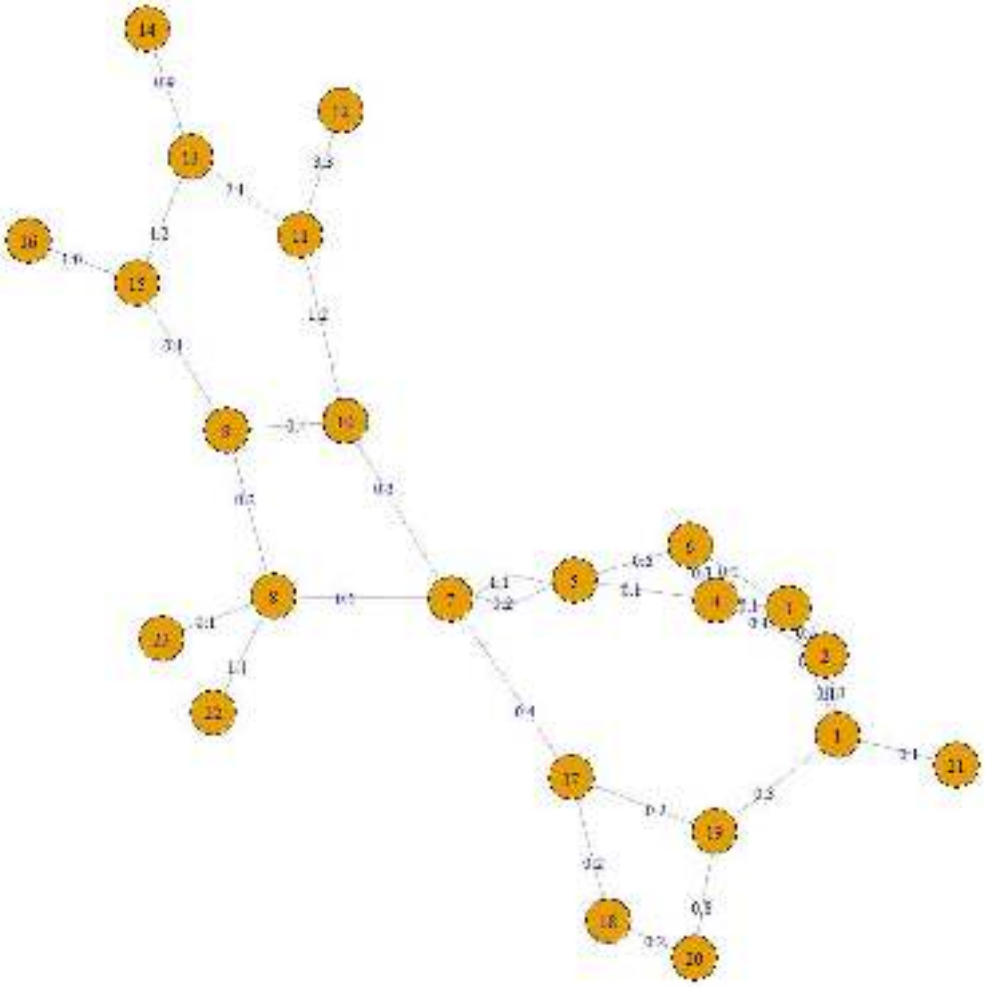
Согласно теории графов [85], решение этой проблемы состоит в нахождении цикла Эйлера, то есть такого способа обхода графа дорожной сети, при котором обход осуществляется по всем рёбрам графа строго по одному разу.

Общий вес любого цикла Эйлера равен суммарному весу всех рёбер графа. Для графа радиационной обстановки общий вес рёбер равен дозе, полученной при перемещении вдоль всех дорог транспортной сети предприятия. Необходимое и достаточное условие для существования такого цикла для связного неориентированного графа является отсутствие вершин нечетной степени [85]. Для транспортной сети это означает отсутствие Т-образных пересечений и тупиков. Если это условие выполнено, то существует цикл Эйлера обхода такой транспортной сети, т.е. существует маршрут её оптимального покрытия.

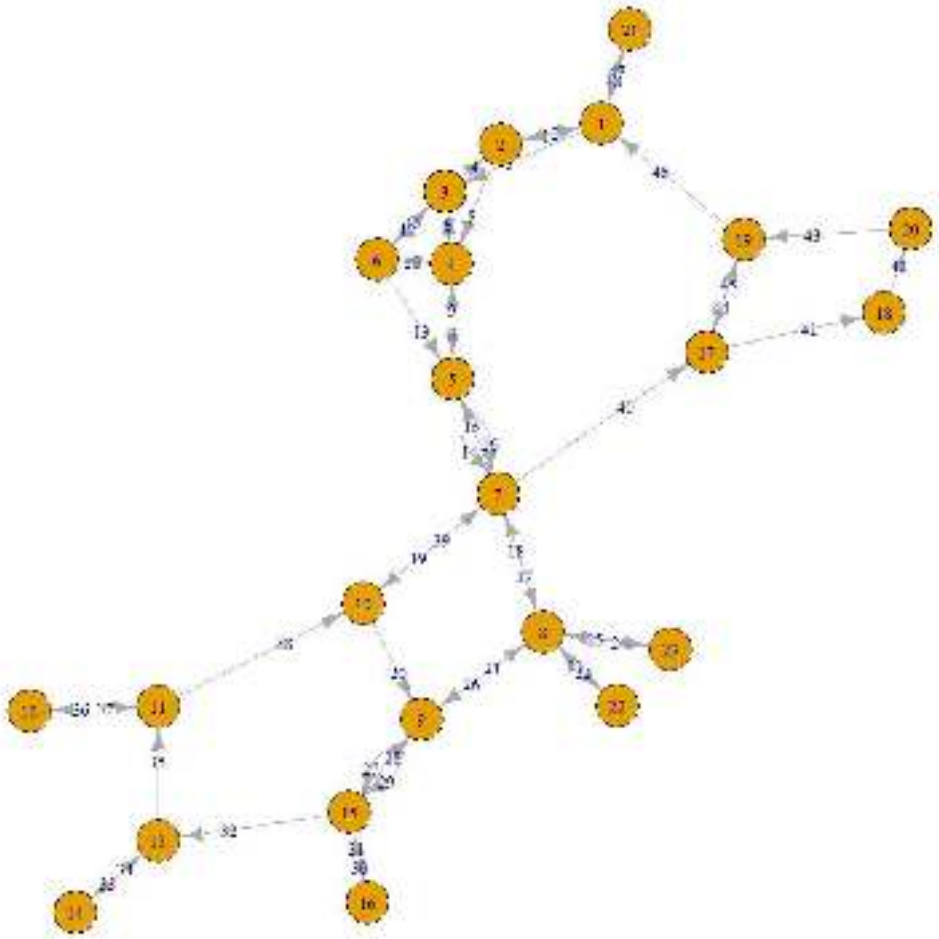
Если транспортная сеть объекта, содержит Т-образные перекрестки и/или тупики, то нет способа обойти каждое ребро транспортной сети строго по одному разу (нет цикла Эйлера). В этом случае необходимо завершить построение графа так, чтобы соединить все нечетные вершины, но с условием, чтобы сумма весов всех возможных комбинаций пар вершин осталась минимальной. Поэтому в граф необходимо добавить дополнительные рёбра, указывающие на неизбежные неоднократные проходы по существующим дорогам между двумя соседними узлами (перекрёстками) транспортной сети.

Пример решения этой задачи для промышленной площадки отделения Северо-Западного Центра «СевРАО» в губе Андреева представлен на Рисунке 24 (модельный пример).

Схема промышленной площадки, каждый перекрёсток или тупик обозначен как вершина графа, (а)



Граф промышленной площадки, вес рёбра графа равен дозе, получаемой при прохождении по нему, мкЗв, (b)



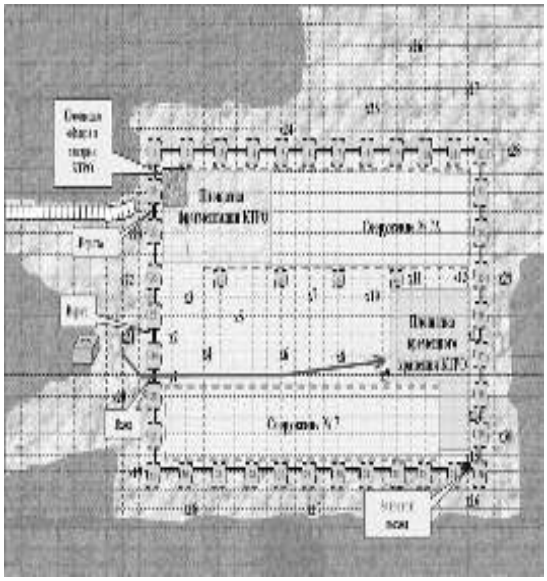
Решение задачи оптимального покрытия дорожной сети, числа над рёбрами графа обозначают последовательность прохождения дорог, (c)

Рисунок 24 – Пример решения задачи оптимального покрытия дорожной сети на промышленной площадке отделения губа Андреева СЗЦ «СевРАО»

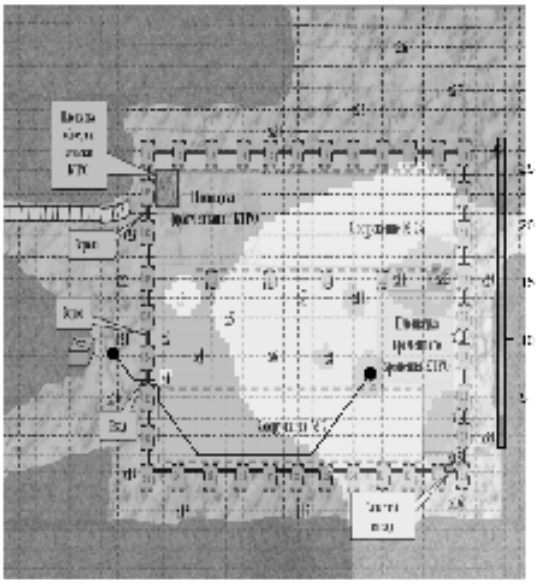
3.4 Экспериментальная оценка индивидуальной эквивалентной дозы дозиметристов при проведении радиационного контроля

В отделении губа Андреева СЗЦ «СевРАО» была проведена экспериментальная проверка разработанного ПО – сравнение показаний дозиметра и расчётов в ИАС РБП. Для этого сотрудник отделения совершил работу, связанную с перемещением по загрязнённой территории (ломаная линия на Рисунке 25(a)). По индивидуальному дозиметру ДКГ-АТ2503, установленному

на груди сотрудника, был определен $H_p(10) = 1{,}00 \pm 0{,}15$ мкЗв, при времени перемещения $t = 12$ минут и пройденном расстоянии $L = 52{,}8$ м. Расчёт индивидуального эквивалента дозы внешнего облучения на маршруте в ИАС РБП дал значение $H_p(10) = 0{,}89$ мкЗв. Также программой был предложен маршрут с минимальной дозой, Рисунок 25(b). Исходя из реального времени перемещения $t = 12$ минут и пройденного расстояния $L = 52{,}8$ м рассчитана скорость передвижения дозиметриста на маршруте $V = 0{,}071$ м/с. При такой скорости на маршруте с минимальной дозой он получит $H_p(10) = 0{,}84$ мкЗв и пройдёт данный маршрут длиною $L = 64{,}3$м за $t = 15{,}09$ минуты (Рисунок 25(b)). Погрешность оценки дозы вычислена через ГСО, равное в данном примере 1,7. Таким образом, в этом примере при прохождении по предложенной программой траектории, можно сократить дозу на 0,05 мкЗв (на 6%).



(a)



(b)

Рисунок 25 – (a) – Схема рабочего помещения и маршрут сотрудника отделения губа Андреева СЗЦ «СевРАО» , (b) – рассчитанный программой вариант с минимальной дозой (b), шаг сетки = 3 метра (размер карты 106,5 на 85,5 метра)

Дозиметристы отделения губа Андреева СЗЦ «СевРАО» проводят радиометрический контроль помещений и промышленной площадки по утверждённой схеме и последовательности обхода точек. С использованием ИАС

РБП был найден оптимальный маршрут обхода точек в Сооружении-укрытии №201, при котором персонал получит наименьшую дозу, Рисунок 26. На маршруте, пройденном дозиметристом, $H_p(10) = 4{,}5 \pm 0{,}7$ мкЗв по показанию индивидуального дозиметра, а исходя из расчёта в программе на основе грида радиационной обстановки $H_p(10) = 2{,}6$ мкЗв, оценка неопределённости рассчитывалась по методологии RADRUE [44] и выражалась как 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 оценке дозы по гриду, Рисунок 26. Таким образом, прохождение по оптимальному маршруту, предложенному программой, позволяет снизить дозу облучения на маршруте в 1,6 раза.

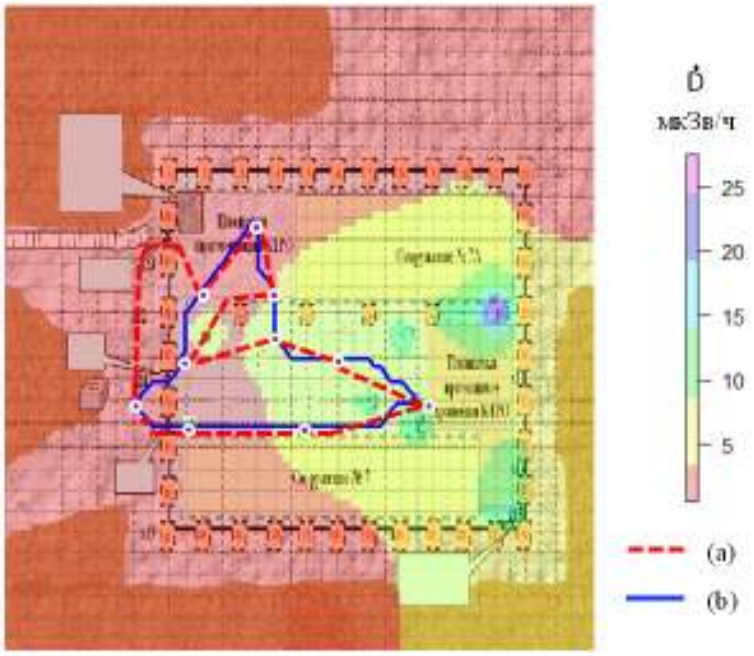


Рисунок 26 – Маршрут дозиметриста (a); маршрут, рассчитанный в программе (b). Размер карты территории: 106,5x85,5 м, шаг сетки: 3 м

3.5 Обсуждение полученных результатов

Использование методов теории графов в области радиационной безопасности не ограничивается тремя задачами, которые решены в этой главе. С помощью теории графов могут быть решены задачи оптимизации оснащения

аварийно-спасательных команд, проблема распределения ресурсов, проблемы оптимального количества и расположения точек радиационного контроля и др.

В данной диссертации рассматриваются только дозиметрические аспекты задачи выбора оптимальных путей для персонала в ситуациях существующего облучения. Очевидно, что этого достаточно для поиска маршрутов минимальной дозы, которая строго соответствует принципу ALAP (настолько низко, насколько это возможно), а не принципу ALARA (настолько низко, насколько возможно в разумных пределах) [115]. Для реализации принципа ALARA необходимо (наряду с дозиметрической аспектом) рассматривать экономический аспект создания дополнительной транспортной сети. Это может быть сделано в рамках модели графа, описанной в данной главе, если в весе ребра принимать во внимание не только дозу, но и составной индекс, который включает в себя стоимость создания возможности перемещения вдоль этого ребра (дополнительные транспортные маршруты).

Компьютерные коды для решения задач данной главы приведены на веб-сайте Github [116].

3.6 Выводы

1. Разработан метод минимизации доз 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.

2. Решена задача поиска маршрута обхода контрольных точек с наименьшей возможной дозой внешнего облучения, что позволяет минимизировать дозы внешнего облучения персонала при проведении радиометрического обследования территории. Приведён пример решения задачи для пяти точек на промышленной площадке отделения губа Андреева СЗЦ «СевРАО».

3. Решена задача оптимального покрытия дорожной сети, что позволяет минимизировать дозы внешнего облучения персонала при перемещении по

радиоактивно загрязнённой территории. Приведён пример решения задачи для промышленной площадки отделения губа Андреева СЗЦ «СевРАО».

ГЛАВА 4. АНАЛИЗ РАДИАЦИОННОЙ ОБСТАНОВКИ НА ЗАГРЯЗНЁННОЙ ТЕРРИТОРИИ С ПОМОЩЬЮ МЕТОДА ДЕКОМПОЗИЦИИ ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ ИНТЕГРАЛА МОЩНОСТИ АМБИЕНТНОГО ЭКВИВАЛЕНТА ДОЗЫ

4.1 Характеристика отделения губа Андреева СЗЦ «СевРАО» до начала реабилитации

В главе представлен обзор и детальный ретроспективный анализ данных по радиационной обстановке в отделении губа Андреева СЗЦ «СевРАО». ПВХ ОЯТ и РАО в губе Андреева был построен в начале 60-х годов и предназначался для перезарядки реакторов атомных подводных лодок (АПЛ) и кораблей ледокольного флота, временного хранения ОЯТ, твердых и жидких (ТРО и ЖРО) радиоактивных отходов, образующихся в процессе эксплуатации и ремонта. ПВХ расположен на Кольском полуострове в Мотовском заливе, на западном берегу губы Западная Лица [117]. Площадка застроена 1-5 этажными зданиями и сооружениями промышленного типа. Площадь территории 230 000 м^2. Схематический план ПВХ по состоянию на 2002 год представлен на Рисунке 27.

На Северном флоте выстроилась следующая модель обращения с ОЯТ [117]: выгрузка активной зоны из реактора в пункте судоремонта – размещение в плавучем хранилище (ПТБ) – доставка морем к причалу в губе Андреева – перевалка на автотранспорт – передача на хранение в Здание №5 – выдержка в автономных бассейнах с водой (съем остаточных тепловыделений) – выгрузка «холодного» (не требующего систем охлаждения) топлива для отправки на переработку (начиная с 1973 г.). На протяжении 20 лет (1963–1983 гг.) ежегодно на хранение в Здание №5 поступало ОЯТ от 10-16 реакторов, начиная с 1975 г. – столько же отправлялось на химкомбинат «Маяк» (в настоящее время ФГУП «Производственное объединение Маяк»).

В 2000 году распоряжением Правительства РФ от 09.02.2000 № 220-р береговая база перезарядки реакторов ВМФ в гб. Андреева, была расформирована [118]. Всего к 2000 г. на БТБ №569 было перегружено 350 активных зон реакторов и отправлено 146 эшелонов с ОЯТ на «Маяк». К моменту расформирования на площадке в гб. Андреева находилось около 100 активных зон АПЛ, Таблица 5. Активность[2], диспергированная по территории ПВХ в гб. Андреева в 2002 году (Таблица 5, правый столбец), составляла $6{,}5 \cdot 10^{11}$ Бк, основной вклад в дозу давал радионуклид ^{137}Cs [118].

Таблица 5 – Активность отработавших тепловыделяющих сборок (ОТВС) и РАО в гб. Андреева

Через площадку прошло ОТВС, активностью (Бк)	На площадке находится ОТВС [118], активностью (Бк)	Суммарная активность ТРО, Бк	Активность на площадке в 2002 г., Бк
$5{,}2 \cdot 10^{17}$	$1{,}3 \cdot 10^{17}$	$6{,}0 \cdot 10^{14}$	$6{,}5 \cdot 10^{11}$

В 2001 году, на момент передачи бывшей береговой технической базы военно-морского флота в губе Андреева от Министерства обороны Российской Федерации в ведение Министерства Российской Федерации по атомной энергии (ныне – Государственная корпорация по атомной энергии «Росатом»), большинство зданий находилось в аварийном состоянии [118] и непрерывно загрязняли окружающую среду. Суммарная активность радионуклидов на территории ПВХ до сих пор превышает $1{,}3 \cdot 10^{17}$ Бк (Таблица 5).

Основными источникам радиоактивного загрязнения территории ПВХ являются: бывшее хранилище ОЯТ (Здание №5), блоки сухого хранения ОЯТ (блоки БСХ), хранилища твердых радиоактивных отходов (площадка ТРО) и хранилище ЖРО, см. Рисунок 27 и Таблицу 7.

---

[2]Активность рассчитана методом конверсионных коэффициентов [68,73] на основе данных радиометрического контроля.

Бывшее хранилище ОЯТ (Здание №5). Хранилище было введено в эксплуатацию двумя очередями в 1962 и 1973 годах. В 1982 году было зафиксировано снижение уровня воды в бассейнах, что свидетельствовало о потере их герметичности. Течь происходила в днищевом районе сварного шва металлической обечайки на границе старого хранилища (постройки 1962 г.) и нового хранилища (1972-1974 гг.). Скорость вытекания в пике доходила до 30 тонн в сутки (удельная активность воды $A_{уд}$ ~ $3{,}7 \cdot 10^7$ Бк/л). Вода, вытекавшая из бассейнов в Здании №5, оказалась радиоактивной, т.к. в регламент выдачи чехлов в эксплуатацию в начале 70-х годов была введена операция прокалывания мембран чехлов и слива непосредственно в бассейны воды, которая имела контакт с ОТВС и, в ряде случаев, с ОТВС, имеющих разрушенные оболочки [119].

Все отработавшее топливо было перегружено в блоки сухого хранения (1547 чехлов), отдельные ОТВС с просыпями удалили полностью[3], однако на дне бассейнов в виде иловых отложений находятся просыпи от дефектного ОЯТ [91] общей активностью около $1{,}5 \cdot 10^{14}$ Бк. В результате протечки радиоактивной воды из Здания №5 в окружающую среду, по оценкам, попало около $3{,}7 \cdot 10^{13}$ Бк. Радиоактивная вода попала в грунт под здание, а также на прилегающую территорию, в том числе в протекающий под Зданием №5 ручей. Ручей выходит на поверхность примерно в 15-20 м от Здания №5 и далее течёт по поверхности до береговой линии.

Блок сухого хранения ОЯТ (БСХ) состоит из трёх ёмкостей, переоборудованных под сухое хранение, (изначально ёмкости предназначались для сбора и хранения жидких радиоактивных отходов). Ёмкость 3А БСХ введена в эксплуатацию в 1983 году, полная загрузка проведена в 1985 году. Внутри части ячеек ёмкости находится вода. В 2004 году над ёмкостью построено временное укрытие для защиты от атмосферных осадков. Ёмкости 2А, 2Б введены в эксплуатацию в 1987 году, основная загрузка проведена в 1989 году, дозагрузка проведена в 1993 и 1995 годах. Общая загрузка хранилища по трем ёмкостям

[3] По результатам обследования в бассейнах Здания №5 обнаружено 5 ОТВС [102].

составляет около 100 активных зон атомных подводных лодок. Срок выдержки топлива более 20 лет с момента выгрузки из ядерных реакторов. Над ёмкостями были установлены съемные перекрытия. Перекрытия и ячейки не герметичны. На 1 октября 2009 г. в БСХ хранилось 35 тонн ОЯТ.

Хранилища ТРО. Для хранения ТРО на ПВХ используются 7 хранилищ и три открытые площадки, Рисунок 27. Количество накопленных ТРО на объекте составляет ~$1{,}76 \cdot 10^4$ м^3, суммарная активность $6{,}0 \cdot 10^{17}$ Бк. В Таблице 6 приводится оценка ТРО по группам активности [91].

Таблица 6 – количественная оценка накопленных на объекте ТРО по категориям

Общее количество ТРО, м^3	В том числе:		
	Низкоактивных, м^3	Среднеактивных, м^3	Высокоактивных, м^3
17600	11800	4300	1500

Хранилища ТРО эксплуатируются 35 лет. Сведения о состоянии заглубленных строительных конструкций (фундаментных плит, стен, перегородок) и находящегося там ТРО отсутствуют. Ряд хранилищ ТРО утратили герметичность, в результате чего радиоактивные вещества загрязнили часть территории.

Для хранения ЖРО на объекте используются 4 ёмкости, расположенные в хранилище ЖРО (Здание №6). Ёмкости объемом 400 м^3 каждая заглублены на полную высоту, выполнены из бетона и облицованы нержавеющей сталью. Полный объем ЖРО на объекте составляет ~1400 м^3, имеет суммарную активность ~ 2,2 ТБк. Срок эксплуатации ёмкостей ЖРО давно истек. Три из указанных ёмкостей негерметичны, и возможно поступление ЖРО в окружающую среду, особенно в период выпадения осадков.

Построенные на БТБ комплексы глубокой очистки ЖРО применения не нашли, и все жидкие отходы сливались в море[4] (на Северном флоте – до 5000 $м^3$/год). Авария со Зданием №5 увеличивала эти сливы вдвое.

Из сказанного выше становятся понятны пути радиационного воздействия на персонал ПВХ в губе Андреева:

- ионизирующие излучения от ОЯТ, ТРО и ЖРО, хранящихся на промышленной площадке предприятия;
- ионизирующие излучения при обращении с РАО (сбор, транспортирование и хранение РАО);
- загрязненные рабочие поверхности и загрязненность воздуха помещений радиоактивными веществами и аэрозолями при обращении с РАО, при проведении радиационного контроля, ремонтных и дезактивационных работ.

Таблица 7 – Активность в зданиях и сооружениях ПВХ в губе Андреева на 2002 г.

№	Здание или сооружение	Активность, Бк
1	Пирс	неизвестно
2	Здание №50	неизвестно
3	Блок сухого хранения	$1.3 \cdot 10^{17}$
4	Здание №5	$1.4 \cdot 10^{17}$
5	Монжусная площадка	$1.9*10^{12}$
6	Здание №6	неизвестно
7	Здание №67А	$7.4*10^{10}$
8	Здание №7Е	$2.3*10^{14}$
9	Здание №7В	неизвестно
10	Здание №7G	$2.6*10^{12}$
11	Здание №7V	$6.7*10^{12}$
12	Здание №67	$3*10^{10}$
13	Здание №7 (площадка)	10^{12}

[4]Минздравом СССР в своё время был санкционирован сброс в Карское и Охотское моря радиоактивных отходов, образующихся при строительстве, эксплуатации и ремонте кораблей ВМФ с ЯЭУ. Для обеспечения этих процедур к БТБ и пунктам базирования ПЛА был приписан ряд судов и плавсредств, предназначенных для приема, хранения и транспортирования жидких РАО, в том числе, 8 самоходных технических танкеров проекта 1783А.

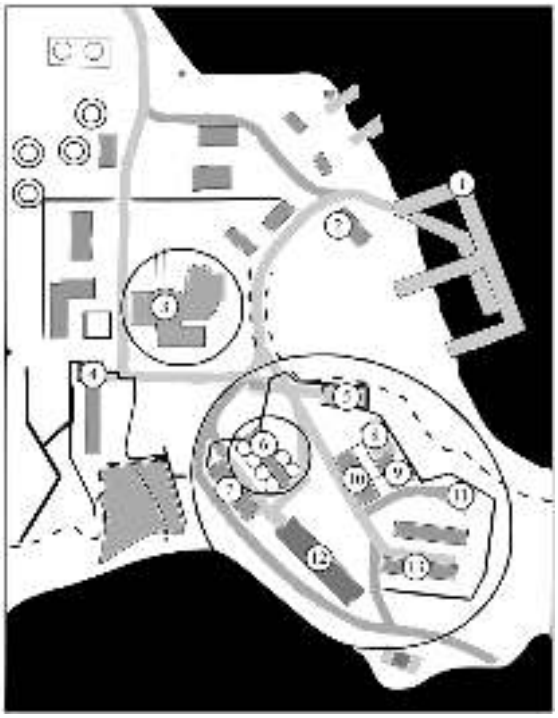


Рисунок 27 – Схематический план ПВХ в губе Андреева на 2002 год

При реабилитации отделения губа Андреева СЗЦ «СевРАО» одним из организационных мероприятий, направленных на обеспечение РБ персонала и минимизацию его дозовых нагрузок, является управление дозами облучения персонала посредством предварительного прогноза, основанного на разработке подробных сценариев проведения реабилитационных работ. С этой целью созданы ИАС РБП: Rockville, Andreeva Planner и EasyRAD [109].

В главе представлены результаты по исследованию динамики РО в отделении губа Андреева СЗЦ «СевРАО» за период реабилитации объекта с 01.07.2002 по 06.02.2016. Внедрение и применение ИАС РБП для поддержки принятия решений службой РБ предприятия осуществлялось с 01.01.2009 г.

4.2 Динамика радиационной обстановки на промышленной площадке отделения губа Андреева СЗЦ «СевРАО» за период с 01.07.2002 по 06.02.2016

Анализ динамики радиационной обстановки неудобно выполнять непосредственно на наборе карт МАЭД. Для анализа динамики необходимо использовать обобщенный показатель. Мы предлагаем в качестве такого

показателя использовать интеграл МАЭД. Он вычисляется как сумма всех значений грида МАЭД. Удобство и информативность предложенного показателя будет продемонстрирована ниже. Временная зависимость интеграла МАЭД по территории ПВХ в гб. Андреева за период с 01.07.2002 по 06.02.2016 гг. представлена на Рисунке 28.

На Рисунке 28 крайняя левая точка соответствует интегралу грида МАЭД, который показан на Рисунке 6. Все остальные значения рассчитаны по картам, которые хранятся в информационно-аналитической системе – ИАС РБП. Каждая точка соответствует одной карте радиационной обстановки. Прямоугольники и круги на рисунке соответствуют выполнению определенных работ на ПВХ в губе Андреева. Фигуры с чёрным фоном соответствуют работам по созданию инфраструктуры, фигуры с белым фоном – мероприятиям по очистке территории. На Рисунке 28 обозначены следующие работы, часть которых являлась РОР:

1. Ликвидация участка хранения ТРО около Здания №50;
2. Ликвидация участка хранения ТРО около здания автотраспортной техники;
3. Ввод в эксплуатацию пункта дезактивации техники в летнее время;
4. Ликвидация участка хранения ТРО около БСХ;
5. Проведение работ по разделке плавучих ёмкостей;
6. Демонтаж старого пирса. Реконструкция нового технологического причала;
7. Построено Сооружение №152 для хранения контейнеров для низкоактивных ТРО;
8. Построены два модульных санпропускника, площадка для круглогодичной дезактивации техники, радиохимическая лаборатория в Здании №50;
9. Вывезено 290 ОТВС из контейнеров 6-го типа;
10. Построены и сданы в эксплуатацию два Сооружения-укрытия №201 и №202;
11. Строительство цеха по обращению с ОЯТ – Сооружение-укрытие №153;
12. Проведено обследование партии ОЯТ в ёмкости 2А.

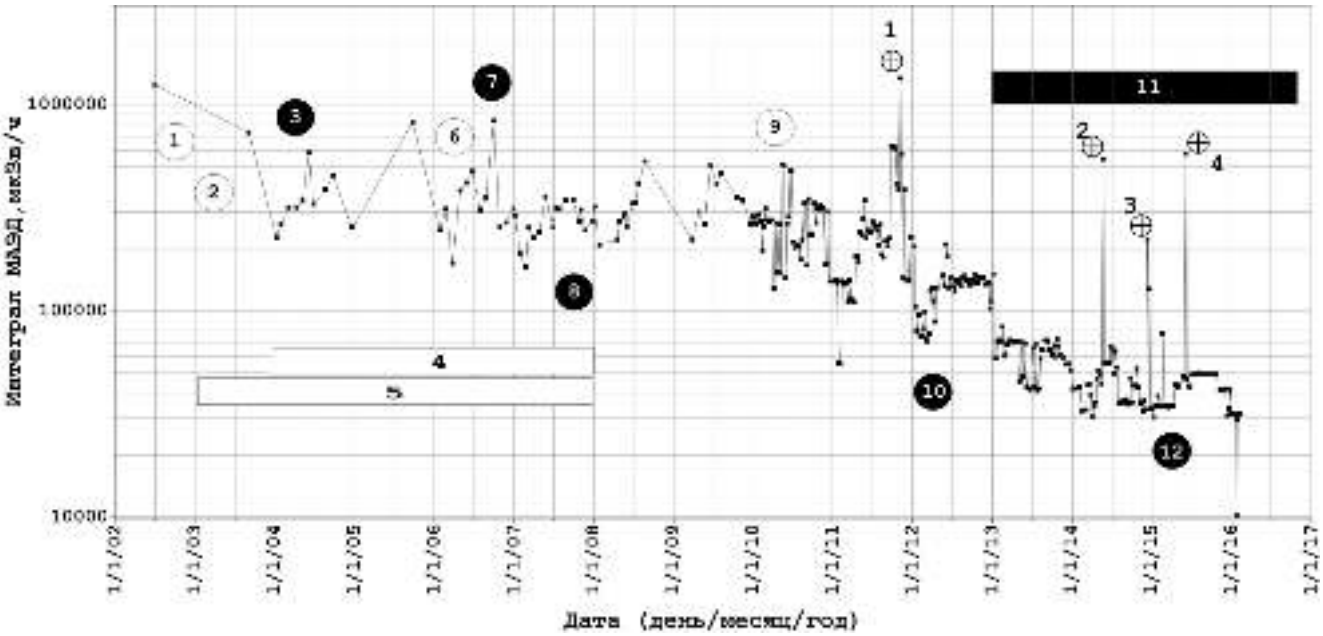


Рисунок 28 – Временная зависимость интеграла МАЭД на промышленной площадке в отделении губа Андреева СЗЦ «СевРАО» за период с 01.07.2002 по 06.02.2016 гг. Числами обозначены работы по реабилитации объекта (пояснения в тексте), символом ⊕ – 4 пика на графике (Таблица 8)

Вначале отметим, что в правой части Рисунка 28 можно выделить четыре пика в значениях интегрального показателя. Эти пиковые значения помечены на Рисунке 28 значком ⊕ и номером пика. Наиболее вероятно, что пиковое значение интегрального показателя может быть связано с выполнением работы, которая временно ухудшает параметры радиационной обстановки. В Таблице 8 время появления пика сопоставлено с работой, которая выполнялась в это время на территории ПВХ в гб. Андреева. Из приведенных в Таблице 8 данных, следует однозначный вывод о том, что четыре пика интегрального показателя на Рисунке 28, означающие ухудшение радиационной обстановки, четко привязаны к проводимым работам.

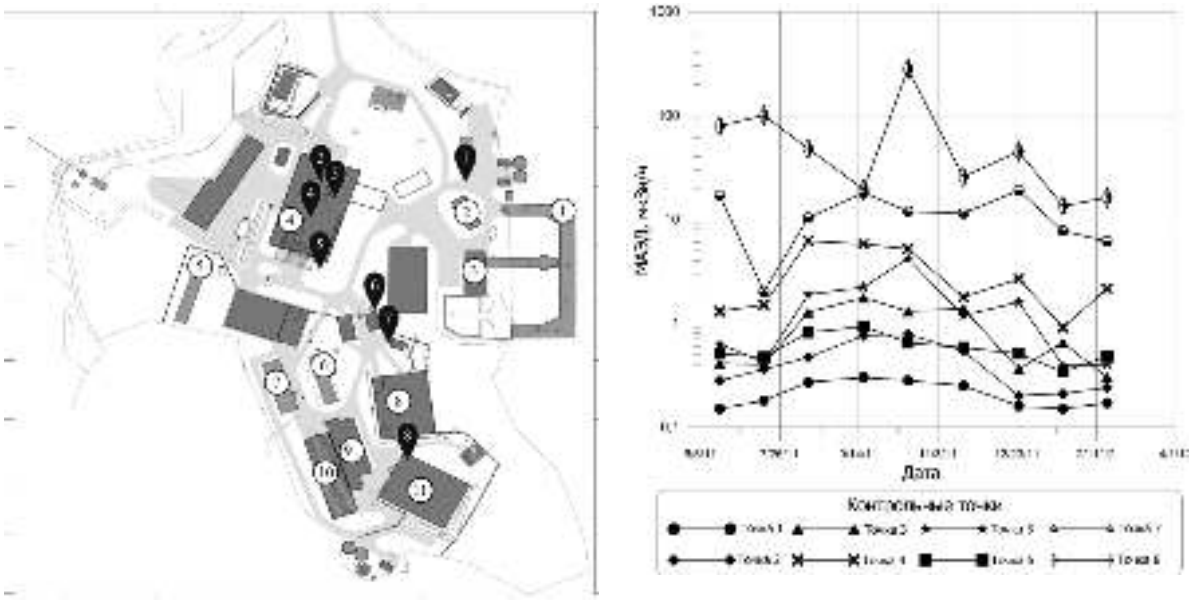
Для характеризации радиационной обстановки в ноябре 2011 г. от интегрального показателя перейдем к временным зависимостям в отдельных контрольных точках территории ПВХ в губе Андреева. На Рисунке 29 показана карта промышленной площадки в губе Андреева с указанием мест расположения 8-ми контрольных точек. Для каждой из этих 8-ми точек показана временная

зависимость МАЭД в период с 15.06.2011 по 20.02.2012 гг. Для всех 8-ми точек очевидно возрастание МАЭД в этот период, связанное с началом проведения работ на радиоактивно загрязнённом участке промышленной площадки.

Таблица 8 – Проведение работ в период с 2011 по 2015 гг. на территории ПВХ в гб. Андреева

№ пика	Время появления пика	Работа, проводимая в это время
1	Октябрь – декабрь 2011 г.	Проведение работ по нормализации РО на ёмкости БСХ 3А[5]
2	Апрель–май 2014 г.	Выемка грунта в районе ёмкости БСХ 3А
3	Декабрь 2014 – январь 2015 гг.	Буровые работы в районе ёмкостей БСХ 2А и 3А, грунтовые работы (перемещение, вывоз) на площадке строительства Сооружения-укрытия №153
4	Апрель – июнь 2015 г.	Инвентаризация ОЯТ на ёмкости БСХ 2А, апрель–май – основные работы, июнь – приведение в исходное состояние

[5] Работы по нормализации РО на ёмкости 3А связаны с вывозом бетонных плит – как подготовка к укладке горизонтальной биологической защиты из стальных трёхслойных плит. На ёмкостях 2А и 2Б бетонного перекрытия не было.



(a) (b)

Рисунок 29 – Временная зависимость МАЭД в 8-ми контрольных точках (метки чёрного цвета) с июня 2011 г. по февраль 2012 г. Числами в белых кругах отмечены: 1 – пирс, 2 – Здание №50, 3 – Здание №151, 4 – Сооружение-укрытие №153, 5 – Здание №5, 6 – Здание №6, 7 – здание №67А, 8 –Сооружение-укрытие №202, 9 – Здание №203, 10 – Здание №67, 11 – Сооружение-укрытие №201.

Все представленные выше результаты относятся к промышленной площадке в губе Андреева. Это связано с тем, что на протяжении всего периода наблюдений ситуация в сооружениях и помещениях площадки в губе Андреева изменялась незначительно, кроме сооружения БСХ, где проводились работы по нормализации РО на ёмкостях БСХ. Поэтому, касаясь вопроса динамики радиационной обстановки в помещениях и сооружениях в губе Андреева, достаточно показать радиационную обстановку в помещениях и сооружениях в губе Андреева на определенную дату, например, на октябрь 2011 г., Рисунок 30. На Рисунке 30 показано, что радиационная обстановка является наихудшей в здании №5 и в сооружении БСХ.

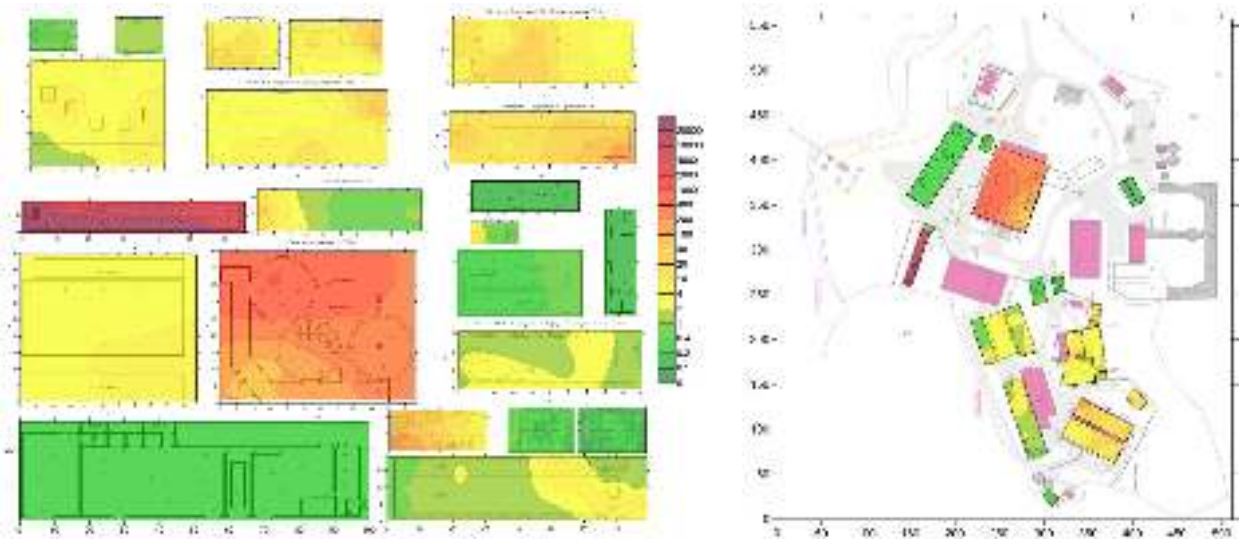


Рисунок 30 – МАЭД в помещениях и сооружениях на промышленной площадке в губе Андреева (мкЗв/ч) на октябрь 2011 г. Размеры по осям – в метрах

Динамика изменения интегрального показателя МАЭД на БСХ показана на Рисунке 31, числами отмечены следующие РОР: 1 – работы по нормализации РО на ёмкости 2Б, 2 – работы по нормализации РО на ёмкости 2А, 3 – отправка первой партии ОЯТ в количестве 290 ОТВС, 4 – подготовительные работы по установке горизонтальной защиты на ёмкости 3А. На фотографиях (Рисунок 32) показано состояние поверхностей ёмкостей БСХ до и после завершения укладки горизонтальной биологической защиты из стальных трёхслойных плит. Как можно видеть из приведенной на Рисунке 31 зависимости, интегральный показатель радиационной обстановки для БСХ уменьшился более чем в сто раз. Рассмотрим, каким образом было достигнуто такое значительное снижение интегрального показателя на ёмкостях БСХ. Для подготовки строительной площадки к строительству Сооружения-укрытия №153 на ёмкостях 2А, 2Б, 3А произведены работы по нормализации радиационной обстановки (установку горизонтальной биологической защиты, представляющей собой экран, состоящий из металлических сегментов из углеродистой стали. Толщина сегментов составляет для хранилища 2А – 75 мм, 2Б – 120 мм, 3А – 150 мм). Целью данных мероприятий было уменьшить мощность эквивалентной дозы γ-излучения

над поверхностью ёмкостей до 12 мкЗв/час в соответствии с [20], т.к. Сооружение-укрытие №153 является помещением временного пребывания.

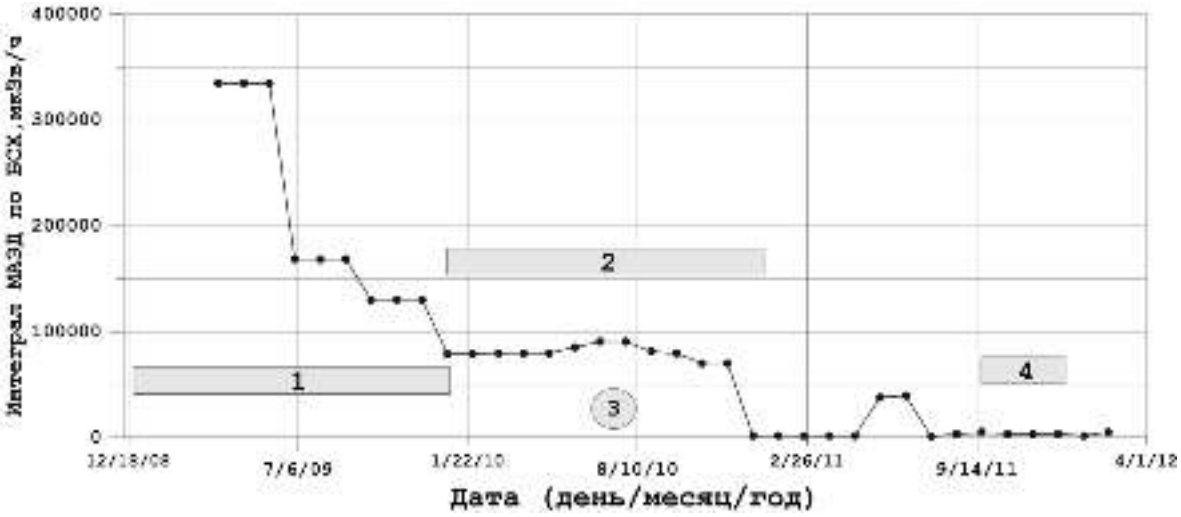
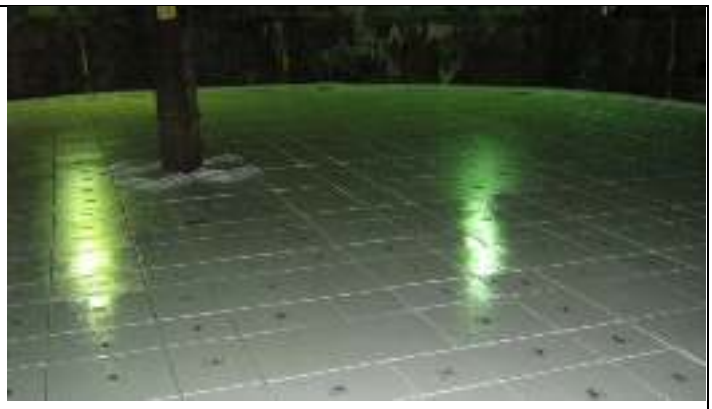


Рисунок 31 – Динамика радиационной обстановки на ёмкостях БСХ в отделении губа Андреева СЗЦ «СевРАО»

(a)



(b)

Рисунок 32 – Фотографии БСХ до проведения работ по нормализации РО (a) и после (b)

На ёмкостях 2Б и 2А работы по нормализации РО проведены в 2009 и 2010 гг. На ёмкости 3А работы по нормализации РО проведены в 2012 году. После проведения работ по нормализации РО на ёмкости 3А все дополнительные конструкции были разобраны и удалены с площадки строительства Сооружения-укрытия №153, а высота кровли над ёмкостью 3А понижена до минимума. В июле 2010 г. была проведена выгрузка из БСХ первой партии ОЯТ в количестве 290 ОТВС, и перевозка её на ФГУП «Производственное объединение Маяк».

4.3 Декомпозиция временных рядов измерений мощности амбиентного эквивалента дозы на промышленной площадке отделения губа Андреева СЗЦ «СевРАО»

Зависимость интеграла МАЭД на промышленной площадке отделения губа Андреева СЗЦ «СевРАО» в период с 01.01.2002 по 06.02.2016 гг., изображенная на Рисунке 28, представляет собой результат измерений МАЭД, крайне неравномерных по времени. Измерения МАЭД начинают носить практически регулярный характер только для последних семи лет наблюдений, начиная с 2010 г. На формирование временной зависимости МАЭД на промышленной площадке оказывали влияние различные факторы, такие как сезонные колебания МАЭД и зависимость МАЭД от действий, которые выполнял персонал в момент измерения МАЭД.

Одной из составляющих контроля радиационной обстановки в отделении губа Андреева СЗЦ «СевРАО» является измерение МАЭД в 76-ти контрольных точках на технической территории, в зданиях и сооружениях. Для каждой точки приводятся два контрольных значения – МАЭД во время отсутствия работ и при их проведении. Отношение контрольных уровней МАЭД в активном состоянии к значениям в состоянии покоя для промплощадки колеблется в широких пределах – от 1,2 до 14, при медиане 1,7 и среднем арифметическом 2,8.

Одним наиболее эффективных методов анализа временных последовательностей наблюдаемых величин является декомпозиция временных рядов наблюдений [120] на три компоненты: тренд, сезонную и остаточную. Принято рассматривать две модели временных рядов: аддитивную (выражение (9)) и мультипликативную (выражение (10)):

$$I_{\dot{H}_p(10)} = t + s + r \tag{9}$$

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

где $I_{\dot{H}_p(10)}$ – интеграл МАЭД, t – тренд, s – сезонная, r – остаточная компоненты временного ряда.

Из физических соображений следует, что адекватной моделью для анализа временных рядов интеграла МАЭД является только мультипликативная модель, формула (10). Так, например, сезонный фактор в значительной мере обусловлен наличием и толщиной снежного покрова. При формировании МАЭД снежный покров можно рассматривать как защитный или ослабляющий фактор между источником и точкой детектирования.

Одним из наиболее универсальных и робастных методов декомпозиции временных рядов наблюдений является метод сезонно-трендовой декомпозиции (STL), основанный на методе локальных регрессий (LOESS) [87].

Недостатком метода STL является то, что с его помощью можно выполнить только аддитивную декомпозицию временного ряда наблюдений [121]. Применительно к МАЭД это означает, что от временного ряда МАЭД нужно перейти к временному ряду логарифмов МАЭД, выполнить для этого ряда аддитивную декомпозицию и получить тренд, сезонную и остаточную компоненты для логарифма МАЭД и затем, путем потенцирования, перейти к тренду, сезонной и остаточной составляющим МАЭД.

Для декомпозиции временного ряда интеграла МАЭД на промышленной площадке в губе Андреева методом STL была написана компьютерная программа на языке статистической обработки данных R [122]. Функция декомпозиции содержится в пакете «*stl*». При декомпозиции, задаются 2 параметра – *t.window* и *s.window*. Они контролируют, как быстро тренд и сезонные компоненты могут измениться – малые значения параметров позволяют более быстрые изменения. Параметр *s.window* может быть задан строкой «periodic» («периодический») или диапазоном в днях, который должен быть нечётным. Параметр *t.window* определяет диапазон окна для извлечения трендов, который также должен быть нечетным числом.

Так как временной ряд интеграла МАЭД на промышленной площадке отделения губа Андреева СЗЦ «СевРАО» был неравномерным, то необходимо было до процедуры декомпозиции выполнить процедуру достраивания

неравномерного временного ряда до равномерного. Процедура достраивания неравномерного временного ряда до равномерного была выполнена путем процедур линейной интерполяции или интерполяции кубическими сплайнами из пакета языка R «zoo» [123] для работы с неравномерными временными рядами. Процедура декомпозиции равномерного временного ряда интеграла МАЭД была выполнена методом STL из базового пакета «*stats*» языка R со значениями основных параметров метода *s.window* = 15 сут., *t.window*= 1801 сут. Результаты декомпозиции представлены на Рисунке 33. При таких параметрах график наилучшим образом отражает динамику тренда и сезонной компоненты интеграла МАЭД.

Как можно видеть из Рисунка 33(b), тренд интеграла МАЭД на промышленной площадке отделения губа Андреева СЗЦ «СевРАО» представляет собой монотонно спадающую функцию. Начальное и конечное значение тренда МАЭД отличаются в 28 раз. Это падение обусловлено, с одной стороны, радиоактивным распадом радионуклидов, оказывающих влияние на величину интеграла МАЭД на промышленной площадке, а с другой стороны – реабилитационными работами, проводимыми персоналом отделения губа Андреева СЗЦ «СевРАО».

Учитывая, что основным дозообразующим радионуклидом является ^{137}Cs, интеграл МАЭД за счет распада ^{137}Cs в период с 01.01.2002 по 06.02.2016 гг. уменьшился в 1,4 раза. Незначительная доля ^{137}Cs была вымыта с промышленной площадки, т.к. согласно исследованиям [124] подвижность ^{137}Cs в почве в губе Андреева составляет от 2,5 до 11,2%. Следовательно, на долю антропогенного фактора – действий персонала отделения СевРАО приходится, примерно, двадцатикратное снижение интеграла МАЭД.

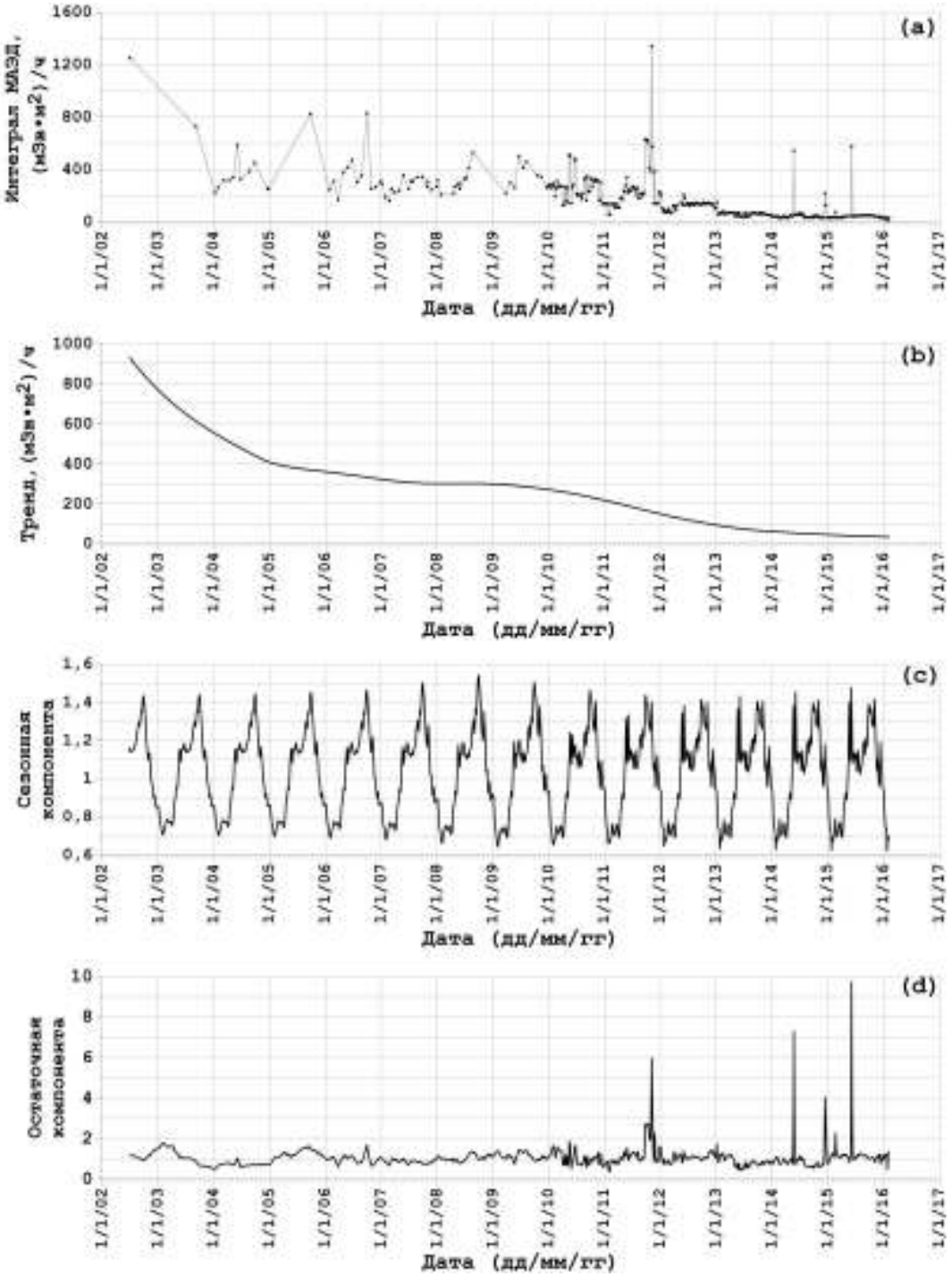


Рисунок 33 – Мультипликативная декомпозиция временного ряда интеграла МАЭД на промышленной площадке отделения губа Андреева СЗЦ «СевРАО» в период 2002-2016 гг. (a) – исходный временной ряд, (b) – трендовая, (c) – сезонная, (d) – остаточная компоненты исходного временного ряда

Из Рисунка 33(c) следует, что сезонная составляющая способна варьировать значения интеграла МАЭД в течение года, примерно, в два раза. Оценим, способен ли снежный покров обеспечить такое изменение интеграла МАЭД.

Будем считать, что плотность снега варьирует в пределах от 0,2 до 0,4 кг/м^3 в зависимости от состояния снега: свежевыпавший, слежавшийся, окученный и т.д. Слой половинного ослабления для воды составляет для γ-излучения от ^{137}Cs величину равную 20 см. Следовательно, для снега этот слой будет варьировать от полуметра до одного метра, что и наблюдается [125] в отделении губа Андреева СЗЦ «СевРАО», учитывая, что с части промышленной площадки отделения снег регулярно убирается. На Рисунке 33(d) представлен остаточный временной ряд, очищенный от тренда и сезонной составляющих. В силу исключения этих двух факторов, анализ остаточного временного ряда более нагляден и прост, чем анализ исходного иррегулярного временного ряда, изображенного на Рисунке 33(a). Остаточный временной ряд интеграла МАЭД на промышленной площадке отделения губа Андреева СЗЦ «СевРАО» можно представить в виде суперпозиции стохастической кривой, колеблющейся вокруг единичного значения, и четырех–пяти пиков в правой части временной зависимости. Возможно, к этим пикам следует добавить еще два пика – в феврале 2003 г. и в сентябре 2005 г., если предположить, что их «размытость» связана с малым числом измерений в данном временном интервале и последующей интерполяцией.

Первая компонента остаточного временного ряда – стохастическая кривая отражает неопределенность вычисления интеграла МАЭД. Вариабельность этой кривой не превышает двойки. Вторая компонента пики характеризуется вариабельностью в несколько раз большей. Как уже было изложено выше, эти пики связаны с выполнением активных действий персоналом отделения в гб. Андреева.

4.4 Обсуждение полученных результатов

После передачи в 2002 году ПВХ в гб. Андреева Министерству Российской Федерации по атомной энергии (с 9 марта 2004 года – Федеральное агентство по атомной энергии «Росатом» [126]), в течение 2002–2016 гг. дополнительной выгрузки ОТВС практически не проводилось. С другой стороны, лишь

незначительное количество ОТВС и радиоактивных отходов было вывезено в этот период времени. Таким образом, в рассматриваемый период суммарная активность радионуклидов на территории и в сооружениях ПВХ в гб. Андреева уменьшалась в результате радиоактивного распада и незначительного вымывания радионуклидов.

С учетом сказанного, можно сделать однозначный вывод о том, что двадцатикратное снижение интеграла МАЭД на промышленной площадке обусловлено действиями персонала отделения губа Андреева СЗЦ «СевРАО».

Точная оценка снижения интеграла МАЭД на промышленной площадке ПВХ в губе Андреева стала возможна благодаря выполнению процедуры декомпозиции временных рядов интеграла МАЭД, см. Рисунок 33. Попытки оценить снижение интеграла МАЭД за период с 01.07.2002 по 06.02.2016 непосредственно из временной зависимости интеграла МАЭД (Рисунок 33(а)) привели бы к существенной неопределенности.

В 2008 году были разработаны Методические указания МУ 2.6.5.05–08 «Особенности применения принципа ALARA при обращении с ОЯТ и РАО в СЗЦ «СевРАО» [98], 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 [109, 127]. 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.

Таким образом, обобщенный показатель радиационной обстановки – интеграл МАЭД по промышленной площадке отделения губа Андреева СЗЦ

«СевРАО» продемонстрировал свою эффективность и удобство для оценки РО в сочетании с процедурой декомпозиции временных рядов.

Рассмотренный в диссертации период с 01.07.2002 по 06.02.2016 был периодом подготовки к активной фазе работ по реабилитации – вывозу ОТВС с территории объекта. Важно знать, с какими возможностями контроля и анализа РО подходит служба радиационной безопасности объекта к этому ответственному периоду. С другой стороны, важно знать стартовые условия предстоящей активной фазы работ.

4.5 Выводы

1. 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 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.

2. С помощью сезонной составляющей временного ряда интеграла МАЭД показано, что из-за выпадения снега интеграл МАЭД в течение года варьирует в 2 раза. Остаточная компонента временного ряда интеграла МАЭД представлена в виде суперпозиции стохастической кривой, колеблющейся вокруг единичного значения и пяти пиков. Показано, что стохастическая кривая отражает неопределённость вычисления интеграла МАЭД, а пики отмечают время проведения работ по обращению с отработавшим ядерным топливом и радиоактивными отходами.

ГЛАВА 5. ПОСТРОЕНИЕ КАРТ ПЛОТНОСТИ ПОВЕРХНОСТНОГО РАДИОАКТИВНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПО ИЗМЕРЕННЫМ ЗНАЧЕНИЯМ МОЩНОСТИ АМБИЕНТНОГО ЭКВИВАЛЕНТА ДОЗЫ

5.1 Отличие мощности амбиентного эквивалента дозы от плотности поверхностного радиоактивного загрязнения

Радиационный контроль [20] включает в себя измерение МАЭД γ-излучения на рабочих местах и на территории радиационного объекта, а также измерение уровней радиоактивного загрязнения (РЗ) территории санитарно-защитной зоны и зоны наблюдения, радиоактивного загрязнения поверхностей (РЗП) рабочих помещений и оборудования. Результатом измерений РЗ и РЗП являются значения плотности потока α- и β-частиц [част/(см^2·мин)], которую путём простого пересчета можно представить как ППРЗ [Бк/м^2]. ППРЗ есть количественная характеристика поверхностной активности; поверхностная активность – это упрощающий формализм, рассматривающий распределенную в поверхностном слое активность радионуклидов как слой бесконечно малой толщины на поверхности объекта исследования, создающий измеряемую плотность потока частиц.

Величины МАЭД и ППРЗ существенно отличаются друг от друга по ряду характеристик. МАЭД измеряется с целью ограничения облучения персонала и населения, ППРЗ измеряется для выявления зон, в которых необходимо провести дезактивацию. Хотя в случае измерения МАЭД регистрируются γ-кванты, прошедшие через чувствительный объём детектора, а в случае измерения ППРЗ – β-частицы, также попавшие в чувствительный объём детектора излучения, существует принципиальное отличие в геометрии облучения чувствительных объёмов детектора, поскольку проникающая способность фотонов и β-частиц одной и той же энергии различается на порядки величины[6] [128]. Измерение

[6]Для γ-квантов с энергией 0,662 МэВ, испускаемых ^{137}Cs, слой половинного ослабления в воздухе составляет ≈ 180 м, для β-частиц с максимальной энергией 1,173 МэВ, испускаемых в процессе распада ^{137}Cs, длина максимального пробега в воздухе ≈ 5,3 м.

МАЭД γ-квантов на высоте 1 м (характерная высота расположения жизненно важных органов человека) – это измерение в практически изотропном поле излучения. Измерение ППРЗ – это, в основном, измерение в мононаправленном поле излучения β-частиц, проникающих через окно детектора, причем детектор должен быть размещен практически вплотную к загрязненной поверхности. Если источник β-частиц заглубляется под поверхность (что и происходит со временем из-за метеорологических и диффузионных процессов, а также хозяйственной деятельности), то он может не дать вклада в ППРЗ[7].

5.2 Плотность поверхностного радиоактивного загрязнения и мощность амбиентного эквивалента дозы как пространственно распределенные данные

Наборы значений МАЭД и ППРЗ представляют собой примеры пространственно распределенных данных [129]. При работе с пространственными данными, содержащими ограниченное число измерений изучаемой переменной в различных точках некоторой области пространства, наиболее часто требуется оценить значения наблюдаемой величины в любой точке этой области пространства, т.е. провести интерполяцию. Для этой цели наиболее эффективным является геостатистический подход, включающий пространственный корреляционный анализ, или вариографию [130].

Одним из ключевых понятий, используемых при анализе пространственно распределенных данных, является опора получаемых данных [129]. В отличие от пространственного разрешения модели (карты интерполяционных оценок), опора определяется процессом измерения и обработки данных. Под опорой измерения понимается физический объем (в обобщенном смысле), подвергнутый измерению. Например, при измерении радиоактивности образца опора измерения характеризуется размером пробы, т.е. сантиметрами габаритных размеров пробы,

---

[7]Для β-частиц с максимальной энергией 1,173 МэВ, испускаемых в процессе распада ^{137}Cs, длина максимального пробега в почве ≈ 0,3 см [128] (оценка для малогумусных почв с плотностью $\rho = 2{,}7$ г/см^3).

а при аэрогаммасъемке радиоактивно загрязненных территорий опорный размер может варьироваться от десятков до сотен метров (размеры одномоментно сканируемой поверхности).

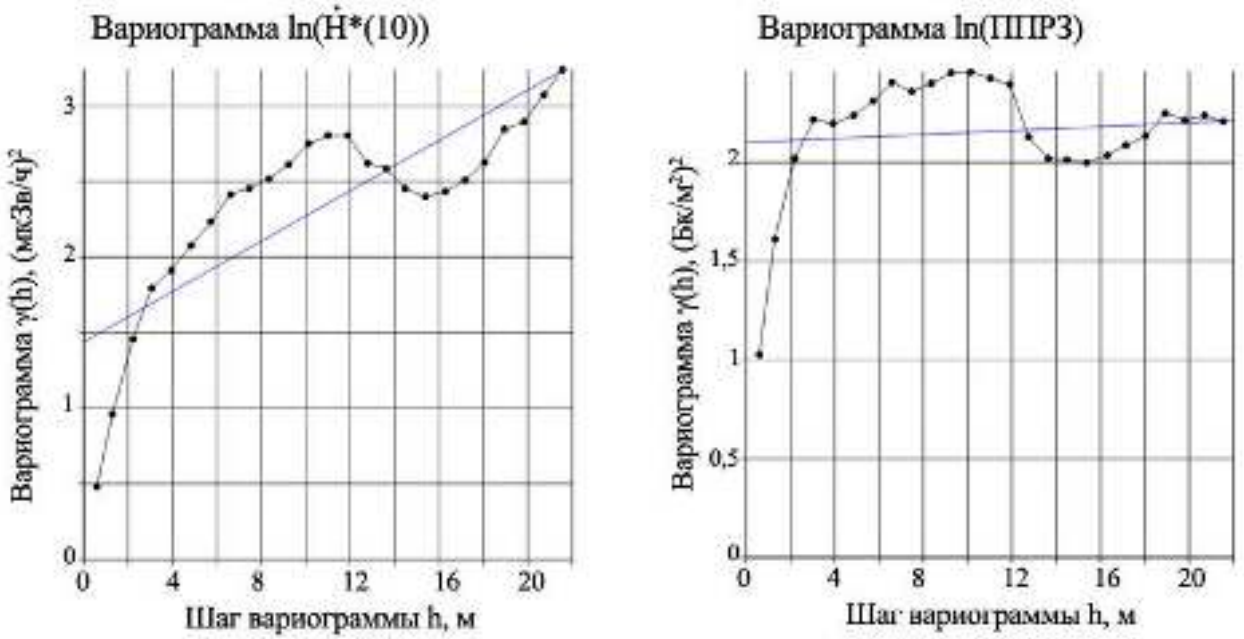
Определение опорного размера измерений, использующихся в моделях пространственного оценивания, чрезвычайно важно для адекватного моделирования вариабельности данных. Если размер опоры измерений (например, 0,1 м) значительно меньше, чем масштаб сетки пространственной интерполяции, используемой моделью (например, 1 км), то такие данные будут обладать значительной вариабельностью на подсеточном масштабе, и поэтому величину наблюдаемой переменной в ячейке сетки оценивания на основе данных с опорой более мелкого масштаба нельзя определить однозначно.

Для МАЭД на высоте 1 м опорой измерений можно считать круг, в центре которого расположен детектор γ-излучения, с радиусом, зависящим от жесткости регистрируемого γ-излучения и составляющим несколько десятков метров. Относительно ППРЗ в п. 5.3.1 МУК 2.6.1.016-99 [130] указано: «контролируемый участок поверхности равномерно по площади разбивают сеткой на прямоугольные ячейки, размеры которых равны размерам входного окна детектора используемого прибора». Следовательно, опора измерений ППРЗ не превосходит 100 см^2. В некоторых случаях загрязненность поверхности в месте контроля определяют методом конверта [130], т.е. как среднюю величину ППРЗ в пяти ячейках (вершины квадрата и геометрический центр), измеренных на площади 1 м^2. В этом случае за опору данных измерений следует принять 1 м^2.

В силу различных физических принципов регистрации вышеуказанных величин можно ожидать, что пространственные корреляции для МАЭД и ППРЗ будут существенно отличаться друг от друга.

На Рисунке 34 представлены вариограммы [129] для логарифмов МАЭД и ППРЗ для 1036 измерений [102] в пределах промышленной площадки отделения губа Андреева СЗЦ «СевРАО». ППРЗ в данном примере обусловлена одним радионуклидом – ^{137}Cs [124]. На Рисунке 34 представлены также линейные

апроксимации вариограмм логарифмов МАЭД и ППРЗ. По оси абцисс единица длины соответствует 10 м. Из рисунков видно, что линейные апроксимации вариограмм мало соответствуют их реальному виду, а грид радиационной обстановки, построенный по данным измерений ППРЗ, был близок к планарному.



(a) (b)

Рисунок 34 – Вариограмма натуральных логарифмов измерений МАЭД (a) и натуральных логарифмов измерений ППРЗ ^{137}Cs (b) на промышленной площадке отделения губа Андреева СЗЦ «СевРАО» на 01.07.2002 г., построенные по данным измерений из [102]. Линейная апроксимация вариограммы показана синий линией

Таким образом, ППРЗ как пространственно распределенная переменная неприемлема для построения карт методами интерполяции [44]. Это происходит в силу физической природы регистрации этой величины, обусловливающей незначительную *опору данных измерений*, что отражается в форме вариограммы: пространственная корреляция между соседними измерениями быстро исчезает.

5.3 Метод построения карт плотности поверхностного радиоактивного загрязнения

В диссертации разработан метод восстановления ППРЗ на открытых площадках и в помещениях, где в качестве входных данных используются только результаты измерений МАЭД. Метод основан на численном решении уравнения Фредгольма 1-го рода [131], который применим для произвольного распределения ППРЗ. Уравнение Фредгольма 1-го рода, связывающее МАЭД и ППРЗ, имеет следующий вид:

$$\dot{H}(x,y) = W \cdot \int\int \dot{Q}(x,y,\acute{x},\acute{y}) \cdot A(\acute{x},\acute{y})\, d\acute{x}d\acute{y}\ , \qquad (11)$$

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 ($\acute{x},y'$) [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 ($\acute{x},y'$), создающего единичную плотность поверхностного загрязнения:

$$Q(x,y,\acute{x},\acute{y}) = \frac{K_\gamma}{H^2+(x-\acute{x})^2+(y-\acute{y})^2}\ , \qquad (12)$$

где K_γ[(аГр·м^2)/(с·Бк)] – керма-постоянная радионуклида, обуславливающего ППРЗ (для ^{137}Cs $K_\gamma = 21{,}3$ (аГр·м^2)/(с·Бк)) [128,133], H [м] – высота проведения измерений. Уравнения по выражениям (11) и (12) соответствуют случаю, когда вся ППРЗ обусловлена наличием в загрязнении только одного радионуклида.

Задача восстановления ППРЗ по МАЭД решалась для промышленной площадки отделения губа Андреева СЗЦ «СевРАО», где основное радиоактивное загрязнение обусловлено одним радионуклидом ^{137}Cs [124], нормировочный коэффициент для ^{137}Cs W = 1,20·10^{18} Зв/Гр [132]. В качестве массива исходных данных использованы измерения МАЭД на одной высоте H = 1 м от поверхности земли.

Интегральное уравнение Фредгольма 1-го рода (15) решено численными методами путём дискретизации интегрального уравнения [134], формула (13). При дискретизации территория делится на квадратные участки (ячейки). Степень дискретизации задаётся количеством таких ячеек по длине (M) и ширине (N). Для каждого участка определяется измеренная в нём величина МАЭД и искомая активность A.

$$\dot{H}(x_m, y_n) = \sum_{j=1}^{M} \sum_{i=1}^{N} \dot{Q}\left(x_m, y_n, \acute{x}_i, \acute{y}_j\right) \cdot \Delta\acute{x} \cdot \Delta\acute{y} \cdot A\left(\acute{x}_i, \acute{y}_j\right), \quad (13)$$

где $Q\left(x_m, y_n, \acute{x}_i, \acute{y}_j\right)$ – МАЭД в ячейке (x_m, y_n) от точечного источника активностью $A\left(\acute{x}_i, \acute{y}_j\right)$, находящегося в ячейке $(\acute{x}_i, \acute{y}_j)$; $\Delta\acute{x}$ и $\Delta\acute{y}$ [м] – ширина ячейки по осям X и Y, соответственно.

5.3.1 Алгоритм решения задачи методом регуляризации Тихонова

Поскольку данные инструментальных измерений всегда содержат погрешность, в нашем случае система линейных алгебраических уравнений (13) будет некорректной, а для её решения нужно применять методы решения некорректных задач. В диссертационной работе уравнение было решено методом регуляризации Тихонова. Для решения задачи было введено дополнительное предположения о гладкости решения. При этом вместо исходной системы уравнений (13) решалось модифицированное уравнение.

Пусть в равенствах (14) и (15) производится дискретизация МАЭД $\dot{H}(x_m, y_n)$ и поверхностной активности A на одной и той же сетке с постоянным шагом по оси X и Y, равным h_x и h_y, соответственно. Введем следующие обозначения:

$$Q\left(x_m, y_n, \acute{x}_i, \acute{y}_j\right) = q_{m,n,i,j} \quad (14)$$

$$A\left(\acute{x}_i, \acute{y}_j\right) = a_{i,j} \quad (15)$$

$$\dot{H}(x_m, y_n) = \dot{k}_{m,n} \quad (16)$$

Тогда систему уравнений (13) можно переписать в следующем виде:

$$\dot{k}_{m,n} = W \cdot \sum_{j=1}^{M} \sum_{i=1}^{N} q_{m,n,i,j} \cdot h_x \cdot h_y \cdot a_{i,j} \quad (17)$$

или:

$$f_{m,n} = \dot{k}_{m,n}/(h_y \cdot W) = \sum_{j=1}^{M} \sum_{i=1}^{N} q_{m,n,i,j} \cdot h_x \cdot a_{i,j} \tag{18}$$

В дальнейшем удобно использовать матричное представление $\boldsymbol{Q} = \|q\|$ массива q:

$$q_{m+M\cdot(n-1),i+N\cdot(j-1)} = q_{m,n,i,j}, \tag{19}$$

и векторные представления $\boldsymbol{F}$ и $\boldsymbol{a}$ матриц $\|f\|$ и $\|a\|$:

$$f_{m+N\cdot n} = f_{m,n} \tag{20}$$

$$a_{m+N\cdot n} = a_{m,n} \tag{21}$$

Система уравнений (17) рассмотрена в работе [120] для одномерной сетки размером $M{\times}N$ ячеек с шагом h_x, ядром $\boldsymbol{Q}$ и с функцией отклика $\boldsymbol{F}$:

$$\boldsymbol{B}^{\alpha} \cdot \boldsymbol{a} = \boldsymbol{F} \tag{22}$$

$$\boldsymbol{F} = \{f_l\},\ l = 1, \dots, M \times N \tag{23}$$

$$\boldsymbol{B}^{\alpha} = \boldsymbol{Q} + \alpha \boldsymbol{C} \tag{24}$$

$$\boldsymbol{Q} = \{q_{ik}\},\ i, = 1, \dots, M \times N;\ k = 1, \dots, M \times N \tag{25}$$

$$\boldsymbol{C} = \boldsymbol{E} + \boldsymbol{C}_1 \tag{26}$$

$$\boldsymbol{C}_1 = \begin{pmatrix} \frac{1}{h_x^2} & -\frac{1}{h_x^2} & 0 & \cdots & 0 \\ -\frac{1}{h_x^2} & \frac{2}{h_x^2} & -\frac{1}{h_x^2} & \cdots & 0 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & -\frac{1}{h_x^2} \\ \cdots & \cdots & \cdots & -\frac{1}{h_x^2} & \frac{1}{h_x^2} \end{pmatrix} \tag{27}$$

Следует подчеркнуть, что таким образом восстанавливается «эффективная» ППРЗ в данной точке поверхности, которая может отличаться от инструментально измеренной ППРЗ в этой точке, поскольку в МАЭД вносят вклад источники, расположенные на значительной территории, безотносительно их распределения по глубине, но, с другой стороны, исключаются источники, обладающие недостаточно проникающим излучением.

5.4 Результаты для модельного примера

На модельном примере МКК и метод решения уравнения Фредгольма 1-го рода (МРУФ) были использованы для перехода от мощности воздушной кермы (МВК) к ППРЗ для трех типов источников (Рисунок 35). Первый источник представлял собой композицию из четырех точечных источников, второй – квадрат из четырех точечных источников и третий – угол из шести точечных источников. Активность каждого точечного источника была равна $2 \cdot 10^4$ кБк. Из Рисунка 35 видно, что ППРЗ, восстановленная МРУФ, точнее описывает исходную ППРЗ, чем при применении МКК.

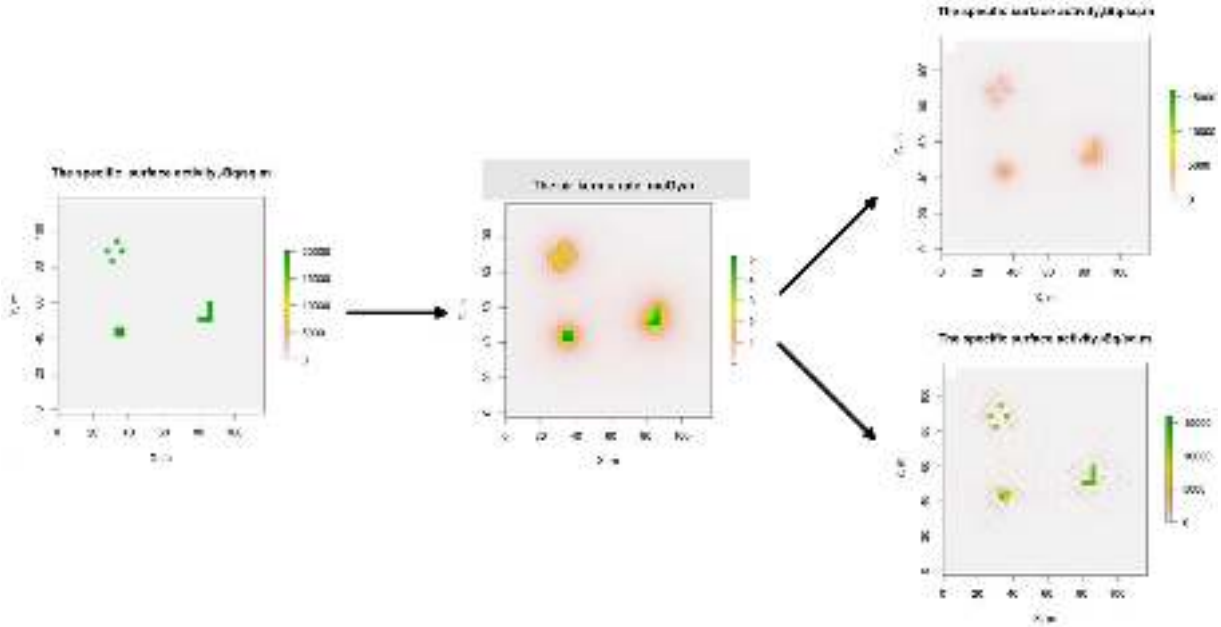
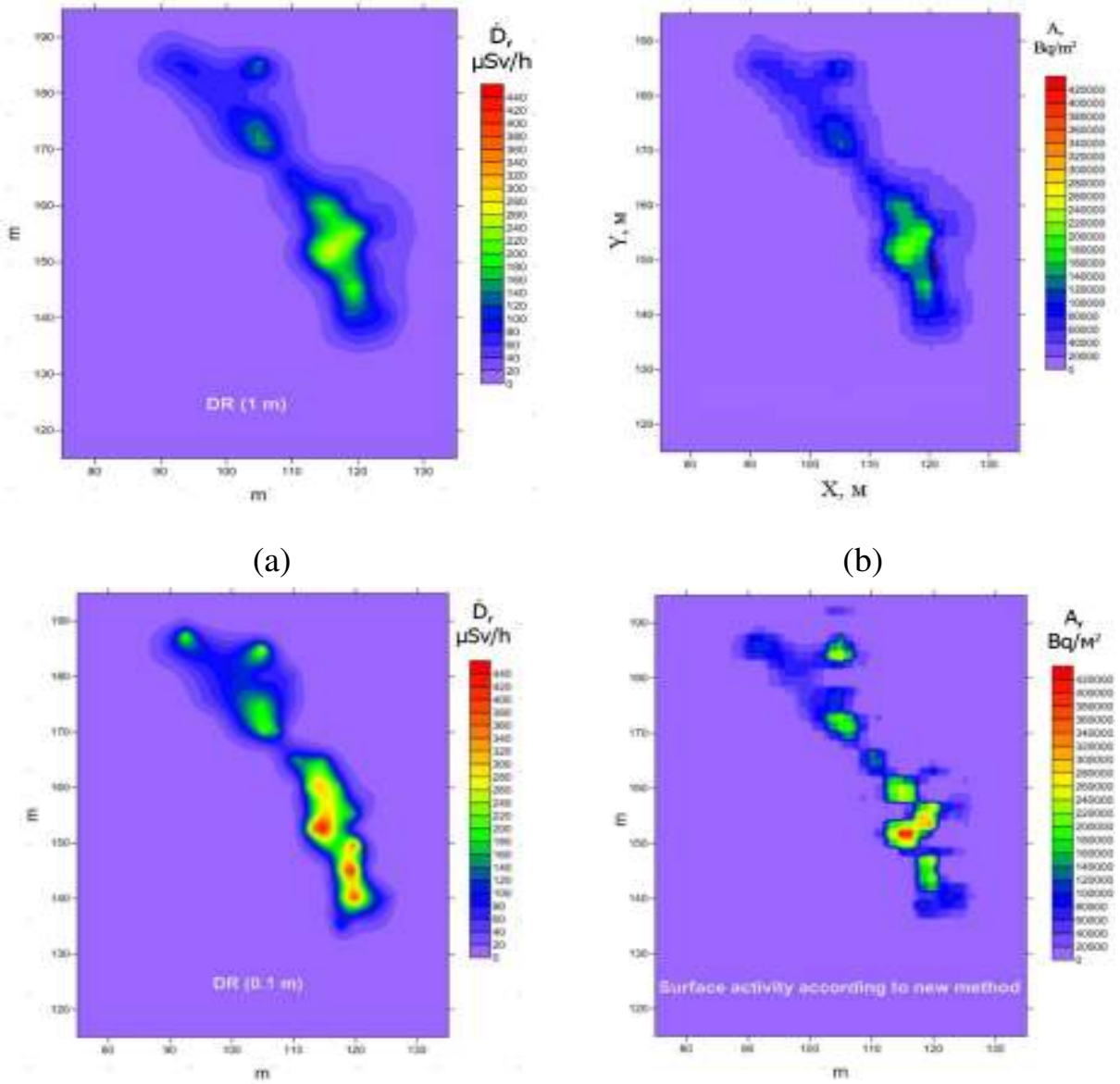


Рисунок 35 – Пример восстановления плотности поверхностной активности двумя методами: МКК (верхний правый фрагмент рисунка) и МРУФ (нижний правый фрагмент)

5.5 Результаты для отделения губа Андреева СЗЦ «СевРАО»

Примеры, приведённые в данном разделе, относятся к отделению губа Андреева СЗЦ «СевРАО» и основаны на массиве первичных данных, которые были получены сотрудниками НИКИЭТ в 2001 и 2002 годах [102]. Данный массив был использован для расчёта ППРЗ ^{137}Cs для 4-х наиболее загрязнённых фрагментов промышленной площадки в губе Андреева: ручья, вытекающего из-под Здания №5, площадки ТРО, блока сухого хранения (БСХ) с прилегающей

территорией и причала. Результаты по зоне ручья, вытекающего из-под Здания №5, показаны на Рисунке 36(d), результаты по 4-м вышеназванным фрагментам территории – на Рисунке 39.

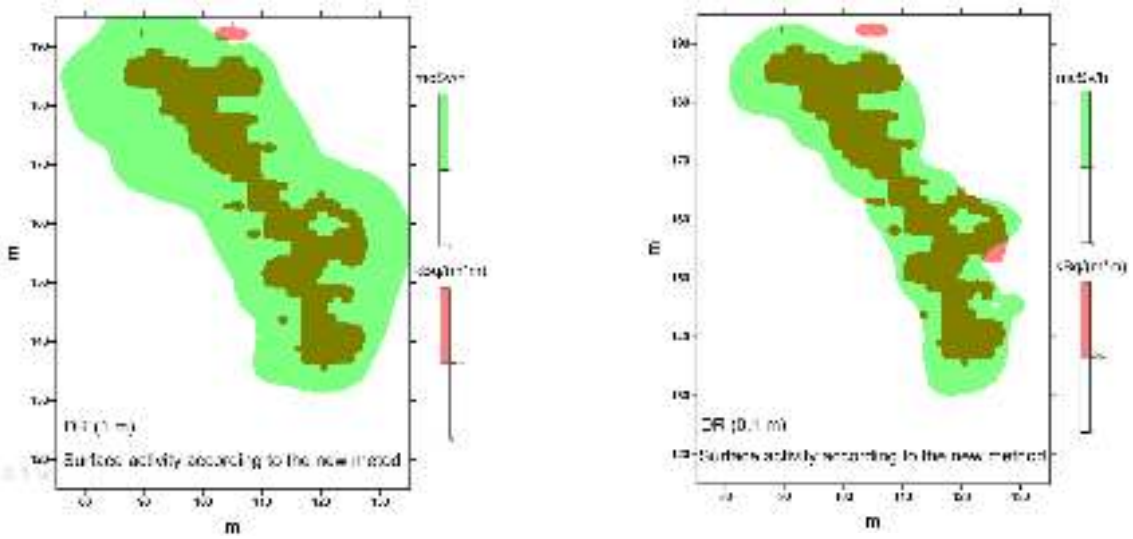


(a) (b)

(c) (d)

Рисунок 36 – Результаты восстановления ППРЗ ^{137}Cs по МАЭД в зоне ручья. Верхний левый (a) – карта МАЭД, построенная методом интерполяции по массиву данных измерений МАЭД на высоте 1 м; нижний левый (c) – карта МАЭД, построенная методом интерполяции по массиву данных измерений МАЭД на высоте 0,1 м; верхний правый (b) – ППРЗ по МКК на основе карты данных карты МАЭД на высоте 1м (a); нижний правый (d) – ППРЗ ^{137}Cs по МРУФ на основе данных карты МАЭД также на высоте 1 м (a)

В левой части Рисунка 36 представлено радиационное поле в районе ручья по результатам измерений МАЭД на высоте 1 м (Рисунок 36(a) и 36(c), соответственно). Карта МАЭД на высоте 0,1 м приводится только для сравнения, поскольку она лучше описывает ППРЗ. Справа – результаты восстановления плотности поверхностной активности двумя методами: МКК – Рисунок 36(b) и МРУФ – Рисунок 36(d). Как можно было ожидать, в одной и той же точке значение МАЭД на высоте 0,1 м выше, чем значения на высоте 1 м. Из сравнения Рисунков 36(b) и 36(d) видно, что распределение ППРЗ на Рисунке 36(d) является более компактно распределённым в зоне ручья, вытекающего из-под Здания №5, относительно Рисунка 36(b). Отметим, что пиковые значения на Рисунке 36(d), превосходят, как минимум, в два раза пиковые значения на Рисунке 36(b). Данное различие более явно показано на Рисунке 37, где изображения контуров МАЭД и ППРЗ наложены друг на друга.



(a) (b)

Рисунок 37 – Наложение карт МАЭД, измеренных на высотах 0,1м (a) и 1м (b), и карты ППРЗ ^{137}Cs, построенной по МРУФ

На Рисунке 37 сравнивались контуры, внутри которых локализовано 80% интеграла МАЭД или ППРЗ ^{137}Cs по площади карты. Для карт МАЭД, измеренных на высотах 1 м и 0,1 м в районе ручья, это будут изолинии 5 и 7 мкЗв/ч, соответственно, а для карты ППРЗ ^{137}Cs – $1{,}1 \cdot 10^4$ кБк/м^2. С помощью

компьютерной программы Surfer 12 [101] была проведена оценка площади территории, находящейся внутри выбранных изолиний. Площадь составила для карты ППРЗ ^{137}Cs – 639 м^2, а для карт МАЭД, измеренных на высоте 1 м и 0,1 м, – 2200 м^2 и 1244 м^2, соответственно. Таким образом, ППРЗ ^{137}Cs более компактно, чем распределение измеренного на высоте 1 м МАЭД – в 3,4 раза, и почти в два раза более компактно, чем распределение МАЭД, измеренного на высоте 0,1 м.

На Рисунке 38 представлена 3D модель фрагмента территории ПВХ в губе Андреева в районе ручья, вытекающего из-под Здания № 5, с наложением карты ППРЗ. Место вытекания радиоактивной воды из-под Здания № 5, находящееся в районе стыка старого и нового бассейнов выдержки, показано белой точкой. Данные по высотам взяты из схемы генерального плана [135].

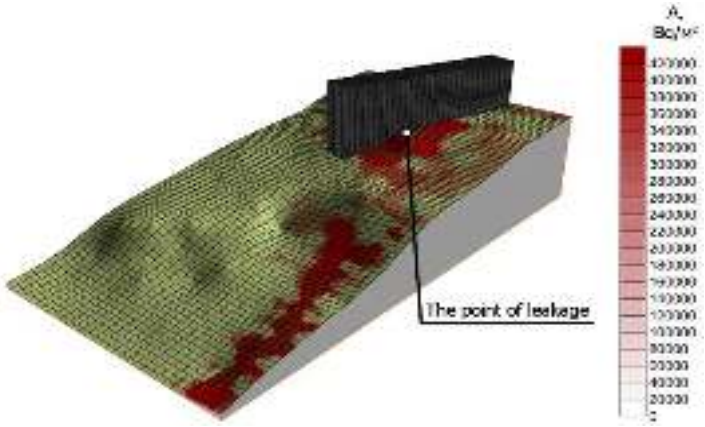


Рисунок 38 – Трехмерная модель распределения ППРЗ ^{137}Cs в районе ручья, вытекающего из-под Здания №5, Бк/м^2. Белой точкой обозначено место вытекания радиоактивной воды

Из сравнения карт МАЭД и ППРЗ ^{137}Cs (Рисунок 37) следует, что восстановленное МРУФ распределение ППРЗ ^{137}Cs существенно более компактное, чем распределение МАЭД, что и следовало ожидать. Таким образом, карта ППРЗ позволяет более эффективно спланировать работы по дезактивации загрязненных участков, чем карта МАЭД. Отметим, что МКК и МРУФ дают очень близкие значения интеграла активности радионуклида ^{137}Cs по территории ПВХ (Таблица 9). При этом МКК позволяет сразу оценить интеграл активности ^{137}Cs по всей территории ПВХ в губе Андреева, в отличие от МРУФ, который

работает на ограниченных площадках с линейными размерами не более 200 м из-за ограничений в вычислительных возможностях компьютера. Однако топология радиоактивного загрязнения на территории ПВХ в губе Андреева в 2002 г. позволила разбить всю загрязнённую территорию на отдельные пятна размером менее 200×200 м и применить МРУФ.

Таблица 9 – Доля активности в зоне (%), где плотность поверхностной активности больше $3 \cdot 10^4$ кБк/м^2

Метод расчета	Площадь зоны, где порог превышен, м^2	Интегральная активность для зон, где порог превышен		Интегральная активность для ПВХ в целом, кБк
		кБк	%	
МКК	$3{,}8 \cdot 10^3$	$2{,}2 \cdot 10^8$	34,4	$6{,}4 \cdot 10^8$
МРУФ	$3{,}1 \cdot 10^3$	$4{,}5 \cdot 10^8$	69,2	$6{,}5 \cdot 10^8$

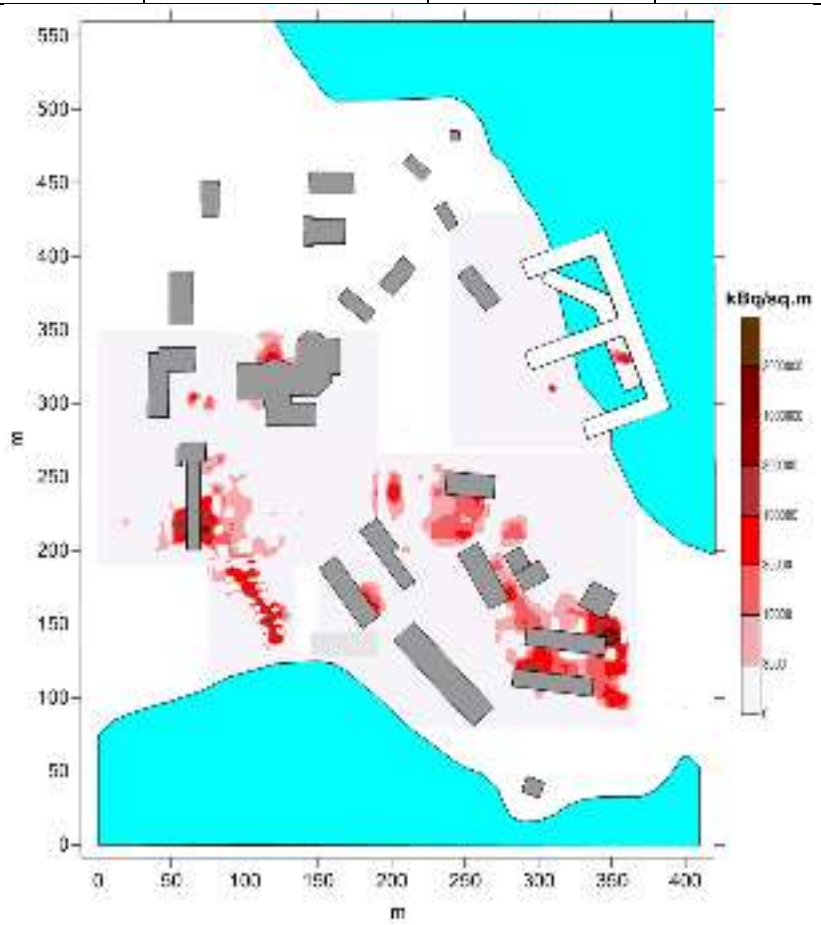
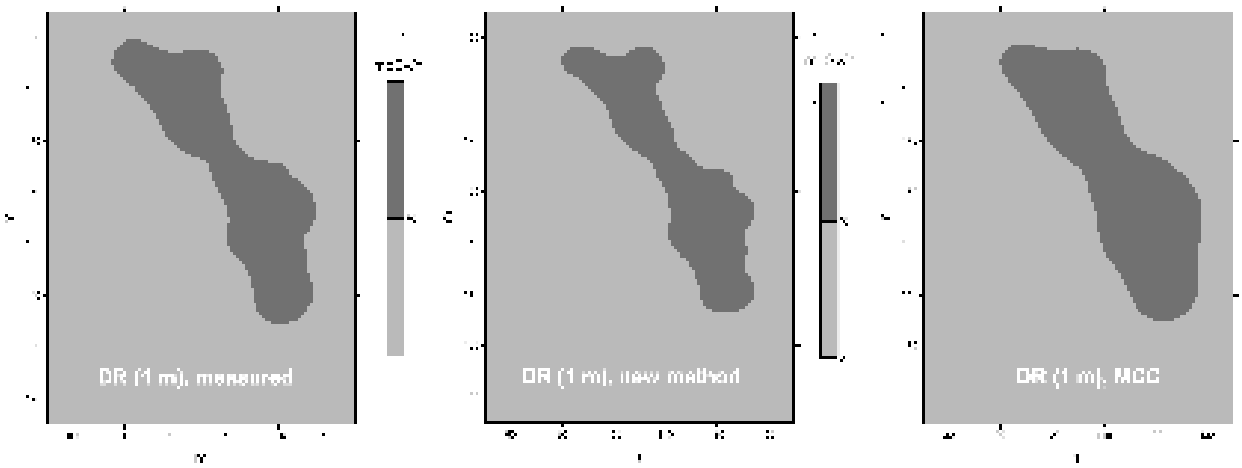


Рисунок 39 – Карта ППРЗ ^{137}Cs территории ПВХ в губе Андреева, восстановленная МРУФ по данным НИКИЭТ [102], кБк/м^2

5.6 Валидация метода

Для проверки метода была решена обратная задача – вычисление значений МАЭД по выражению (13), используя ранее восстановленные значения ППРЗ ^{137}Cs для ручья, вытекающего из-под Здания №5 (Рисунок 36(b,d)). Результаты для МКК и МРУФ представлены на Рисунке 40, где тёмно-серым цветом отмечены зоны с МАЭД ≥ 30 мкЗв/ч). Карта МАЭД, восстановленная по МРУФ (Рисунок 40(b)), ближе к карте фактических измерений МАЭД (Рисунок 40(a)), чем карта МАЭД, восстановленная по МКК (Рисунок 40(c)).



(a) (b) (c)

Рисунок 40 – Реконструкция карты МАЭД (мкЗв/ч) по распределениям ППРЗ ^{137}Cs, восстановленной МРУФ (b) и МКК (c), тёмно-серым цветом отмечены зоны с МАЭД ≥ 30 мкЗв/ч

Валидация МРУФ была выполнена по 38 измерениям удельной активности ^{137}Cs в пробах грунта попавших в зону ручья, вытекающего из-под Здания №5 (Таблица 10).

Таблица 10 – Результаты измерений удельной активности ^{137}Cs в пробах грунта на промышленной площадке отделения губа Андреева СЗЦ «СевРАО».

№	Координата X, м	Координата Y, м	Результат измерения удельной активности ^{137}Cs, Бк/кг	Результат расчёта ППРЗ ^{137}Cs, Бк/м^2
1	130	160	1,3E+3	1,5E+3

№	Координата X, м	Координата Y, м	Результат измерения удельной активности ^{137}Cs, Бк/кг	Результат расчёта ППРЗ ^{137}Cs, Бк/м^2
2	75	120	2,4E+3	1,0E+2
3	122,5	145	6,4E+3	3,1E+3
4	120	150	7,0E+3	0,0E+0
5	120	185	7,1E+3	0,0E+0
6	95	150	7,4E+3	0,0E+0
7	105	130	7,8E+3	0,0E+0
8	120	157,5	9,1E+3	1,3E+5
9	120	165	9,2E+3	2,1E+4
10	105	155	1,0E+4	0,0E+0
11	90	195	1,1E+4	4,3E+3
12	125	135	1,1E+4	5,3E+1
13	112,5	180	1,4E+4	1,7E+3
14	90	140	1,9E+4	0,0E+0
15	105	145	2,0E+4	0,0E+0
16	100	160	2,8E+4	0,0E+0
17	115	170	3,7E+4	0,0E+0
18	110	175	3,9E+4	3,6E+3
19	117	146	7,6E+4	7,7E+4
20	100	170	9,6E+4	4,3E+3
21	100	165	1,1E+5	0,0E+0
22	95	170	1,2E+5	1,4E+2
23	90	175	1,6E+5	0,0E+0
24	115	130	1,8E+5	0,0E+0
25	107,5	160	3,3E+5	0,0E+0
26	85	185	3,5E+5	6,2E+3
27	96	179	4,8E+5	4,6E+4
28	105	177,5	6,3E+5	1,0E+5
29	99	181	9,9E+5	6,2E+4
30	100	175	1,9E+6	6,0E+4
31	104	180	2,1E+6	0,0E+0

№	Координата X, м	Координата Y, м	Результат измерения удельной активности ^{137}Cs, Бк/кг	Результат расчёта ППРЗ ^{137}Cs, Бк/м^2
32	107,5	167,5	2,1E+6	6,3E+4
33	105	172,5	2,2E+6	2,1E+5
34	107,5	165	2,5E+6	0,0E+0
35	116	152,5	2,8E+6	3,0E+5
36	112,5	160	3,7E+6	1,7E+5
37	117,5	137,5	4,6E+6	4,8E+4
38	114	157	5,8E+6	1,5E+5

На Рисунке 41 представлены результаты определения удельной активности ^{137}Cs в пробах в районе ручья, вытекавшего из-под Здания №5 (чёрные, тёмно-серые и светло-серые квадраты), с результатами расчета ППРЗ ^{137}Cs, выполненных по МКК (светло-серая зона) и по МРУФ (тёмно-серая зона).

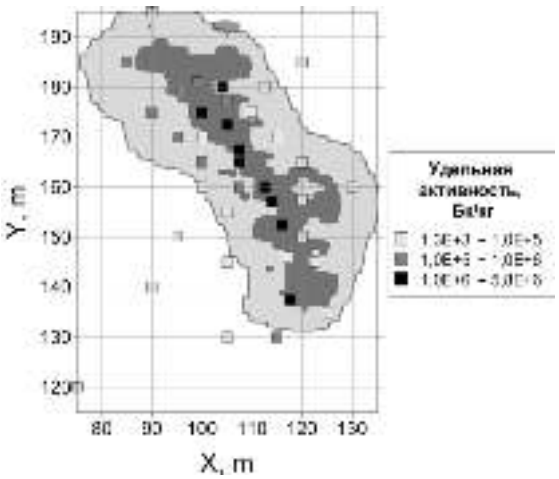


Рисунок 41 – Результаты сравнения ППРЗ ^{137}Cs по МАЭД в зоне ручья, вытекавшего из-под Здания №5

На Рисунке 41 девять измерений, отмеченных чёрным цветом, дают в сумме 82% активности ^{137}Cs от всех измерений в зоне ручья. Что касается ограничивающих зоны ППРЗ ^{137}Cs изолиний, которые определены по методам МКК и МРУФ, то внутри этих изолиний локализовано по 80% поверхностного загрязнения радионуклидом ^{137}Cs.

Для уточнения соответствия расчетных и измеренных значений ППРЗ ^{137}Cs в зоне ручья (Таблица 10), был вычислен информационный коэффициент корреляции *R* [136], он составил R = 0,68, что говорит о средней корреляции данных и применимости разработанного метода, выражение (28).

$$R(X,Y) = \sqrt{1 - e^{-2I(X,Y)}}\ , \qquad (28)$$

где $l(X,Y)$ – количество информации об измерении *X*, содержащееся в измерении *Y* [137]. Использован информационный коэффициент корреляции, т.к. может обоснованно применяться к случайным величинам, распределенным по любому закону, а не только по закону Гаусса, в отличие от коэффициента Пирсона [138].

5.7 Выводы

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

2. Сравнение карт МАЭД и плотности поверхностного радиоактивного загрязнения ^{137}Cs для промышленной площадки отделения губа Андреева СЗЦ «СевРАО» показало, что распределение плотности поверхностного радиоактивного загрязнения, восстановленное путём численного решения уравнения Фредгольма 1-го рода методом регуляризации Тихонова в 2–4 раза более компактное, чем распределение плотности поверхностного радиоактивного загрязнения, восстановленное методом конверсионных коэффициентов. Таким образом, разработанный в диссертации метод позволяет более эффективно спланировать работы по дезактивации загрязненных участков, чем метод конверсионных коэффициентов.

3. Разработанный метод восстановления карт плотности поверхностного радиоактивного загрязнения применим для произвольного распределения радиоактивного загрязнения на исследуемой территории, в отличие от метода конверсионных коэффициентов, применимого только в условиях плавно изменяющегося по поверхности радиоактивного загрязнения.

ГЛАВА 6. ОПТИМИЗАЦИИ РАДИАЦИОННОЙ ЗАЩИТЫ ПЕРСОНАЛА, ОСНОВАННАЯ НА ТЕХНОЛОГИИ ДИНАМИЧЕСКОГО ТРЁХМЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ РАДИАЦИОННОЙ ОБСТАНОВКИ В ВИРТУАЛЬНОЙ СРЕДЕ

6.1 Применение технологии динамического трёхмерного моделирования радиационной обстановки в виртуальной среде для обеспечения радиационной безопасности персонала

Работы в условиях фактической или потенциальной радиационной опасности (радиационно опасные работы) должны планироваться на основании принцип оптимизации для предотвращения необоснованного облучения и разработки мероприятий по снижению дозовых нагрузок на персонал.

Реализация принципа оптимизации естественным образом аккумулирует в себе почти все аспекты проявления человеческого фактора в обеспечении радиационной безопасности на предприятии [20], в том числе: обучение и тренировку персонала, планирование доз облучения в предстоящих работах и защитных мероприятий, оптимизацию дозы облучения за рабочую смену [139], выбор оптимальных путей доступа к рабочему месту [139], анализ и расследование нестандартных ситуаций.

Принцип оптимизации имеет отношение только к будущему облучению персонала, т.к. только в этом случае можно говорить о вариативности облучения. Вариативность облучения в полной мере может быть реализована средствами виртуальной реальности [69]. Иными словами, инструментом для реализации принципа оптимизации на радиационном объекте может служить виртуальная реальность (ВР) территории и помещений производственного комплекса с динамической визуализацией РО. В настоящее время технология создания ВР достаточно развита для практического применения в целях обеспечения радиационной безопасности персонала [69].

Программное обеспечение по созданию виртуальной реальности (ПОВР) может состоять из нескольких программных продуктов с интерфейсами, дружественными друг к другу.

Виртуальная реальность (ВР) должна перевести РО из разряда невидимых психологических стрессоров [140] в непосредственно воспринимаемый стрессор, снижая тем самым неопределенности в оценке радиационного риска тех или иных производственных операций. Кроме того, ВР должна позволять создавать различные сценарии выполнения работ и моделировать их на компьютере с численной оценкой радиационных последствий для исполнителей этих работ по каждому сценарию. ПОВР должна оперировать как с данными измерений РО, выполненными персоналом службы РБ предприятия, так и моделировать РО по информации об активности, радионуклидном составе и геометрии источников излучения. ПОВР должна содержать в своем составе мощный аналитический блок, предназначенный для поддержки принятия решений.

Для планирования и оптимизации радиационно опасных работ в отделении губа Андреева СЗЦ «СевРАО», в дополнение к ПО EasyRAD, было разработано ПОВР Andreeva Planner, созданное на базе Halden Planner [69]. Расчёт индивидуального эквивалента дозы $H_p(10)$ и амбиентного эквивалента дозы H*(10) в Andreeva Planner происходит по модели «точечного источника» [69] для 3-х типов источников: точечного, линейного, плоского, и для двух типов защиты – цилиндра и параллелепипеда, выражение (29):

$$\dot{H}^*(10) = w_r \frac{A \cdot \sum_i E_i \cdot \eta_i \cdot \mu_a(E_i) \exp(-\mu(E_i) r) \cdot B_D(E_i, \mu(E_i) r) \cdot 1{,}602 \cdot 10^{-13}}{4\pi r^2 w}, \quad (29)$$

где $\dot{H}^*(10)$ – МАЭД [мкЗв/ч], A [Бк] – активность точечного изотропного источника, η_i – вклад фотонов с энергией E_i [МэВ], r [м] – расстояние от источника до точки детектирования, $\mu_a(E_i)$ [кг/м^2] – массовый коэффициент поглощения для энергии E_i, $B_D(E_i, \mu(E_i) r)$ – дозовый фактор накопления в

материале защиты, w =1 [(Дж·кг)/Гр], w_r=1 [Зв/Гр] – взвешивающий коэффициент для γ-излучения, 1,602·10^{-13} [МэВ/Дж].

6.2 Реализация принципа оптимизации с помощью технологии динамического трёхмерного моделирования радиационной обстановки в виртуальной среде

В диссертации были разработаны методы применения ПОВР для оптимизации облучения персонала радиационных объектов при радиационно опасных работах, общая схема представлена на Рисунке 42.

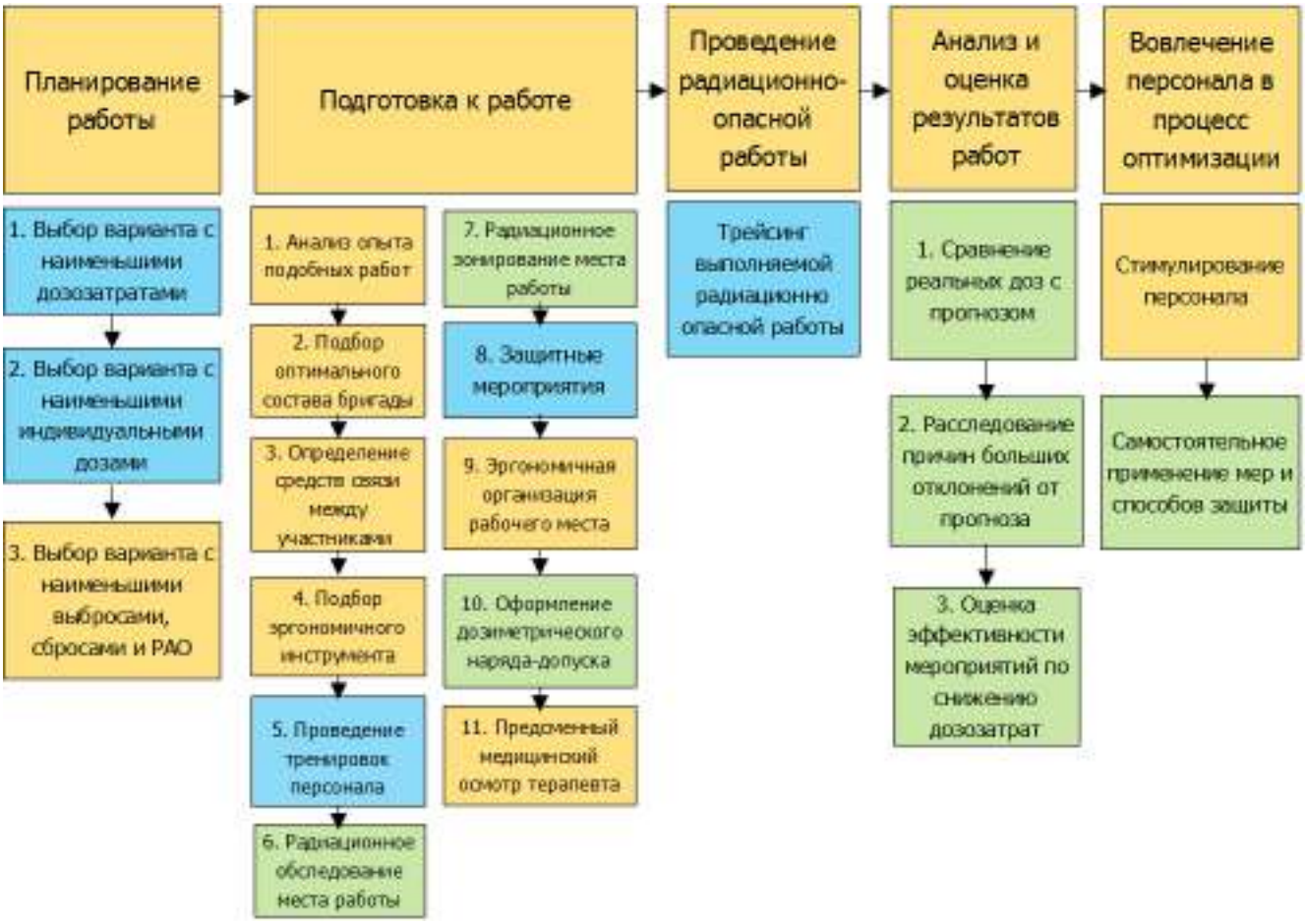


Рисунок 42 – Реализация принципа оптимизации при проведении радиационно опасных работ на предприятии

При планировании радиационно опасных работ должны быть рассмотрены различные варианты их выполнения. Приоритет отдаётся вариантам с наименьшими дозами облучения. При этом предпочтительными являются способы выполнения работы с наименьшими индивидуальными

дозами персонала. ПОВР Andreeva Planner позволяет создавать и анализировать различные сценарии проведения радиационно опасной работы. Для этого создаются необходимые 3D-модели помещений и оборудования. В виртуальной среде программы размещаются объекты: 3D-модели, источники с известной активностью, «манекены» (модели, имитирующие действия персонала). Каждое действие и положение объекта привязывается к шкале времени. Пользователь может изменять маршруты персонала, передвигать оборудование, изменять толщину стен и материал защиты, задавать различные параметры источника. Выполнение каждого сценария (варианта) сопровождается вычислением $H_p(10)$ каждого из участников работы. Таким образом, ПОВР позволяет тестировать различные варианты, пока не будет найден оптимальный (Рисунок 43).

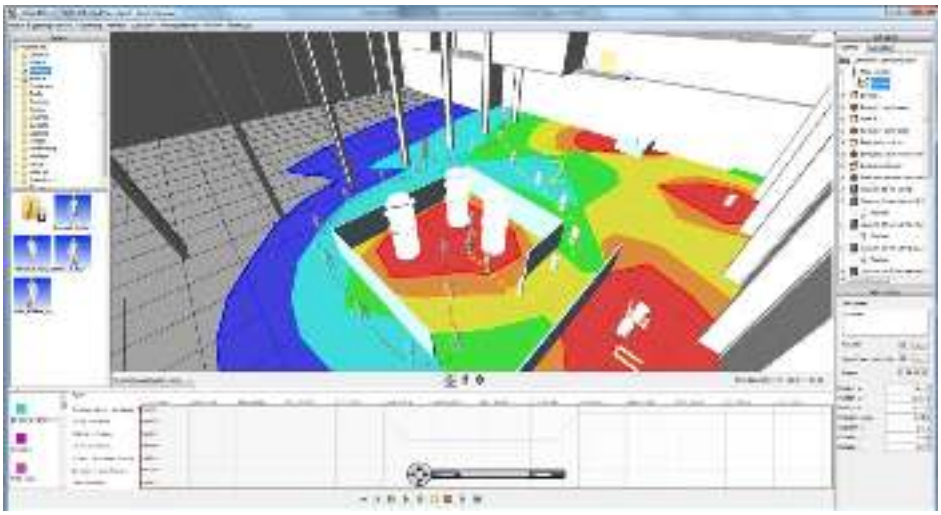


Рисунок 43 – Моделирование различных вариантов выполнения сценария

ПОВР используется для реалистичного моделирования выполнения сценария с визуализацией радиационного поля (Рисунок 44).

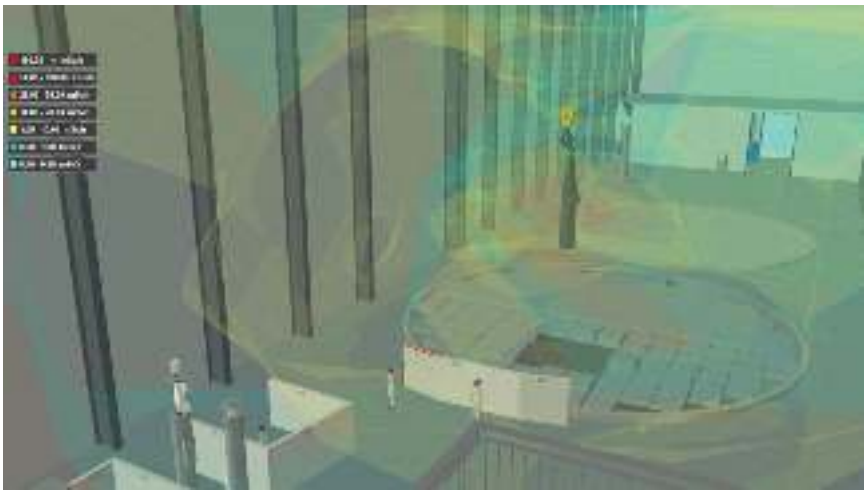


Рисунок 44 – Программа Andreeva Planner. Визуализации радиационной обстановки в виде трёхмерной карты в реальном времени

В дополнение к демонстрации оптимальной стратегии действий ПОВР может быть применено и для демонстрации альтернативных сценариев, а также для объяснения негативных последствий отклонения от плана работ. Наконец, ПО Andreeva Planner может также использоваться для моделирования возможных неудач и оптимальных вариантов стратегии реагирования при тренировке персонала (Рисунок 45).

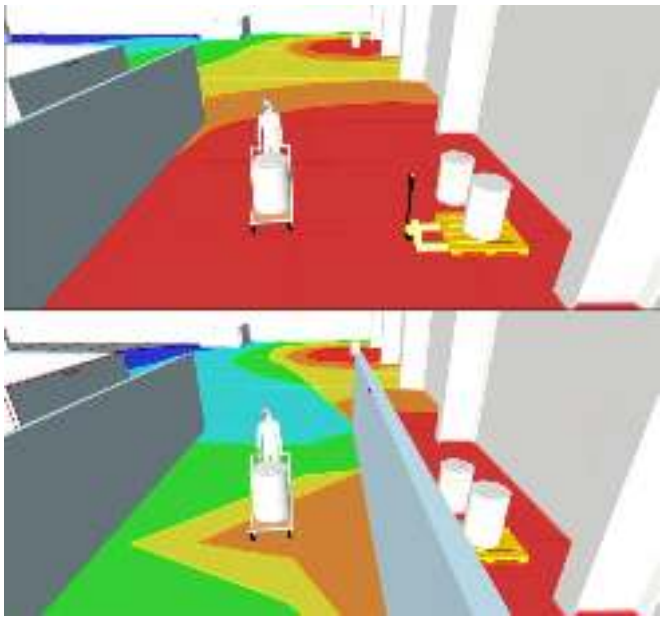


Рисунок 45 – Пример изменения радиационного поля при добавлении в сценарий дополнительной защиты

При работе с Andreeva Planner существует несколько ограничений применимости программы:

- необходимо знать точное расположение и активность всех источников;
- дозовый калькулятор не учитывает рассеяние от стен и потолка (альбедо);
- дозовый калькулятор программы использует концепцию факторов накопления с некоторыми допущениями: фактор накопления не зависит от взаимного расположения источника и защиты, для любого угла падения излучения на защиту фактор накопления задаётся равным фактору накопления, рассчитанному для защиты, толщина которой равна оптической длине пути луча в барьере;
- расчёт доступен для 118-ти радионуклидов;
- для работы со сложными сценариями нужен компьютер достаточной мощности.

Достоинством программы является то, что она может быть использована как тренажёр для обучения персонала. Программа повышает эффективность взаимодействия предприятия и надзорных органов путём более детальной проработки сценария радиационно опасной работы (трёхмерная динамическая модель с отображением радиационной обстановки и оценкой доз облучения персонала).

6.3 Применение Andreeva Planner в противоаварийных исследовательских учениях

ПО Andreeva Planner было применено для оценки доз в исследовательских противоаварийных учениях в СЗЦ «СевРАО», поскольку одной из его целей было исследование эффективности применения методов компьютерного моделирования для решения задач противоаварийного планирования и аварийного реагирования.

Сценарий учений состоял в следующем: при перевозке транспортного упаковочного комплекта (ТУК) из блока сухого хранения к накопительной площадке возникает нештатная ситуация (падение вертолёта), которая приводит

к пожару и последующему выбросу в атмосферу дисперсии смеси радионуклидов, с известной активностью и нуклидным составом (Таблица 11). Загрязнение вне территории объекта отсутствует (Рисунок 46). Бригада специальной пожарной части начинает тушить пожар через 7 минут после возгорания и завершает через 18 минут.

6.3.1 Исходные данные

Исходными данными для проведения компьютерного моделирования были результаты прогноза радиационной обстановки на основе документа «Оценка воздействия окружающей среды» (ОВОС) [141], выполненные с учетом влияния промышленной застройки и состояния атмосферы:

- загрязнение территории промплощадки губа Андреева СЗЦ «СевРАО» радиоактивными веществами;
- поле концентрации радиоактивных веществ на высоте 1,5 метра;
- поле МАЭД на момент времени 1000 секунд после начала выброса.

Таблица 11 – Выход радионуклидов в окружающую среду (по сценарию учения)

Радионуклид	Активность, Бк
^{60}Co	$2,85 \cdot 10^{8}$
^{90}Sr	$4,70 \cdot 10^{10}$
^{134}Cs	$4,55 \cdot 10^{9}$
^{137}Cs	$5,50 \cdot 10^{11}$
^{238}Pu	$7,00 \cdot 10^{7}$
^{239}Pu	$5,50 \cdot 10^{6}$
^{240}Pu	$6,00 \cdot 10^{6}$
^{241}Pu	$4,50 \cdot 10^{8}$
Суммарная активность	$6,02 \cdot 10^{11}$

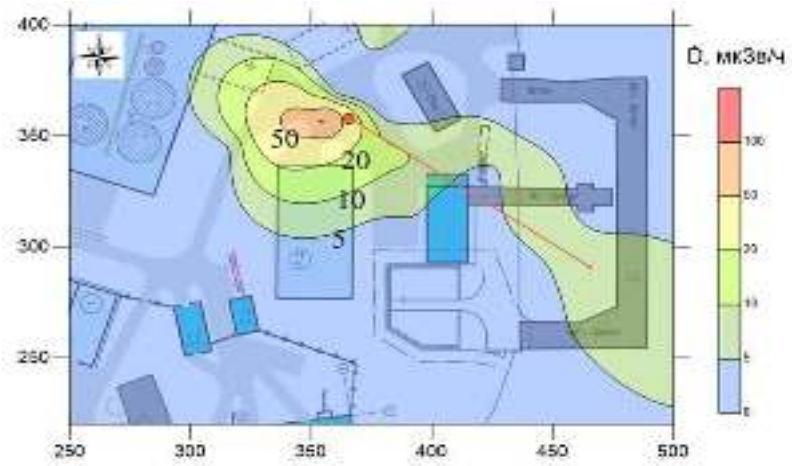
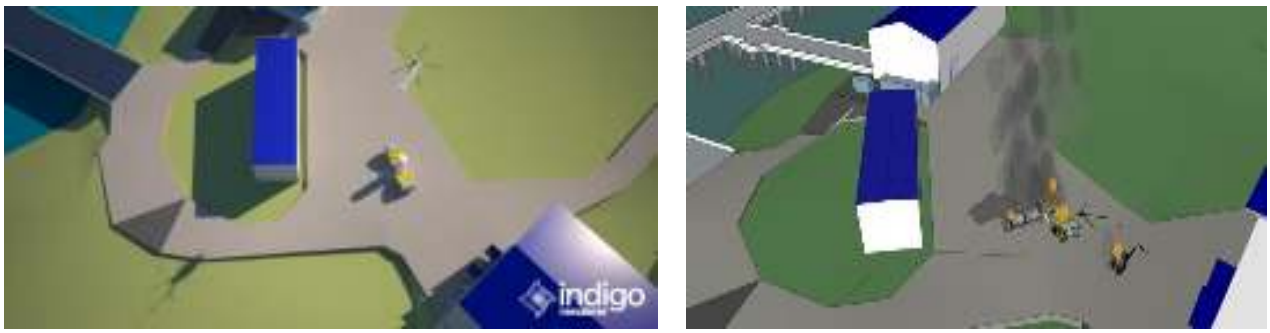


Рисунок 46 – Схема аварии и карта радиационной обстановки. Оранжевой стрелкой показано направление ветра в момент аварии

При подготовке сценария учений были созданы необходимые 3D-модели помещений и оборудования (Рисунок 47), смоделирован сценарий аварии в Andreeva Planner. На основании расчётных данных, в программе были смоделировано радиационное поле, путём размещения в виртуальной среде комбинации источников (Рисунок 48).



(a) (b)

Рисунок 47 – 3D визуализация аварии. (a) – вертолёт пролетает над технической территорией объекта, (b) – падение вертолёта на ТУК

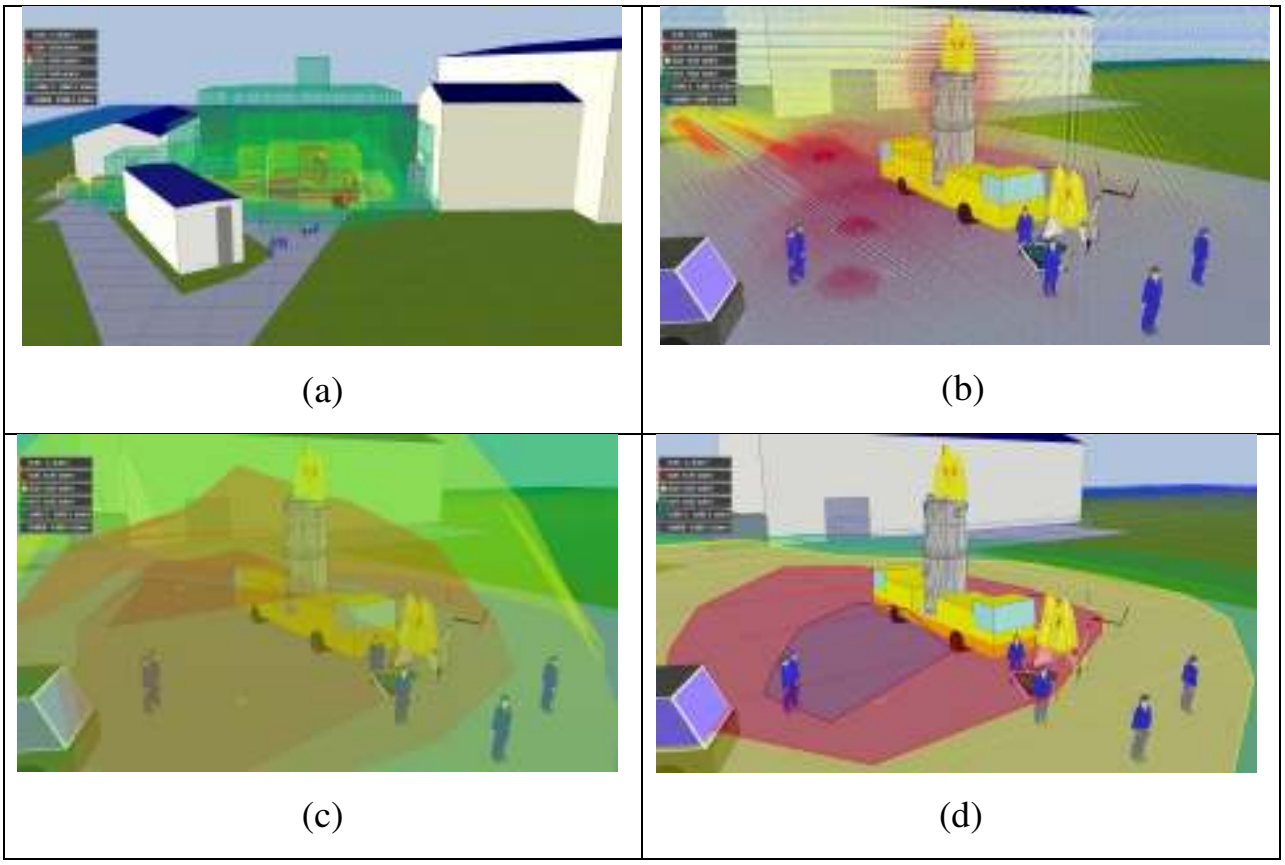


Рисунок 48 – Типы визуализации в Andreeva Planner для сценария учений. (a) – трёхмерная визуализация РО в виде кубов, (b) – визуализация РО полем частиц в узлах трёхмерной сетки, (c) – трёхмерное отображение РО, (d) – срез РО на высоте 1 м

6.3.2 Оценка доз облучения

По оценке Andreeva Planner максимальный $H_p(10)$ = 22 мкЗв был получен пилотом вертолёта. $H_p(10)$ персонала спасательной аварийной бригады (САБ) составил от 3 до 5 мкЗв, у пожарных – от 2 до 5 мкЗв.

6.4 Применение Andreeva Planner для оценки доз в нештатной ситуации

В качестве аварийного сценария, был рассмотрен вариант нештатной ситуации – падение перегрузочного контейнера при перемещении его от ёмкости БСХ к посту перечехловки. После падения происходит повреждение контейнера и разгерметизация чехла с ОТВС. Причины и возможность возникновения такой ситуации детально описаны в работах [142-144]. После падения контейнера средства аварийной сигнализации, расположенные в монтажном зале, выдадут

аварийный световой и звуковой сигналы об эвакуации персонала. В статье [145] для такого варианта развития событий за 5–10 минут (время выхода персонала из монтажного зала) оценено, что максимально возможный $H_p(10)$ составит от 2,5 до 5 мЗв.

В Andreeva Planner был промоделирован соответствующий сценарий, с разрушением контейнера и просыпанием радиоактивного материала с суммарной активностью 4000 ГБк (активность ^{137}Cs = 3600 ГБк, ^{60}Co = 200 ГБк, ^{144}Ce = 200 ГБк). Расстояние до ближайших работников от источника по сценарию составляло 4 метра. Расчётная оценка $H_p(10)$ персонала за 5-минутную эвакуацию составила от 0,08 до 0,87 мЗв в зависимости от места расположения работника в пространстве. При планировании работ предполагалось, что перегрузочный контейнер обеспечивает достаточную защиту обслуживающего персонала во время проведения работ. Но нами также была проведена оценка минимизации доз при использовании дополнительной защиты, поставленной между работниками и источником.

По оценке в программе при использовании защиты из листа железа толщиной 2 мм при эвакуации максимальный $H_p(10)$ будет равен 0,77 мЗв, при использовании защиты из листа свинца толщиной 2 мм − максимальный $H_p(10)$ = 0,30 мЗв.

6.5 Выводы

1. 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.

2. Программа Andreeva Planner позволила рассчитать дозы внешнего облучения персонала при возникновении нештатной ситуации: падении перегрузочного контейнера при перемещении его от ёмкости блока сухого хранения к посту перечехловки. Расчётная оценка Hp(10) персонала за пятиминутную эвакуацию составила от 0,08 до 0,87 мЗв в зависимости от места расположения работника в пространстве.

ВЫВОДЫ ИЗ ДИССЕРТАЦИИ

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.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Толстиков В. С. Об освещении истории создания и развития отечественной атомной промышленности // Вестник Челябинского государственного университета. – 1999. – Т. 1. – №. 2. – С. 20-26.
2. Круглов А. К. Как создавалась атомная промышленность в СССР. – 2-е изд., испр. – М.: Цниатоминформ, 1995. 380 с.
3. Туков А. Р., Гуськова А. К. Анализ опыта и источников ошибок в оценке состояния здоровья лиц, вовлеченных в радиационные аварии // Медицинская радиология и радиационная безопасность. – 1997. – Т. 42. – №. 5. – С. 5-10.
4. Крупнейшие радиационные аварии в мире. Справка. [Электронный ресурс] / РИА Новости. – 2008. – Режим доступа: http://ria.ru/spravka/20080426/105961878.html.
5. Кудряшов Ю. Б., Мазурик В. К., Ломанов М. Ф. Радиационная биофизика (ионизирующие излучения). – М.:Физматлит, 2004.
6. Галушкин Б. А. и др. Научно-методическое сопровождение работ по ликвидации последствий аварии на Чернобыльской АЭС // Технологии гражданской безопасности. – 2011. – Т. 8. – №. 2.
7. Rees J. V. Hostages of each other: The transformation of nuclear safety since Three Mile Island. – University of Chicago Press, 2009.
8. Алексахин Р. М. и др. Крупные радиационные аварии: последствия и защитные меры. – М.: ИздАТ, 2001.
9. Wakeford R. The Windscale reactor accident—50 years on //Journal of Radiological Protection. – 2007. – V. 27. – №. 3. – P. 211.
10. Samuel J. Walker. Three Mile Island: A Nuclear Crisis in Historical Perspective — Berkeley: University of California Press, 2004. — 317 p. — ISBN 0-520-23940-7.

11. Крючков В. П., Кочетков О. А., Цовьянов А. Г. Радиационно-дозиметрические аспекты ликвидации последствий аварии на Чернобыльской АЭС. – М.: ИздАТ, 2011.
12. International Atomic Energy Agency. INES, the International Nuclear and Radiological Event Scale, Users Manual, 2008 edition. IAEA Publishing Section, 2009. Режим доступа: http://www-pub.iaea.org/mtcd/publications/pdf/ines-2009_web.pdf.
13. Povinec P. P., Hirose K., Aoyama M. Fukushima accident: radioactivity impact on the environment. – Newnes, 2013.
14. НП-061-05 Правила безопасности при хранении и транспортировании ядерного топлива на объекты использования атомной энергии. – М.: Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору, 2005.
15. Нормы радиационной безопасности НРБ-99/2009. – М.: Центр санитарно-эпидемиологического нормирования, гигиенической сертификации и экспертизы Минздрава России, 2009.
16. Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, ICRP Publication 103. – N.: Pergamon Press, 2007, 343 p.
17. Радиационная защита и безопасность источников излучения: международные основные нормы безопасности. – МАГАТЭ, ВЕНА, 2015б STI/PUB/1578, ISBN 978–92–0–409915–7, ISSN 1020–5845.
18. Федеральный закон от 09.01.1996 N 3-ФЗ (ред. от 19.07.2011) "О радиационной безопасности населения".
19. Санитарные правила «Санитарные правила обращения с радиоактивными отходами» СПОРО-2002, СП 2.6.1.1168–02: утв. Главным государственным санитарным врачом РФ 16 окт. 2002 г. - М., 2002.
20. СП 2.6.1.2612-10. Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ-99/2010). – М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2010. – 82 с.

21. Рогожин М. Ю. Организация делопроизводства предприятия: (на основе ГОСТ Р6. 30-2003). – Directmedia, 2014.
22. Белов В.С. Информационно-аналитические системы. Основы проектирования и применения. Московский государственный университет экономики, статистики и информатики. — М., 2005. — 111 с.
23. Han J., Pei J., Kamber M. Data mining: concepts and techniques. – Elsevier, 2011.
24. Yasutaka T. et al. A GIS-based evaluation of the effect of decontamination on effective doses due to long-term external exposures in Fukushima // Chemosphere. – 2013. – V. 93. – №. 6. – P. 1222-1229.
25. Труды ИБРАЭ РАН / под общ. ред. чл.-кор. РАН Л. А. Большова; Ин-т проблембезопасного развития атомной энергетики РАН. — М. : Наука, 2007—Вып. 15 : Развитие систем аварийного реагирования и радиационного мониторинга / науч. ред. Р. В. Арутюнян. — 2013. — 315 с.: ил. —ISBN 978-5-02-039111-6 (в пер.).
26. Богданова Л. С., Галушкин Б. А., Саленко Ю. А. Теория и практика проведения учений и тренировок в случае радиационных чрезвычайных ситуаций // Вестник НЦБЖД. – 2012. – № 3 (13), С. 99-106.
27. Savkin M. N. et al. Medical and radiological aspects of emergency preparedness and response at SevRAO facilities //Journal of Radiological Protection. – 2008. – V. 28. – №4. – С. 499.
28. Сайт гильдии экологов [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.ecogiuld.ru.
29. Сайт НПО «Гарант»: [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://garant.hut.ru/programs/universal.html.
30. Модель мезо-масштабного переноса радиоактивных веществ в атмосфере. Руководство пользователя. – Обнинск: НПО «Тайфун», 2000.
31. Программное средство "SULTAN" оперативного прогнозирования радиационной обстановки за пределами станции в случае аварии на АЭС.

Инструкция пользователя. Утв. Техническим директором концерна "Росэнергоатом" 12.10.2000, М., 2000.

32. Программа ДОЗА-RRC. ОФАП-ЯР, N 393 от 28.12.96.
33. Положение о повышении точности прогностических оценок радиационных характеристик радиоактивного загрязнения окружающей среды и дозовых нагрузок на персонал и население. Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору. – 2010.
34. Халевин Р.Г., Бердников А.В. Компьютерные программы для экологов//Экологические системы и приборы. – 2002. –№3. – С. 35–38.
35. Нострадамус. Компьютерная система прогнозирования и анализа радиационной обстановки на ранней стадии аварии на АЭС. Инструкция пользователя. ИБРАЭ РАН, инв. №3429. –М., 2001.
36. Ulanovsky A. et al. ReSCA: decision support tool for remediation planning after the Chernobyl accident //Radiation and environmental biophysics. – 2011. – Т. 50. – №. 1. – С. 67-83.
37. Истомина Н.Ю. Геоинформационный экспертно-моделирующий комплекс для оценки последствий выбросов радиоактивных веществ в атмосферу. Дисс. на соиск. уч. ст. канд. техн. наук, Северск, 2005 – 159 с.
38. Расчетный код «СОКРАТ/В1». Аттестационный паспорт программного средства, Рег. номер 275, 13.05.2010.
39. IAEA TECDOC Series No. 1162, IAEA, Vienna, 2000. Общие инструкции оценки и реагирования на радиологические аварийные ситуации. – МАГАТЭ, Вена, 2004. IAEA-TECDOC-1162/R.
40. Pebesma E. J. et al. INTAMAP: an interoperable automated interpolation web service. – 2009.
41. Szegvary T. et al. Mapping terrestrial γ-dose rate in Europe based on routine monitoring data //Radiation measurements. – 2007. – Т. 42. – №. 9. – С. 1561-1572.

42. Pilz J., Kazianka H., Spöck G. Interoperability—spatial interpolation and automated mapping. // In: Tsiligiridis T (ed) Proceedings of the 4th international conference on information and communication technologies in bio and earth sciences HAICTA. – 2008. Agricultural University of Athens, Athens, P. 110–118.

43. Изместьев К. М. и др. Реконструкция доз облучения населения от газоаэрозольных выбросов, содержащих радиоактивный йод, в период 1961–1969 гг. (Оценка метеорологических факторов, расчет ингаляционной дозы облучения) // Бюллетень сибирской медицины. – 2005. – №. 2. – С. 105-109.

44. Kryuchkov V. et al. RADRUE method for reconstruction of external photon doses for Chernobyl liquidators in epidemiological studies // Health Phys. – 2009. – V. 97. – №4. – P. 275–298.

45. Авария на ЧАЭС: Дозы облучения участников ЛПА: аварийный контроль, ретроспективная оценка / Крючков В.П., Голованов И.А., Чижов К.А. и др. – М.: Типография ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России, 2011. – 280 с.

46. Romanenko A. Et al. The Ukrainian-American Study of leukemia and related Disorders among Chornobyl Cleanup workers from Ukraine: III. Radiation Risks. // Radiation Research. – 2008. – V.170(6). – P. 711-720.

47. Bouville A., Chumak V., Inskip P. et al. Chornobyl accident: estimation of radiation doses received by the clean-up workers // Radiation Research - Radiation Research Society, 2006. - 166 : Vol. 1, part 2 - pp. 158-167.

48. Глушкова В. В., Седлецкий А. А., Седлецкий Д. А. Оптимизация процесса эвакуации населения в случае радиационных аварий // Математические машины и системы. – 1998. – №. 1. – С. 89.

49. Бєляєв В. Ю., Тарасенко О. А. Аналіз математичних моделей знаходження оптимальних шляхів екстреної евакуації населення. // Проблеми надзвичайних ситуацій, Збірка наукових праць.– 2011. – №. 14.

50. Беляев В.Ю., Тарасенко А.А. Нахождение оптимального маршрута эвакуации населения по существующей сети автодорог // Проблеми надзвичайних ситуацій. – 2011. – Вип. 13. – С. 39-46.
51. Данилкин Ф.А., Наумов Д.С. Трассировка маршрута движения по цифровым картам местности // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. – Рязань: РГРТУ. – 2010. – Вып. 31 – № 1. – С.86-88.
52. Емельянов В.В., Курейчик В.В., Курейчик В.М. Теория и практика эволюционного моделирования / М.: ФИЗМАТЛИТ. – 2003. – 432 с.
53. Hart P. E., Nilsson N. J., Raphael B. A formal basis for the heuristic determination of minimum cost paths // IEEE transactions on Systems Science and Cybernetics. – 1968. – V. 4. – №. 2. – P. 100-107.
54. Liu Y. et al. Minimum dose method for walking-path planning of nuclear facilities //Annals of Nuclear Energy. – 2015. – V. 83. – P. 161–171.
55. Liu Y. et al. Walking path-planning method for multiple radiation areas //Annals of Nuclear Energy. – 2016. – V. 94. – P. 808–813.
56. Alzalloum A. Q. Application of shortest path algorithms to find paths of minimum radiation dose. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.ideals.illinois.edu/bitstream/handle/2142/14665/Alzalloum_Abdul-Qadim.pdf?sequence=2&isAllowed=y.
57. Sandin R. Pathfinding in radioactive environment: using Java. [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:633347/FULLTEXT01.pdf.
58. Scheblanov V. Y., Sneve M. K., Bobrov A. F. Monitoring human factor risk characteristics at nuclear legacy sites in northwest Russia in support of radiation safety regulation //Journal of Radiological Protection. – 2012. – V. 32. – №4. – P. 465.
59. Glushkova V., Schichtel T., Paesler-Sauer J. Modelling of early countermeasures in RODOS /1st International Conference of the European Commission, Belarus,

the Russia Federation and Ukrain on the Consequences of the Chernobyl Accident, Minsk, Belarus. – 1996. – P. 18-22.

60. Ehrhardt J. et al. RODOS–Decision Support System for Off-site Emergency Management in Europe //European Commission, EUR–Report. – 2000. – V. 19144.
61. IAEA Training Course on Decommissioning Dose Assessment & Dose optimization. MARCOULE CEA Center. Dec 5th 2011. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.iaea.org/OurWork/ST/NE/NEFW/WTS-Networks/IDN/idnfiles/Characterization&Visualization/10-Simulation_Narveos.pdf.
62. Kim Y. H., Park W. M. Use of simulation technology for prediction of radiation dose in nuclear power plant //International Conference on Computational and Information Science. –Berlin: Springer, 2004. – P. 413-418.
63. Khasawneh M. A. et al. A localized navigation algorithm for radiation evasion for nuclear facilities: Optimizing the “Radiation Evasion” criterion: Part I //Nuclear Engineering and Design. – 2013. – V. 259. – P. 240-257.
64. Jeong K. S. et al. The scenario-based system of workers training to prevent accidents during decommissioning of nuclear facilities //Annals of Nuclear Energy. – 2014. – V. 71. – P. 475-479.
65. Thevenon J. B. et al. Using simulation for intervention design in radiating environment: first evaluation of NARVEOS //GLOBAL, Paris, France. – 2009. – P. 153-157.
66. Yong-kuo L. Walking path-planning method for multiple radiation areas // Annals of Nuclear Energy (Oxford). – 2016. – P. 808-813.
67. Chao N. et al. A dose assessment method for arbitrary geometries with virtual reality in the nuclear facilities decommissioning //Radiation Physics and Chemistry. – 2017.
68. Защита от ионизирующих излучений. Том I. Физические основы защиты от излучений./ Гусев Н.Г. и др. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 512 с.

69. Szőke I. et al. Real-time 3D radiation risk assessment supporting simulation of work in nuclear environments //Journal of Radiological Protection. – 2014. – V. 34. – №2. – P. 389.

70. Briesmeister J. F. et al. MCNP-A general Monte Carlo code for neutron and photon transport. – Los Alamos National Laboratory, 1986.

71. Agostinelli S. et al. GEANT4—a simulation toolkit //Nuclear instruments and methods in physics research section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. – 2003. – V. 506. – №3. – P. 250-303.

72. Jia X. et al. Development of a GPU-based Monte Carlo dose calculation code for coupled electron–photon transport // Physics in medicine and biology. – 2010. – V. 55. – №11. – P. 3077.

73. Методические указания МУ 2.6.1.2153-06 Оперативная оценка доз облучения населения при радиоактивном загрязнении территории воздушным путем. – М., 2007.

74. Ankerhold U., Berens R., Ambrosi P. X ray spectrometry of low energy photons for determining conversion coefficients from air kerma, Ka, to personal dose equivalent, Hp (10), for radiation qualities of the ISO narrow spectrum series // Radiation protection dosimetry. – 1999. – V. 81. – №4. – P. 247-258.

75. Kimiaki S. et al. Effective dose conversion coefficients for radionuclides exponentially distributed in the ground // Radiation and environmental biophysics. – 2012. – V. 51. – P. 411–423.

76. Методические указания МУ 2.6.1.2153-06 Оперативная оценка доз облучения населения при радиоактивном загрязнении территории воздушным путем. – М., 2007.

77. Stöhlker U., Bleher M., Gering F. Measurement and data analysis concepts combined with data assimilation techniques for source term reconstruction and dose assessment. [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www-pub.iaea.org/iaeameetings/cn235p/Session4/S4-5-Ulrich-Stoelker.pdf

78. Saunier O. et al. An inverse modeling method to assess the source term of the Fukushima nuclear power plant accident using gamma dose rate observations //Atmospheric Chemistry and Physics. – 2013. – V. 13. – №22. – P. 11403–11421.

79. Рапута В. Ф. (2011). Модели реконструкции полей радиоактивного загрязнения территорий после ядерных взрывов // Ползуновский вестник. – 2011. –Т.4. –№2. – С. 133-137.

80. Израэль Ю. А. и др. Реконструкция фактической картины радиоактивного загрязнения местности в результате аварий и ядерных испытаний //Метеорология и гидрология. – 1994. – Т. 199. – №. 4. – С. 5–18.

81. Седунов Ю. С. и др. Физико-математическое моделирование регионального переноса в атмосфере радиоактивных веществ в результате аварии на Чернобыльской АЭС // Метеорология и гидрология. – 1989. – Т. 19. – №. 8. – С. 9.

82. Marko M. N., Adrovic F. Air Kerma Rate Constants for Nuclides Important to Gamma Ray Dosimetry and Practical Application, Gamma Radiation. Prof. Feriz Adrovic (Ed.). – InTech. [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.intechopen.com/books/gamma-radiation/air-kerma-rate-constants-for-nuclides-important-to-gamma-ray-dosimetry-and-practical-application

83. Батий В.Г., Кузьменко В. А. Математическое моделирование процесса инвентаризации радиоактивно загрязненных грунтов // Межотраслевой научно-технический центр "Укрытие" НАН Украины, Чернобыль. – 2001.

84. Геостатистика: теория и практика / В. В. Демьянов, Е. А. Савельева, под ред. Р. В. Арутюняна. Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН. – М.: Наука, 2010. – 327с.

85. Харари Ф. Теория графов. – М.: УРСС, 2003. – С. 296.

86. Dijkstra E. W. A note on two problems in connexion with graphs //Numerische mathematik. – 1959. – Т. 1. – №. 1. – С. 269-271.

87. *Cleveland* R. et al. STL: A Seasonal-Trend Decomposition Procedure Based on Loess // Journal of Official Statistics. – 1990. – V.6. – №1. – P. 3–73.

88. Тихонов А. Н. О некорректных задачах линейной алгебры и устойчивом методе их решения //ДАН СССР. – 1965. – Т. 163. – №. 3.

89. Григорьев А.В. История и состояние системы обращения с ОЯТ и РАО на Северо-Западе Российской Федерации / Доклад на семинаре КЭГ «Обращение с РАО ядерного наследия перед захоронением: переработка, кондиционирование и хранение», 17-19 мая 2011, Херингсдорф – Остров Узедом, Германия, 2011, 13 с.

90. PRoAtom - Базы для реакторов. [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.proatom.ru/modules.php?file=print&name=News&sid=1984.

91. Ilyin I. et al. Initial Threat Assessment. Radiological Risks Associated with SevRAO Facilities Falling Within the Regulatory Supervision Responsibilities of FMBA. – Østerås: Statens strålevern, 2005.

92. Savkin M. et al. Medical and radiological aspects of emergency preparedness and response at SEVRAO facilities // Journal of Radiological Protection. – 2008. – V. 28. – №4.

93. Проблемы ядерного наследия и пути их решения. Развитие системы обращения с радиоактивными отходами в России. — Под общей редакцией Большова Л.А., Лаверова Н.П., Линге И.И. — Москва: 2013. — 392 с. — Т.2.

94. Проблемы ядерного наследия и пути их решения. Вывод из эксплуатации. — Под общей редакцией Л.А. Большова, Н.П. Лаверова, И.И. Линге. — Москва: 2015 — 316 с. — Т.3.

95. Абрамов А.А. и др. К вопросу оценки объема ядерного наследия в атомной промышленности и на иных объектах мирного использования атомной энергии в России // Ядерная и радиационная безопасность. – 2014. – №. 3. – С. 3-13.

96. Крюков О.В. и др. Ликвидация ядерного наследия в континентальной части России как условие радиационного благополучия арктики // Арктика: экология и экономика – 2017.– № 4 (28) – С. 49-58.

97. Шандала Н. К. и др. Регулирующий надзор и оценка радиационной обстановки в районах размещения бывших военных технических баз //Гигиена и санитария. – 2013. – №. 3. – С. 15-19

98. Методические указания Особенности применения принципа ALARA при обращении с ОЯТ и РАО в Филиале № 1 ФГУП «СевРАО», МУ 2.6.1.05–08. – М:Б-ка ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России, 2008.

99. Rouhani S. (ed.) Geostatistics for environmental and geotechnical applications. – ASTM International, 1996. – V. 1283.

100. Кынашев С. К., Баранов С. А. Основные элементы и понятия геостатистики // European research. – 2014. – №. 1(1).

101. Surfer for Windows user guide / Kleckner D. – Golden Software Inc., 1996.

102. Детальные измерения МАЭД в 2002 в губе Андреева (НИКИЭТ). Отчет 104/5. Итоговый отчет по результатам радиационных измерений на территории ПВХ ОЯТ и РАО в губе Андреева. Этап № 5, договор № 104 от 02.09.02. НИКИЭТ, Москва, 2002.

103. Геостатистический анализ данных в экологии и природопользовании (с применением пакета R): Учебное пособие / А.А. Савельев, С.С. Мухарамова, А.Г. Пилюгин, Н.А. Чижикова. – Казань: Казанский университет, 2012. – 120 с.

104. Chumak V et al. Dosimetry Support of the Ukrainian-American Case-Control Study of Leukemia and Related Disorders among Chornobyl Cleanup Workers // *Health physics*. 2015. – №. 109(4) . – С. 296-301.

105. Первоочередные медико-гигиенические мероприятия при радиационных авариях: Пособие для врачей. –М., 1998; Организация санитарно-гигиенический и лечебно-профилактических мероприятий при

радиационных авариях: Руководство. Под редакцией академика РАМН, профессора Ильина Л.А. –М., 2005.

106. Nakayama S et al A Comparison Of Remediation After The Chernobyl And Fukushima Daiichi Accidents. Presentation to Technical Meeting of the International Atomic Energy Agency on Remediation Techniques and Strategies in Post-Accident Situations, 13–17 June 2016, IAEA, Vienna.
107. Sneve M K et al Radiation safety during remediation of the SevRAO facilities: 10 years of regulatory experience // J. Radiol. Prot. – 2015. – V.35. – P. 571–596.
108. A Mitigation of Accident Consequences at Chernobyl NPP: Radiation and Dosimetry Issues/ Kryuchkov V, Kochetkov A, Tsovijanov. – M.: Izdat, 2012, 208 p. ISBN: 9785849302317.
109. Chizhov K. et al. 3D simulation as a tool for improving the safety culture during remediation work at Andreeva Bay // J. Radiol. Prot. – 2014. – V. 34. – P. 755–773.
110. Zadeh, L. A. Fuzzy sets as a basis for a theory of possibility // Fuzzy Sets and Systems. – 1978. –V. 1. – P. 3–28.
111. Elizabeth S., Sujatha L. Fuzzy Shortest Path Problem Based on Index Ranking // Journal of Mathematics Research. – 2011. – V. 3. – №4.
112. Chuang T. N., Kung, J. Y. The fuzzy shortest path length and the corresponding shortest path in a network //Computers and Operations Research. – 2005. – V.32. – №6. –P. 1409-1428.
113. Bona M. A. Walk Through Combinatorics: An Introduction to Enumeration and Graph Theory. – World Scientific Publishing Company, 492 p., 2006.
114. Prato C., Bekhor S. Applying branch-and-bound technique to route choice set generation // Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board. – 2006. – V.1985. – P.19–28.
115. Shaw P., Croüail P. ALARA in Existing Exposure Situations: 14th European ALARA Network Workshop, 4–6 September 2012, Dublin // *J. Radiol. Prot*. – 2013. – V.33. – P.487–490.

116. GitHub - Radiationsafety/RGraph_minimum_dose_route: Methods of minimizing doses incurred by external exposure while moving in radiation hazardous areas. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://github.com/Radiationsafety/RGraph_minimum_dose_route.
117. Sneve M K, Kiselev M, Kochetkov O. Regulatory improvements related to the radiation and environmental protection during remediation of the nuclear legacy sites in North West Russia. Final report of work completed by FMBA and NRPA in 2007. – Østerås: Norwegian Radiation Protection Authority, 2008.
118. Шандала Н.К. и др. Регулирующий надзор и оценка радиационной обстановки в районах размещения бывших военных технических баз // Гигиена и санитария. – 2013. – №3. – С.15-19.
119. Nikitin A., Shchukin A. Of nuclear and radiation legacy sites in Russia's northwest: an overview of projects carried out as part of international. [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://bellona.no/content/uploads/sites/4/Nuclear-report-.pdf.
120. Introductory Time Series with R / Cowpertwait P.S.P., Metcalfe A.V. – Springer, 2009.
121. Forecasting: principles and practice / Hyndman R., Athanasopoulos G. – OTexts, 2014. ISBN: 0987507109.
122. R language definition / R Core Team. – Vienna, Austria: R foundation for statistical computing, 2000.
123. Zeileis A., Grothendieck G. Zoo: S3 Infrastructure for Regular and Irregular Time Series // Journal of Statistical Software. – 2005. – V.14(6) . – P. 1–27.
124. Филонова А. А., Серёгин В. А. Миграция техногенных радионуклидов в почвах и донных отложениях прибрежной полосы пункта временного хранения СевРАО и ее влияние на возможное загрязнение морской акватории // Гигиена и санитария. – 2014. – №2.

125. Armstrong, R. Historical Soviet daily snow depth version 2 (HSDSD). Boulder, CO: National Snow and Ice Data Center. CD-ROM. [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://dx.doi.org/10.7265/N5JW8BS3.

126. Указ Президента РФ «О системе и структуре федеральных органов исполнительной власти» от 09.03.2004 №314.

127. Шандала Н. К. и др. Обеспечение радиационной безопасности при реабилитации объектов СЗЦ «СевРАО» //Гигиена и санитария. – 2015. – Т. 94. – №. 5.

128. Защита от ионизирующих излучений. Справочник./ Машкович В. П., Кудрявцева А. В. – М.: Энергоатомиздат, 1995. – 496 с.

129. Геостатистический анализ данных в экологии и природопользовании (с применением пакета R) / Савельев, А. А. – Казань: Казанский университет, 2012.

130. МУК 2.6.1.016-99. Контроль загрязнения радиоактивными нуклидами поверхностей рабочих помещений, оборудования, транспортных средств и других объектов. Методические указания по методам контроля (утв. Минатомом России 16.11.1999, главным государственным санитарным врачом РФ 10.09.1999 N 16-99).

131. Методические указания к практическим заданиям по курсу «Обратные задачи механики» для студентов механико-математического факультета / А.О. Ватульян, О.В. Явруян. – Ростов-на-Дону, 2005.

132. ICRP Publication 74. Conversion Coefficients for Use in Radiological Protection against External Radiation //Annals of the ICRP. Vol. 26, No.3. 1997.

133. ГОСТ-8.087-2000. Государственная система обеспечения единства измерений. Установки дозиметрические рентгеновского и гамма-излучений эталонные. Методика поверки по мощности экспозиционной дозы и мощности кермы в воздухе, введена 01.01. 2002 – М.: Изд-во стандартов, 2001. – 19 с.

134. Hansen, P. C. (1992). Numerical tools for analysis and solution of Fredholm integral equations of the first kind // Inverse problems. –1992. –V. 8(6). – P. 849.
135. Схема генерального плана для разработки УЧРП 2007-2008г., 2007г. Утв. зам. руководителя Федерального агентства по атомной энергии А.Б. Малышевым.
136. Linfoot E An informational measure of correlation // Inf. Control. – 1957.– №1.– С. 85–89.
137. Elements of Information Theory / Cover, T. M., Thomas, J. A. – New York, 1990.
138. Bioinformatics: Applications in Life and Environmental Sciences / Fulekar M.H. – Springer, 2009.
139. Исследования в области повышения радиационной безопасности при реализации практической деятельности в зоне отчуждения ЧАЭС / В.Г. Батий // Проблеми безпеки атомних електростанцій і Чорнобиля. — 2009. — Вип. 12. — С. 113-124.
140. Ларцев М. А., Метляева Н. А., Щербатых О. В. Пути совершенствования системы медицинского и психофизиологического обеспечения персонала объектов использования атомной энергии //Медицина катастроф. – 2010. – №. 3. – С. 34-37.
141. Акционерное общество «научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт энергетических технологий «Атомпроект», договор № т08-1/иф12/182/14-39/0332/900 оценка воздействия окружающей среды (ОВОС) технологических операций по извлечению ОЯТ из ячеек БСХ, перегрузке их в чехлы и транспортные контейнеры (ТУК-18 и ТУК-108/1), загрузке на причале в губе Андреева, транспортированию на причал ФГУП «Атомфлот» в Мурманске и выгрузке на причале ФГУП «Атомфлот».
142. 2004а, Отчет. Проект: Губа Андреева - Задача 2. Технико-экономическая оценка (вариантов) обращения с отработавшим ядерным топливом

береговой технической базы губы Андреева Кольского полуострова и оценка воздействия на окружающую среду, Том. 1 – М: НИКИЭТ им. Н.А.Доллежаля, 2004. – 182 с.

143. 2004b, Отчет. Проект: Губа Андреева - Задача 2. Технико-экономическая оценка (вариантов) обращения с отработавшим ядерным топливом береговой технической базы губы Андреева Кольского полуострова и оценка воздействия на окружающую среду, Том. 2. – М: НИКИЭТ им. Н.А.Доллежаля, 2004. – 197 с.

144. Технологический регламент по обеспечению выгрузки кондиционных ОТВС из контейнеров тип 6, 11, 11/12 и 12, вывоза кондиционных ОТВС с территории филиала №1 ФГУП «СевРАО» и размещения контейнеров с некондиционными ОТВС на временное хранение», 2009. – 145 с.

145. Kiselev M. F. et al. Securing Safety of the Spent Nuclear Fuel Management and its Removal from Andreeva Bay. The Role of the Supervision Bodies in Assessment of Documentation Developed. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.researchgate.net/profile/Malgorzata_Sneve/publication/265871283_Securing_Safety_of_the_Spent_Nuclear_Fuel_Management_and_its_Removal_from_Andreeva_Bay_The_Role_of_the_Supervision_Bodies_in_Assessment_of_Documentation_Developed/links/5592561008ae47a34910e1a8.pdf.

ПРИЛОЖЕНИЕ А. АКТЫ ВНЕДРЕНИЯ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

Титульный лист протокола установки ПО Andreeva Planner в отделение губа Андреева СЗЦ «СевРАО»

Титульный лист протокола установки программного обеспечения, разработанного в проекте DRIVE (в частности, Andreeva Planner) в отделение губа Андреева Северо-Западного центра по обращению с радиоактивными отходами «СевРАО» - филиала Федерального государственного унитарного предприятия «Предприятие по обращению с радиоактивными отходами «РосРАО».

УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России

_____ А.Н. Кузнецов

«___» _____ 2013 г.

УТВЕРЖДАЮ

Директор отделения губа Андреева СЗЦ «СевРАО» - филиала ФГУП «РосРАО»

_____ А.Н. Красноцеков

«19» декабря 2013 г.

ПРОТОКОЛ

УСТАНОВКИ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ В ОТДЕЛЕНИЕ ГУБА АНДРЕЕВА СЗЦ «СевРАО» - ФИЛИАЛА ФГУП «РосРАО» В ХОДЕ КОМАНДИРОВКИ СОТРУДНИКОВ ФМБЦ им. А.И. БУРНАЗЯНА 16 – 20 ДЕКАБРЯ 2013 г.

Заозерск – 2013

22/I-2014 г.

Протокол установки программного обеспечения ИАС РБП в отделение губа Андреева СЗЦ «СевРАО»

Протокол установки программного обеспечения ИАС РБП (в частности, EasyRAD) в отделение губа Андреева Северо-Западного центра по обращению с радиоактивными отходами «СевРАО» - филиала Федерального государственного унитарного предприятия «Предприятие по обращению с радиоактивными отходами «РосРАО».

УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России

_____ К.Ю. Котенко

«____» _____ 2014 г.

УТВЕРЖДАЮ

Руководитель центра – директор отделения губа Андреева СЗЦ «СевРАО» - филиала ФГУП «РосРАО»

_____ А.Н. Краснощеков

«____» _____ 2014 г.

ПРОТОКОЛ

УСТАНОВКИ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ В ОТДЕЛЕНИЕ ГУБА АНДРЕЕВА СЗЦ «СевРАО» - ФИЛИАЛА ФГУП «РосРАО» В ХОДЕ КОМАНДИРОВКИ СОТРУДНИКОВ ФМБЦ им. А.И. БУРНАЗЯНА

19 – 23 МАЯ 2014 г.

Заозерск – 2014

Цель работы: Установка программного обеспечения, разработанного в рамках проекта № М15-12/25 «Внедрение информационно-аналитической системы по радиационной безопасности персонала (ИАС РБП) отделения СевРАО в губе Андреева. Оптимизация программного обеспечения до уровня, обеспечивающего реальное использование ИАС РБП в целях регулирующего надзора за состоянием РБ персонала» (шифр «DOSEMAP-3»).

В работе принимали участие следующие специалисты:

От отделения губа Андреева СЗЦ «СевРАО» - филиала ФГУП «РосРАО»:

1. Руководитель центра – директор отделения гб.Андреева А.Н. Краснощеков;
2. Начальник отдела радиационной безопасности А.С. Косников;
3. Начальник участка радиационного контроля Г.Л. Гончаренко.

От ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России:

1. Инженер И.К. Мазур;
2. Инженер И.Д. Кудрин;
3. Инженер К.А. Чижов.

Участниками проведена следующая работа:

1. **СОГЛАСОВАНИЕ ЗАДАЧ ОРГАНИЗАЦИИ РАБОТЫ:**

Дата, место проведения:

- 19 мая 2014 г., г. Заозерск, отделение гб. Андреева СЗЦ «СевРАО» - филиала ФГУП «РосРАО».

Обсуждаемый вопрос:

- Планирование работы специалистов ФМБЦ им. А.И. Бурназяна по установке программного обеспечения.

Участники:

- от отделения гб. Андреева СЗЦ «СевРАО» - филиала ФГУП «РосРАО»: А.Н. Краснощеков, А.С. Косников, Г.Л. Гончаренко;
- от ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России: И.К. Мазур, И.Д. Кудрин, К.А. Чижов.

2. **ВЫПОЛНЕНИЕ РАБОТЫ:**

Дата, место проведения:

19-23 мая 2014 г., ПВХ в губе Андреева.

Осуществляемая работа:

- Установка на компьютеры отделения гб. Андреева СЗЦ «СевРАО» - филиала ФГУП «РосРАО» программного обеспечения, разработанного в рамках проекта «Внедрение информационно-аналитической системы по радиационной безопасности персонала (ИАС РБП) отделения СевРАО в губе Андреева. Оптимизация программного обеспечения до уровня, обеспечивающего реальное использование ИАС РБП в целях регулирующего надзора за состоянием РБ персонала»:

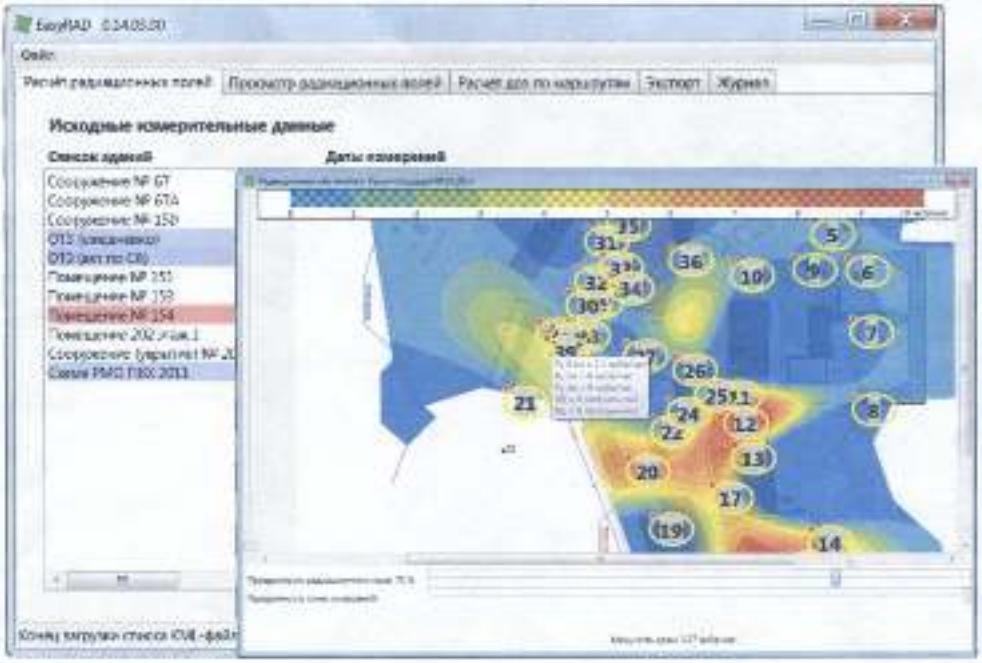
1. Mazur Interface (рис. 1);
2. EasyRAD (рис. 2);
3. TesnovKML.

Участники:

- от отделения гб. Андреева СЗЦ «СевРАО» - филиала ФГУП «РосРАО»: А.С. Косников, Г.Л. Гончаренко;
- от ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России: И.К. Мазур, И.Д. Кудрин, К.А. Чижов.

Рисунок 1. Интерфейс пользователя программы Mazur Interface

Рисунок 2. Интерфейс пользователя программы EasyRAD



Инженер ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России _____ И.Ж. Мазур

Начальник отдела радиационной безопасности отделения губа Андреева СЗЦ "СевРАО" - филиала ФГУП "РосРАО" _____ А.С. Косников

Акт о внедрении ПО Andreeva Planner в МРУ №120 ФМБА России

ФМБА РОССИИ

Межрегиональное управление №120 Федерального медико-биологического агентства
(Межрегиональное управление №120 ФМБА России)

Бирюкова ул., д. 5/1, г. Снежногорск-2, Мурманская область, 184682
Тел./факс: (815-30) 6-03-01, e-mail: fmba-ru120@mail.ru http://ru120.fmbaros.ru
ОКПО 76983956, ОГРН 1055100068210, ИНН/КПП 5105021014/511201001

АКТ о внедрении программного обеспечения
Andreeva Planner

Настоящий Акт свидетельствует, что программное обеспечение Andreeva Planner, разработанное Институтом Энергетических Технологий (IFE, Халден, Норвегия) и ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России, внедрено в Межрегиональное управление №120 ФМБА России.

Процесс внедрения проходил с 16 по 20 декабря 2013 г.

Заявленные характеристики системы предполагали наличие следующих основных возможностей:

- Создание детального сценария проведения работы в 3D с привязкой ко времени;
- 3D-визуализация радиационного поля в реальном времени;
- Оценка доз персонала;
- Моделирование различных вариантов работы и выбор оптимального.

В ходе эксплуатации программы подтверждено, что она обладает всеми заявленными возможностями и применима для поддержки принятия решений специалистами службы радиационной безопасности.

На момент подписания настоящего Акта система установлена на персональный компьютер в Межрегиональное управление №120 ФМБА России.

Руководитель И.А. Кемский

Акт о внедрении ПО EasyRAD в МРУ №120 ФМБА России

ФМБА РОССИИ

Межрегиональное управление №120 Федерального медико-биологического агентства
(Межрегиональное управление №120 ФМБА России)

Бирюкова ул., д. 50, г. Снежногорск-2, Мурманская область, 184682
Тел./факс: (815-30) 6-03-01, e-mail: fmba-mu120@mail.ru http://vr120.fmbaros.ru
ОКПО 76983956, ОГРН 1055100068210, ИНН/КПП 5105201016/511201001

АКТ о внедрении программного обеспечения
EasyRAD

Настоящий Акт свидетельствует, что программное обеспечение EasyRAD, разработанное ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России, внедрено в Межрегиональное управление №120 ФМБА России.

Процесс внедрения проходил 27-28 мая 2014 г.

Заявленные характеристики системы предполагали наличие следующих сервисных возможностей:

- Ведение базы данных результатов радиометрического контроля;
- Расчёт и визуализация полей мощности дозы на основании данных радиометрического контроля;
- оценка дозы персонала при перемещении по маршрутам;
- Инструмент «карта контрольных уровней»;
- Инструмент поиска пути с минимальной дозой;
- Инструмент оптимального обхода транспортной сети предприятия;
- Инструмент поиска оптимальной траектории обхода точек.

В ходе эксплуатации программы подтверждено, что она обладает всеми заявленными возможностями и применима для поддержки принятия решений специалистами службы радиационной безопасности.

На момент подписания настоящего Акта система установлена на персональный компьютер в Межрегиональное управление №120 ФМБА России.

Руководитель И.А. Кечекян

ПРИЛОЖЕНИЕ Б. СЕРТИФИКАТЫ СООТВЕТСТВИЯ ГОСТ Р ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

Сертификат соответствия ГОСТ Р программного обеспечения EasyRAD.

СИСТЕМА СЕРТИФИКАЦИИ ГОСТ Р

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ТЕХНИЧЕСКОМУ РЕГУЛИРОВАНИЮ И МЕТРОЛОГИИ

СЕРТИФИКАТ СООТВЕТСТВИЯ

№ РОСС RU.МЛ04.Н01064

Срок действия с 30.06.2014 г. по 29.06.2017 г.

№ 1564318

ОРГАН ПО СЕРТИФИКАЦИИ

Аттестат аккредитации №РОСС RU.0001.11МЛ04

ОРГАН ПО СЕРТИФИКАЦИИ ПРОДУКЦИИ ООО «РАДИОФИЗИЧЕСКИЕ ТЕСТОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ»

Юридический адрес: 125315, г. Москва, ул. Адмирала Макарова, д.10, стр.1

Фактический адрес: 107258, г. Москва, ул. 1-я Бухвостова, д. 12/11, корп.17, офис 10

тел./факс: +7 (495) 748-7861, e-mail: mail@cert.ru

ПРОДУКЦИЯ

Программное обеспечение (ПО) "EasyRAD".

Серийный выпуск.

код ОК 005 (ОКП):

50 3900

СООТВЕТСТВУЕТ ТРЕБОВАНИЯМ НОРМАТИВНЫХ ДОКУМЕНТОВ

ГОСТ Р ИСО 9127-94 (п.п. 6.1, 6.3-6.5, 6.8),

ГОСТ Р ИСО/МЭК 12119-2000 (п.п. 3.1.3, 3.1.4, 3.1.5, 3.3.1, 3.3.2, 3.3.3),

ГОСТ 28195-99 (таблица 1, п.п. 1.2, 3.2, 4.6)

код ТН ВЭД России:

ИЗГОТОВИТЕЛЬ

ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России, ИНН: 7734081136,

адрес: 123182, Москва, ул. Живописная, д. 46

СЕРТИФИКАТ ВЫДАН

ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России, ОКПО: 85667361, ИНН: 7734591136,

адрес: 123182, Москва, ул. Живописная, д. 46, тел. (499) 190-80-73.

НА ОСНОВАНИИ

Протоколов испытаний

№225 от 16.06.2014 г. ИЛ ПО ООО ЦРИСИТ, рег. №РОСС RU.0001.21СП05.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Местонанесения знака соответствия: на изделии, упаковке и в технической документации. Схема сертификации №3.

М.П.

Руководитель органа _____ А.В. Шепудченков

Эксперт _____ Ю.В. Гибин

Сертификат не применяется при обязательной сертификации

Сертификат соответствия ГОСТ Р программного обеспечения Rockville.

СИСТЕМА СЕРТИФИКАЦИИ ГОСТ Р

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ТЕХНИЧЕСКОМУ РЕГУЛИРОВАНИЮ И МЕТРОЛОГИИ

Добровольная сертификация

СЕРТИФИКАТ СООТВЕТСТВИЯ

№ РОСС RU.МЛ04 Н00807

Срок действия с 15.12.2011 г. по 14.12.2014 г.

№ 0629667

ОРГАН ПО СЕРТИФИКАЦИИ
Аттестат аккредитации №РОСС RU.0001.11МЛ04
ОРГАН ПО СЕРТИФИКАЦИИ ПРОДУКЦИИ ООО «РАДИОФИЗИЧЕСКИЕ ТЕСТОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ»
Юридический адрес: 125315, г. Москва, ул. Адмирала Макарова, д.10, стр. 1.
Фактический адрес: 107258, г. Москва, ул. 1-я Бухвостова, д. 12/11, корп.17, офис 10.
тел./факс: +7 (495) 748 7861, e-mail: mail@certific.ru

ПРОДУКЦИЯ
Программное обеспечение "ROCKVILLE".
Серийный выпуск

код ОК 005 (ОКП):
50 9000

СООТВЕТСТВУЕТ ТРЕБОВАНИЯМ НОРМАТИВНЫХ ДОКУМЕНТОВ
ГОСТ Р ИСО/МЭК 12119-2000

код ТН ВЭД России:

ИЗГОТОВИТЕЛЬ
ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России, ИНН: 7734581136,
адрес: 123182, Москва, ул. Живописная, д. 46

СЕРТИФИКАТ ВЫДАН
ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России, ОКПО: 95687361, ИНН: 7734581136,
адрес: 123182, Москва, ул. Живописная, д. 46, тел. (499) 190-65-73.

НА ОСНОВАНИИ
Протоколов испытаний
№156 от 14.12.2011 г. ИЛ ПС ООО ЦРИОИТ, рег. №РОСС RU.0001.21СП06.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ
Место нанесения знака соответствия: на изделии, упаковке и в технической документации. Схема сертификации:

Руководитель органа — А.В. Шевлученков
Эксперт — Ю.В. Гибин

Сертификат не применяется при обязательной сертификации

ПРИЛОЖЕНИЕ В. ПИСЬМО-ПОДТВЕРЖДЕНИЕ ОТ НАЦИОНАЛЬНОГО ИНСТИТУТА РАКА

Письмо с подтверждением использования методов, разработанных в рамках диссертационной работы в Национальном институте рака (США) для проведения эпидемиологических исследований последствий аварии на ЧАЭС.

DEPARTMENT OF HEALTH AND HUMAN SERVICES — Public Health Service

February 7, 2017

Victor Kryuchkov

State Research Center A.I. Burnasyan Federal Medical Biophysical Center of Federal Medical Biological Agency

46, Zhivopisnaya str., Moscow 123182
RUSSIAN FEDERATION

Subject: Contribution of Mr. Konstantin Chizhov to radiation dosimetry of NCI-conducted post-Chernobyl epidemiological studies: Confirmation letter

Dear Dr. Kryuchkov,

With this letter I confirm the contribution of Mr Konstantin Chizhov to radiation dosimetry of NCI-conducted post-Chernobyl epidemiological studies. Mr Chizhov's specific field of research, known as radiation dosimetry for cancer research, is an extraordinarily complex field. It concerns the calculation of the absorbed dose in human organs and tissue resulting from the exposure to ionizing radiation. It is a scientific subspecialty in the fields of health physics and medical physics. Having worked in the field of radiation epidemiology for many years, I can attest that creating new developments in the field of radiation dosimetry is extremely difficult. Mr Chizhov brings a unique combination of knowledge, ability, and skills to bear on his investigations, which ensures that he will continue to advance this field of research.

Mr Chizhov remarkably contributed to the development of dosimetry system "Rockville" that is the major dosimetry method currently used in epidemiological studies among Chernobyl cleanup workers. Analytical methods developed by Mr Chizhov have been used in "Rockville" system to calculate radiation doses to cleanup workers and population evacuated from town of Pripyat in the NCI-conducted post-Chernobyl epidemiological studies, including the Study of thyroid cancer in Ukrainian Chernobyl cleanup workers and the Study of paternal irradiation of Ukrainian cleanup workers and germline mutations in their offspring (TRIOS Study).

Mr Chizhov is also one of the major researcher in the study of reliability of questionnaire-based dose reconstruction, so called Human Factor Uncertainty study. In 2014 we invited him to visit NCI and to work with our Dosimetry Group on analysis of personal interview data and doses in order to evaluate uncertainties in cleanup workers'

dosimetry. Mr Chizhov significantly contributed to development and verification of analysis methodology; our scientists were impressed by his analytical and computer skills.

Mr. Chizhov's research on this topic is important because the results of this work have implications for analysis of radiation-related risks of diseases in exposed population. Mr Chizhov brings a unique combination of knowledge, ability, and skills to bear on his investigations, which ensures that he will continue to advance this field of research.

Sincerely,

K Mabuchi

Kiyohiko Mabuchi, MD, DrPH
Head, Chernobyl Research Unit
DCEG/REB, Room 7E534
National Cancer Institute
9609 Medical Center Drive
Bethesda, MD 20892-9778, USA
Tel: 240-276-7392
Fax: 240-276-7840