

ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ БЕЗОПАСНОГО РАЗВИТИЯ АТОМНОЙ
ЭНЕРГЕТИКИ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

На правах рукописи

Киселев Алексей Аркадьевич

Программный комплекс для расчетного обоснования радиационной
безопасности населения при запроектных авариях на объектах ядерной
энергетики

05.14.03 – Ядерные энергетические установки, включая проектирование,
эксплуатацию и вывод из эксплуатации

Диссертация на соискание ученой степени кандидата
технических наук

Научный руководитель:
Арутюнян Рафаэль Варназович
доктор физико-математических наук,
профессор

Москва – 2014

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1 Анализ и оценка методов и способов расчетного обоснования радиационной безопасности населения при запроектных авариях на объектах ядерной энергетики	18
1.1 Анализ существующей нормативно-правовой базы по обеспечению радиационной безопасности населения при радиационной аварии	18
1.2 Методы и способы обоснования радиационной безопасности населения при запроектных радиационных авариях	30
1.2.1 Методы и способы контроля и мониторинга радиационной обстановки вокруг ПОО	30
1.2.2 Методы и способы прогнозирования последствий радиационных аварий	33
1.2.3 Неопределенности в выборе параметров модели атмосферного выброса.....	56
1.2.4 Способы минимизации неопределенностей без использования данных натуральных измерений	59
1.2.5 Методы восстановления параметров атмосферного выброса с использованием средств радиационного контроля и мониторинга объектов окружающей среды	62
1.3 Обоснование цели и задач исследования	63
1.4 Выводы по главе 1.....	65
2 Разработка программного средства прогнозирования радиационной обстановки и доз облучения населения для выработки рекомендаций по применению защитных мероприятий	67
2.1 Разработка состава программного средства для выработки рекомендаций по применению защитных мероприятий	67
2.2 Разработка архитектуры программного средства для проведения прогностических оценок параметров радиационной обстановки и поддержки принятия решений.....	72

2.3 Программное средство для выработки рекомендаций по применению защитных мероприятий при обосновании радиационной безопасности населения при запроектных радиационных авариях.....	75
2.3.1 Инструментальные средства разработки.....	75
2.3.2 Графический интерфейс пользователя	75
2.3.3 Технологии параллельного программирования.....	78
2.3.4 Верификация и апробация частей программного комплекса.....	79
2.4 Выводы по главе 2.....	101
3 Разработка программного средства для восстановления параметров атмосферного выброса.....	104
3.1 Методика восстановления параметров радиационной обстановки.....	104
3.2 Разработка архитектуры программного средства для восстановления параметров атмосферного выброса	114
3.3 Программное средство для восстановления параметров выброса	115
3.3.1 Графический интерфейс пользователя	115
3.3.2 Верификация и апробация программного средства.....	118
3.4 Выводы по главе 3.....	128
4 Создание Интегрального программного комплекса для расчетного обоснования радиационной безопасности населения при запроектных авариях на объектах ядерной энергетики.....	130
4.1 Схема интеграции разработанных программных средств и расчетного кода СОКРАТ в единый программный комплекс.....	130
4.2 Работа с программным комплексом.....	134
4.3 Возможности расширения области применения интегрального программного комплекса.....	136
4.4 Верификация интегрального программного комплекса на данных натурных измерений при аварии на АЭС Фукусима-1 (Япония)	136
4.5 Выводы по главе 4.....	141
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	143
Список сокращений и условных обозначений.....	145

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	147
Список иллюстрированного материала	164

ВВЕДЕНИЕ

Объекты ядерной энергетики относятся к классу потенциально опасных объектов и представляют угрозу возникновения аварий с радиационным фактором. Поэтому согласно Федеральным нормам и правилам "Общие положения обеспечения безопасности объектов ядерного топливного цикла" НП-016-15 [1] для обеспечения безопасности должна быть реализована концепция глубоко эшелонированной защиты, основанная на использовании группы физических барьеров и системы технических и организационных мер для их защиты, сохранения их эффективности, защиты персонала, населения и окружающей среды. В основном, имеющиеся внутренние системы безопасности обеспечивают надежную защиту, однако, несмотря на это, не исключается возможность возникновения аварийной ситуации [2], приводящей к выбросам радиоактивных веществ за пределы промплощадки, которые могут привести к облучению населения свыше установленного предела. Поэтому на всех этапах жизненного цикла объектов ядерной энергетики проводятся оценки воздействия на окружающую среду (ОВОС) [3], а на этапе проектирования разрабатывается сначала предварительный отчет по обоснованию безопасности (ПООБ) [4], а потом и отчет по обоснованию безопасности (ООБ) [4], одним из элементов которых являются оценка распространения радионуклидов в атмосфере и расчеты ожидаемых дозовых воздействий на население. При подготовке этих документов также разрабатываются планы проведения мероприятий по защите персонала и населения [5], на основе которых должны проводиться защитные мероприятия по защите персонала и населения при возникновении проектных и ряда запроектных сценариев развития аварии. При этом для отработки действий в случае возникновения аварий, проверки знаний персонала, проверки работоспособности средств оповещения и оборудования регулярно проводятся противоаварийные тренировки, связанные с реагированием на гипотетические аварийные ситуации, направленные, в конечном итоге, на обеспечение радиационной безопасности персонала и населения и минимизацию последствий для окружающей среды. В

связи с этим возникает необходимость решения следующих задач для обеспечения радиационной безопасности населения:

- проведение расчетов параметров радиационной обстановки и дозовых нагрузок на персонал и население при предварительном обосновании безопасности [6];
- выработка рекомендаций по применению защитных мероприятий;
- проведение расчетов параметров радиационной обстановки и дозовых нагрузок на персонал и население при возникновении реальной аварийной ситуации, когда необходимо минимизировать ее последствия [7].

Особенно это важно и актуально для запроектных аварий. Такие оценки могут проводиться с помощью современных комплексных программных средств [6, 9], включающих в себя модели распространения радионуклидов в атмосфере, дозиметрические модели и модели учета влияния защитных мероприятий на прогностические значения дозовых нагрузок на население. Во всех случаях необходимо предоставить достаточно надежные или консервативные оценки параметров радиационной обстановки [10]. При этом, для повышения точности таких прогнозов при принятии решений по применению защитных мероприятий также необходимо учитывать результаты комплексного анализа аварии, включающие анализ данных о повреждениях объекта, данных мониторинга радиационной обстановки и др.

На данный момент существует широкий спектр отдельных программных средств, позволяющих проводить такие расчеты: ПС “Чистый воздух – расчет рассеяния” [11] основан на подходах, описанных в методике ОНД-86 [12], ПС “Гарант универсал” [13], ПС “CALPUFF” [14], ПС “ERAD” [15], ПС “RECASS” [16,17], ПС “Нострадамус” [18], ПС “Призма” [19], геоинформационная система “PRANA” [20], ПС “АРИА” [21], ПС “SULTAN” [22], ПС “Доза” [23], ПС “GENGAUSS” [8]. Однако на ранней фазе развития аварии, когда формируются основные дозы, их использование затруднено дефицитом исходных данных, существенно снижающим точность прогнозирования и не позволяющим в полной

мере использовать возможности этих программных средств. Существует несколько путей решения проблемы.

Для запроектных аварий (как наиболее потенциально опасных для персонала и населения) необходимо иметь предварительную информацию (данные о наиболее вероятном сценарии развития аварии, основанные на использовании тяжелоаварийных кодов класса MELCOR или СОКРАТ). Т.е. использование программных средств, позволяющих сквозным образом моделировать последствия для населения, начиная от исходного события, моделируя накопление продуктов деления в топливной матрице при нормальной эксплуатации, выход радионуклидов под оболочку тепловыделяющего элемента (ТВЭЛ), выход продуктов деления в первый контур после разрушения оболочки ТВЭЛа, поведение продуктов деления в первом контуре, их выход под защитную оболочку, поведение продуктов деления под защитной оболочкой, выход в атмосферу, распространение в атмосфере, осаждение на подстилающую поверхность и формирование доз на население.

По мере поступления дополнительной информации (данных натурных измерений) необходимо создавать методики, позволяющие откорректировать данные об источнике, адаптируя прогноз радиационной обстановки в соответствии с результатами измерений (так называемая концепция «гибридного» мониторинга) [6, 24, 25].

Следующим вариантом решения части проблем, связанных с неопределенностью входных данных, является подбор комплекса моделей, отвечающих за разные физические процессы, влияющие на конечный результат, и интеграция этих моделей в единый программный комплекс под общей интегрирующей оболочкой. В силу того, что при реальных авариях ослабление радиологических последствий для персонала и населения напрямую зависит от времени применения защитных мероприятий, комплекс должен иметь развитый интерфейс, минимизирующий ошибки на этапах подготовки данных и анализа результатов расчета, и включать необходимые для моделирования базы данных.

В связи с этим возникает необходимость разработки программного комплекса для расчетного обоснования радиационной безопасности населения, реализующего как механизм прогнозирования последствий для населения при распространении загрязнения в атмосфере, так и механизмы итерационного уточнения параметров расчета с целью минимизации ошибок прогноза с использованием всей доступной на ранней фазе развития аварии информации. Т.е. рассматривается следующий подход к проведению расчетного анализа последствий запроектной радиационной аварии с возможностью выхода радионуклидов в атмосферу:

- прогнозирование самых консервативных вариантов развития событий с выходом радионуклидов в атмосферу;
- уточнение прогноза выхода активности из-под защитной оболочки (ЗО) в атмосферу, с использованием тяжелоаварийных кодов (для реакторных установок (РУ));
- расчет новых прогностических оценок радиационной обстановки;
- уточнение прогностических значений с использованием данных автоматизированной системы контроля радиационной обстановки (АСКРО);
- уточнение прогностических значений с использованием данных групп радиационного контроля.

Таким образом, **актуальность темы диссертации** обеспечивается необходимостью научно-технического обоснования радиационной безопасности населения при запроектных авариях на объектах ядерной энергетики на этапах проектирования, ввода в эксплуатацию, эксплуатации и вывода из эксплуатации, а также при обеспечении безопасности в части подготовки персонала при проведении противоаварийных учений и минимизации последствий при реальных авариях.

Целью работы является создание интегрального программного комплекса для расчетного обоснования радиационной безопасности населения при запроектных радиационных авариях на основе сквозного моделирования

процессов на ЯРОО, атмосферного переноса радиоактивности, расчета доз облучения населения и снижения ошибок прогноза за счет использования данных мониторинга для выработки рекомендаций по защите населения. Имея углубленную ориентацию на моделирование последствий тяжелых аварий, комплекс должен иметь возможность прогнозировать последствия любого радиационного инцидента. Исходя из поставленной цели, в диссертационной работе решаются следующие **задачи**:

1. анализ существующей отечественной и международной нормативно-правовой базы и методов и способов обоснования радиационной безопасности населения при запроектных радиационных авариях;

2. выбор набора физических процессов и их моделей, которые должны быть учтены, исходя из специфики поставленной задачи. Разработка принципов взаимодействия этих моделей и создание программного средства на их основе для прогнозирования радиационной обстановки, доз облучения населения и выработки рекомендаций по применению защитных мероприятий при обосновании радиационной безопасности населения при запроектных радиационных авариях;

3. разработка комплексной методики и программного средства на ее основе для коррекции параметров исходного атмосферного выброса радиоактивных веществ с использованием средств радиационного контроля и мониторинга объектов окружающей среды;

4. создание сквозного программного комплекса, интегрирующего разработанные программные средства и модуль, реализующий расширяемую автоматизированную связь с результатами моделирования внутриреакторных процессов современными тяжелоаварийными кодами при запроектных авариях на АЭС.

Решению первой задачи посвящена глава 1 настоящей работы. В ней представлен обзор нормативно-правовой базы по обоснованию радиационной безопасности населения в случае радиационных аварий. В частности показано, что принятие решений осуществляется с использованием прогностических

оценок, которые проводятся программными средствами с использованием табулированных дозовых коэффициентов и критериев принятия решений. Также рассмотрены методы и способы обеспечения радиационной безопасности населения при запроектных радиационных авариях. В частности рассмотрены современные методы и способы контроля и мониторинга последствий радиационных аварий и методы и способы прогнозирования последствий радиационных аварий.

Определен круг физических процессов, влияющих на конечный результат, которые должны быть учтены при прогнозировании радиационной обстановки при атмосферном переносе радиоактивности. На основе этого проведен отбор и доработка моделей атмосферной дисперсии радиоактивных веществ, дозиметрических моделей, моделей эффективности проведения защитных мероприятий и дополнительных моделей, позволяющих описывать такие физические процессы, как взрыв, пожар, распространение над неоднородной поверхностью и др., с целью их интеграции в общую модель прогнозирования радиационной обстановки, доз облучения населения и выработки рекомендаций по применению защитных мероприятий. Отбор проводился с учетом российских и международных норм и рекомендаций. Поскольку отобранные модели изначально разработаны для различных задач, поэтому требуется разработка требований для их интеграции в единый программный комплекс и разработка принципов их взаимодействия для их корректной работы в составе программного модуля.

Также в главе 1 рассмотрены вопросы точности прогнозирования и способы ее повышения. В силу того, что на ранней фазе развития аварии, исходные данные для этих моделей имеют большие неопределенности и, соответственно, результаты прогнозирования имеют низкую точность, документы нормативно-правовой базы рекомендуют использовать дополнительные источники информации для повышения точности прогнозов. Например, в отечественной документации представлены рекомендации по повышению точности таких оценок с использованием данных мониторинга радиационной обстановки и другой информации об аварии. Другим способом минимизации возможных

неопределенностей при определении исходных параметров для моделей атмосферной дисперсии является использование тяжелоаварийных кодов класса MELCOR или СОКРАТ для оценки радионуклидного состава атмосферного выброса и проведение сквозного моделирования радиационной аварии от исходного события до рекомендаций по обеспечению радиационной безопасности населения.

Также в первой главе обосновываются цель и задачи диссертационной работы, показана актуальность разработки программного комплекса, определена его область применения и целевые функции.

На основе отобранных моделей и с учетом требований и рекомендаций по обоснованию радиационной безопасности населения, проанализированных в главе 1, в главе 2 решается задача, связанная с разработкой общей модели на основе отобранных моделей с учетом требований для ее интеграции в единое программное средство, формированием принципа взаимодействия моделей программного средства и его реализацией в виде программного средства для прогнозирования радиационной обстановки, доз облучения населения и выработки рекомендаций по применению защитных мероприятий. Также в главе 2 представлены результаты апробации и верификации разработанного программного средства. Верификация и апробация проводилась:

- с использованием данных серии Европейских экспериментов по атмосферной дисперсии;
- на данных натурных измерений при оценках последствий от реальных радиационных аварий в бухте Чажма;
- на данных натурных измерений при оценках последствий радиационной аварии 1993 года на радиохимическом заводе Сибирского химического комбината (СХК);
- путем кросс-верификации с аттестованным программным средством НОСТРАДАМУС (не гауссового типа), в том числе сопоставления расчетов радиационной обстановки для противоаварийных тренировок;

- при оценках радиационной безопасности планируемой Южно-Уральской атомной электростанции (АЭС).

В главе 3 представлена комплексная методика коррекции параметров атмосферного выброса, построенная на основе анализа, проведенного в главе 1. Она включает в себя адаптацию методов восстановления с использованием средств радиационного контроля и мониторинга объектов окружающей среды на основе системы моделей, отобранных в главе 1 и доработанных в главе 2. Также в главе 3 представлены результаты разработки программного средства на основе разработанной методики, его верификация и апробация, как на модельных задачах, так и на данных натурных измерений при радиационной аварии на ПО «Маяк» в 1957 г. Таким образом, решена задача 3 из списка поставленных задач.0

В главе 4 представлены результаты разработки программного комплекса для расчетного обоснования радиационной безопасности населения при запроектных авариях на объектах ядерной энергетики путем объединения разработанных программных модулей и создания расширяемой технологической цепочки, связывающей разработанные автором программные средства и тяжелоаварийный код для оценки радионуклидного состава в атмосферном выбросе. Представлена схема интеграции созданных в главе 2 и главе 3 программных средств и тяжелоаварийного кода для моделирования внутриреакторных процессов. Также представлены результаты разработки непосредственно программного комплекса и приведены результаты его верификации на примере последствий аварийного выброса на АЭС Фукусима-1. Таким образом, решена задача 4 и цель диссертационной работы достигнута.

Научная новизна:

1. На основе анализа специфики поставленной задачи, разработана, как единое целое, общая модель различных физических процессов, влияющих на конечный результат. Круг учитываемых факторов в единой модели является новым. Модель реализована в программном средстве прогнозирования радиационной обстановки и доз облучения населения.

2. Разработана комплексная методика корректировки параметров исходного атмосферного выброса радиоактивных веществ и корректировки других входных параметров, использующая средства радиационного контроля и мониторинга объектов окружающей среды и создано программное средство на ее основе.

3. Разработанные программные средства включены в интегральный программный комплекс сквозного счета, предназначенный для выработки рекомендаций по применению защитных мероприятий при обосновании радиационной безопасности населения при запроектных радиационных авариях.

Практическая значимость работы. Практическая ценность работы заключается в следующем:

1. созданный интегральный программный комплекс позволяет существенно сократить время на сбор исходной информации путем автоматизации наиболее затратных по времени процедур, начиная с подготовки картографической подложки и данных о высотном профиле рельефа, заканчивая обработкой результатов расчета и подготовкой отчетных форм, что существенно повышает эффективность выработки рекомендаций о необходимости проведения защитных мероприятий для снижения последствий радиационных аварий для населения;

2. интегральный программный комплекс позволяет повысить достоверность расчета за счет обобщенной модели распространения радиоактивности, позволяющей учитывать топографию местности, оценивать эффективную высоту подъема горячего выброса (характерного для поставленной задачи), учитывать объемный источник (взрыв), учитывать полидисперсность продуктов взрыва в рамках единого программного комплекса;

3. дружественный интерфейс позволяет отчуждение программного комплекса от разработчика и использование специалистами без специальных знаний о картографии, форматах выходных данных, предоставляемых тяжелоаварийными кодами;

4. использующиеся технологические решения позволяют обеспечить работоспособность программного комплекса на большинстве современных операционных систем, в частности обеспечена полноценная функциональность на семействе операционных систем Windows, Linux и Mac OS. При этом, в зависимости от оснащения персонального компьютера, возможно использование современных технологий параллельного вычисления, позволяющих проводить пакетные расчеты, используя все ресурсы вычислительной машины с несколькими ядрами;

5. созданный интегральный программный комплекс позволяет существенно повысить достоверность проводимых расчетов за счет использования программного средства корректировки параметров атмосферного выброса, корректировки метеорологических параметров по мере поступления информации о параметрах радиационной обстановки;

6. созданный автором интегральный программный комплекс может быть эффективно использован в системе поддержки принятия решений по проведению защитных мероприятий для населения, при проведении противоаварийных тренировок и для проведения детерминистических расчетов при проектировании объектов ядерной техники, в том числе при проведении ВАБ-3;

7. для самых опасных по возможным последствиям - тяжелым авариям - имеется расширяемая технологическая цепочка, связывающая тяжелоаварийные коды и разработанные автором программные средства (проверена на практике Фукусима 2011г. на примере использования тяжелоаварийного кода СОКРАТ).

Положения, выносимые на защиту:

1. Общая модель (состав, принципы взаимосвязи отдельных моделей) необходимых физических процессов для расчетного обоснования радиационной безопасности населения, выработки рекомендаций по применению защитных мероприятий при запроектных радиационных авариях.

2. Методика восстановления и уточнения параметров атмосферного выброса по данным радиационного мониторинга.

3. Интегральный программный комплекс для расчетного обоснования радиационной безопасности населения при запроектных радиационных авариях на объектах ядерной энергетики, созданный на базе разработанных программных средств, реализующих общую модель необходимых физических процессов, требующих учета при решении поставленной задачи, и методики восстановления и уточнения параметров атмосферного выброса.

Достоверность результатов:

Разработанный интегральный программный комплекс включает в себя современные версии гауссовых моделей с расширенными возможностями: с функцией коррекции результатов в условиях неоднородного рельефа, верифицированными моделями подъема примеси над мощными источниками тепла (взрыв и пожар), методиками расчета параметров виртуального объемного источника для гауссовых моделей, моделями эффективного подъема примеси над незначительным по мощности тепловым источником с начальным импульсом. Доведен до расчета дозовых нагрузок на население и рекомендаций по принятию контрмер.

Достоверность работы отдельных модулей программного комплекса обеспечена результатами кросс верификации с другими известными моделями, а также результатами верификации на конкретных радиационных инцидентах и экспериментах по распространению примеси в атмосфере (Таблица 1). Режим сквозного моделирования с использованием тяжелоаварийного кода СОКРАТ, успешно прошел верификацию при прогнозе радиационной ситуации на АЭС Фукусима-1.

Таблица 1 – Верификация и кросс-верификация моделей и участков сопряжения программных средств в рамках программного комплекса

Источник данных	Задействованные модели
Серия европейских экспериментов по	Модель атмосферной дисперсии

<p>распространению трассера. Кросс-верификация с несколькими известными моделями на основе сравнения с данными измерений</p>	
<p>Модельные задачи, рассмотренные в ходе противоаварийных тренировок 2003 г (кросс-верификация)</p>	<p>Модель атмосферной дисперсии, дозиметрические модели, модели расчета эффективности защитных мероприятий</p>
<p>Нострадамус (аттестованное ПС не гауссового типа)</p>	<p>Модель атмосферной дисперсии, дозиметрические модели</p>
<p>Авария в б. Чажма, 1985 г.</p>	<p>Модель подъема облака при взрыве, модель полидисперсности, модель учета орографии местности</p>
<p>Авария на СХК, 1993 г.</p>	<p>Проведение пакетных расчетов, модель атмосферной дисперсии</p>
<p>Имитация измерений от гипотетического выброса с искусственно наложенной погрешностью</p>	<p>Методика восстановления параметров атмосферного выброса</p>
<p>Авария на ПО «Маяк», 1957 г.</p>	<p>Методика восстановления параметров атмосферного выброса, модель полидисперсности, модель фиктивного источника, модель атмосферной дисперсии.</p>

Авария на АЭС Фукусима-1	Режим сквозного моделирования с использованием тяжелоаварийного кода СОКРАТ, модель атмосферной дисперсии
--------------------------	---

1 АНАЛИЗ И ОЦЕНКА МЕТОДОВ И СПОСОБОВ РАСЧЕТНОГО ОБОСНОВАНИЯ РАДИАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ НАСЕЛЕНИЯ ПРИ ЗАПРОЕКТНЫХ АВАРИЯХ НА ОБЪЕКТАХ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

1.1 Анализ существующей нормативно-правовой базы по обеспечению радиационной безопасности населения при радиационной аварии

В настоящее время нормативно-правовая база обеспечения радиационной безопасности населения опирается на основополагающие правовые акты - Конституцию Российской Федерации, федеральные законы и международные договоры, подробный список представлен в Приказе Ростехнадзора от 04.09.2013 №385 [26].

На следующем уровне иерархической классификации находятся нормативно-правовые акты Президента и Правительства Российской Федерации, касающиеся использования атомной энергии (например, «О гарантиях безопасного и устойчивого функционирования атомной энергетики Российской Федерации» [27] или «Об утверждении Положения о разработке и утверждении федеральных норм и правил в области использования атомной энергии» [28]). Следующий уровень образуют федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии, которые разрабатываются и утверждаются такими органами регулирования безопасности, как Ростехнадзор и Минздравсоцразвития РФ и после регистрации в Минюсте становятся обязательными для исполнения. Далее идут государственные и отраслевые стандарты, строительные нормы и правила и т.п., которые разрабатывались в течение длительного времени и являются обязательными для обеспечения безопасности.

Регулирование деятельности в области обеспечения радиационной безопасности при использовании атомной энергии и источников ионизирующих излучений осуществляется на основе Федерального закона от 21.12.1994г. №68-ФЗ «О защите населения и территорий от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера» [29], Федерального закона от 21.11.1995

№170–ФЗ «Об использовании атомной энергии» [30], Федерального закона от 10.01.2002 № 7–ФЗ «Об охране окружающей среды» [31] и Федерального закона от 09.01.1996 №3–ФЗ «О радиационной безопасности» [32], являющимися документами первого иерархического уровня.

В соответствии с Федеральным законом от 30.03.1999 № 52-ФЗ «О санитарно-эпидемиологическом благополучии населения» [33] и Постановлением Правительства Российской Федерации от 24.07.2000 № 554 «Об утверждении Положения о государственной санитарно-эпидемиологической службе Российской Федерации и Положения о государственном санитарно-эпидемиологическом нормировании» [34] для конкретизации отдельных положений закона «О радиационной безопасности» утверждены санитарные правила СанПиН 2.6.1.2523-09 «Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009)» [35] и СП 2.6.2.2612-01 «Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ 99/2010)» [6]. В соответствии с НРБ-99/2009 утверждаются пределы радиационного воздействия ионизирующего излучения на население и определяются критерии проведения защитных мероприятий при радиационных авариях, основанные на прогностических значениях доз, предотвращаемых защитным мероприятием (в соответствии с принципом оптимизации). «Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ 99/2010)» устанавливают основные принципы, пути и требования по обеспечению радиационной безопасности людей (персонал и население) при облучении от источников ионизирующего облучения, на которые распространяется действие НРБ-99/2009. Данные документы являются документами второго иерархического уровня и обязательны для исполнения на территории РФ, любые федеральные, региональные или ведомственные нормативные документы в области радиационной безопасности более низкого иерархического уровня не должны им противоречить.

К документам третьего иерархического уровня относятся санитарные правила обеспечения радиационной безопасности при эксплуатации атомных

станций, гигиенические требования к эксплуатации медицинского оборудования, использующего источники ионизирующего излучения, правила транспортирования ядерных материалов и радиоактивных веществ и другие санитарные правила или требования отраслевого или федерального значения, относящиеся к обеспечению безопасности в конкретной сфере использования атомной энергии. К документам четвертого иерархического уровня относятся требования или инструкции для конкретного объекта или технического процесса, связанного с использованием источников ионизирующего излучения.

Таким образом, исходя из требований российских документов в области регулирования радиационной защиты, для обеспечения радиационной безопасности населения необходимо обеспечить выполнение требований НРБ-99/2009, разработанного с учетом международных рекомендаций [35]. Так, в случае радиационных аварий необходимо выполнить требования к ограничению техногенного облучения путем принятия мер по восстановлению контроля над источником ионизирующего излучения и сведению к минимуму доз облучения, количества облученных лиц, экономических и социальных потерь и радиоактивного загрязнения окружающей среды, вызванных радиоактивным загрязнением. При этом ограничение доз осуществляется путем применения защитных мероприятий, которые, с одной стороны, должны максимально снижать дозы для человека и окружающей среды, с другой стороны, минимизировать экономический ущерб, психологическое воздействие на население. Поэтому при принятии решений о применении защитных мероприятий руководствуются двумя принципами:

принцип обоснования вмешательства (предполагаемое вмешательство должно привести больше пользы, чем вреда);

принцип оптимизации вмешательства (польза от применения защитных мероприятий была бы максимальной).

При этом применение защитных мероприятий рассматривается исходя из прогнозируемых значений дозы и прогнозируемой предотвращаемой дозы (таблица 2, таблица 3, таблица 4) [35]. Если предотвращаемые дозы (таблица 2,

таблица 3) облучения не превышают уровень А, то в применении мер, связанных с нарушением нормальной жизнедеятельности населения, необходимости нет.

Таблица 2 – Критерии для принятия неотложных решений в начальном периоде радиационной аварии [35]

Меры защиты	Предотвращаемая доза за первые 10 суток, мГр			
	на все тело		щитовидная железа, легкие, кожа	
	уровень А	уровень Б	уровень А	уровень Б
Укрытие	5	50	50	500
Йодная профилактика: взрослые	-	-	250*	2500*
Йодная профилактика: дети	-	-	100*	1000*
Эвакуация	50	500	500	5000

Таблица 3 – Критерии для решений об отселении и ограничении потребления загрязненных пищевых продуктов [35]

Меры защиты	Предотвращаемая эффективная доза, мЗв	
	уровень А	уровень Б
Ограничение потребления загрязненных пищевых продуктов и питьевой воды	5 за первый год 1 /год в последующие годы	50 за первый год 10 /год в последующие годы
Отселение	50 за первый год	500 за первый год
	1000 за все время отселения	

Если предотвращаемые дозы облучения лежат между уровнями А и Б, решение о выполнении мер защиты принимается, исходя из принципа

обоснования и оптимизации. Если предотвращаемые дозы облучения превышают уровень Б, необходимо применять защитные мероприятия. В случае, когда прогнозируемая доза облучения за 2 суток достигает значений, представленных в таблице 4, необходимо срочное применение защитных мероприятий (при превышении значений доз, представленных в таблице 4, возможно возникновение детерминистических эффектов).

Таблица 4 – Прогнозируемые уровни облучения, при которых необходимо срочное вмешательство [35]

Орган или ткань	Поглощенная доза в органе или ткани за 2 суток, Гр
Все тело	1
Легкие	6
Кожа	3
Щитовидная железа	5
Хрусталик глаза	2
Гонады	3
Плод	0,1

Во всех случаях для использования указанных критериев необходимы прогнозируемые значения доз для населения и персонала. Так, в случае радиационных аварий на атомных станциях на основе документа третьего иерархического уровня НП 005-98 «Положение о порядке объявления аварийной обстановки, оперативной передачи информации и организации экстренной помощи атомным станциям в случае радиационно-опасных ситуаций» [7] в ИБРАЭ РАН функционирует центр технической поддержки кризисного центра ОАО «Концерн Росэнергоатом» и осуществляет «...оценку ситуации, как по масштабу аварии, так и по радиоактивному загрязнению окружающей среды» и «оценку и прогноз основных характеристик источника выброса», на основе которых формируются рекомендации для принятия срочных защитных мер для персонала и населения. Для объектов ядерного топливного цикла использование прогностических оценок для принятия решений закреплено в документе

НП-078-06 «Положение о порядке объявления аварийной готовности, аварийной обстановки и оперативной передачи информации в случае радиационно-опасных ситуаций на предприятиях ядерного топливного цикла» [36].

Для получения прогностических значений доз на уровне рекомендаций РБ-053-10 «Положение о повышении точности прогностических оценок радиационных характеристик радиоактивного загрязнения окружающей среды и дозовых нагрузок на персонал и население» [37] закреплено использование комплексных программных средств, включающих в себя модели распространения радионуклидов в атмосфере, дозиметрические модели и модели учета влияния защитных мероприятий на прогностические значения дозовых нагрузок на население.

Международные рекомендации обеспечения радиационной безопасности в случае радиационной аварии закреплены в документах:

«Готовность и реагирование в случае ядерной и радиационной аварийной ситуации» №GS-R-2 [38];

«Методика разработки мероприятий по реагированию на ядерную или радиологическую аварийную ситуацию» (EPR-METHOD (2003); доработка IAEA-TECDOC-953) [9, 39];

«Руководство по радиационной защите при авариях ядерных реакторов» (IAEA-TECDOC-955) [40];

«Руководство по мониторингу при ядерных или радиационных авариях» (IAEA-TECDOC-1092) [41];

«Руководство для лиц, принимающих первые ответные меры в случае радиологической аварийной ситуации» (EPR-FIRST RESPONDERS (2006) доработка IAEA-TECDOC-1162) [42];

«Реагирование на события, связанные с непреднамеренным или нелегальным перемещением радиоактивных материалов» (IAEA-TECDOC-1092) [41].

Документ «Готовность и реагирование в случае ядерной и радиационной аварийной ситуации» №GS-R-2 [38] устанавливает требования к аварийной

готовности и аварийному реагированию с целью минимизации последствий для населения, персонала, собственности и окружающей среды. Реализация требований представлена в двух документах «Организация готовности к ядерной или радиационной аварийной ситуации» (GS-G-2.1) [43] и «Критерии для использования при обеспечении готовности и реагирования в случае ядерной или радиологической аварийной ситуации» (GSG-2) [44]. Согласно этим документам строится критериальная база по проведению защитных мероприятий в зависимости от этапа аварии [45] (защитные мероприятия делятся на упреждающие неотложные мероприятия, неотложные защитные мероприятия и отложенные защитные мероприятия).

EPR-METHOD (2003) включает в себя методики, процедуры и результаты исследований, связанные с реагированием на ядерные или радиологические аварийные ситуации для кадров и оценки программ аварийного реагирования на радиационные аварии и определяет возможность использования моделей для прогнозирования, однако запрещает их использование в качестве единственной основы для разработки защитных мер в силу низкой точности расчетов. IAEA-TECDOC-955 представляет собой набор методик, инструкций и данных для оценки последствий аварий на АЭС, включая выброс радиоактивных материалов в атмосферу с точки зрения технической оценки последствий радиационной аварии. Документ может использоваться для оценки последствий аварии и принятия решений о проведении защитных мероприятий. EPR-FIRST RESPONDERS (2006) включает в себя набор методик, необходимых для начального этапа обеспечения радиационной безопасности населения и предназначена для лиц, принимающих первоначальные ответные меры в первые часы после возникновения радиационной аварийной ситуации (сотрудники аварийных служб и госслужащие).

Для обеспечения радиационной защиты людей и охраны окружающей среды МАГАТЭ устанавливает основополагающие принципы безопасности, требования и меры по контролю облучения и выбросов радиоактивного материала в окружающую среду. «Радиационная защита и безопасность источников

излучения: международные основные нормы безопасности, 2014 год)» [46] заменяет «Международные основные нормы безопасности для защиты от ионизирующих излучений и безопасного обращения с источниками излучения» (ОНБ) [47]. Документ состоит из 4 разделов (общие требования к обеспечению безопасности, требования к обеспечению безопасности в ситуации планируемого облучения, аварийного облучения и ситуации существующего облучения) и большого числа приложений, в которых содержатся фактические данные по критериям и дополнительные данные, необходимые для расчетов различных критериев безопасности. В данном документе закрепляются дозовые коэффициенты при ингаляционном и пероральном поступлении, на основе базы данных [48], взвешивающие коэффициенты для органов и ткани (таблица 5) и общие критерии для проведения защитных мероприятий с целью снижения риска возникновения детерминистических (таблица 6) и стохастических (таблица 7) эффектов на основе 103 публикации Международной комиссии по радиологической защите (МКРЗ) [10]. Следует отметить, что пороговый критерий, связанный с минимизацией детерминистических эффектов, определяется исходя из значений средней относительной биологической эффективности (ОБЭ) - взвешенной поглощенной дозы во внутренних тканях или органах, которая не равна эквивалентной дозе в общем случае, однако из соображений консервативности оценок [10], необходимых для достижения цели работы, и того, что в настоящей работе рассматриваются вопросы радиационной безопасности населения, находящихся за пределами санитарно-защитной зоны, когда вклад нейтронов и альфа-излучения в дозу меньше, чем вклад от гамма-излучения, поэтому использование эквивалентной дозы в место взвешенной дозы не приведет к существенным ошибкам, а в случае ошибок будет завышение прогностических значений [10, 49]. В публикации 103 МКРЗ существенно скорректированы значения взвешивающих коэффициентов для излучений и органов и тканей, однако индивидуальные пределы по эффективной и эквивалентной дозе остались неизменными. В работе [49] отмечена проблема соответствия нового определения взвешивающих коэффициентов и

коэффициентов конверсии для ожидаемой эффективной дозы и показано, что использование дозовых коэффициентов из 115 публикации Международного агентства по атомной энергии (МАГАТЭ) [47] не приводит к существенным ошибкам. Кроме того, после выхода публикации 107 МКРЗ [50] по данным по ядерному распаду для дозиметрических расчётов, декларируется пересчет дозовых коэффициентов в последующих публикациях МКРЗ, которые в настоящее время основаны на данных 38 публикации МКРЗ [51].

Таблица 5 – Рекомендованные значения тканевых весовых множителей

Орган	НРБ-99/2009 [35]	МАГАТЭ [47]	МАГАТЭ [52]
Гонады	0,2	0,2	0,08
Костный мозг (красный)	0,12	0,12	0,12
Толстый кишечник	0,12	0,12	0,12
Легкие	0,12	0,12	0,12
Желудок	0,12	0,12	0,12
Мочевой пузырь	0,05	0,05	0,04
Грудная железа	0,05	0,05	0,12
Печень	0,05	0,05	0,04
Пищевод	0,05	0,05	0,04
Щитовидная железа	0,05	0,05	0,04
Кожа	0,01	0,01	0,01
Клетки костных поверхностей	0,01	0,01	0,01
Головной	-	-	0,01

Орган	НРБ-99/2009 [35]	МАГАТЭ [47]	МАГАТЭ [52]
мозг			
Слюнные железы	-	-	0,01
Остальное	0,05 (надпочечники, головной мозг, экстаторакальный отдел органов дыхания, тонкий кишечник, почки, мышечная ткань, поджелудочная железа, селезенка, вилочковая железа и матка)	0,05 (надпочечники, головной мозг, экстаторакальный отдел органов дыхания, тонкий кишечник, почки, мышечная ткань, поджелудочная железа, селезенка, вилочковая железа и матка)	0,12 (надпочечники, экстаторакальный отдел, желчный пузырь, сердце, почки, лимфатические узлы, мышечная ткань, слизистая оболочка полости рта, поджелудочная железа, предстательная железа, тонкий кишечник, селезенка, вилочковая железа и матка)

В ситуациях аварийного облучения с целью снижения риска детерминистических (таблица 6) и стохастических (таблица 7) эффектов приведены критерии для защитных действий и других мер реагирования.

Таблица 6 – Критерии для защитных действий и других мер реагирования, принимаемых в ситуациях аварийного облучения с целью снижения риска детерминистических эффектов [52]

Внешнее облучение (<10 ч), Гр	
$AD_{\text{Костный мозг}}$	1
$AD_{\text{Плод}}$	0,1
$AD_{\text{Ткань}}$	25 (глубина 0,5 см)
$AD_{\text{Кожа}}$	10 (площадь - 100 см ²)
Внутреннее облучение (30 дней), Гр	
$AD_{\text{Костный мозг}}$	0,2 для ($Z \geq 90$), 2 для ($Z < 90$)
$AD_{\text{Щитовидная железа}}$	2
$AD_{\text{Легкие}}$	30
$AD_{\text{Толстый кишечник}}$	20
$AD_{\text{Плод}}$	0,1

Таблица 7 – Критерии для защитных действий и других мер реагирования, принимаемых в ситуациях аварийного облучения с целью снижения риска стохастических эффектов [52]

Общие критерии		Примеры защитных действий и других мер реагирования
Прогнозируемая доза, превышающая приводимые ниже общие критерии: предпринять срочные защитные действия и другие меры реагирования		
H^* Щитовидная железа	50 мЗв в первые 7 дней	йодное блокирование щитовидной железы
E^{**} $H_{\text{Плод}}$	100 мЗв в первые 7 дней 100 мЗв в первые 7 дней	укрытие; эвакуация; дезактивация; ограничение потребления загрязненных пищевых продуктов, молока и воды; контроль радиоактивного загрязнения; информационно-разъяснительная работа среди населения
Прогнозируемая доза, превышающая приводимые ниже общие критерии: предпринять защитные действия и другие меры реагирования на раннем этапе реагирования		

Общие критерии		Примеры защитных действий и других мер реагирования
<i>E</i> <i>H_{Плод}</i>	100 мЗв в год 100 мЗв за весь период внутриутробного развития	Временное переселение; дезактивация; замена загрязненных пищевых продуктов, молока и воды на чистые; информационно-разъяснительная работа среди населения
Полученная доза, превышающая приводимые ниже общие критерии: принять долгосрочные медицинские меры для обнаружения и эффективного лечения индуцированных излучением последствий для здоровья		
<i>E</i>	100 мЗв в месяц	Скрининг на основе эквивалентных доз, полученных радиочувствительными органами (в качестве основы для последующего медицинского наблюдения), консультирование
<i>H_{Плод}</i>	100 мЗв за весь период внутриутробного развития	Консультирование для принятия обоснованных решений в индивидуальных обстоятельствах

* Н – эквивалентная доза на орган

** Е – эффективная доза

Одним из наиболее важных элементов при прогнозировании последствий радиационных аварий является учет цепочек радиоактивного распада, который во многих случаях играет существенную роль (ярким примером служит Cs-137, который имеет на несколько порядков меньший дозовый коэффициент, чем находящийся с ним в равновесии дочерний Ba-137m). Цепочки радиоактивного распада представлены в публикации 107 МКРЗ, которая содержит данные по 1252 радионуклидам 97 элементов [50] и, как ранее было отмечено, заменяет использовавшуюся ранее 38 публикацию МКРЗ. На ее основе получены современные дозовые коэффициенты, которые были пересчитаны в случае

внешнего облучения по методикам, представленным в документе ЕРА 402-R-93-81 [53,54].

Таким образом, российские и международные документы по обеспечению радиационной безопасности вводят прогностические оценки последствий радиационных аварий как вспомогательный источник информации для принятия решений и вводят критерии принятия решений, и методики их расчета, включая коэффициенты конверсии при пероральном и ингаляционном поступлении для персонала и населения, которые, согласно проводимым исследованиям, изменились в основном в сторону уменьшения консервативности [49]. Поэтому для удовлетворения российских норм радиационной безопасности и международных норм МАГАТЭ, при этом, не занижая прогностические оценки, что могло бы негативно сказаться на здоровье населения, могут быть использованы дозовые коэффициенты 115 публикации МАГАТЭ.

1.2 Методы и способы обоснования радиационной безопасности населения при запроектных радиационных авариях

1.2.1 Методы и способы контроля и мониторинга радиационной обстановки вокруг ПОО

Контроль радиационной обстановки в санитарно-защитной зоне и зоне наблюдения даже в режиме нормальной эксплуатации ведется непрерывно с использованием автоматизированных систем контроля и передвижных лабораторий для этих целей постоянно разрабатываются и внедряются новые методы [55, 56] и технологии [57]. При этом проводится контроль, как показаний мощности дозы, так и отбор проб аспирационным методом (например, с использованием установок “ТАЙФУН”) и седиментационным методом, также проводится отбор проб воды для оценки сбросов.

В случае возникновения радиационной аварии важнейшим элементом системы аварийной готовности являются территориальные автоматизированные системы контроля радиационной обстановки (АСКРО), предназначенные для контроля радиационной обстановки и информационной поддержки для лиц,

принимающих решения по обеспечению радиационной безопасности, населения и СМИ.

В руководстве по безопасности [37] АСКРО предлагается использовать также и для уточнения прогностических оценок последствий, откуда вытекают требования на расположение пунктов контроля [58], которые в силу различного рода причин не всегда могут быть выполнены [59].

Схема территориальной АСКРО представлена на рисунке 1 [57]. Как правило, датчики АСКРО измеряют значения мощности дозы внешнего гамма-излучения на открытой местности в диапазоне $0,1 \div 10^7$ мкЗв/ч с основной относительной погрешностью не более $\pm 25\%$. Данные с постов попадают в центр сбора информации, такой центр может находиться в администрации области, в подразделении МЧС России, в областном подразделении Росгидромета и т.д. Посты устанавливаются в соответствии с демографическими критериями [61] и методическими указаниями [62]. В населенном пункте предусматривается установка: не менее 1 поста при населении до 50 тыс. жителей; 2 постов - 100 тыс.; 2-3 постов - 200-300 тыс.; 3-5 постов - 200-500 тыс.; 5-10 постов - более 500 тыс. жителей; 10-20 стационарных и маршрутных постов - при населении более 1 млн. жителей.

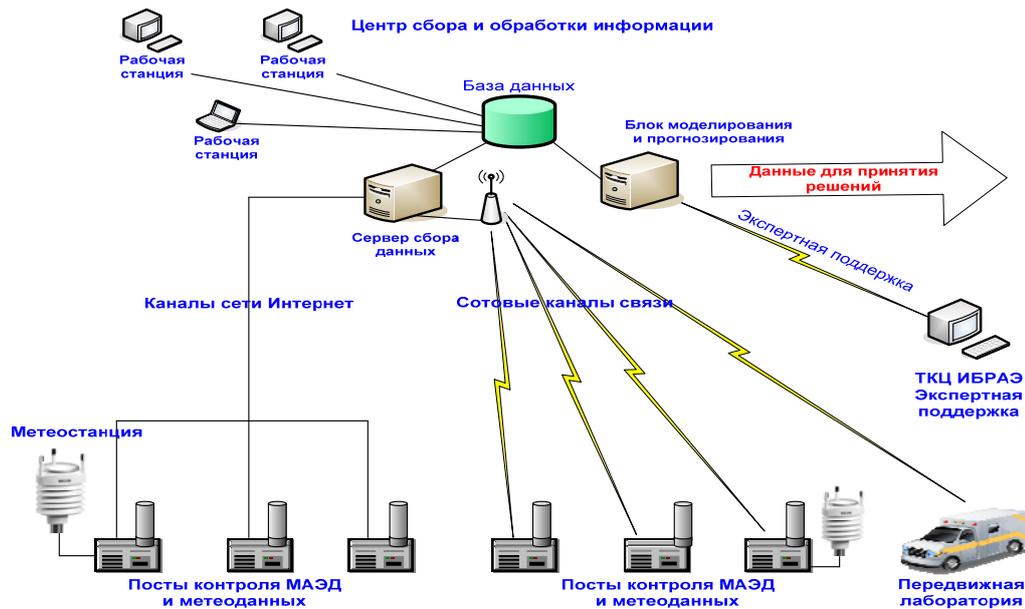


Рисунок 1 – Общая схема сбора информации о радиационной обстановке территориальной АСКРО [57]

Еще одним способом проведения измерений параметров радиационной обстановки является использование передвижных радиометрических лабораторий (ПРЛ). С их использованием проводят радиационную разведку, в том числе с применением методов γ -спектрометрии (отбор проб почвы и воздуха для дальнейшего анализа). В комплект оборудования входят пробоотборные устройства воздуха, воды и грунта (как правило, анализ проб при таких измерениях проводится в специально развернутой лаборатории), вспомогательное оборудование, а также спектрометры с полуавтоматической обработкой измерений для оценки плотности поверхностных выпадений в он-лайн режиме [59]. Оборудование ПРЛ обеспечивает передачу данных в кризисные центры по любому доступному каналу связи.

Метеомачты для прогнозирования радиационной обстановки устанавливаются согласно требованиям [63, 64], определяющим, в частности, выбор площадки под мачту. Метеорологический мониторинг осуществляется для [63, 64]:

- выявления тенденций и трендов изменения параметров окружающей среды;

- использования данных для прогнозирования радиологических последствий при атмосферных выбросах радиоактивных материалов.

Также источником информации о параметрах радиационной обстановки могут являться данные аэро-гамма съемки, получаемые посредством беспилотных летательных аппаратов с установленными спектрометрами и датчиками для измерения мощности дозы [65, 66, 67, 68, 69].

В комплексе представленные методы, позволяют проводить контроль, измерения и мониторинг радиационной обстановки, как при нормальной эксплуатации объектов, так и в режиме аварийной ситуации. Однако, в силу точности проводимых измерений и времени, необходимого для сбора данных по всей области потенциального загрязнения, их использование на ранней стадии развития аварии носит нормирующий характер для результатов расчетов моделями атмосферного переноса. Эффективность применения большинства защитных мероприятий ограничена несколькими часами после выброса, поэтому прогнозирование только за счет использования данных натурных измерений не представляется возможным. И требуется использование моделирования последствий компьютерными программами с возможностью использования измерений для повышения точности прогностических моделей.

1.2.2 Методы и способы прогнозирования последствий радиационных аварий

В результате анализа нормативно-правовой базы было получено, что принятие решений о проведении срочных защитных мероприятий проводится на основе прогностических оценок распространения радиоактивного загрязнения и на основе комплексного анализа радиационной аварии, включающего, в том числе, и первичные измерения радиационной обстановки. Для этих целей рекомендовано [37] использовать модели переноса радиоактивных примесей в атмосфере с учетом особенностей подстилающей поверхности, параметра шероховатости, вымывания радиоактивной примеси осадками, радиоактивного распада примеси, влажности атмосферы, дисперсного состава примеси, атмосферных параметров. В этом документе представлены рекомендованные

программные средства: RECASS, SULTAN, НОСТРАДАМУС, ДОЗА, GENGAUS, представляющие собой программные средства расчета последствий выброса радиоактивных веществ в атмосферу. С точки зрения зарубежной нормативной документации [9] для проведения прогностических оценок рекомендуется использовать программные средства, такие как INTERAS[40]. Указанные программные средства реализуют модели атмосферной дисперсии, представленные в документах [16, 17, 70, 71, 18], которые представляют собой реализации гауссовых, гаусс-пуфф, лагранжевых стохастических моделей. Представленные программные средства ограничены использованием стандартных аэрозольных выбросов (АМАД 1 мкм и СГО 2,5) и предназначены для решения стандартной задачи – распространение атмосферного выброса на разных масштабах и оценка доз на население и не позволяют решать комплексную задачу по оценке последствий при наличии неопределенностей в выборе исходных параметров выброса. Кроме того, лишь немногие программные средства позволяют учитывать полидисперсность и орографию местности, которые во многих случаях приводят к существенному изменению распределения доз по рассматриваемой области. Стоит отметить, что программное средство НОСТРАДАМУС позволяет решать подобную задачу, однако, будучи основанным на использовании лагранжевой стохастической модели, набор статистики по всему распределению активности по диаметрам частиц в выбросе приведет к существенному увеличению времени расчета, что на начальной фазе развития радиационной аварии нежелательно.

Базовая модель атмосферной дисперсии. Как ранее было отмечено, разрабатываемый программный комплекс ориентирован на использование в локальном масштабе на ранней стадии развития аварии, поэтому адекватным будет использование гауссовых моделей атмосферного переноса [71]. Гауссовы модели представляют собой обобщение экспериментальных результатов по диспергированию аэрозолей в атмосфере, и предполагают наличие стандартных метеоусловий (подчиняющихся стандартной классификации), квазистабильных за время распространения облака. В 2009 г был выпущен руководящий документ,

предоставляющий современную методику расчета рассеяния загрязняющих веществ в атмосфере при аварийных выбросах [73]. Это модель гауссова типа, однако, наиболее современная модель этого класса. Она применима не только для мгновенного и непрерывного источника, но и источника конечного времени действия. В модели учтено влияние высоты пограничного слоя атмосферы (в зависимости от стратификации), зависимость дисперсии гауссова облака от шероховатости подстилающей поверхности. Модель предназначена для оценок радиационной обстановки на расстояниях до 10 км и экспресс оценок до 30 км при высоте выброса не превышающей 150 м.

Проинтегрированная по времени концентрация в точке x, y (предполагается, что ось следа направлена по оси x) в момент времени t определяется по формулам:

- для мгновенного источника:

$$q_{\text{ПВК}}(x, y, t) = \begin{cases} 0 & \text{при } t < \frac{x}{U} \\ Q \cdot F(x) \cdot G_{\text{дл}}(x, y) & \text{при } t > \frac{x}{U} \end{cases} \quad (1)$$

- для источника конечного времени действия:

$$q_{\text{ПВК}}(x, y, t) = \begin{cases} 0 & \text{при } t < \frac{x}{U} \\ M \cdot F(x) \cdot G_{\text{дл}}(x, y) \cdot t & \text{при } \frac{x}{U} \leq t \leq t_s + \frac{x}{U} \\ M \cdot F(x) \cdot G_{\text{дл}}(x, y) \cdot t_s & \text{при } t > t_s + \frac{x}{U} \end{cases} \quad (2)$$

где Q - активность источника, Бк; M - мощность источника, Бк/с; t_s - время действия источника; U - скорость ветра в слое, м/с; $F(x)$ - функция обеднения источника; $G_{\text{дл}}(x, y)$ - функция разбавления, вычисляемая по формуле:

$$G_{\text{дл}}(x, y, t) = \frac{e^{-\frac{y^2}{2\sigma_y^2(x-x_{sy})}}}{2\pi \cdot \sigma_y(x-x_{sy})\sigma_z(x-x_{sz})U} \cdot \left[e^{-\frac{(z-h)^2}{2\sigma_z^2(x-x_{sz})}} + e^{-\frac{(z+h)^2}{2\sigma_z^2(x-x_{sz})}} + A_J(x, 0) \right], \quad (3)$$

где

$$A_j(x, z) = e^{-\frac{(z-h-2H_{\max})^2}{2\sigma_z^2(x-x_{sz})}} + e^{-\frac{(z-h+2H_{\max})^2}{2\sigma_z^2(x-x_{sz})}} + e^{-\frac{(z+h-2H_{\max})^2}{2\sigma_z^2(x-x_{sz})}} + e^{-\frac{(z+h+2H_{\max})^2}{2\sigma_z^2(x-x_{sz})}} \quad (4)$$

Здесь h - высота подъема облака, $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ - горизонтальные и вертикальные дисперсии, H_{\max} - высота пограничного слоя атмосферы, которая может быть определено по формуле:

$$H_{\max} = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \sigma_z^{\max} \approx 1,25 \cdot \sigma_z^{\max} \quad (5)$$

где значения σ_z^{\max} определяются в соответствии с категорией устойчивости атмосферы [73].

Функция обеднения, используемая в формулах (1) и (2), представлена как произведение факторов обеднения за счет сухого выпадения (f_{vd}), радиоактивных превращений (f_r) и вымывания осадками (f_w):

$$F(x) = f_{vd}(x) \cdot f_r(x) \cdot f_w(x) \quad (6)$$

При описании фактора обеднения за счет сухого обеднения облака существенным является то, что в рамках системы моделей программного комплекса планируется рассматривать расчеты рассеяния полидисперсных составов, что приводит к необходимости использования гравитационного осаждения облака и первоначального интегрального определения функции обеднения в системе формул гауссовых моделей с учетом гравитационного оседания облака по формуле:

$$f_{vd}(x) = \exp \left[-\sqrt{\frac{2}{\pi}} \cdot \frac{V_d}{U} \cdot \int_0^x \frac{1}{\sigma_z(\chi - x_{sz})} \cdot \exp \left(-\frac{(h - (\chi/U)V_R)^2}{2\sigma_z^2(\chi - x_{sz})} \right) d\chi \right], \quad (7)$$

где h - высота подъема облака; U - скорость ветра в слое, м/с; x_{sz} - расстояние до виртуального источника, м; интегрирование проводится до точки наблюдения вдоль оси x , направленной по направлению ветра; V_d, V_R - скорости сухого и гравитационного осаждения частиц, м/с, которые для классических выбросов определяются в соответствии с данными [73], за исключением скорости гравитационного оседания, которая считается равной нулю, в соответствии с рекомендациями [81]. При этом для расчетов не всегда удобно (в силу отсутствия

информации) использовать стандартное разбиение радионуклидов йода на аэрозольный, молекулярный и органический, поэтому согласно данным работы [77] можно использовать разбиение:

- органические соединения - 20%;
- элементарная форма - 40%;
- аэрозоли - 40%.

Фактор обеднения за счет вымывания осадками рассчитывается по формуле:

$$f_w(x) = \exp\left(-\lambda_w \cdot \frac{x}{U}\right), \quad (8)$$

где $\lambda_w = \gamma_0 \gamma_1 I$ - коэффициент вымывания осадками, c^{-1} , γ_0 - параметр, характеризующий вымывающую способность осадков при интенсивности I , мм/час, γ_1 - характеризует относительную вымывающую способность атмосферных осадков различных типов [73].

Еще одним фактором, неучтенным в существующих методиках, является необходимость учета дочерних радионуклидов, причем радионуклиды, находящиеся в равновесии с материнскими, можно учесть на уровне свертки дозовых коэффициентов [77]. Учет цепочек радиоактивного распада для других радионуклидов может быть осуществлен путем замены функции обеднения за счет радиоактивного распада, функцией, учитывающей обеднение и накопление [78]. При этом фактор обеднения за счет радиоактивного распада, в случае если радионуклид не является дочерним и имеет постоянную распада λ_r , может быть учтен следующим образом:

$$f_r(x) = \exp\left(-\lambda_r \cdot \frac{x}{U}\right) \quad (9)$$

Если же радионуклид является продуктом распада (в рассматриваемой модели учитываются только цепочки радиоактивного распада первого порядка), расчет фактора обеднения проводится следующим образом (λ_r^D - постоянная распада дочернего радионуклида, λ_r^M - постоянная распада материнского радионуклида, f_d - выход радионуклидов):

$$f_r(x) = f_d \frac{\lambda_r^M}{\lambda_r^D - \lambda_r^M} \left(\exp\left(-\lambda_r^M \cdot \frac{x}{U}\right) - \exp\left(-\lambda_r^D \cdot \frac{x}{U}\right) \right) \quad (10)$$

Для расчета **параметров дисперсии** облака используются σ -кривые Бриггса для $\sigma_y(X)$ в комбинации с кривыми Смита-Хоскера для $\sigma_z(X)$ [73]:

$$\sigma_y(x) = \frac{c_3 \cdot x}{\sqrt{1 + c_4 \cdot 10^{-4} \cdot x}} \quad (11)$$

$$\sigma_z(X) = \frac{F(z_0, x) \cdot g(x)}{\sqrt{1 + v_g^2}}, \quad (12)$$

где

$$F(z_0, x) = \begin{cases} \ln \left[c_1 X^{d_1} \left(1 + \frac{1}{c_2 X^{d_2}} \right) \right] & \text{при } z_0 > 0,1 \text{ м} \\ \ln \left[\frac{c_1 X^{d_1}}{1 + c_2 X^{d_2}} \right] & \text{при } z_0 \leq 0,1 \text{ м} \end{cases} \quad (13)$$

$$g(X) = \frac{a_1 \cdot X^{b_1}}{1 + a_2 \cdot X^{b_2}} \quad (14)$$

Здесь $v_g = \frac{4V_R}{\sigma_w}$ - коэффициент, учитывающий влияние седиментации выброса, V_R – скорость гравитационного оседания, м/с, параметры a_1 , a_2 , b_1 , b_2 , p_{II} , c_1 , d_1 , c_2 , d_2 определены в работе [73]. Параметр c_3 вычисляется по формуле:

$$c_3 = 10^{a+b \left(\lg \frac{z_0}{4} \right)^2}, \quad (15)$$

где $a = -0,385 - 0,107 p_{II} - 0,00139 (p_{II})^2$, $b = -0,0716 - 0,0203 p_{II} + 0,00142 (p_{II})^2$ для шероховатостей подстилающей поверхности в диапазоне от 0.1 до 3 м и полагается равным значениям, представленным в таблице -8 в остальных случаях.

Параметр c_4 описывается интерполяционной формулой:

$$c_4 = (10z_0)^{0.21+0.13 \lg(10z_0)} \quad (16)$$

Таблица 8 – Значения параметров c_3 для шероховатости подстилающей поверхности вне диапазона от 0.1 до 3 м [73]

Категория устойчивости по Пасквиллу	c_3 для $z_0 < 0,1$ м	c_3 для $z_0 > 3$ м
A	0,22	0,33
B	0,16	0,24
C	0,11	0,17
D	0,08	0,12
E	0,06	0,09
F	0,04	0,06

Параметр σ_w :

$$\sigma_w = \sqrt{2} \cdot c_{z1} u, \quad (17)$$

где $u = \max\{1 \text{ м/с}, U\}$,

$$c_{z1} = \frac{1}{12} \cdot \frac{(100z_0)^{0.15+0.028p_{\Pi}}}{p_{\Pi}^{0.2+0.12p_{\Pi}}} \quad (18)$$

Плотность выпадений веществ $D(x, y, t)$ рассчитывается как суперпозиция плотности выпадений за счет влажного выведения D_w и сухого D_d , которые можно записать в следующем виде [73]:

$$D_d(x, y, t) = V_d \cdot q_{\text{пвк}}(x, y, t) \cdot e^{-\lambda_r(t - \frac{x-x_s}{U})} \quad (19)$$

- для мгновенного источника:

$$D_w(x, y, t) = \begin{cases} 0, & \text{при } t < x / U \\ \frac{Q \cdot F(x) \cdot e^{-\frac{y^2}{2\sigma_y^2(x-x_{sy})}} \cdot e^{-\lambda_r(t - \frac{x}{U})}}{\sqrt{2\pi} \cdot U \cdot \sigma_y(x-x_{sy})} \cdot \lambda_w & \text{при } t > x / U \end{cases} \quad (20)$$

- для источника конечного времени действия:

$$D_w(x, y, t) = \begin{cases} 0 & \text{при } t < \frac{x}{U} \\ \frac{\lambda_w \cdot M \cdot F(x) \cdot e^{-\frac{y^2}{2\sigma_y^2(x-x_{sy})}} \cdot e^{-\lambda_r(t-\frac{x}{U})}}{2\sqrt{2\pi} \cdot U \cdot \sigma_y(x-x_{sy})} \cdot t & \text{при } \frac{x}{U} \leq t \leq t_s + \frac{x}{U} \\ \frac{\lambda_w \cdot M \cdot F(x) \cdot e^{-\frac{y^2}{2\sigma_y^2(x-x_{sy})}} \cdot e^{-\lambda_r(t-\frac{x}{U})}}{2\sqrt{2\pi} \cdot U \cdot \sigma_y(x-x_{sy})} \cdot t_s & \text{при } t > t_s + \frac{x}{U} \end{cases} \quad (21)$$

Верификация [74] методики [73] на данных серии европейских экспериментов по атмосферной дисперсии показала в целом хорошие результаты за исключением случаев с сильным градиентом скорости ветра по высоте, давая существенное отличие от экспериментальных результатов при использовании экстраполирующих формул скорости ветра по высоте выброса (рисунок 2).

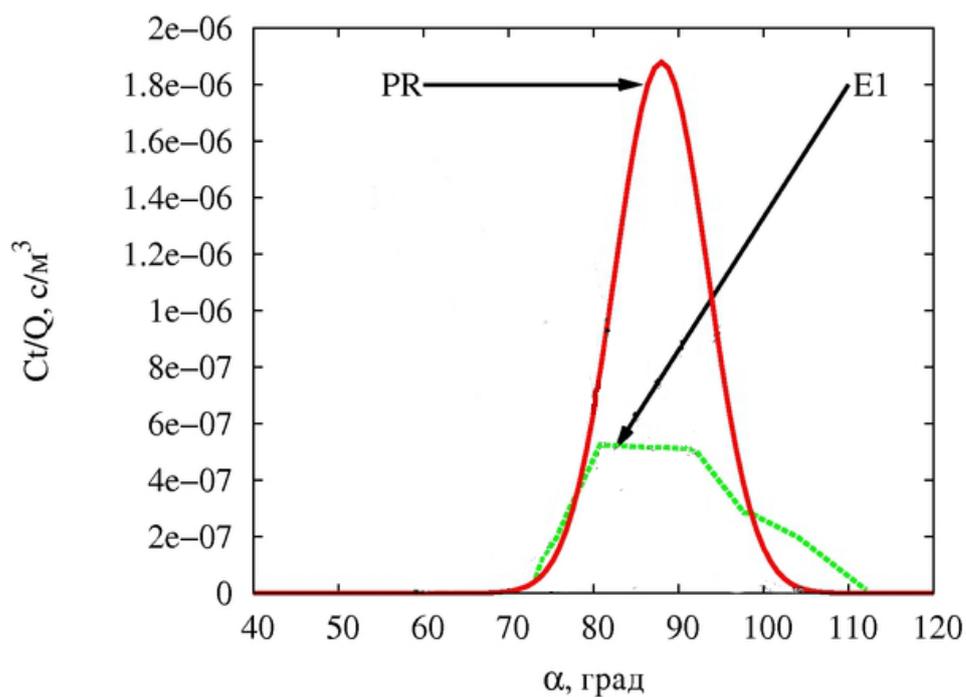


Рисунок 2 – Интеграл приземной концентрации трассера в эксперименте (E1) и рассчитанный с использованием модели РД 2009 (PR)

Решение подобной проблемы приведено в работе [75], в которой предлагается использовать для расчетов не скорость ветра на высоте выброса, а эффективную скорость ветра в приземном слое, вычисляемую по данным о скорости ветра от метеомачты. Поэтому скорость ветра на высоте выброса в соответствии рекомендациями [75] заменена на среднюю скорость ветра в слое атмосферного воздуха высотой h :

$$U = U_0 \cdot (h/10)^m / (1+m), \quad (22)$$

где m – параметр, определенный в Таблице 9, U_0 – скорость ветра на высоте флюгера (10 м), м/с; h – высота начального подъема ЗВ из источника, м. Значения для параметров шероховатости 0,04 и 0,4 получены путем использования линейной интерполяции по соседним значениям в таблице 9.

Таблица 9 – Параметр m для профиля ветра [73]

Категория устойчивости по Пасквиллу	$z_0 = 0,01$ м	$z_0 = 0,04$ м	$z_0 = 0,1$ м	$z_0 = 0,4$ м	$z_0 = 1$ м	$z_0 = 4$ м
A	0,05	0,06	0,08	0,11	0,16	0,27
B	0,06	0,07	0,09	0,12	0,17	0,28
C	0,06	0,077	0,11	0,14	0,2	0,31
D	0,12	0,133	0,16	0,197	0,27	0,37
E	0,34	0,333	0,32	0,34	0,38	0,47
F	0,53	0,533	0,54	0,56	0,61	0,69

Классическая гауссова модель предполагает точечность источника в начальный момент времени, однако в большинстве случаев характерные размеры облака в начальный момент времени сопоставимы с высотой его подъема. Поэтому для **учета конечных размеров облака** в плоскости перпендикулярной направлению ветра (в терминах модели y и z) используют расстояния до

фиктивного источника¹. При этом расстояние можно оценить путем решения трансцендентного уравнения для каждого направления [95]

$$\sigma_y(x_{sy}) = r_y / 2.14 \quad (23)$$

$$\sigma_z(x_{sz}) = r_z / 2.14 \quad (24)$$

где r_y - радиус облака по y , м, r_z - радиус облака по z , м. Положение источника при этом отсчитывается с подветренной стороны. В программном комплексе решение проводится с шагом 10 м. В случае, если рассматривается аэродинамическая тень от близлежащего здания r_y и r_z берутся как полуширина и полувысота здания соответственно, а высота подъема облака считается равной полувысоте здания.

В случае взрывов или пожаров имеет место **полидисперсное распределение частиц** в выбросе с большой долей грубодисперсных фракций, причем в соответствии с данными работы [114], частицы с диаметрами вплоть до 100 мкм вовлекаются в перенос в турбулентной атмосфере (считать такие частицы баллистическими нельзя). Для таких случаев скорость сухого V_d осаждения вычисляются по формулам [79, 80]:

$$V_d = V_R + 0,075 u Sc^{-2/3} \quad (25)$$

где V_R – скорость гравитационного осаждения; u^* - динамическая скорость ветра (скорость трения), Sc – число Шмидта, которое дается выражением $Sc = v/D_B$, где v – кинематическая вязкость воздуха ($\sim 0,15 \cdot 10^{-4}$ м²/с), D_B – коэффициент Броуновской диффузии загрязнителя в воздухе, см²/с. Коэффициент D_B оценивается по формуле

$$D_B = 8.09 \cdot 10^{-10} \left[\frac{T \cdot S_{CF}}{d_p} \right], \quad (26)$$

где T – температура воздуха; К; d_p – диаметр частиц загрязнителя (верхнее значение интервала частиц по размерам, d_i) мкм; S_{CF} – безразмерный

¹ В общем случае, для не симметричного начального облака положения фиктивных источников, определяющих рассеяние облака по осям Y и Z , могут существенно отличаться. Рассеяние облака по оси X в текущей версии модели считается пренебрежимо малым по сравнению с ветровым переносом.

поправочный коэффициент на «скольжение» частиц, который можно оценить следующим образом:

$$S_{CF} = 1 + \frac{0,163}{d_p} + 0,052 \cdot \frac{e^{-8,46 \cdot d_p}}{d_p} \quad (27)$$

тогда скорость гравитационного оседания можно получить:

$$V_R = \frac{(\rho - \rho_{AIR})gd_p^2c_2}{18\mu} S_{CF} \quad (28)$$

где ρ – плотность частиц загрязнителя, г/см³; ρ_{AIR} – плотность воздуха ($\sim 1,2 \cdot 10^{-3}$ г/см³);

μ – вязкость воздуха ($\sim 1,81 \cdot 10^{-4}$ г/(см*с)); $c_2 = 10^{-8}$ см²/мкм².

Динамическая скорость ветра в выражении 25 определяется исходя из величины масштаба Монины-Обухова L , м:

$$u_* = \frac{k \cdot u_{10}}{\ln \frac{z_{10} + z_0}{z_0} - \varphi} \quad (29)$$

где φ - определяется, исходя из класса устойчивости атмосферы:

$$\varphi = \begin{cases} 2 \ln \left[\frac{1+a}{2} - \ln \frac{1+a^2}{2} \right] - 2 \arctg(a) + \frac{\pi}{2} & \text{для категорий уст - ти А, В, С} \\ 0 & \text{для категории D} \\ -\frac{6,9z_{10}}{L} & \text{для категорий E, F} \end{cases} \quad (30)$$

где k – константа фон Кармана, равная 0,41; z_0 – параметр шероховатости; u_{10} – скорость ветра на высоте флюгера z_{10} , параметр a вычисляется исходя из масштаба Монины-Обухова:

$$a = \left(1 - 22 \frac{z_{10}}{L}\right)^{1/4} \quad (31)$$

Для нейтральной устойчивости атмосферы (класс D) $L = \infty$. Для остальных условий устойчивости атмосферы масштаб Монины-Обухова определяется по формуле (32) с использованием данных, приведенных в таблице 10.

$$L = k_L \cdot z_0^p \quad (32)$$

Таблица 10 – Величины коэффициентов k_L и p для вычисления масштаба Монино-Обухова [79]

Класс устойчивости	A	B	C	E	F
k_L	-11,4	-26,0	-123,0	123,0	26,0
p	0,10	0,17	0,30	0,30	0,17

Формулы (25-32) дают однозначное соответствие между диаметром частицы и скоростями сухого и гравитационного осаждения. При выходе радиоактивных веществ, связанных с взрывным выделением энергии (например, при СЦР), радионуклиды присутствуют в выбросе с некоторым распределением по диаметрам. В программном комплексе используются три вида полидисперсного распределения: логнормальное, паровоздушное и пользовательское, включающее возможность добавления 10 фракций. Если пользовательское распределение вводится через интерфейс пользователя, то для логнормального распределения используется формула:

$$\phi_i = 0,5 \cdot \left[\operatorname{erfc} \left(\frac{\ln \left(\frac{d_{i-1}}{m} \right)}{\sqrt{2} \ln g} \right) - \operatorname{erfc} \left(\frac{\ln \left(\frac{d_i}{m} \right)}{\sqrt{2} \ln g} \right) \right] \quad (33)$$

где ϕ_i - доля частиц, находящихся в диапазоне от d_{i-1} до d_i для распределения с медианным диаметром частиц (по активности) m , мкм и стандартным геометрическим отклонением g , а erfc – комплементарная (дополнительная) функция ошибок. Для расчета распределения паровоздушной примеси используется экспериментальное распределение капель по диаметрам в устье градирни (рисунок 3) [119]:

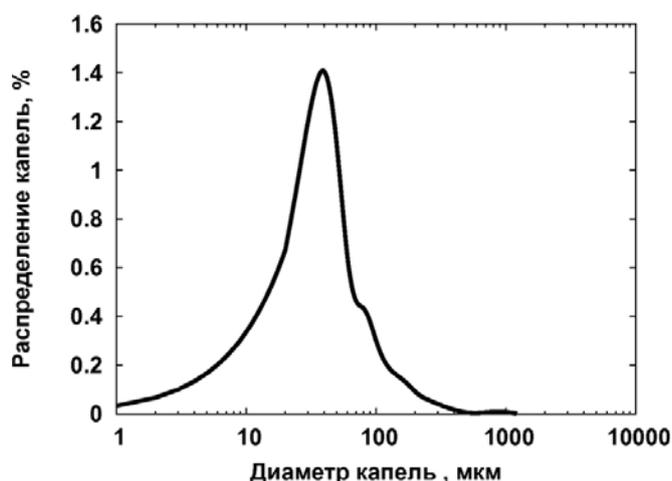


Рисунок 3 – Экспериментальное распределение капель по диаметрам в устье градирни [119]

Учет **орографии местности** в рамках использования гауссовых моделей рассеяния загрязняющих веществ в атмосфере может быть проведен с использованием методики [36], где в соответствии наклоном подстилающей поверхности проводится коррекция приземной скорости ветра, или с использованием методики [82], где учет рельефа проводится как суперпозиция вкладов от прямого источника, проникающего источника и инвертированного источника. Использование последней методики дает возможность эффективно учитывать орографию местности, однако при этом скорость расчета падает и поднимается вопрос о целесообразности использования такой методики для расчета в рамках использования гауссовой модели, поскольку существуют лагранжевы стохастические модели, в которых намного корректнее, с точки зрения описания физических процессов, учитывается орография [76].

Наиболее адекватным, с точки зрения целевого назначения разрабатываемого программного комплекса, является использование методики ISC3 [80], которая представляет собой инженерную методику учета высоты рельефа, позволяющую дать без потери скорости вычислений мажорантную оценку основных параметров радиационной обстановки с учетом рельефа местности. Данные по орографии берутся из файлов топографической съемки SRTM, которые находятся в открытом доступе на сайте миссии SRTM. Для расчета используются подход моделей ISC3, где предлагается использовать

модели простого, среднего и сложного рельефов. В силу того, что в используемой гауссовой модели отсутствует подъем облака (при распространении всегда берется конечная эффективная высота), модель среднего рельефа не реализуется.

В случае если высота выброса превышает максимальную высоту рельефа, рельеф считается простым и расчет проходит по формулам гауссовой модели за исключением:

- высота слоя перемешивания отсчитывается от высоты рельефа;
- расстояние до рецептора определяется высотой подъема облака и высотой рельефа.

Модель сложного рельефа используется в случае, если высота рельефа превышает высоту выброса. В этой модели полагается равномерное поперечное распределение (перпендикулярно оси следа) с углом раскрытия $\Delta\Theta$ - 22,5°. Вместо координат x и y , использовавшихся в (1) и в модели простого рельефа теперь используется расстояние до рецептора (точки, для которой проводится оценка). Теперь функция разбавления (3) переписывается в виде:

$$G_{\text{long}}(r, t) = \frac{\text{CORR}}{\sqrt{2\pi} \cdot r \cdot \Delta\Theta \cdot \sigma_z(r - x_{sz})U} \left[e^{-\frac{(z-h)^2}{2\sigma_z^2(r-x_{sz})}} + e^{-\frac{(z+h)^2}{2\sigma_z^2(r-x_{sz})}} + A_J(r, 0) \right] \quad (34)$$

где CORR параметр, использующийся для коррекции результатов расчета для рецепторов выше оси следа, вычисляемый из соотношения:

$$\text{CORR} = \begin{cases} 1.0 & \text{unstable / neutral} \\ 1.0 & \Delta H < 0 \\ 0.0 & \Delta H \geq 400\text{m} \\ (400 - \Delta H) / 400 & \Delta H < 400\text{m} \end{cases} \quad (35)$$

где ΔH - высота рецептора над центром облака. Далее в качестве высоты подъема облака берется модифицированное значение

$$h = h - (1 - F_T) H_t \quad (36)$$

где F_T - поправочный коэффициент, равный 0.5 для категорий А-Д и 0.0 для стабильных категорий Е и F, H_t - относительная высота рельефа, м. Расстояние по ветру (x) в расчетах по модели сложного рельефа заменено на расстояние до рецептора (r).

Эффективная высота подъема облака, как правило, оценивается исходя из сопоставления с характерными геометрическими размерами близлежащих к облаку объектов, либо рассчитывается с использованием полуэмпирических моделей. В рамках данной работы помимо выброса из трубы, например, при вентилировании контейнента, где используются полуэмпирические методики подъема облака в стратифицированной атмосфере за счет начальной скорости и сил плавучести [73], рассматривается распространение радионуклидов от возможных взрывов и пожаров, которые могут быть оценены с использованием верифицированных методик [81].

Модель расчета высоты подъема облака при выбросе из трубы взята из документа РД-2009 [73], лежащего в основе базовой модели рассеяния загрязняющих веществ в атмосфере. Высота подъема Δh определяется скоростью истечения загрязняющего вещества из источника. Используемые формулы приведены ниже.

Длительность начального подъема ЗВ, t' , с, рассчитывается по формуле

$$t' = 100 \cdot \ln(1 + v_s + |\Delta T|) \quad (37)$$

где $\Delta T = T_s - T$ – разность температур выбрасываемого T_s и атмосферного воздуха, К; v_s – скорость истечения газо-аэрозольной смеси из трубы, м/с.

При $t \leq t'$:

а) для неустойчивых условий атмосферы – категорий А, В, С

$$\Delta h(t) = \left\{ \frac{3}{2\beta_h^2 \cdot U \cdot s^2} \left[F_0 \left(st - \frac{1 - e^{-2st}}{2} \right) + M_0 s \left(st + \frac{1 - e^{-2st}}{2} \right) \right] + \left(\frac{R_0}{\beta_h} \right)^3 \right\}^{1/3} - \frac{R_0}{\beta_h} \quad (38)$$

б) для нейтральных условий атмосферы – категория D

$$\Delta h(t) = \left\{ \frac{3}{2\beta_h^2 \cdot U \cdot s^2} \left[F_0 + M_0 s - (sM_0 + F_0(1 + st))e^{-st} \right] + \left(\frac{R_0}{\beta_h} \right)^3 \right\}^{1/3} - \frac{R_0}{\beta_h} \quad (39)$$

в) для устойчивых условий атмосферы – категории Е, F

$$\Delta h(t) = \left\{ \frac{3}{2\beta_h^2 \cdot U \cdot s^2} \left[F_0 + M_0 s - (sM_0 (\cos(st) - \sin(st)) + F_0 (\cos(st) + \sin(st)))e^{-st} \right] + \left(\frac{R_0}{\beta_h} \right)^3 \right\}^{1/3} - \frac{R_0}{\beta_h} \quad (40)$$

где s и β_h определены в [73] для различных стратификаций атмосферы.

$$F_0 = \frac{\Delta T}{T} g v_s \left(\frac{d_s}{2} \right)^2 \quad (41)$$

$$M_0 = \left(v_s \frac{d_s}{2} \right)^2 \quad (42)$$

$$R_0 = d_s \cdot \left(\frac{v_s}{2U} \right)^{1/2} \quad (43)$$

d_s – диаметр устья трубы, U – скорость ветра на высоте источника выброса (z_s), но не менее 1 м/с.

Исходя из выше перечисленного, высота подъема определяется по формуле

$$h = \max \{2, z_s + \Delta h, H_z^{\max}\} \quad (44)$$

с учетом того, что при $t > t'$ подъем за счет тепловых и динамических факторов прекращается, также высота подъема не может превышать высоту слоя перемешивания H_z^{\max} .

Довольно часто выход радиоактивного вещества происходит в результате СЦР, которая приводит к образованию облака, поднимающегося в атмосфере за счет перегрева и начальной скорости, подсасывая в процессе воздух из окружающей среды. Использование методик конвективного подъема, разработанных в ИБРАЭ РАН [81], также позволяет проводить оценку размера облака, которая используется в модели фиктивного источника программного комплекса. Далее будет рассматриваться только система уравнений, описывающая подъем, не затрагивая параметризацию атмосферы. Т.е. имеются данные о температурном профиле, профиле давлений, скоростей и направлений ветра с состава воздуха по высотам. Также считается, что давление в облаке сравнялось с атмосферным, а газы в облаке - идеальные. Рассматривается многокомпонентная смесь.

Скорость изменения массы облака за счет втекания окружающего воздуха рассчитывается как:

$$\frac{dM}{dt} = \alpha \cdot \sqrt{V_z(t)^2 + (V_x(t) - U(t))^2} \cdot S \cdot \sqrt{\rho(t)\rho_s(t)} \quad (45)$$

где S – площадь поверхности облака, м^3 ; V_z и V_x – вертикальная и горизонтальная (по ветру) составляющие скорости облака \vec{V} , м/с ; α — эмпирическая константа вовлечения, равная приблизительно 0,14; $\rho(t)$ - плотность атмосферы, кг/м^3 ; $\rho_s(t)$ - плотность перегретого облака загрязняющего вещества, кг/м^3 . Перемещение облака осуществляется согласно классическому уравнению движения:

$$\frac{d(M\vec{V})}{dt} = \vec{F}(t) \quad (46)$$

Масса облака равна $M = \Omega(z)\rho_s(z)$. Энтальпия облака, H , определяется следующим образом:

$$H = \sum_i C_{p_i} \cdot \rho_i \cdot T_s(z) \cdot \Omega \quad (47)$$

где сумма берется по всем компонентам смеси, C_{p_i} - удельная теплоемкость i -ого компонента смеси Дж/(кг*К) , $T_s(z)$ - температура облака, К . Для движения облака в вертикальном направлении

$$F_z(t) = \Omega(t) \cdot [\rho(t) - \rho_s(t)] \cdot g - 2\pi r(t) \cdot \Gamma(t) \cdot \rho(t) \cdot u \quad (48)$$

здесь $g=9,8 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения; $u = dr/dt$ - скорость расширения облака в горизонтальном направлении; $r(t)$ - горизонтальный радиус облака; $\Gamma(t)$ - циркуляция скорости в вихревом кольце внутри облака:

$$\frac{d\Gamma}{dt} = - \left(\sqrt{\frac{F_z}{F_{z0}}} \cdot \Gamma_0 - \Gamma \right) \cdot \frac{2}{3M} \cdot \frac{dM}{dt} \quad (49)$$

где F_{z0} и Γ_0 - начальные значения F_z и Γ соответственно. Начальная циркуляция выбиралась следующим образом:

$$\Gamma_0 = 0,1365 \cdot r(0) \cdot \sqrt{r(0) \cdot g} \quad (50)$$

Приращение горизонтальной компоненты импульса определяется захваченным воздухом:

$$d(MV_x) = -U(z) \cdot dM \quad (51)$$

Закон сохранения энергии удобно записать для энтальпии с учетом того, что эта величина меняется от втекания внешнего воздуха и от изменения внешнего

давления при подъеме облака:

$$\frac{dH}{dt} = C_{p_{ext}} \cdot T(z) \cdot \frac{dM}{dt} + \frac{\gamma-1}{\gamma} \cdot \frac{H}{P} \cdot \frac{dP}{dt} \quad (52)$$

где $C_{p_{ext}}$ - удельная теплоемкость подсосываемого воздуха. Пользуясь соотношением для энтальпии газа в облаке можно однозначно вычислить температуру облака. Объем облака вычисляется согласно уравнению Менделеева-Клапейрона:

$$\Omega = T_s(z) / P(z) \cdot R \cdot \sum_i \frac{\delta_i \cdot M}{\mu_i} \quad (53)$$

где δ_i – массовые доли газовых компонентов в облаке, $R=8,3$ Джг-моль⁻¹К⁻¹ – универсальная газовая постоянная.

Формулы (45 – 53) составляют замкнутую систему уравнений и позволяют рассчитывать параметры облака на различной высоте. Реализованные в программном комплексе модели подъема облака при паровоздушном выбросе и при взрыве химического вещества рассчитываются по представленной методике с выбором соответствующих значений для компонентов газовой смеси в облаке и в атмосфере.

Еще одним важным моментом являются **дозиметрические модели**, эти модели являются устоявшимися [71] и позволяют проводить расчеты доз внутреннего и внешнего облучения от облака и поверхности, исходя из значений проинтегрированной по времени приземной концентрации и плотности поверхностных выпадений, получаемых с использованием моделей атмосферной дисперсии. В этом случае, как было отмечено при анализе нормативно-технической документации, необходимо использовать табулированные коэффициенты конверсии [52, 35, 53]. Единственным исключением являются дозы при пероральном поступлении с учетом пищевых цепочек, несмотря на то, что дозовые коэффициенты приведены в документе [47], необходимо учитывать переход радионуклидов от поверхностных выпадений к продуктам питания [85]. В рамках данной работы, в силу того, что используемые зарубежные и российские нормативные документы не противоречат друг другу, можно

использовать разработанную совместно с МАГАТЭ и Украинским институтом радиационной защиты программу RaDEnvir 3.1 [86] для расчета переноса радионуклидов и оценки доз при проживании на загрязненных территориях.

Для расчетов **дозы внешнего облучения** для рецептора на поверхности с координатами (x,y) , находящегося на расстоянии d от оси облака загрязняющего вещества, которое в свою очередь находится на высоте h (рисунок 4), для оценок эквивалентной дозы гамма-излучения H_{CL}^{γ} , полученной за время распространения облака от залпового источника выброса отдельно взятого радионуклида, используется формула:

$$H_{CL}^{ext} = K(x)H_{CL,\infty}^{ext} + (1-K(x))H_{CL,L}^{ext} \quad (54)$$

где $H_{CL,\infty}^{ext}$ - доза гамма-излучения от облака, Зв, в приближении полубесконечного пространства, $H_{CL,L}^{ext}$ - доза гамма-излучения облака, Зв, в приближении линейного источника, $K(x,y)$ определяется по формуле:

$$K(x) = e^{-\frac{h^2}{2\sigma_z(x)^2}} \cdot e^{-\frac{h^2}{2\sigma_y(x)^2}} \quad (55)$$

где $\sigma_z(x)$ и $\sigma_y(x)$ – параметры дисперсии облака.

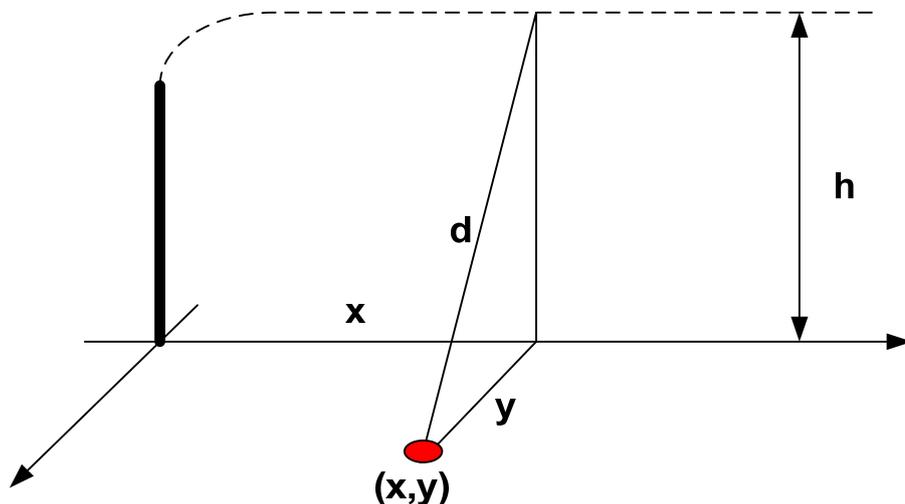


Рисунок 4 – Схема расчета доз внешнего облучения от радиоактивного облака

Доза от облака в приближении полу бесконечного пространства, $H_{CL,\infty}^{ext}$, Зв рассчитывается по формуле:

$$H_{CL,\infty}^{ext} = q_{ПВК} \cdot V_V \quad (56)$$

где $q_{ПВК}(x, y)$, $\text{Бк} \cdot \text{с} \cdot \text{м}^{-3}$, - проинтегрированная по времени временная концентрация в точке (x, y) , V_V , $\text{Зв} \cdot \text{м}^{-3} \cdot \text{Бк}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$, - дозовый коэффициент, связывающий мощность дозы излучения с объемной активностью рассматриваемого радионуклида для полу бесконечного пространства.

Доза от облака в приближении линейного источника, $H_{CL,L}^{ext}$, Зв , равна

$$H_{CL,L}^{ext} = \frac{Q}{U} \cdot \Gamma \cdot F_L \quad (57)$$

где Q – активность радионуклида в выбросе, Бк , U – скорость ветра на высоте выброса, $\text{м}/\text{с}$, Γ - максимальная гамма постоянная рассматриваемого радионуклида по мощности поглощенной (эффективной дозы), $\Gamma(\text{Зв}) \cdot \text{м}^2 \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{Бк}^{-1}$, F_L – функция излучения линейного источника со средней энергией \bar{E}_γ в воздухе на расстоянии d , м^{-1} :

$$F_L = \frac{1}{d} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} B_D(\bar{E}_\gamma, \mu d, Z) [\exp(-\mu d \sec \theta)] d\theta \quad (58)$$

d – расстояние от точки наблюдения до оси распространения струи ($d = \sqrt{y^2 + h^2}$, рисунок4), μ – линейный коэффициент ослабления фотонов с энергией \bar{E}_γ , м^{-1} , B_D – дозовый фактор накопления точечного изотропного источника с энергией \bar{E}_γ для толщины экранирующего слоя воздуха μd . Среднее значение энергии гамма квантов рассматриваемого радионуклида \bar{E}_γ для расчета коэффициента F_L по данным определялось по формуле:

$$\bar{E}_\gamma = \frac{\sum_i n_i E_{\gamma i}}{\sum_i n_i} \quad (59)$$

где n_i – выход гамма-кванта с энергией $E_{\gamma i}$ в схеме распада радионуклида. Значение коэффициента F_L получалось линейной интерполяцией между соседними значениями энергии, для средних значений \bar{E}_γ в формуле (59).

В программном комплексе принимается, что доза облучения от проходящего облака формируется достаточно быстро и дозами облучения от

дочерних радионуклидов, образующихся в процессе распространения облака, можно пренебречь.

Ожидаемая доза гамма-излучения от загрязненной радионуклидами бесконечной плоской поверхности рассчитывается по формуле H_S^{ext} , Зв,

$$H_S^{ext} = B_S \cdot k_{\text{Э}} \cdot \int_{t_1}^{t_2} D_s dt \quad (60)$$

где D_s , Бк/м², плотность выпадения радионуклида на местности, B_S , Зв·м²·Бк⁻¹·с⁻¹, дозовый фактор конверсии, $k_{\text{Э}}$ – коэффициент экранирования, равный по умолчанию 1,0, исходя из соображений консервативности, однако для долгосрочных прогнозов рекомендовано применять равным 0,4.

Для сформировавшихся радиоактивных выпадений вместо константы радиоактивного распада λ_r в формуле, отвечающей за радиоактивный распад, используется постоянная λ_{eff} , с⁻¹:

$$\lambda_{\text{eff}} = \lambda_r + \lambda_b \quad (61)$$

где λ_b - экранирование излучения вследствие заглубления радионуклида вглубь почвы, равная $1,27 \cdot 10^{-9}$ с⁻¹.

Доза внутреннего облучения за счет ингаляционного поступления радионуклидов от проходящего облака H_{CL}^{inh} , Зв, рассчитывается как произведение проинтегрированной по времени концентрации, $q_{\text{ПВК}}$, Бк·с·м⁻³, скорости дыхания, V_1 , м³/с (в соответствии с НРБ-99/2009) и дозового коэффициента B_{inh} , Зв/Бк.

$$H_{CL}^{inh}(x, y) = q_{\text{ПВК}}(x, y) \cdot V_1 \cdot B_{inh} \quad (62)$$

Дозовые коэффициенты, определены как максимальные для различных групп растворимости частиц в соответствии с рекомендациями МАГАТЭ по выбору коэффициентов при неизвестном составе выброса (по растворимости в легких). Для источника конечного времени действия ингаляционная доза от проходящего облака, полученная за интервал времени (t_1, t_2) , определяется пределами интегрирования мгновенных концентраций и равна:

$$H_{CL}^{inh}(t_1, t_2) = [q_{\text{ПВК}}(t_2) - q_{\text{ПВК}}(t_1)] \cdot V_1 \cdot B_{inh} \quad (63)$$

Доза от ингаляционного поступления радионуклидов при вторичном ветровом подъеме (ресуспензии) радионуклидов от сформировавшегося следа H_{RF}^{inh} , Зв, за период $t = t_1 - t_2$ рассчитывается по формуле [70]:

$$H_{RF}^{inh} = k_{\text{Э}} \cdot V_1 \cdot B_{inh} \cdot \int_{t_1}^{t_2} D_S \cdot RF(\tau) d\tau \quad (64)$$

здесь D_S - плотность загрязнения местности радионуклидом, Бк/м²; $RF(\tau)$ - коэффициент дефляции, м⁻¹; B_{inh} - эффективная доза от единичного поступления радионуклида с вдыхаемым воздухом, Зв/Бк; V_1 - скорость дыхания рассматриваемой группы населения, м³/с; $k_{\text{Э}}$ - осредненный коэффициент защиты (по умолчанию равен 1,0, но доступен для изменения в окне настроек программного комплекса).

Выражение для расчета коэффициента дефляции при вычислении доз от поступления вторично поднятых с поверхности почвы радиоактивных продуктов:

$$RF(t) = K_{\alpha 1} \cdot e^{-(\lambda_1 + \lambda_2) \cdot t} + K_{\alpha 2} \cdot e^{-\lambda_2 \cdot t} \quad (65)$$

здесь t - время с момента выпадения радиоактивных продуктов, с; λ_1 и λ_2 - постоянные уменьшения коэффициента дефляции для быстрой и медленной фазы, равные $1,46 \cdot 10^{-7} \text{ с}^{-1}$ и $2,2 \cdot 10^{-10} \text{ с}^{-1}$ соответственно; $K_{\alpha 2} = 10^{-9} \text{ м}^{-1}$, а значения для $K_{\alpha 1}$ приводятся в таблице 11.

Таблица 11 – Рекомендуемые значения для параметра $K_{\alpha 1}$ [87]

Тип подстилающей поверхности	$K_{\alpha 1}, \text{ м}^{-1}$
Твердое покрытие (асфальт), почва без растительности (полупустыни)	10^{-4}
Почва с обильной травяной растительностью	10^{-5}
Болотистая местность	$10^{-7} \dots 10^{-10}$
Снег	10^{-11}

Доза, предотвращаемая при проведении защитного мероприятия «Укрытие» $\Delta H_{\text{SHELTER}}(t_1, t_2)$ равна (коэффициенты для ослабления дозовых воздействий по внешнему и внутреннему облучению в населенных пунктах различного типа приведены в таблице 12):

$$\Delta H_{\text{SHELT}}(t1, t2) = (1 - k_{\text{ext}}) \cdot (H_{\text{CL}}^{\text{ext}}(t1, t2) + H_{\text{S}}^{\text{ext}}(t1, t2)) + (1 - k_{\text{inh}}) \cdot (H_{\text{CL}}^{\text{inh}}(t1, t2) + H_{\text{RF}}^{\text{inh}}(t1, t2)) \quad (67)$$

Таблица 12 – Рекомендуемые значения коэффициентов ослабления для различных населенных пунктов [88]

Тип населенного пункта	Коэффициент защищенности, отн. ед.	
	Внешнее гамма-облучение, k_{ext}	Ингаляционное поступление, k_{inh}
Сельский	0.66	0.73
Поселок городского типа	0.50	0.58
Город	0.43	0.51

Значение предотвращаемой дозы от внутреннего поступления изотопов йода ΔH_I равно:

$$\Delta H_I = k_1(\Delta t) \cdot H_{\text{CL}}^{\text{inh}, I} + V_1 B_{\text{inh}}^I \cdot \int_{x/U}^{\infty} k_1(\tau - t) \cdot D_S^I(t) \text{RF}(t) dt \quad (68)$$

Для источника конечного времени действия, t_S ,

$$\Delta H_I = V_1 B_{\text{inh}}^I \cdot \int_{x/U}^{x/U+t_S} q_I(x, y) \cdot k_1(\tau - t) dt + V_1 B_{\text{inh}}^I \cdot \int_{x/U}^{\infty} k_1(\tau - t) \cdot D_S^I(t) \text{RF}(t) dt \quad (69)$$

где значение $k_1(\tau - t)$ приведено на рисунке 5. Приведенные формулы записаны как суперпозиция предотвращенной дозы от вторичного пылеподъема и предотвращенной дозы внутреннего облучения от проходящего облака.

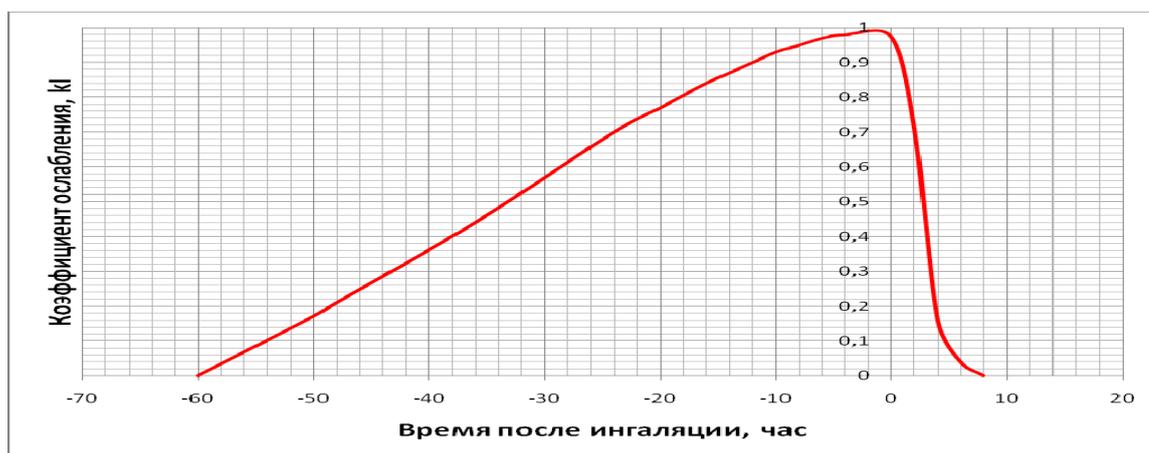


Рисунок 5 – Коэффициент ослабления дозы на щитовидную железу от действия радионуклидов йода в зависимости от времени проведения мероприятия йодная профилактика (Отрицательное значение времени соответствует приему препарата до ингаляции)[89]

Таким образом, с учетом современных версий гауссовых моделей, необходимостью расширения круга решаемых задач, повышения точности, которую можно, обеспечить совокупностью различных дополнительных инженерных моделей, необходима разработка требований для интеграции отобранных моделей в единое программное средство. При этом необходимо избежать противоречий и разночтений при использовании различных моделей в рамках единого программного средства для проведения прогноза радиационной обстановки при радиационной аварии. Также появляется необходимость разработки архитектуры программного средства, позволяющего проводить четкое и быстрое обоснование радиационной безопасности населения при запроектных авариях на объектах ядерной энергетики в парадигме постепенного уточнения прогноза по мере поступления дополнительной информации об аварии.

1.2.3 Неопределенности в выборе параметров модели атмосферного выброса

Ключевым вопросом при прогностических расчетах последствий атмосферных выбросов радионуклидов в атмосферу является вопрос выбора

исходных данных для проведения расчета, которые, в случае использования гауссовых моделей, можно подразделить на следующие группы:

- метеорологические параметры (категория устойчивости атмосферы, скорость/направление ветра на высоте выброса, интенсивность осадков, шероховатость подстилающей поверхности);
- облако загрязняющего вещества (высота подъема облака, характерные размеры облака);
- радионуклидный состав выброса;
- распределение активности по размеру частиц в выбросе.

На ранней фазе развития аварии существует неопределенность в выборе некоторых из указанных параметров. Так метеорологические параметры могут быть получены исходя из данных локальных измерений с использованием метеомачт, которые обязательны к установке для всех ЯРОО, или данных Росгидромета, однако они меняются с течением времени и являются точечными оценками или результатами расчета метеорологических полей с использованием моделей на базе проведения измерений в опорных точках. Для использования гауссовых моделей необходимы усредненные метеорологические данные, описывающие эффективные погодные условия за время распространения примеси. Так, скорость ветра и направление ветра в разных точках пространства разная, а ошибки при их определении (путем экстраполяции данных метеомачт или усреднения метеорологических полей, даваемых Росгидрометом) существенно влияют на результаты расчета, особенно в случае устойчивой категории стабильности атмосферы. Эти параметры должны быть определены как можно точнее, исходя из данных измерений, поскольку в силу специфики гауссовой модели скорость ветра и активность радионуклидов в выбросе не могут быть восстановлены вместе, исходя из данных натуральных измерений [90].

Поскольку геометрические параметры облака загрязняющего вещества в основном определяются либо исходя из визуального сопоставления облака и размеров близлежащих конструкций, либо исходя из расчетов по моделям расчета

эффективной высоты подъема, то их определение является, по сути, экспертной оценкой, что может сказаться на результатах прогностических оценок.

Демонстрацией совместного влияния двух параметров на результаты расчета может служить факторное пространство. На рисунке 6 представлен пример факторного пространства, определяемого моделью переноса при варьировании высоты подъема облака и скорости ветра на высоте флюгера при прочих равных параметрах. Видно, что неопределенность в выборе скорости ветра в ± 1 м/с и неопределенность в выборе высоты подъема облака в ± 20 м может привести к результатам оценок, отличающимся в 3-4 раза только с точки зрения расчета с использованием модели.

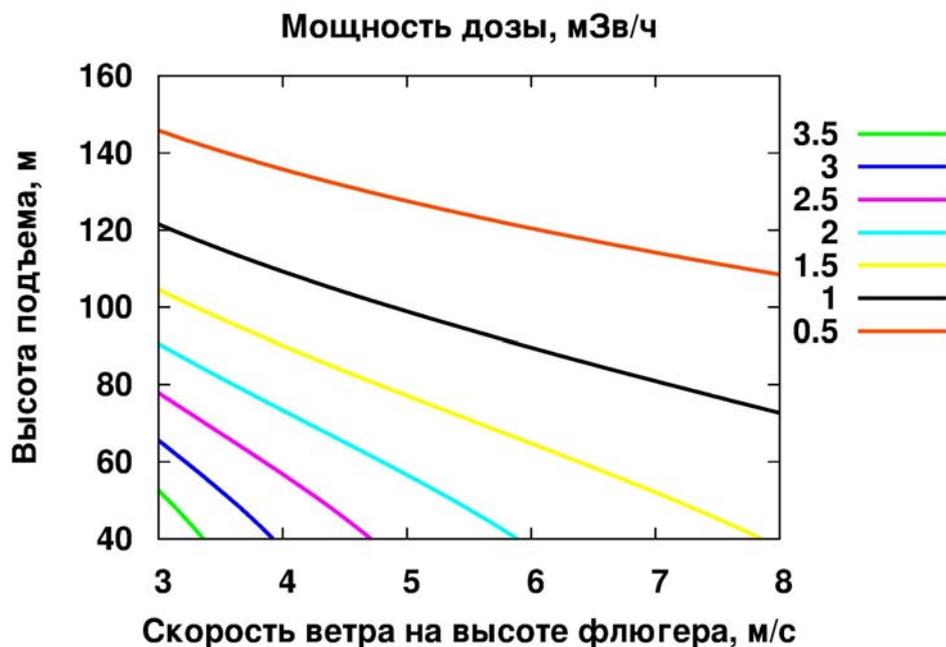


Рисунок 6 – Пример факторного пространства для мощности дозы при варьируемых параметрах скорость ветра - высота подъема. Линиями уровня обозначены соответствующие значения мощности дозы гамма излучения

Еще одним элементом неопределенности является величина выброса радионуклидов в атмосферу, которая оценивается либо экспертно, на основании данных о повреждениях объекта [39], либо с использованием тяжелоаварийных кодов [91, 92], либо посредством решения обратной задачи атмосферного

рассеивания [93] с использованием данных натуральных измерений параметров радиационной обстановки.

Последний элемент – дисперсный состав выброса, для которого в классическом случае характерно логнормальное распределение с АМАД равным 1 мкм и СГО равным 2,5 [35], однако было показано [94, 95], что при взрывах распределение активности в выбросе описывается более сложным распределением, зависящим от мощности взрыва и вовлеченных материалов [95, 96], причем в этом случае существенный вклад в формирование картины загрязнения вносят грубодисперсные фракции [97]. В острой фазе развития аварии параметры таких распределений можно определить только экспериментально, либо с использованием подпрограмм восстановления параметров атмосферного выброса.

Поскольку неопределенности в выборе параметров могут приводить к существенным отклонениям результатов прогностических оценок от реальных параметров радиационной обстановки, то одной из основных задач для повышения точности таких оценок является их минимизация, которая может быть обеспечена либо улучшением измерительной аппаратуры, либо совершенствованием моделей для косвенных оценок этих параметров, либо использованием данных натуральных измерений для их коррекции в режиме постоянного уточнения прогноза при поступлении дополнительной информации (так называемая система гибридного мониторинга) [98].

1.2.4 Способы минимизации неопределенностей без использования данных натуральных измерений

Минимизация неопределенностей в выборе исходных параметров для прогностических моделей ключевым образом зависит от исходного события. Так при выбросах радионуклидов в атмосферу из мест хранения ОЯТ или выбросов при нарушениях условий транспортировки ОЯТ, где в качестве основного события рассматривается пожар [99], используя цепочки радиоактивного распада, можно определить накопление и распад радионуклидов в источнике, начиная от исходного, и в качестве консервативной оценки брать получившийся состав.

Высота подъема облака остается оценочной величиной и может быть определена либо путем сопоставления с высотами близлежащих конструкций, либо с использованием моделей подъема, либо путем ее восстановления, исходя из данных натурных измерений.

В случае радиационных аварий на реакторных установках, когда известно исходное событие, для расчета выхода радионуклидов в атмосферу возможно использование тяжелоаварийных кодов класса MELCOR [100] или СОКРАТ [101], позволяющих сквозным образом моделировать выход радионуклидов в атмосферу, начиная от исходного события, моделируя накопление продуктов деления в топливной матрице при нормальной эксплуатации, выход радионуклидов под оболочку ТВЭЛа, выход продуктов деления в первый контур после разрушения оболочки ТВЭЛа, поведение продуктов деления в первом контуре, их выход под защитную оболочку, поведение продуктов деления под защитной оболочкой и выход в атмосферу. В силу того, что аварии возможны на реакторных установках различного типа, чтобы не сужать возможности работы программного комплекса, важной является схема интеграции такого кода в программный комплекс с возможностью замены одного кода на другой для разных типов реакторных установок.

В случае возникновения аварии на реакторных установках, при невозможности использования тяжелоаварийного кода, или выбросов из бассейнов выдержки для минимизации неопределенностей в выборе активности выброса, можно выделить соотношения между активностями продуктов деления для основных типов отечественных реакторов ВВЭР-440, ВВЭР-1000, РБМК-1000 [102]. Таким образом, можно определить радионуклидный состав в первом приближении до получения данных по спектрометрическому анализу выброса. В соответствии с классификацией по физико-химическим свойствам [100], радионуклидный состав выброса можно разбить на группы (таблица 13). Поэтому в рамках настоящей работы, при отсутствии данных о плотности поверхностных выпадений, радионуклидный состав необходимо разбивать на группы, и при проведении расчетов использовать групповую активность, соблюдая соотношения

между активностями радионуклидов в зависимости от типа реактора и с учетом цепей радиоактивного распада (например, таблица 14).

Таблица 13 – Разбиение радионуклидов по группам [100]

Группа	Элементы
1	He, Ne, Ar, Kr, Xe, Rn, H, N
2	Li, Na, K, Rb, Cs, Fr, Cu
3	Be, Mg, Ca, Sr, Ba, Ra, Es, Fm
4	F, Cl, Br, I, At
5	O, S, Se, Te, Po
6	Ru, Rh, Pd, Re, Os, Ir, Pt, Au, Ni
7	V, Cr, Fe, Co, Mn, Nb, Mo, Tc, Ta, W
8	Ti, Zr, Hf, Ce, Th, Pa, Np, Pu, C
9	Al, Sc, Y, La, Ac, Pr, Nd, Pm, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, Am, Cm, Bk, Cf
10	U
11	Cd, Hg, Zn, As, Sb, Pb, Tl, Bi
12	Ga, Ge, In, Sn, Ag

Таблица 14 – Таблица с активностями части изотопов Cs, накопленных в реакторной установке за время кампании [102], Бк/т

Реактор (кампания)	Нуклид			
	Cs-134	Cs-136	Cs-137	Cs-138
ВВЭР-440 (кампания 3 г)	4.61E+15	1.20E+15	3.44E+15	5.80E+16
ВВЭР-440 (кампания 2 г)	2.25E+15	8.21E+15	2.31E+15	-
ВВЭР-440 (кампания 1 г)	6.04E+14	4.53E+14	1.16E+15	-
ВВЭР-1000 (кампания 3 г)	7.50E+15	1.84E+15	4.69E+15	8.45E+16
ВВЭР-1000 (кампания 2 г)	3.62E+15	3.26E+12	3.14E+15	-
ВВЭР-1000 (кампания 1 г)	9.6E+14	6.6E+14	1.58E+15	-
РБМК-1000 (кампания 1100 сут)	4.03E+15	7.15E+14	2.89E+15	3.00E+16

1.2.5 Методы восстановления параметров атмосферного выброса с использованием средств радиационного контроля и мониторинга объектов окружающей среды

Еще одним способом восстановления параметров атмосферного выброса является использование модуля, для коррекции и восстановления параметров модели на основе данных радиационной разведки. Такой модуль существует, например, в программном средстве SULTAN [93], где по экспериментальным данным мощности дозы рассчитывается эквивалент активности атмосферного выброса по I-131. Также активно разрабатываются зарубежные аналоги [103, 104]. Во всех вышеперечисленных случаях модель восстановления основана на измерениях одного типа (мощность дозы или проинтегрированная по времени концентрация) и включает в себя построение и минимизацию единого функционала. Во всех случаях процедура восстановления сводится к использованию метода нелинейного регрессионного анализа и заключается в поиске экстремума функционала $Q(\vec{a})$ по параметрам \vec{a} , построенного на базе метода наименьших квадратов, либо на базе функции правдоподобия [106]. При этом ошибки оценки параметров радиационной обстановки с использованием моделей, точность проводимых измерений, связанная как с инструментальной погрешностью, так и с образованием локальных зон с повышенным или пониженным уровнем загрязнения (из-за локальных условий распространения) делают задачу некорректно поставленной и требуют использования методов повышения устойчивости [107].

Активное внедрение портативного γ -спектрометра для оценок плотности поверхностных выпадений в состав стандартного оборудования ПРЛ [105], открывает возможность для улучшения существующих методик восстановления с использованием данных о точечных измерениях плотности поверхностных выпадений (отдельно для каждого радионуклида). Теперь рассматривается задача восстановления параметров выброса по данным разноплановых измерений (точечные измерения мощности дозы и плотности поверхностных выпадений для каждого радионуклида в выбросе), что делает неэффективной свертку всех

измерений в единый функционал, поскольку при этом теряется информация об измерениях плотности поверхностных выпадений, предоставляющая детализированные данные по радионуклидному составу выброса и активностям его компонентов.

С учетом вышеизложенного, в настоящей диссертационной работе сформулирована методология восстановления параметров атмосферного выброса с использованием последовательного байесовского оценивания (общие принципы сформулированы в работе [110]) для общей нелинейной модели прогнозирования радиационной обстановки и доз облучения населения. Этот метод является эффективной процедурой при проведении восстановления на основе данных измерений различного типа в рамках единой системы моделей, упрощающей моделирование и как минимум (когда нет спектрометрического анализа плотности поверхностных выпадений) позволяющей достичь тех же результатов, которые дают традиционные подходы – метод наименьших квадратов и метод максимального правдоподобия.

В настоящей части диссертационной работы представлена методика восстановления параметров атмосферного выброса по данным радиационной разведки, включающей в себя измерения мощности дозы и спектрометрические измерения плотности поверхностных выпадений. Использование программного средства восстановления параметров атмосферного выброса в разрабатываемом программном комплексе обеспечивает возможность использования программы в качестве расчетного средства в так называемой системе гибридного мониторинга [98, 112].

1.3 Обоснование цели и задач исследования

На основе существующей нормативно-правовой базы по обеспечению радиационной безопасности и защиты населения в случае радиационных аварий было показано, что обоснование радиационной безопасности населения на этапе планирования при запроектных авариях проводится на основе прогностических значений последствий радиационной аварии. Для выработки рекомендаций по применению защитных мероприятий требуются оценки доз облучения по

внутреннему и внешнему облучению и предотвращаемых защитными мероприятиями доз (НРБ-99/2009).

Такие оценки могут быть получены с использованием программных средств, включающих модели атмосферного переноса и дозиметрические модели, которые в свою очередь имеют низкую точность в силу больших неопределенностей в выборе параметров [9], поэтому необходима дополнительная информация для принятия решений.

Одним из способов снижения неопределенностей входных данных является подбор комплекса моделей, отвечающих, за разные физические процессы, влияющие на конечный результат и интеграция этих моделей в единый программный комплекс под общей интегрирующей оболочкой. Таким образом, появляется необходимость разработки программного средства для моделирования атмосферного переноса облака загрязняющего вещества, его осаждения на подстилающую поверхность, оценок дозовых функционалов и расчета критериев принятия решений о проведении защитных мероприятий. Такое программное средство должно включать модули учета специфичного распространения радионуклидов в атмосфере (в силу того, что для описания реальных радиационных аварий, требуется учет этих особенностей[113]) при различных условиях возникновения аварий [114]:

- оценки с учетом топографии местности;
- оценки эффективной высоты выброса;
- оценки распространения полидисперсных составов;
- оценки эффектов аэродинамической тени и начальных размеров облака.

Другим способом снижения неопределенностей является учет при моделировании данных натурных измерений, полученных с использованием современных средств контроля и мониторинга радиационной обстановки вокруг ЯРОО, на базе которых можно проводить восстановление и коррекцию расчетов [35, 98], и тем самым повышать точность прогностических оценок. Поэтому появляется необходимость разработки методик восстановления параметров атмосферного выброса по данным комплексного анализа радиационной аварии.

Поскольку, в силу того, что измерения радиационной обстановки проводятся когда большая часть доз уже получена, то эффективность применения защитных мероприятий снижается (очевидно, что если выброс уже произошел, то в качестве основного источника информации стоит использовать данные мониторинга). Поэтому оценку радионуклидного состава и активностей его компонентов можно проводить путем использования расчетов накопления продуктов деления в ОЯТ, оценок наработки радионуклидов при завершении кампании для бассейнов выдержки или в качестве консервативной оценки выхода радионуклидов при аварии реакторной установки [102] или с использованием моделирования внутриреакторных процессов тяжелоаварийным кодом, позволяя определить выход радионуклидов из под защитной оболочки в атмосферу. Таким образом, появляется необходимость создания технологической цепочки для интеграции тяжелоаварийных кодов в программный комплекс для расчета выхода радионуклидов в атмосферу из реакторных установок.

В силу того, что на данный момент ни один из существующих кодов в рамках единого программного комплекса не позволяет проводить такие расчеты, определяется актуальность поставленной цели и, как следствие, поставленные задачи по разработке и интеграции программных средств.

1.4 Выводы по главе 1

В главе 1 выполнен обзор российской и международной нормативно-правовой базы в области обеспечения радиационной безопасности населения при радиационных авариях на объектах ядерной энергетики. Определена актуальность и необходимость создания интегрального программного комплекса для расчетного обоснования радиационной безопасности населения при запроектных радиационных авариях на основе сквозного моделирования процессов на ЯРОО, атмосферного переноса радиоактивности, расчета доз облучения населения и снижения ошибок прогноза за счет использования данных мониторинга для выработки рекомендаций по защите населения:

- программное средство для прогнозирования радиационной обстановки, доз облучения населения и выработки рекомендаций по применению защитных мероприятий при обосновании радиационной безопасности населения при запроектных радиационных авариях;
- программное средство для коррекции параметров исходного атмосферного выброса радиоактивных веществ с использованием средств радиационного контроля и мониторинга объектов окружающей среды;
- модуль, реализующий расширяемую автоматизированную связь с результатами моделирования внутриреакторных процессов современными тяжелоаварийными кодами при запроектных авариях на АЭС.

При этом следует отметить, что константное обеспечение, с точки зрения дозиметрических величин и критериев принятия решений по применению защитных мероприятий, соответствует нормативной документации. Причем, на данный момент расхождения в этой документации, связанные с пересмотром понятия эффективной дозы и пересчетом дозовых коэффициентов, с точки зрения российских и международных норм обеспечения безопасности, незначительно.

Также в главе 1 проведен анализ методов и способов контроля радиационной обстановки, на основе которого были определены основные источники данных о параметрах радиационной обстановки в санитарно-защитной зоне (СЗЗ), зоне наблюдения и зоне потенциального загрязнения. Анализ методов и способов прогнозирования радиационной обстановки определил выбор физических процессов и их моделей, которые должны быть учтены, исходя из специфики поставленной задачи. Также проведен анализ существующих методов восстановления параметров модели по данным натуральных измерений и подготовлена платформа для разработки методики, которая по данным натуральных измерений современными средствами мониторинга позволит проводить восстановление параметров отобранных моделей прогнозирования для повышения точности прогностических оценок. На основе проведенного анализа проведено обоснование цели и задач диссертационной работы.

2 РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО СРЕДСТВА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РАДИАЦИОННОЙ ОБСТАНОВКИ И ДОЗ ОБЛУЧЕНИЯ НАСЕЛЕНИЯ ДЛЯ ВЫРАБОТКИ РЕКОМЕНДАЦИЙ ПО ПРИМЕНЕНИЮ ЗАЩИТНЫХ МЕРОПРИЯТИЙ

2.1 Разработка состава программного средства для выработки рекомендаций по применению защитных мероприятий

В первой главе диссертационной работы был проведен анализ и отбор существующих моделей атмосферного переноса, дозиметрических моделей и моделей защитных мероприятий, необходимых для расчетного обоснования радиационной безопасности населения при атмосферных выбросах радионуклидов. Было показано, что для достижения поставленной цели будет полезным и на определенном этапе достаточным использование современных версий гауссовых моделей распространения радиоактивных веществ в атмосфере, позволяющих проводить расчеты при минимуме исходных данных. Современные параметризации обеспечивают разумную консервативность оценок и позволяют расширять круг решаемых задач.

Для разработки состава программного средства для выработки рекомендаций по применению защитных мероприятий необходимо определить требования к моделям для задачи интеграции. Исходя из отобранных моделей атмосферной дисперсии, требований нормативно-правовой базы и требований к современным программным средствам в области обеспечения радиационной безопасности населения, необходимо достижение компромисса между точностью прогноза и простотой и наглядностью программного средства. В результате отбора был получен следующий набор моделей:

- базовая модель рассеивания загрязняющих веществ в атмосфере для материнских радионуклидов;
- базовая модель рассеивания загрязняющих веществ в атмосфере для дочерних радионуклидов;

- модель уточнения с учетом орографии местности для материнских радионуклидов
- модель уточнения с учетом орографии местности для дочерних радионуклидов;
- модель расчета параметров полидисперсного распределения;
- модель расчета эффективной высоты подъема облака при выбросе из трубы;
- модель расчета эффективной высоты подъема облака при выбросе при пожаре;
- модель расчета эффективной высоты подъема облака при выбросе при взрыве;
- модель расчета параметров виртуального источника;
- дозиметрические модели;
- модели расчета эффективности проведения защитных мероприятий.

Поскольку проведение расчетов по всем моделям одновременно нецелесообразно, то одним из требований для их интеграции является их классификация по степени важности для достижения поставленной цели. Так, базовая модель атмосферной дисперсии является приоритетной для расчетов параметров радиационной обстановки при наличии только базовой информации о параметрах аварии. Модель уточнения результатов с учетом орографии местности позволяет проводить уточнение результатов расчета, когда высота рельефа вдоль оси радиоактивного следа сопоставима с высотой подъема облака. Таким образом, она является логическим продолжением базовой модели рассеивания. Кроме того реализация модели учета орографии местности в рамках использования гауссовых моделей позволяет только скорректировать результаты расчета в сторону увеличения консервативности расчетов, поскольку при наличии сильных неоднородностей поверхности требуется учет трехмерных турбулентных потоков. Поэтому при отсутствии данных об орографии местности оценки базовой моделью и моделью с учетом орографии местности должны совпадать. Следует отметить, что модель ISC3, взятая за основу для учета орографии местности, может давать переоценку в 3 раза [115]. Остальные модели являются

вспомогательными для базовой модели и модели уточнения с учетом орографии местности и являются только источниками параметров для этих моделей, позволяя проводить уточнение входных параметров для базовой модели и модели уточнения с учетом орографии местности. Так расчеты эффективной высоты подъема облака, расчеты параметров полидисперсного распределения и расчеты параметров виртуального источника являются независимыми внешними данными и определяют только форму записи моделей атмосферного переноса. Таким образом, для интеграции разработанных программных средств в единое программное средство должны быть выполнены следующие требования:

- совпадение асимптотики базовой модели и модели учета орографии местности;
- доступность нескольких уровней расчета, исходя из известной информации (уточнение прогноза при наличии дополнительной информации);
- интегрируемость расчетов дополнительными моделями в базовую модель и модель учета орографии местности.

На основе полученных требований разработан состав программного средства для выработки рекомендаций по применению защитных мероприятий, включающий доработанные модели, отобранные ранее.

Модификация базовой модели была проведена по двум направлениям: замена определения эффективной скорости ветра в соответствии с данными источника [75] и замена концепции фиктивного источника на предложенную в работе [95].

Необходимость замены скорости ветра обусловлена неудовлетворительными результатами верификации (среднеквадратическое отклонение от кривой составляет 100%), представленными в главе 1, при наличии нестандартного градиента скорости ветра по высоте (у поверхности земли наблюдается скорость ветра 1 м/с, на высоте выброса – порядка 10 м/с). В результате скорость ветра на высоте выброса заменена на эффективную скорость ветра в слое, которая может быть определена исходя из данных измерений с использованием метеомачты на разных высотах. Верификация программного

средства показала существенно лучшие результаты (отклонение 40% вместо 100%), при использовании доработанной модели.

Замена концепции фиктивного источника проводилась в соответствии с рекомендациями международного документа [95], содержащего описание методики учета конечного размера облака в начальный момент времени для гауссовых моделей распространения загрязняющих веществ в атмосфере. Использование данного подхода совместно с расчетом параметров полидисперсности при использовании программного средства для восстановления параметров атмосферного выброса позволило описать последствия аварии на ПО «Маяк» 1957 г. со среднеквадратической ошибкой 40%, представленные в главе 3 настоящей работы.

Асимптотика модели учета орографии местности. Модель ISC3, выбранная за основу для уточнения расчетов с учетом орографии местности, основана на зарубежных параметризациях гауссовых моделей [80]. Для совместимости с базовой моделью атмосферной дисперсии, в силу своей модульной структуры, требуется заменить коэффициенты горизонтальной и вертикальной дисперсии на коэффициенты базовой модели, при этом логика использования модели остается той же, за исключением использования модели “промежуточного” рельефа (реализующейся, когда высота рельефа превышает высоту источника, но лежит ниже, чем высота выброса), которая не реализуется в силу того, что при расчетах пренебрегается траекторией подъема облака. В соответствии с базовой моделью, в данную модель вводится концепция фиктивного источника. В результате, при отсутствии данных о профиле рельефа, базовая модель и модель уточнения с учетом орографии местности дают одинаковый результат.

Модели расчета высоты подъема облака при взрывах и пожарах основаны на использовании верифицированных моделей [116] подъема перегретого облака, образовавшегося в результате взрыва или пожара, в стратифицированной атмосфере. Представленные методики разработаны для подъема паровоздушной смеси во влажной атмосфере.

При взрыве химического вещества основным компонентом в облаке загрязняющего вещества будет перегретый углекислый газ (CO_2) [117], который и определит поведение облака на начальном этапе распространения, поэтому модель взрыва была обобщена на случай подъема многокомпонентных смесей. Поскольку при расчетах данными моделями формируются все параметры облака (в том числе и геометрические), то логично их использовать для расчета параметров фиктивного источника, что является физически обоснованным предположением.

Дозиметрические модели основаны на результатах расчета плотности поверхностных выпадений и проинтегрированной по времени концентрации моделями атмосферной дисперсии [70, 118, 62]. При этом дозовые коэффициенты определяются согласно табулированным значениям в нормативной документации с учетом требований документа [81], что соответствует общепринятой практике расчета дозовых функционалов.

Полидисперсные распределения включают в себя распределение активности по диаметрам частиц в выбросе и расчет скоростей сухого и гравитационного оседания в соответствии с методикой [79]. Для выброса стандартных аэрозолей используются эффективные скорости оседаний [77], однако, в случае выбросов в результате взрыва, необходимо рассматривать распространение спектра частиц с различными скоростями оседания. При этом распределение частиц в выбросе носит полидисперсный характер с преобладанием грубодисперсной фракции [114,95]. Таким образом, становится возможным рассмотрение взрывов и пожаров в рамках разрабатываемого программного средства на уровне применения инженерной методики, что подтверждено результатами анализа аварий на ПО «Маяк» и в бухте Чажма, представленными в настоящей диссертационной работе.

2.2 Разработка архитектуры программного средства для проведения прогностических оценок параметров радиационной обстановки и поддержки принятия решений

На основе разработанного состава программного средства для выработки рекомендаций по применению защитных мероприятий при обосновании радиационной безопасности населения при запроектных радиационных авариях была разработана архитектура программного средства, определяющая основные принципы взаимодействия модулей в составе программного средства. На рисунке 7 представлена схема взаимодействия основных частей программного средства.

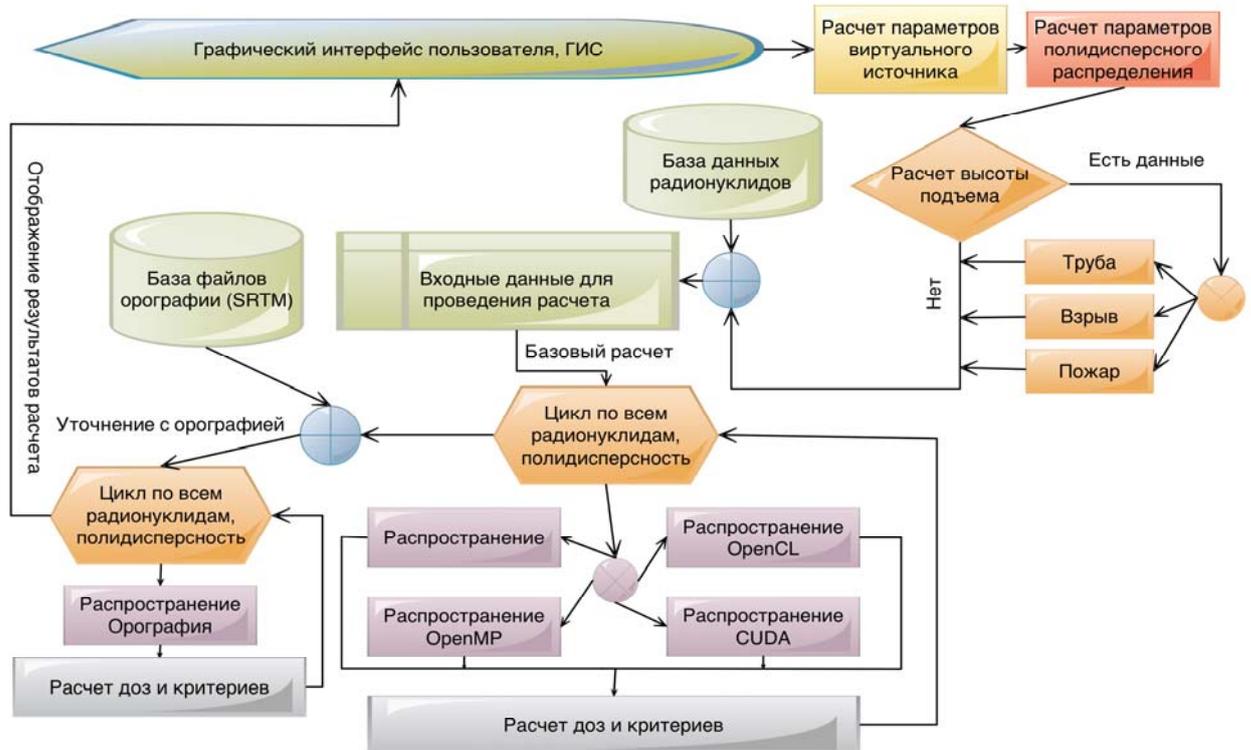


Рисунок 7 – Схема взаимодействия моделей программного средства для выработки рекомендаций по применению защитных мероприятий при обосновании радиационной безопасности населения

Здесь исходные данные, необходимые для проведения расчета, заносятся в графический интерфейс пользователя, формирующий запросы к базе данных по параметрам радионуклидов и к расчетным модулям программного средства,

реализованным в виде динамически типизированных библиотек с одинаковым программным интерфейсом в пределах одинаковых групп. Исходными параметрами для расчета являются:

- блок метеорологических параметров;
- блок, определяющий параметры полидисперсного распределения;
- блок формирования радионуклидного состава в атмосферном выбросе;
- блок параметров для расчета эффективной высоты подъема облака.

В частности, возможен выбор параметров:

- в части метеоданных: устойчивости, скорости ветра, высоты ветра, направления ветра, типов осадков и их интенсивности, шероховатости;
- в части области расчета: положения оси, расстояния между точками, длина и ширина;
- в части сведений об источнике: координат месторасположения, длительности выброса;
- в части дисперсного состава: тип распределения и его параметры (рассматривается логнормальное распределение, пользовательское и эмпирическое паровоздушное распределение [119]);
- в части сведений о радионуклидном составе: радионуклиды и их активности;
- в части высоты подъема: типы моделей расчета эффективной высоты подъема облака и их параметры.

Результатом работы программного средства является оценка следующих дозовых функционалов:

- доза внешнего облучения от облака и поверхности;
- ингаляционная доза от облака и вторичного пылеподъема;
- доза по пищевым цепочкам;
- суммарная эффективная доза;
- доза, приходящаяся на щитовидную железу;
- предотвращаемые защитными мероприятиями дозы.

На рассчитанные значения доз возможно наложение контрмер для определения их эффективности по предотвращению облучения в зависимости от времени их применения относительно времени начала выброса:

- укрытие;
- йодная профилактика;
- эвакуация;
- ограничение по продуктам.

Сопоставление прогностических значений доз с российскими и международными критериями проводится по следующим категориям [35, 52]:

- прогнозируемое облучение за 2 суток, НРБ;
- укрытие за 10 суток, НРБ;
- йодная профилактика для взрослых за 10 суток, НРБ;
- йодная профилактика для детей за 10 суток, НРБ;
- эвакуация за 10 суток, НРБ;
- отселение, 1 год и 70 лет, НРБ;
- ограничение потребления продуктов за первый год, НРБ;
- внешнее облучение, 10 часов, МАГАТЭ;
- внутреннее облучение, 30 суток, МАГАТЭ.

Логика проведения расчетов следующая:

- 1) вводятся исходные данные;
- 2) формируется заброс к базе данных;
- 3) проводится расчет с использованием базовой модели;
- 4) после этого возможно уточнение при использовании модели с учетом орографии местности;
- 5) далее проводится работа с результатами расчета с активным использованием картографической подложки.

2.3 Программное средство для выработки рекомендаций по применению защитных мероприятий при обосновании радиационной безопасности населения при запроектных радиационных авариях

2.3.1 Инструментальные средства разработки

Программное средство разработано на стандартизованном языке C++ (версия стандарта ISO/IEC 14882:2011) [120, 121] с использованием встраиваемого языка программирования Lua [122] и библиотек Qt [123] версии 5.3 для универсального кроссплатформенного доступа к основным функциям операционной системы и разработки графического интерфейса пользователя. Программное средство является кроссплатформенным и может функционировать на следующих операционных системах: Linux, Mac OS и другие UNIX-подобные системы, Microsoft Windows.

В качестве базы данных используется встраиваемая реляционная база данных SQLite, включающая данные по 137 радионуклидам (дочерние радионуклиды, находящиеся в равновесии с материнскими, включены в материнские), составленные на основе требований российских и международных норм к константному обеспечению для задач оценки облучения персонала и населения.

2.3.2 Графический интерфейс пользователя

Для эффективной работы с программным средством был разработан графический интерфейс пользователя, позволяющий:

- задавать параметры радиоактивного выброса и проводить расчеты по модели атмосферного переноса с отображением на карте результатов моделирования;
- работать с результатами расчетов на картографической подложке с помощью специальных инструментов;
- экспортировать результаты расчета в наиболее используемые форматы (генерация отчета в виде файла в формате rtf или экспорт данных в MS Excel);

- сохранять текущее состояние системы в специальном файле для воспроизведения при дальнейшем анализе.

Программное средство снабжено интерфейсом, реализованным в общепринятом "оконном" виде с развитой системой иерархических меню. Оно доступно для эксплуатации и обучения пользователям, не имеющих специальных знаний по программированию и картографии. Общее управление программным средством осуществляется с помощью основного меню, закладок с возможностью выбора пользователем целевых функций и современных геоинформационных технологий. Ввод исходных данных для расчета осуществляется в закладке интерфейса «Исходные данные», представлен на рисунке 8:

The screenshot shows the 'ПРОЛОГ' software interface with the 'Исходные данные' (Initial Data) tab selected. The interface is divided into several sections:

- Метеоданные (Meteorological Data):**
 - Устойчивость: A (очень неустойчиво)
 - Скорость ветра: 5,00 м/с; Высота: 10,00 м; Направление: Ю, 180,00 °
 - Тип осадков: отсутствуют; Интенсивность: 1,00 мм/ч
 - Шероховатость: снег, газон высотой до 10 см; z: 0,01 м
- Область расчета (Calculation Area):**
 - Положение: вдоль оси следа
 - Расстояние между точками: 100 м; Длина: 10,00 км; Ширина: 10,00 км
- Источник (Source):**
 - Координаты: 35,05735 ВД 57,90425 СШ
 - Длительность: длительный выброс, 0,28 час.
- Дисперсность (Dispersion):**
 - Тип выброса: по умолчанию
 - Распределение: (empty dropdown)
- Радионуклиды (Radionuclides):**
 - Empty list box with a list of radionuclides: H-3, C-14, Na-22, Na-24, P-32, P-33, S-35, Cl-36, K-40, K-42, Ca-45, Sc-46, Tl-44, V-48.
- Высота (Height):**
 - Расчетная модель: Пользовательская модель
 - Высота подъема: 100,0 м; Ширина облака: 10,0 м; Высота облака: 0,0 м
 - Вирт. ист. X: 0, м; Вирт. ист. Z: 0, м

At the bottom of the window, the status bar displays: 30.10.2013 17:16:45 | X: 34°44'44" Y: 58°02'02" | R: 23 396,0 м, A: 308,1°

Рисунок 8 – Окно задания исходных данных для расчета

После ввода параметров выброса на вкладке “целевые функции” (рисунок 9) задаются функции, для которых производится расчет:

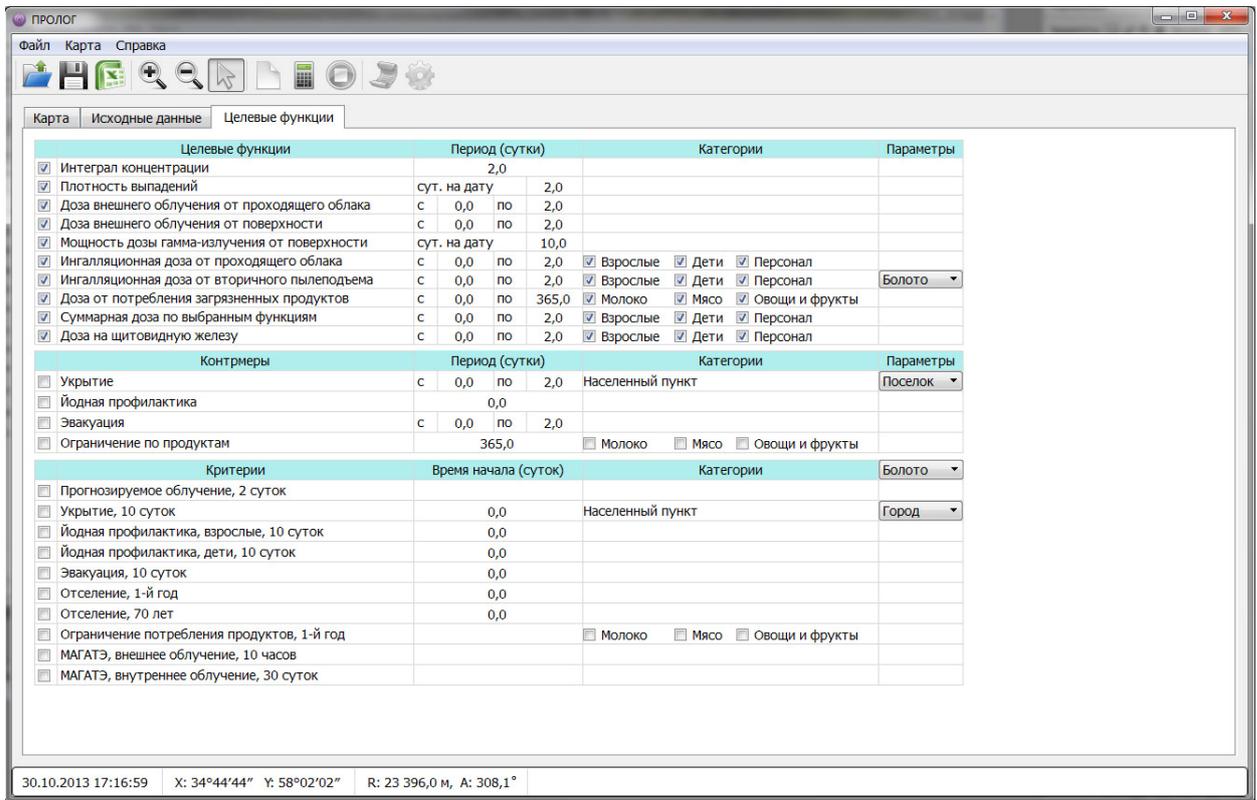


Рисунок 9 – Окно задания целевых функций расчета, контрмер и критериев принятия решений

Результаты расчета отображаются на картографической подложке (рисунок 10), которая может быть получена как при помощи использования онлайн картографических сервисов типа OpenStreetMap или GeoServer, так и с использованием локальных картографических подложек.

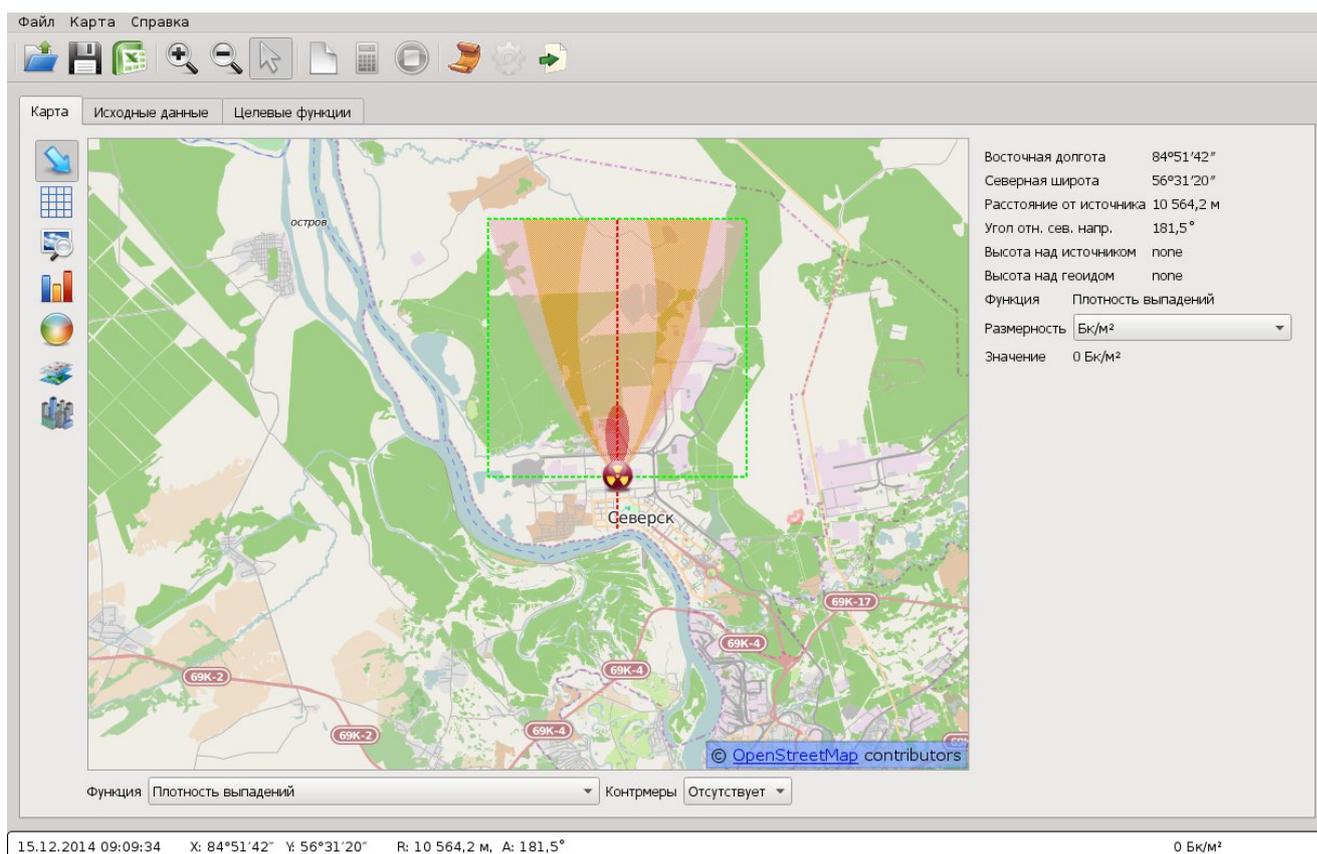


Рисунок 10 – Пример отображения результатов расчета в программном средстве [124]

2.3.3 Технологии параллельного программирования

Для проведения пакетных расчетов радиационной обстановки, особенно для случаев расчета распространения сложных полидисперсных составов, были созданы расчетные модули, реализующие технологии параллельного программирования для программного средства. При этом модульная структура программного средства позволяет подключать или отключать использование аппаратного ускорения для проведения расчетов в зависимости от конфигурации персонального компьютера или вычислительного кластера. На рисунке 11 представлены результаты сопоставления скорости проведения расчета без использования средств параллельного программирования, с использованием технологии OpenMP[125] для проведения параллельных вычислений на центральном процессоре или процессорах персонального компьютера, технологии OpenCL[126] для проведения расчетов на графических картах с одинарной и

двойной точностью (расчетный модуль программного средства ориентирован на использование технологии OpenCL для расчетов на видеокарте ввиду наличия модуля с реализацией OpenMP, причем в связи с видом расчетных формул, в гибридных вычислениях нет необходимости) и технологии CUDA [127] для проведения параллельных вычислений с одинарной и двойной точностью на графических картах, в которых эта технология поддерживается.

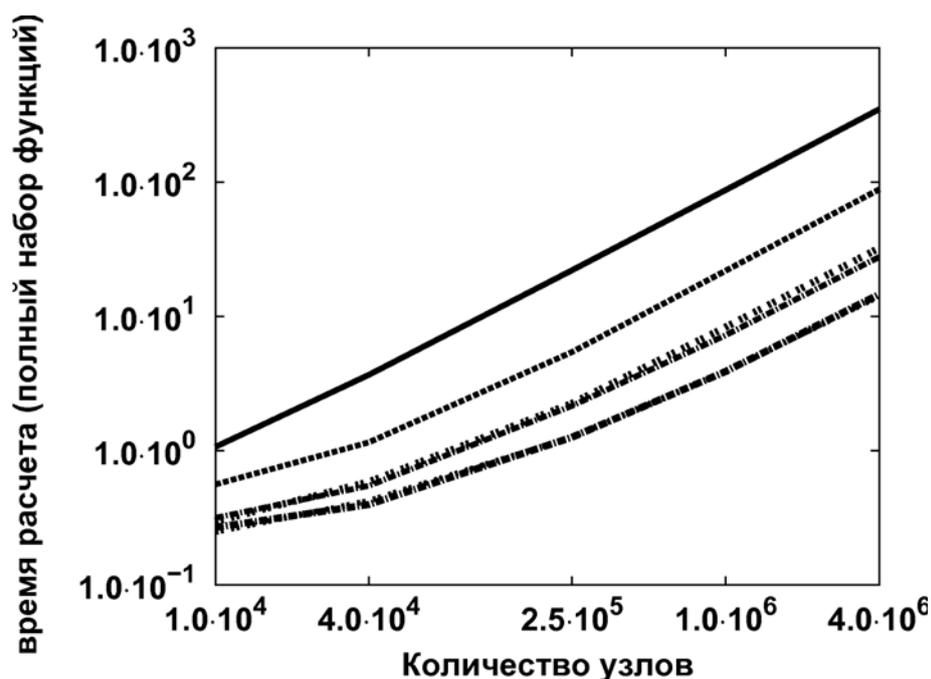


Рисунок 11 – Зависимость скорости расчета от числа узлов расчетной сетки для последовательный расчета (—), технологии OpenMP (---), OpenCL (····), CUDA (---)

2.3.4 Верификация и апробация частей программного комплекса

Кросс-верификация с аттестованным ПС НОСТРАДАМУС (не гауссова модель) в том числе в ходе тренировок и учений.

Программный комплекс НОСТРАДАМУС [141] разработан для прогнозирования радиационной обстановки при атмосферных выбросах радионуклидов на основе лагранжевой стохастической модели рассеяния загрязняющих веществ в атмосфере и содержит дозиметрические модели для проведения оценок ожидаемых дозовых воздействий.

Рассматривалось распространение на высоте 100 м мгновенного выброса 1000 Ки радионуклида ^{147}Pm и формирование прогностических значений доз на население по оси радиоактивного следа по различным путям облучения с использованием разработанного программного средства и аттестованного программного средства НОСТРАДАМУС.

На рисунке 12 представлены результаты расчета дозовых функционалов за 10 суток с использованием разработанного программного средства и аттестованного программного комплекса НОСТРАДАМУС для различных категорий устойчивости, скоростей ветра и шероховатостей подстилающей поверхности. Приведенные результаты свидетельствуют о корректности системы моделей, заложенных в программном средстве, причем, как и следовало ожидать, на первых 5 километрах гауссова модель дает завышение дозовых воздействий над лагранжевой моделью рассеивания, далее оценки с хорошей точностью совпадают.

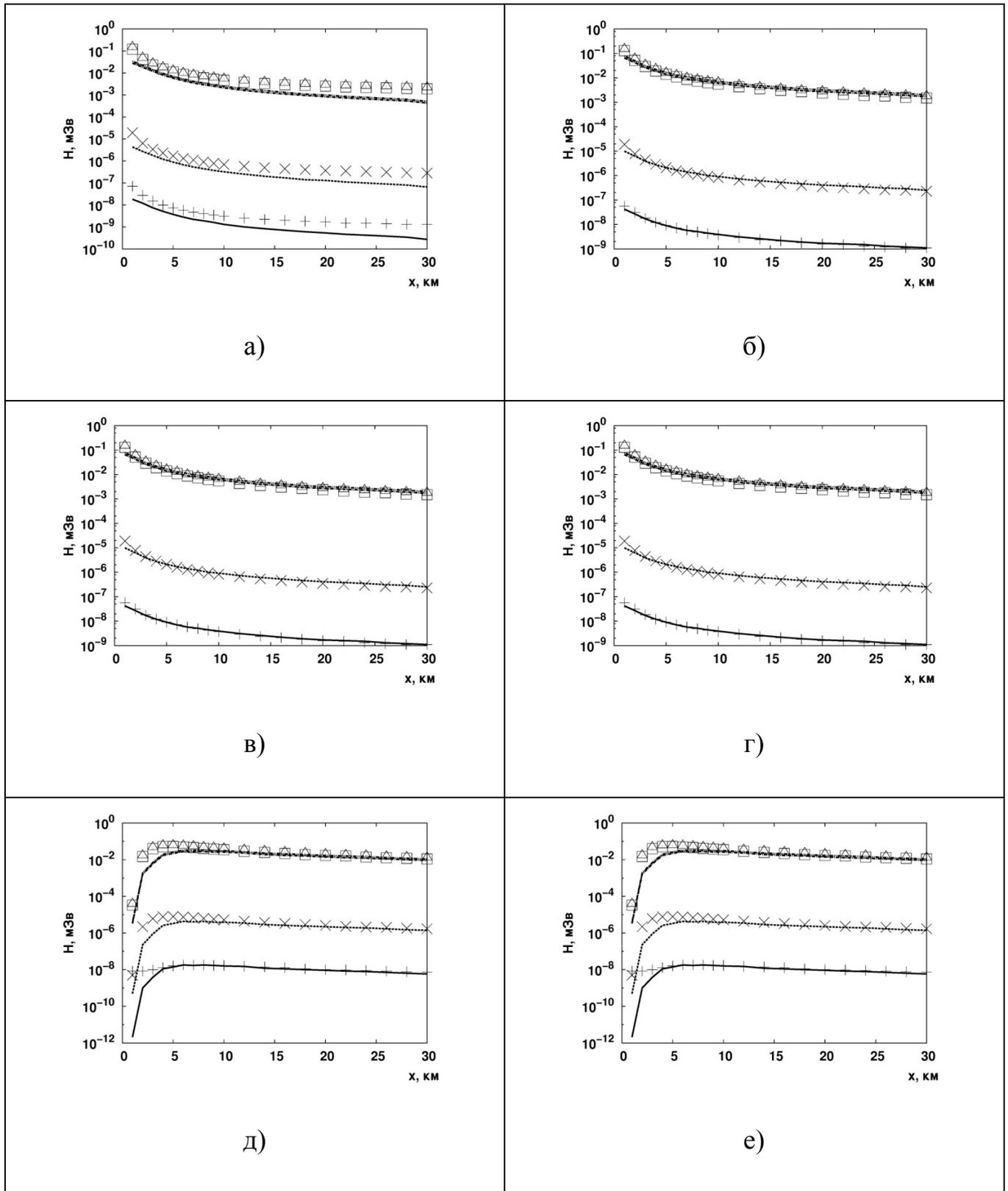


Рисунок 12 – Сопоставление прогностических доз для населения с использованием ПС НОСТРАДАМУС (доза от облака (—), доза от поверхности (---), доза ингаляционная на детей (-·-·-), доза ингаляционная на взрослых (-·-·-·-)) и разработанного программного средства (доза от облака (+), доза от поверхности (×), доза ингаляционная на детей (□), доза ингаляционная на взрослых (Δ)):

категория устойчивости – А, скорость ветра – 1 м/с, шероховатость – 4 м (а);
категория устойчивости – В, скорость ветра – 2 м/с, шероховатость – 1 м (б);
категория устойчивости – С, скорость ветра – 5 м/с, шероховатость – 0.4 м (в);
категория устойчивости – D, скорость ветра – 5 м/с, шероховатость – 0.1 м (г);
категория устойчивости – Е, скорость ветра – 3 м/с, шероховатость – 0.04 м (д);
категория устойчивости – F, скорость ветра – 2 м/с, шероховатость – 0.01 м (е)

Ниже приведены сведения по гипотетическим авариям [128, 129], использовавшимся при проведении противоаварийных тренировок в 2003 г экспертами по РБ ЦТП Кризисного центра и экспертами атомных станций «Концерн Росэнергоатом». Адаптированные данные для расчетов с помощью разработанного программного средства по радионуклидному составу, метеорологическим характеристикам, представлены ниже.

Противоаварийная тренировка на Ленинградской АЭС (19.03.03)

В рамках противоаварийной тренировки на Ленинградской АЭС использовались следующие данные о выбросе: ^{131}I – 47 ПБк, ^{132}I – 58,3 ПБк, ^{133}I – 52,1 ПБк, ^{134}I – 0,265 ТБк, ^{135}I – 11,7 ПБк, ^{134}Cs – 2,6 ПБк, ^{137}Cs – 5,6 ПБк.

Метеорологические параметры брались следующими: класс устойчивости атмосферы по Пасквиллу – D, скорость ветра на высоте флюгера – 5,5 м/с, осадки отсутствуют, шероховатость подстилающей поверхности – 0,1 м. Эффективная высота подъема облака – 50 м.

Распределение эффективной дозы внешнего облучения вдоль оси следа по внешнему облучению было получено с использованием разработанного программного средства и с использованием ПС НОСТРАДАМУС (рисунок 13).

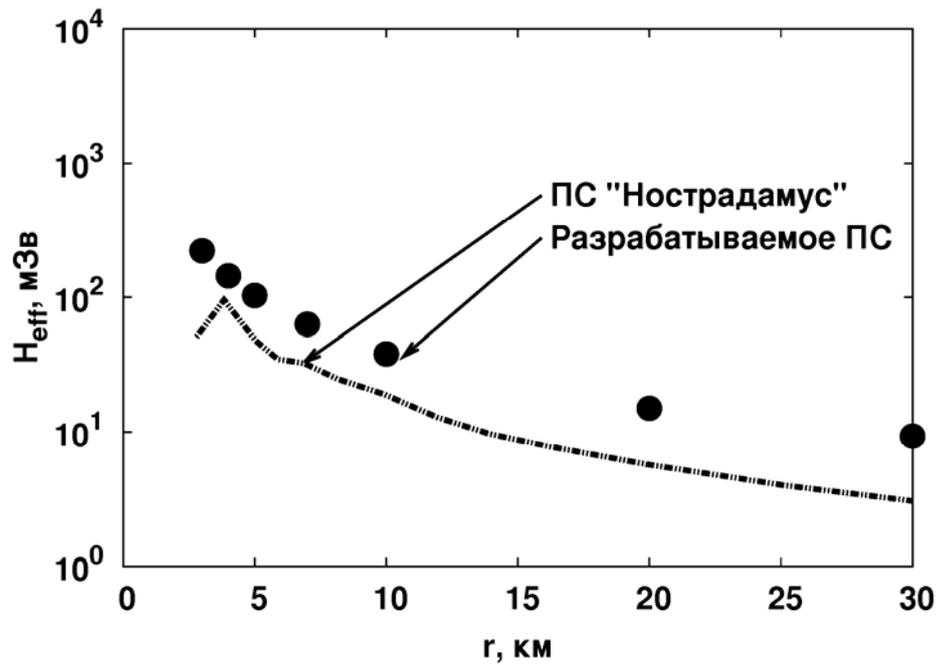


Рисунок 13 – Значения эффективной дозы внешнего облучения, полученные с использованием ПС НОСТРАДАМУС (---) и разработанным программным средством (•)

Дополнительно проведено сравнение расчетов критериев по применению контрмер (согласно НРБ-99/2009). В таблице 15 представлены результаты сопоставления расстояний, на которых следует применять экстренные меры защиты (уровень Б таблицы 6.3 НРБ-99/2009).

Таблица 15 – Расстояния, на которых следует применить экстренные меры защиты по уровню Б [35] (в километрах)

Программные средства	Укрытие	Йодная профилактика		Эвакуация
		дети	взрослые	
ПС НОСТРАДАМУС	12	8	–	–
Разработанное программное средство	15	26	7,5	5

Противоаварийная тренировка на Балаковской АЭС (29.10.03)

При проведении противоаварийной тренировке на Балаковской АЭС использовались следующие данные о выбросе: ^{131}I – 54 ТБк, ^{132}I – 29,7 ТБк, ^{133}I – 88 ТБк, ^{134}I – 29,7 ТБк, ^{135}I – 57 ТБк, ^{134}Cs – 0,59 ТБк, ^{137}Cs – 0,37 ТБк, ^{133}Xe – 8200 ТБк, ^{135}Xe – 790 ТБк, ^{88}Kr – 390 ТБк, ^{87}Kr – 110 ТБк, ^{85m}Kr – 210 ТБк.

Заданные метеорологические параметры: класс устойчивости атмосферы по Пасквиллу – С, скорость ветра на высоте флюгера – 2,0 м/с, осадки отсутствуют, шероховатость подстилающей поверхности – 0,1 м. Эффективная высота подъема облака – 45 м.

На рисунке 14 представлены результаты сопоставления результатов расчетов дозы внешнего облучения за 10 суток разработанным программным средством и с использованием ПС НОСТРАДАМУС.

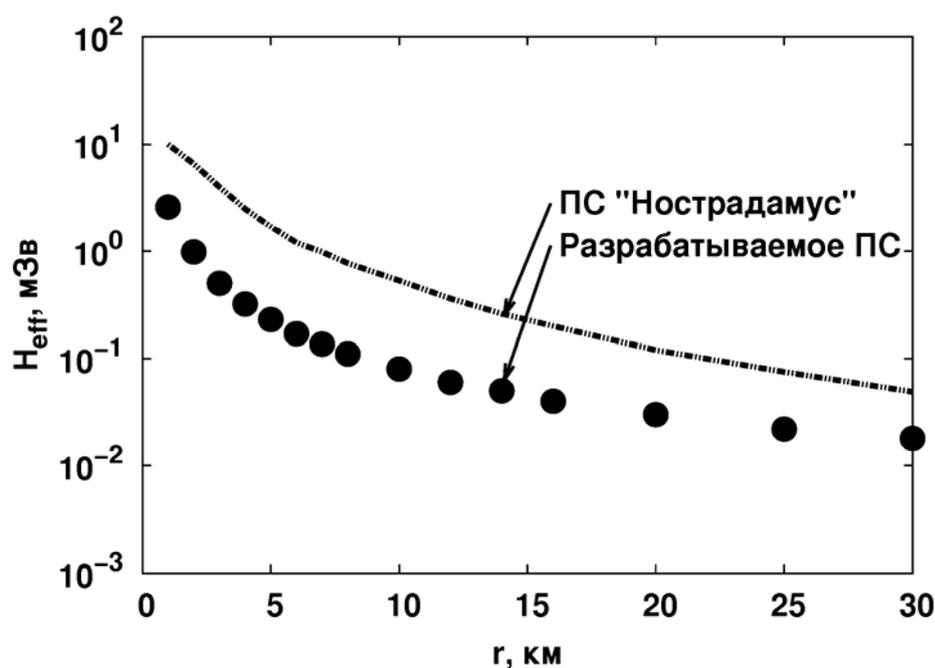


Рисунок 14 – Значения эффективной дозы внешнего облучения, полученные с использованием ПС НОСТРАДАМУС (---) и разработанным программным средством (•)

Проведено сравнение расчетов критериев по применению контрмер (согласно НРБ-99/2009). В таблице 16 представлены результаты сопоставления

расстояний, на которых следует применять экстренные меры защиты (уровень Б таблицы 6.3 НРБ-99/2009).

Таблица 16 – Расстояния, на которых следует применить экстренные меры защиты по уровню А [35] (в километрах)

Программные средства	Укрытие	Йодная профилактика		Эвакуация
		дети	взрослые	
ПС НОСТРАДАМУС	12	8	3,0	3,0
Разработанное программное средство	1,0	1,5	–	–

Противоаварийная тренировка на Ленинградской АЭС (11.11.03)

Приведены следующие данные о выбросе: ^{87}Kr – 1000 ТБк, ^{88}Kr – 1300 ТБк, ^{131}I – 1900 ТБк, ^{133}I – 3600 ТБк, ^{135}I – 3400 ТБк, ^{133}Xe – 5500 ТБк, ^{135}Xe – 1000 ТБк, ^{134}Cs – 6,5 ТБк, ^{137}Cs – 14 ТБк.

Заданные метеорологические параметры: класс устойчивости атмосферы по Пасквиллу – Е, скорость ветра на высоте флюгера – 3,0 м/с, осадки отсутствуют, шероховатость подстилающей поверхности – 0,1 м. Эффективная высота подъема облака – 150 м.

Результаты сопоставления дозы внешнего облучения за 10 суток с результатами расчета с использованием ПС НОСТРАДАМУС представлены на рисунке 15. Следует отметить, что в ближней зоне радиоактивного следа (2 км) существенную роль играет доза внешнего облучения от облака, учитываемая в разработанном программном средстве как суперпозиция дозы в приближении полубесконечного пространства и дозы в приближении линейного источника [35].

Проведен расчет рекомендаций по применению контрмер (согласно НРБ-99/2009). Результаты сопоставления расстояний, начиная с которых следует рассматривать возможность применения защитных мероприятий (уровень А таблицы 6.3 НРБ-99/2009) представлены в таблице 17. Здесь разработанное

программное средство дает результаты, согласующиеся с результатами, полученными экспертами ИБРАЭ РАН.

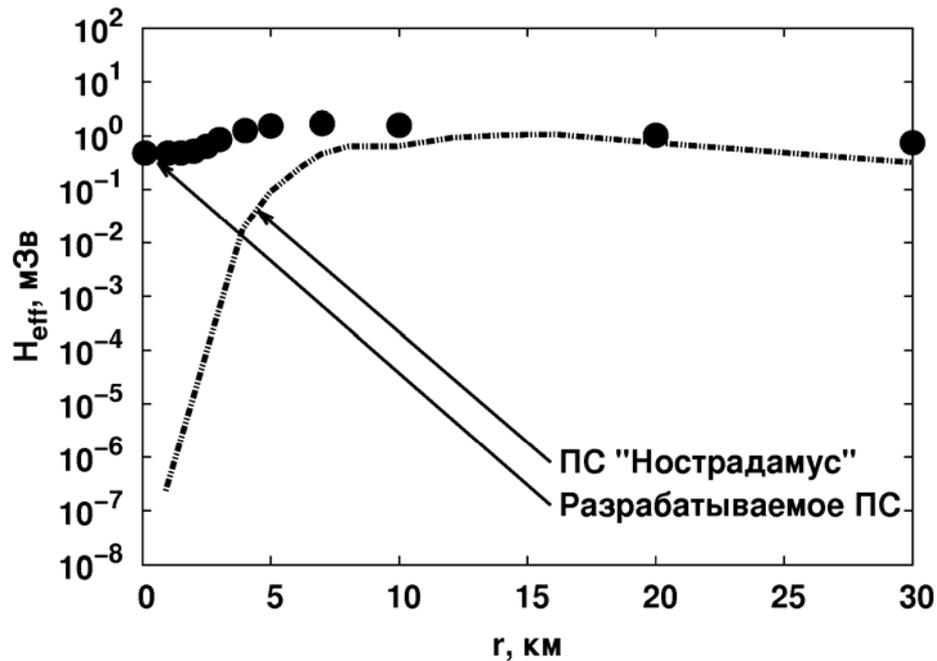


Рисунок 15 – Значения эффективной дозы внешнего облучения, полученные с использованием ПС НОСТРАДАМУС (-·-·-) и разработанным программным средством (•)

Таблица 17 – Расстояния, начиная с которых следует рассматривать возможность применения защитных мероприятий (уровень А таблицы 6.3 НРБ-99/2009), км

Программные средства	Укрытие	Йодная профилактика		Эвакуация
		дети	взрослые	
ПС НОСТРАДАМУС	–	–	–	–
Разработанное программное средство	–	17	–	–

Сопоставление с серией европейских экспериментов

Ниже приведены результаты четырех модельных европейских экспериментов по рассеянию примеси в атмосфере, проведенных для верификации моделей атмосферного переноса [130, 131].

Эксперимент E1

Эксперимент (E1) проводился при следующих параметрах (параметры адаптированы для использования в программном комплексе):

- Трассер Но-166;
- Высота источника - 100 м;
- Интенсивность источника - 0,28 ТБк/сек;
- Время работы источника - 1 час 30 мин;
- Количество пунктов измерения - 6шт;
- Расстояние между источником и пунктами измерения - 5 км;
- Начало интервала измерения - 0 мин;
- Конец интервала измерения - 1 час 50 мин;
- Скорость ветра на высоте флюгера - 1 м/с;
- Класс устойчивости - D;
- Шероховатость - 0,3 м.

Результаты сопоставления расчетных данных, полученных с помощью разработанного программного средства (рисунок 16), с экспериментальными данными и результатами расчетов по наиболее известным европейским моделям приведены на рисунке 17.

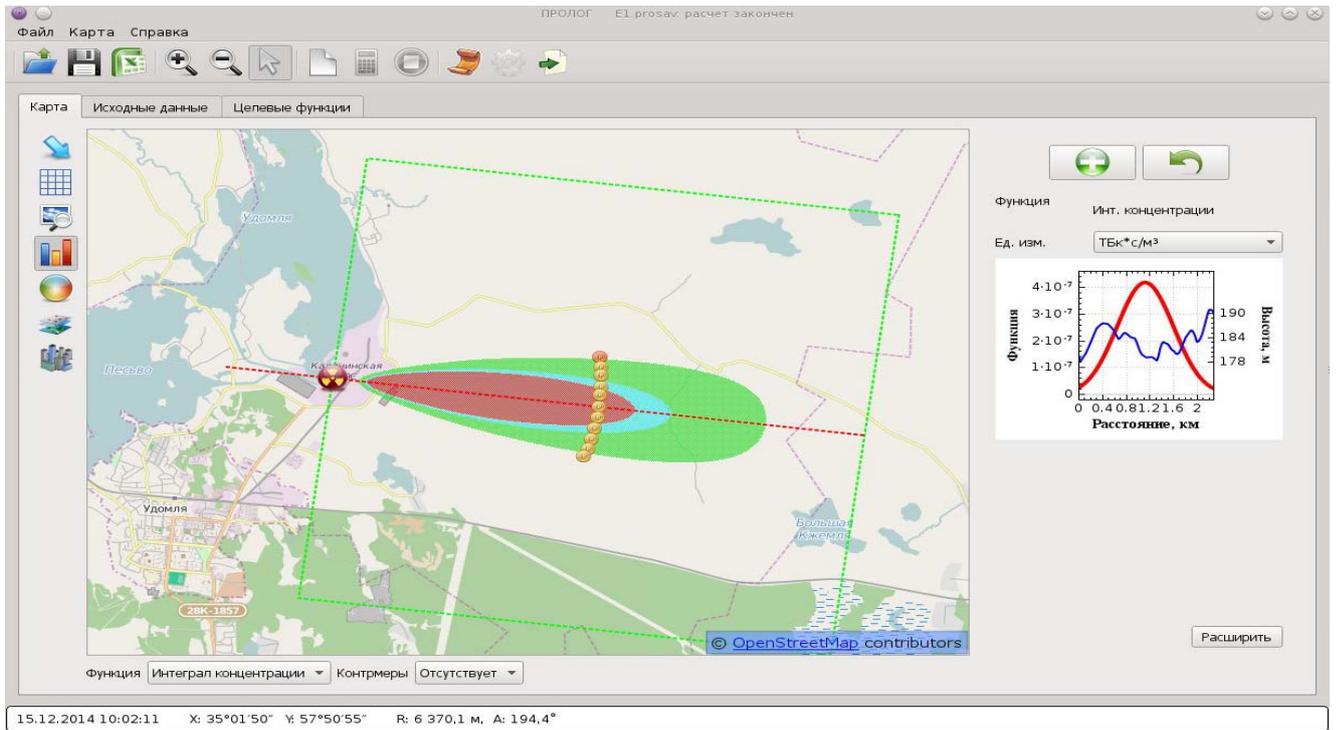


Рисунок 16 – Окно «Карта» с результатами расчета проинтегрированной по времени концентрации в эксперименте E1 [124]

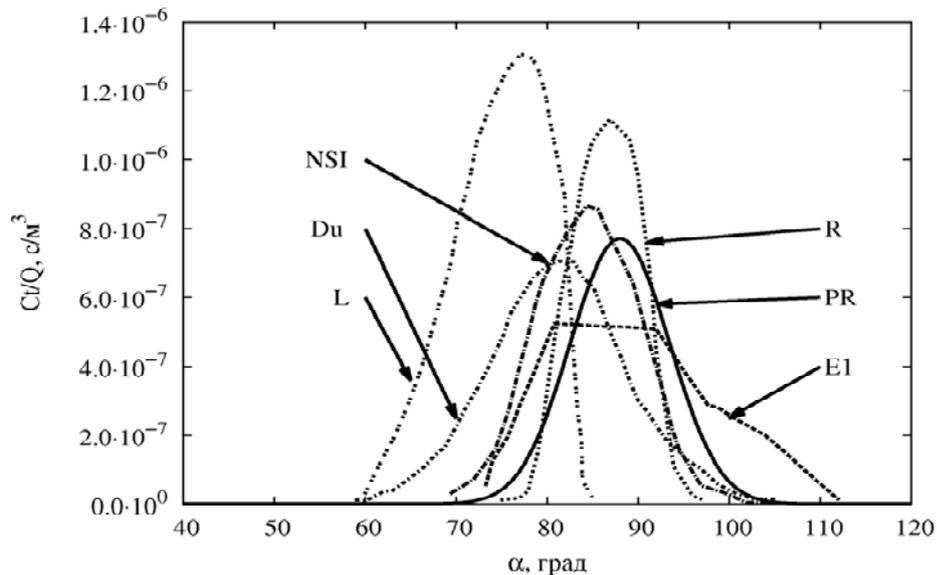


Рисунок 17 – Интеграл приземной концентрации трассера в эксперименте E1 (*PR* – модель разработанного программного средства, *NSI* - модель ИБРАЭ «Нострадамус», *R* - гауссова *puff* модель (Дания), *L* - лагранжева модель *IABG* (Германия), *Du* - эйлерова модель (Германия))

Эксперимент E2

Эксперимент E2 проведен при следующих параметрах (параметры адаптированы для использования в программном комплексе):

- Трассер SF₂Br₂;
- Высота источника – 60 м;
- Интенсивность источника - 2 г/сек;
- Время работы источника - 1 час;
- Количество пунктов измерения -5;
- Расстояние между источником и пунктами измерения - 0,6 км;
- Начало интервала измерения - 20 мин;
- Конец интервала измерения - 50 мин;
- Скорость ветра на высоте 60 м - 6,1 м/с;
- Класс устойчивости - C;
- Шероховатость - 0,3 м.

Результаты сопоставления расчетных данных, полученных с помощью разработанного программного средства (рисунок 18), с экспериментальными данными и результатами расчетов по наиболее известным европейским моделям приведены на рисунке 19. Поскольку в разработанном программном средстве рассчитывается интеграл приземной концентрации, начиная с “нулевого момента времени”, то для сопоставления с экспериментальными данными проводились расчеты интеграла концентрации на момент начала отбора проб и на момент окончания отбора проб и, пользуясь аддитивностью этой величины, проводился расчет сопоставляемой величины.

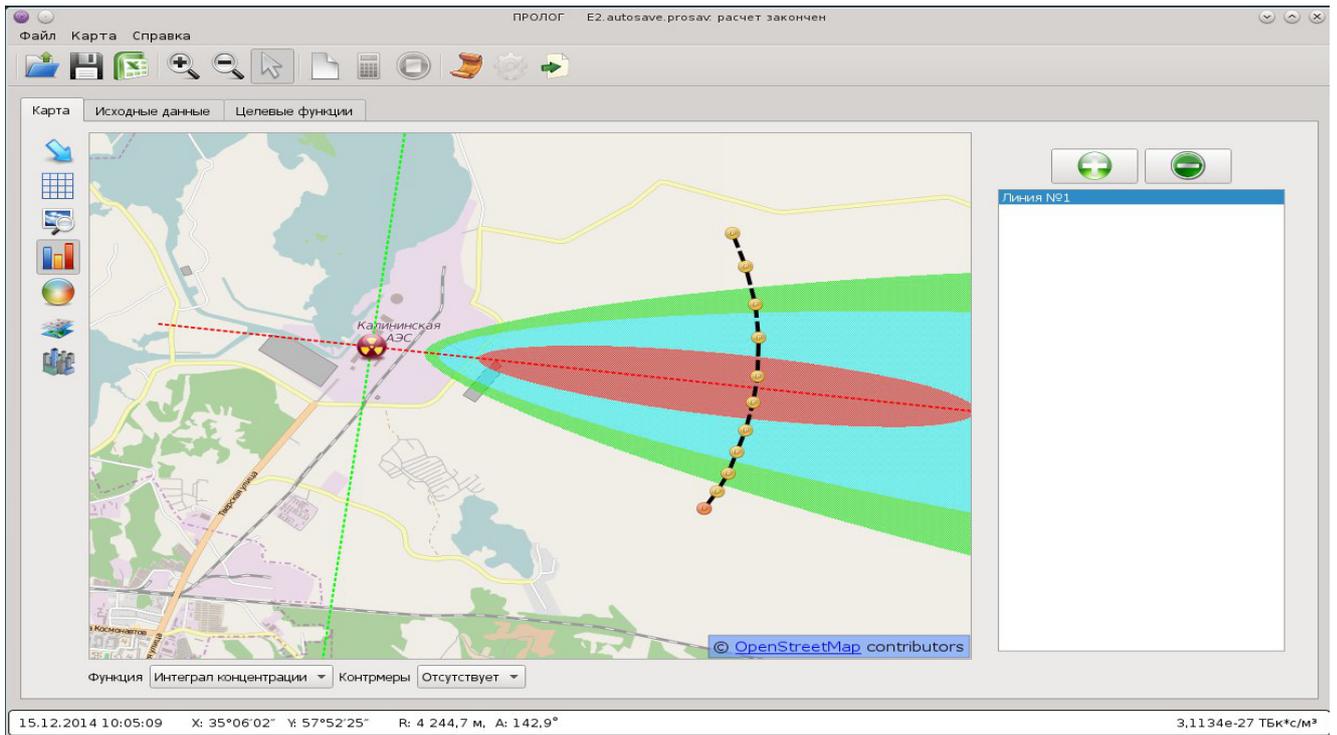


Рисунок 18 – Окно карта с результатами расчета проинтегрированной по времени концентрации в эксперименте E2 [124]

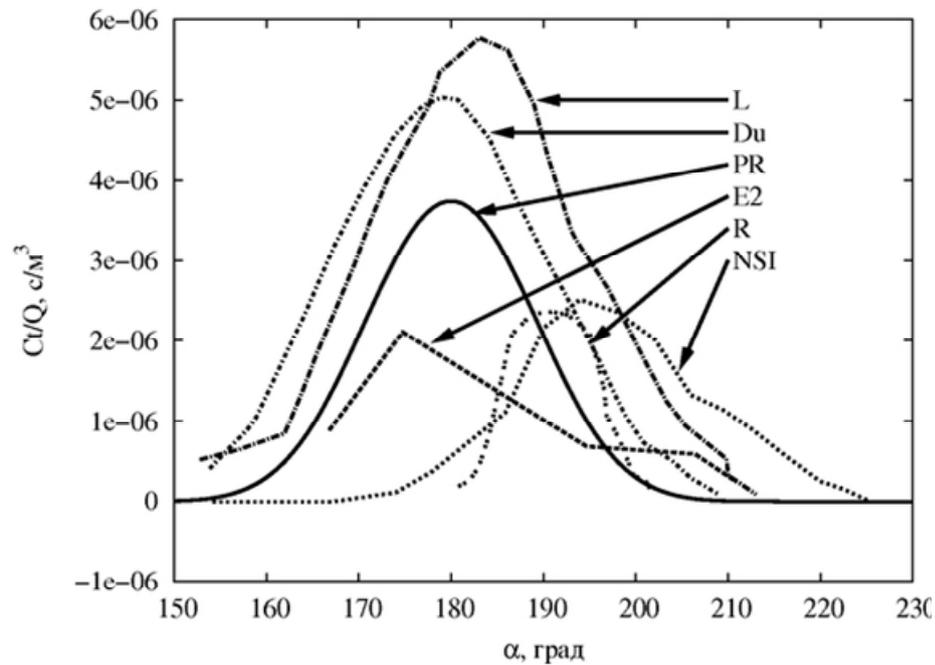


Рисунок 19 – Интеграл приземной концентрации трассера в эксперимент E2 (*PR* – модель разработанного программного средства, *NSI* - модль ИБРАЭ «Нострадамус», *R* - гауссова *puff* модель (Дания), *L* - лагранжева модель *IABG* (Германия), *Du* - эйлерова модель (Германия))

Эксперимент ЕЗ

Эксперимент ЕЗ проводился при следующих параметрах (параметры адаптированы для использования в программном комплексе):

- Трассер SF₆;
- Высота источника – 80 м;
- Интенсивность источника - 2 г/сек;
- Время работы источника - 2 час;
- Количество пунктов измерения - 10;
- Расстояние между источником и пунктами измерения - 3,5 - 4,5 км;
- Начало интервала измерения - 45 мин;
- Конец интервала измерения - 1 час 45 мин;
- Скорость ветра на высоте флюгера - 2,9 м/с;
- Класс устойчивости - Е;
- Шероховатость - 0,3 м.

Результаты сопоставления расчетных данных, полученных с помощью разработанного программного средства (рисунок 20), с экспериментальными данными и результатами расчетов по наиболее известным европейским моделям (поскольку в разработанном программном средстве проводится расчет переноса радиоактивных веществ, для трассировки был выбран Со-60, обладающий много большим периодом полураспада, чем рассматриваемый промежуток времени (таким образом, радиоактивным распадом можно пренебречь)) приведены на рисунке 21. Поскольку в разработанном компоненте ПК рассчитывается интеграл приземной концентрации, начиная с “нулевого момента времени”, то для сопоставления с экспериментальными данными проводились расчеты интеграла концентрации на момент начала отбора проб и на момент окончания отбора проб и, пользуясь аддитивностью этой величины, проводился расчет (за рамками разработанного программного средства) сопоставляемой величины.

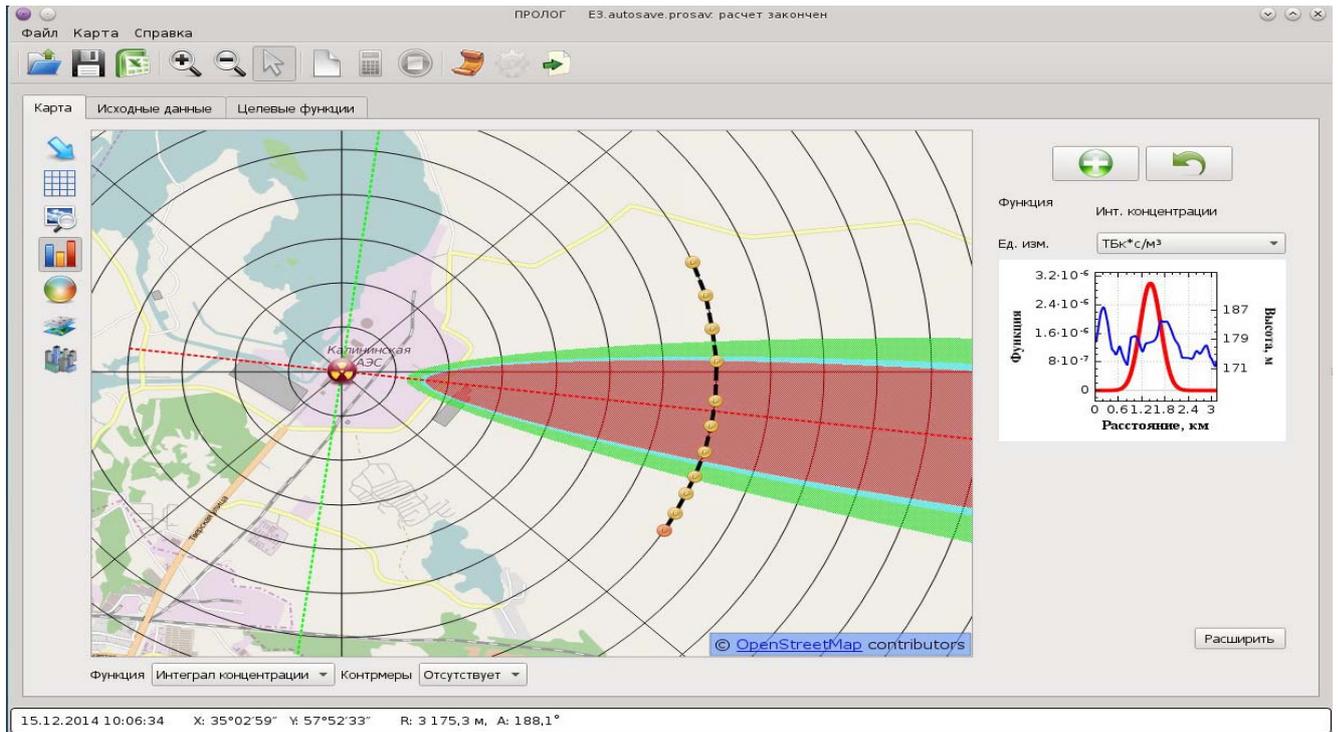


Рисунок 20 – Окно карта с результатами расчета проинтегрированной по времени концентрации в эксперименте E3 [124]

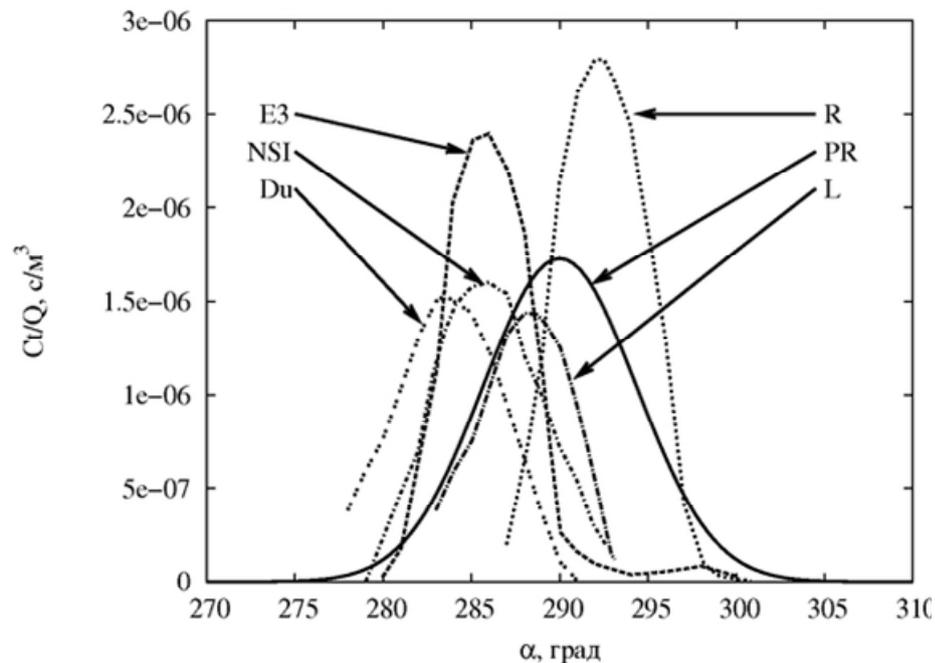


Рисунок 21 – Интеграл приземной концентрации трассера в эксперимент E3 (*PR* – модель разработанного программного средства, *NSI* - модель ИБРАЭ «Нострадамус», *R* - гауссова *puff* модель (Дания), *L* - лагранжева модель *IABG* (Германия), *Du* - эйлерова модель (Германия))

Эксперимент Е4

Эксперимент Е4 проведен при следующих параметрах (параметры адаптированы для использования в программном комплексе):

- Трассер SF₆;
- Высота источника - 115;
- Интенсивность источника - 3 г/сек;
- Время работы источника - 1 час 30 мин;
- Количество пунктов измерения - 20;
- Расстояние между источником и пунктами измерения - 3,6 км;
- Начало интервала измерения - 30 мин;
- Конец интервала измерения - 1 час 30 мин;
- Скорость ветра на высоте флюгера - 4,2 м/с;
- Класс устойчивости - D;
- Шероховатость - 0,3 м.

На рисунке 22 приведены результаты расчета, полученные с помощью разработанного программного средства. Сопоставление с экспериментальными данными и результатами расчетов по наиболее известным европейским моделям представлено на рисунке 23. (поскольку в разработанном программном средстве проводится расчет переноса радиоактивных веществ, для трассировки был выбран Со-60, обладающий много большим периодом полураспада, чем рассматриваемый промежуток времени (таким образом, радиоактивным распадом можно пренебречь)). Поскольку в разработанном программном средстве рассчитывается интеграл приземной концентрации, начиная с “нулевого момента времени”, то для сопоставления с экспериментальными данными проводились расчеты интеграла концентрации на момент начала отбора проб и на момент окончания отбора проб и, пользуясь аддитивностью этой величины, проводился расчет (за рамками разработанного программного средства) сопоставляемой величины.

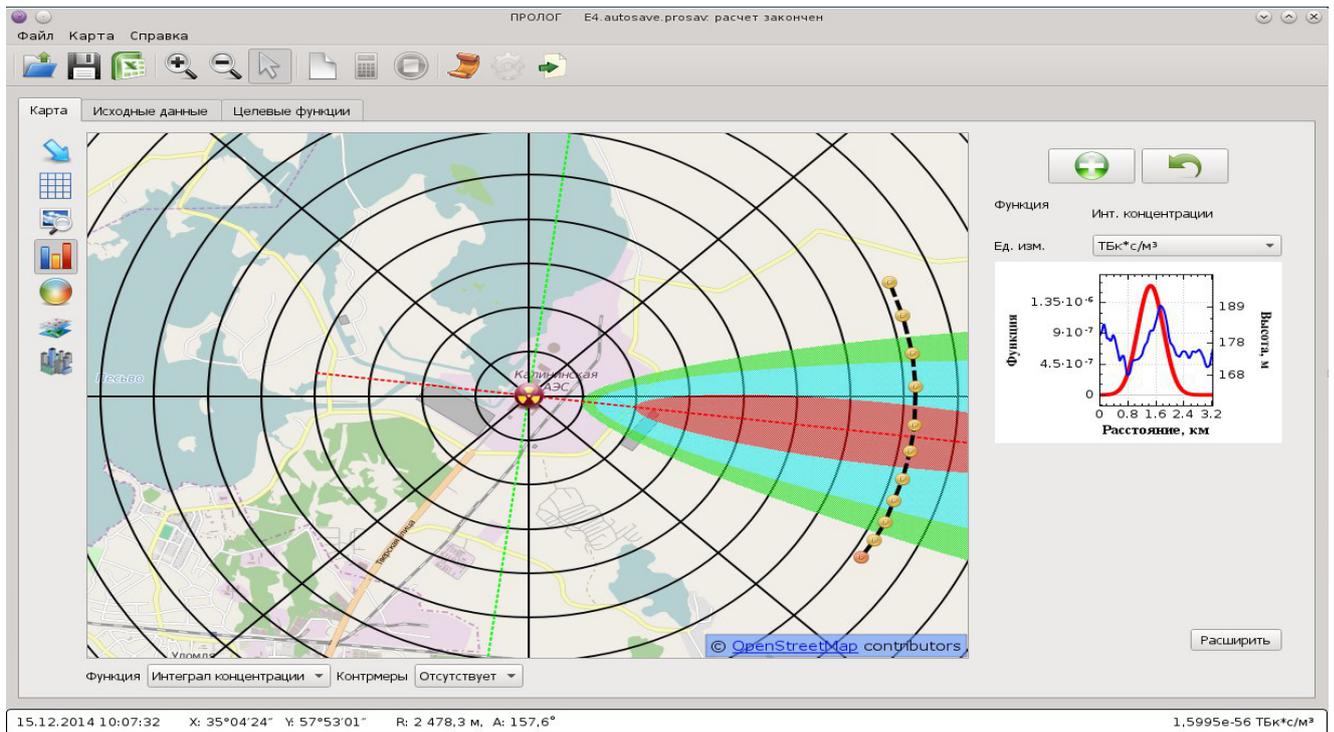


Рисунок 22 – Окно карты с результатами расчета проинтегрированной по времени концентрации в эксперименте E4 [124]

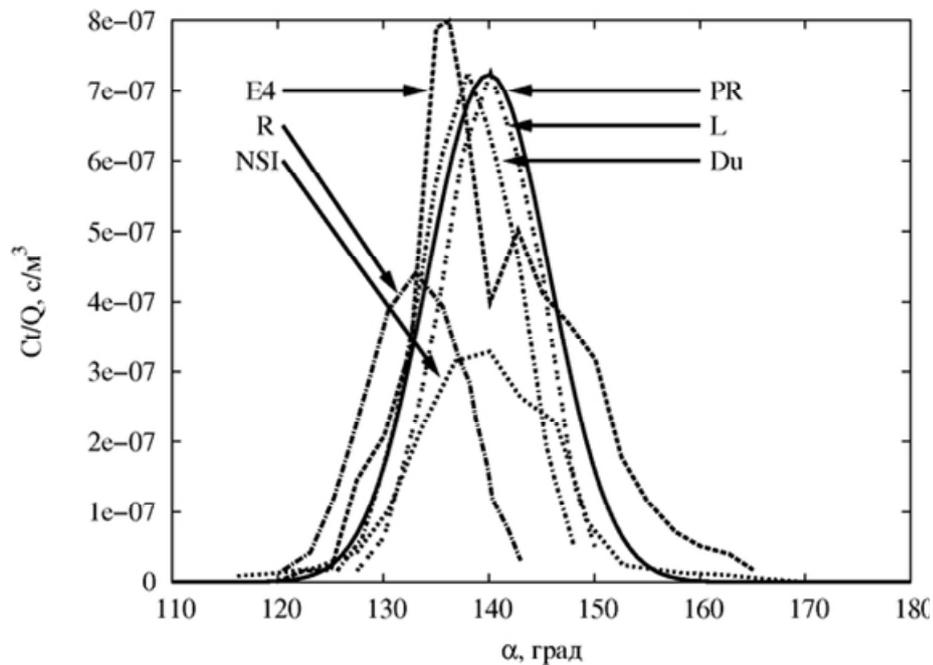


Рисунок 23 – Интеграл приземной концентрации трассера в эксперимент E4 (*PR* – модель разработанного программного средства, *NSI* - модель ИБРАЭ «Нострадамус», *R* - гауссова *puff* модель (Дания), *L* - лагранжева модель *IABG* (Германия), *Du* - эйлерова модель (Германия))

Верификация на данных натуральных измерений при аварии в бухте Чажма

Атомная подводная лодка (ПЛА) первого поколения, вступившая в состав ВМФ в 1965, проходила плановый ремонт на судоремонтном заводе (СРЗ) в б.Чажма. Плановый ремонт окончился 2 августа 1985 г., в результате чего была произведена перезарядка активных зон обеих ядерно-энергетических установок. Однако к этому времени съемный лист не был поставлен на место и реакторный отсек был открыт (срезана верхняя часть легкого и прочного корпуса) [132].

В процессе проверки реакторов на герметичность выявилась неплотность прилегания красномедной прокладки крышки носового аппарата, в связи с чем было принято решение об устранении негерметичности и о подъеме крышки без осушения реактора.

В 11 часов 55 минут 10 августа при подъеме крышки реактора произошло зацепление штока и не санкционированный подъем компенсирующей решетки реактора (основного инструмента управления реактивностью активной зоны реактора), за которым последовали две вспышки самоподдерживающейся цепной реакции (СЦР) деления взрывного типа.

В результате залпового выделения энергии произошло разрушение, выброс внутриреакторных конструкций и паровоздушной смеси, на лодке начался пожар.

Визуально наблюдалась яркая световая вспышка высотой до 6 м. Образовался оранжево-серый дым, поднявшийся на высоту более 20 м. Сформировалось облако, которое стало перемещаться по направлению ветра (рисунок 24). На 12.00 местного времени преобладал юго-восточный ветер скоростью 5 м/с, облачность низкая - 10 баллов, периодическая морось, температура 20°C, давление - 1007 Па. Данные погодные условия соответствуют категории атмосферной устойчивости по Пасквиллу – D.

Сразу же после взрыва в реакторном отсеке начался пожар, который ликвидировали через 4 часа. Горели кабельные трассы, краска, обшивка ПЛА.

Образовавшиеся продукты горения совместно с продуктами ядерного взрыва в виде мелких частиц и шлака стали выпадать на поверхность. Выпадение шлака наблюдалось в радиусе 50 м вокруг аварийной ПЛА.

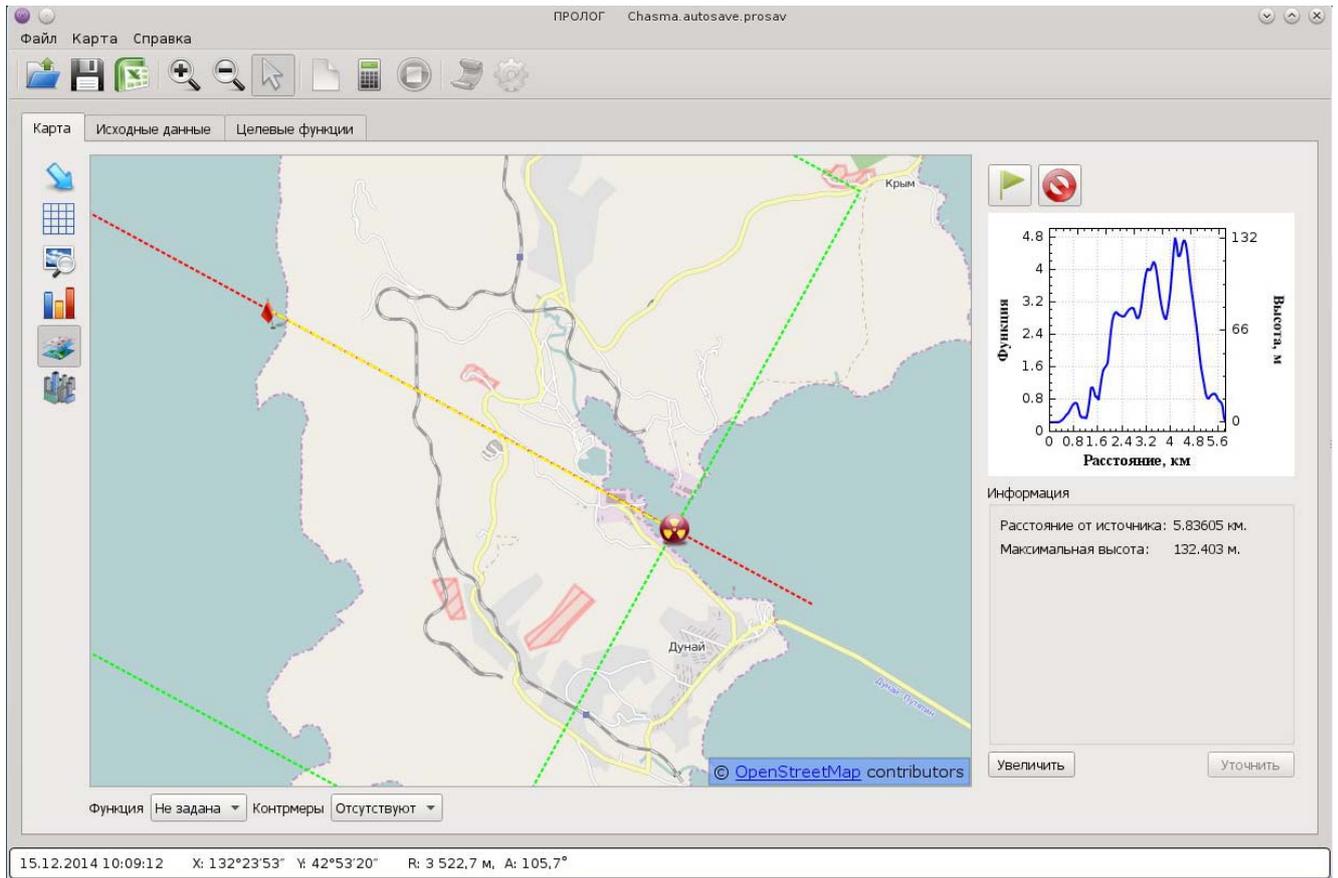


Рисунок 24 – Направление оси следа при аварии в бухте Чажма [124]

СЦР произошла на «свежей» активной зоне, и радионуклидный состав выброса определялся короткоживущими продуктами деления (криптон, ксенон, радионуклиды йода), наработанными при вспышке мощности, и продуктами активации (в основном ^{60}Co) [133, 134].

Некоторые параметры СЦР оценивались в работе [77]. Масса топлива, участвовавшего в СЦР, оценивалась равной примерно 100 кг, общее число делений – 10^{19} (энергетический эквивалент $\sim 3 \cdot 10^8$ Дж). При данном энерговыделении на единицу массы топлива (около 700 кал/г(U)) происходит его разрушение и диспергирование при взаимодействии с теплоносителем на частицы с медианным размером порядка 10 мкм. Основная часть выброса была сосредоточена в облаке паро-газовой смеси массой около 50 кг при начальной температуре около 1800⁰ К. При данных параметрах выброса высота подъема облака составит примерно 350 м (при расчете использовалась модель парового взрыва, заложенная в программный комплекс (рисунок 25)) [135].

Из-за сильной неоднородности подстилающей поверхности (рисунок 26) вдоль оси следа расчеты были скорректированы с учетом данных радарной топографической съемки (srtm) [136].

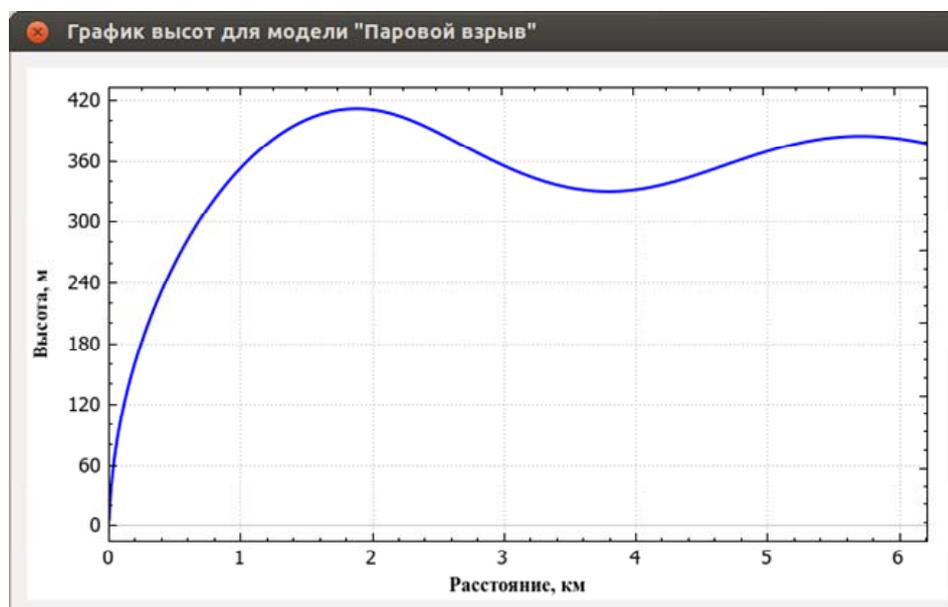


Рисунок 25 – Результаты оценки эффективной высоты подъема программным КОМПЛЕКСОМ

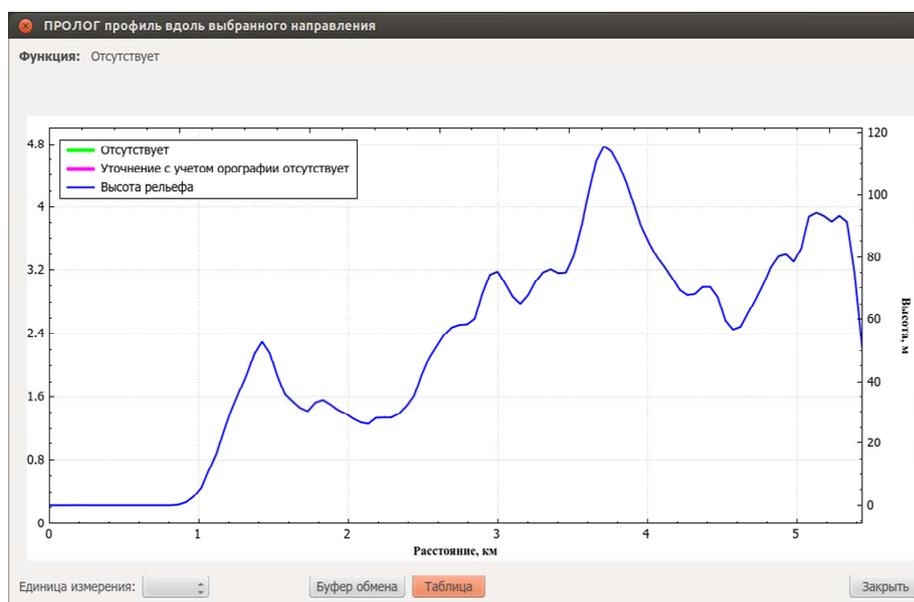


Рисунок 26 – Профиль рельефа по оси следа (по данным SRTM-съемки)

На рисунке 27 приведены результаты расчета программным комплексом в виде графиков по оси следа, выдаваемым программным комплексом в

автоматическом режиме. На рисунке 28 эти результаты отображены в виде графиков с наложенными на них результатами натурных измерений. Как видно, совпадение результатов лежит в пределах погрешности измерений для плотности поверхностных выпадений и пределах точности гауссовой модели для сопоставления по мощности дозы.

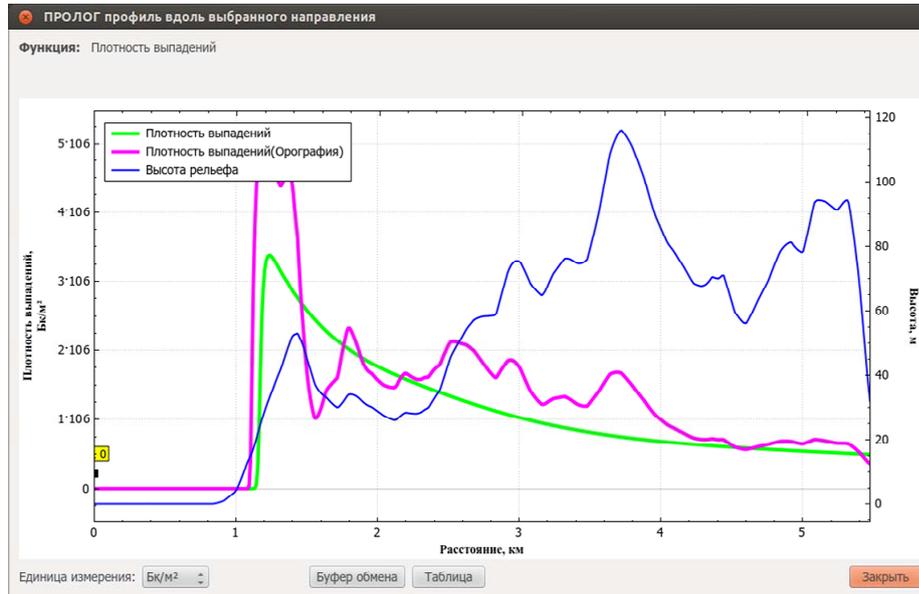


Рисунок 27 – Результаты расчета плотности выпадений

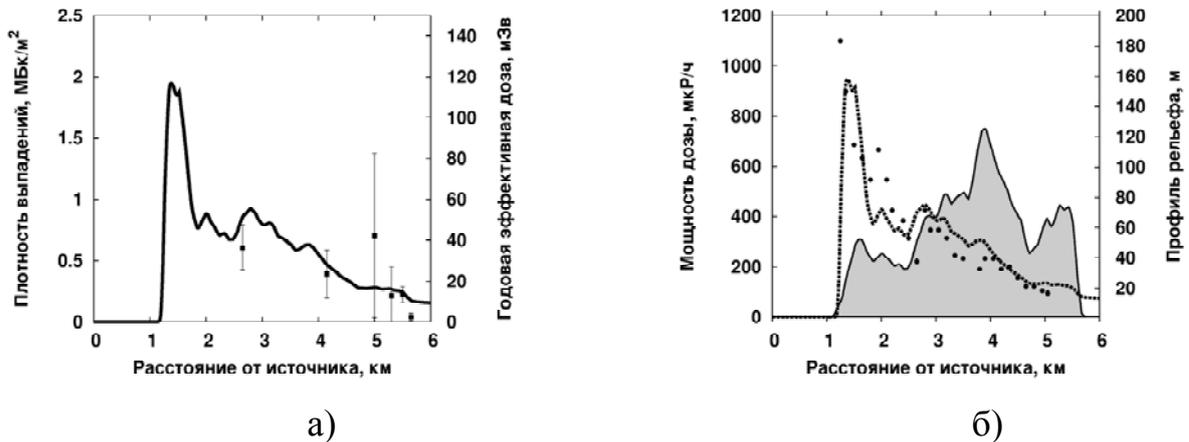


Рисунок 28 – Расчетные (--) и экспериментальные (•) значения плотности поверхностных выпадений(а) $Co-60$ и мощности дозы (б) при аварии в бухте

Чажма

Верификация на данных натуральных измерений при аварии на СХК

В 12 часов 58 минут (по местному времени) 6 апреля 1993 года на радиохимическом заводе Сибирского химического комбината (СХК) произошло разрушение аппарата, в котором производились технологические операции по подготовке уранового раствора к экстракции с залповым выбросом части активности в окружающую среду [137, 138, 139].

По данным об активности уранового раствора в аппарате перед разрушением находилось около 3000 Ки бета-активных продуктов (^{90}Sr , ^{103}Ru , ^{106}Ru , ^{95}Zr , ^{95}Nb) и около 60 Ки альфа-активных продуктов, из которых большая часть приходилась на ^{239}Pu . Разрушение происходило в связи с процессом разложения органической фазы раствора, находившегося в аппарате, при взаимодействии с концентрированной азотной кислотой.

Разрушение аппарата сопровождалось взрывом ограниченного объема парогазовой смеси, выброшенной в аппаратный зал. При аварии в результате взрыва была частично разрушена кровля здания 201 и образовался пролом площадью около 250 м^2 в стене здания с наветренной стороны. Выброс продуктов взрыва произошел через пролом в стене и окна с выбитым стеклом, через разрушенную кровлю, трубу здания 201 и через трубу вентиляционного центра высотой 150 м (зд. 205). Распределение активности между этими источниками не известно.

При апробации программного комплекса на натуральных измерениях бралось два источника (на высоте 150 м с направлением ветра 210 град, и на высоте 30 м в направлении 203). Результаты расчетов плотности выпадений по Ru-106 по срезам на расстояниях 4.5 и 12 км представлены на рисунке 29. Результаты расчета с хорошей точностью (среднеквадратическое отклонение составляет 30%) совпадают с измерениями [97].

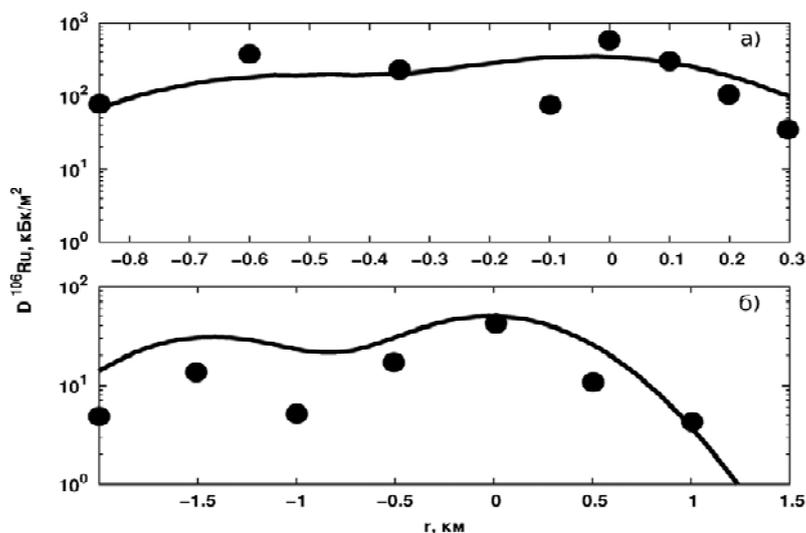


Рисунок 29 – Расчетные (—) и экспериментальные (•) значения плотности поверхностных выпадений Ru-106 при аварии на радиохимическом заводе Сибирского химического комбината (СХК) по срезам следа на расстояниях 4,5 (а) и 12 км (б)

Апробация при анализе безопасности планируемой Южно-Уральской АЭС

Разработанное программное средство использовалось при анализе безопасности при выборе площадки одного из базовых вариантов размещения Южно-Уральской АЭС. Анализ проводился в части атмосферного переноса воды от градирен АЭС и их выпадений в Теченский каскад водоемов (ТКВ). Поскольку если на территорию акватории и водосбора ТКВ попадет более 5% от объема потерь воды АЭС, то возможно повышение водного баланса ТКВ. Оценки проводились в пакетном режиме на основе данных о повторяемости погодных условий в течение года с учетом полидисперсности выброса, где в качестве распределения бралось экспериментальное распределение для капель в устье градирни [119]. На рисунке 30 представлен пример результата расчета дополнительных годовых поступлений воды. Расчеты показали [140], что на фоне среднегодового количества атмосферных осадков дополнительным поступлением от градирен можно пренебречь.



Рисунок 30 – Результаты оценок дополнительных годовых поступлений от выпадений от планируемых градиентов Южно-Уральской АЭС, мм/год
(Картографические данные – Google)

2.4 Выводы по главе 2

Во второй главе разработано ключевое программное средство, необходимое для выработки рекомендаций по применению защитных мероприятий при обосновании радиационной безопасности населения при запроектных радиационных авариях при кратковременных атмосферных выбросах. Для этого были разработаны требования к моделям для интеграции в единую подсистему моделей для расчета атмосферного переноса, дозовых функционалов и критериев применения защитных мероприятий. Так, программное средство включает в себя модели, позволяющие проводить оценки параметров радиационной обстановки на основе минимального количества исходных данных с использованием графического интерфейса пользователя для ввода исходных данных, отображении результатов расчета и обработки результатов расчета, что обеспечивает высокую эффективность работы программного средства как для проведения расчетов при реальных радиационных авариях, так и проведении демонстрационных расчетов последствий гипотетических радиационных аварий при подготовке аварийно-спасательных формирований и персонала служб радиационной безопасности ЯРОО.

Модели программного средства обеспечивают возможность проведения расчетного обоснования радиационной безопасности населения при атмосферных выбросах радионуклидов при запроектных радиационных авариях при различных исходных событиях (взрыв, пожар, выброс радиоактивных аэрозолей, например, при вентилировании контейнента), уточняя проводимые расчеты с учетом топографии местности и отличных от стандартного распределения активности по диаметрам частиц в выбросе распределений (например, полидисперсность с преобладающей грубодисперсной фракцией, характерной для взрывов). Так же в систему моделей введена концепция фиктивного источника, позволяющая моделировать конечные размеры облака в начальный момент времени и зону аэродинамической тени от отдельно стоящего здания.

Разработанный графический интерфейс пользователя позволяет автоматизировать наиболее затратные по времени операции подготовки картографической информации и данных о рельефе и обработки результатов расчетов, что делает программное средство эффективным для решения поставленной задачи.

Работа программного средства верифицирована на данных серии европейских экспериментов по атмосферной дисперсии, предназначенных для верификации моделей атмосферного переноса, путем сопоставления результатов расчета, полученных с использованием аттестованного программного средства НОСТРАДАМУС, в том числе на базе результатов расчетов радиационной обстановки для противоаварийных тренировок, на результатах натурных измерений при радиационных авариях в бухте Чажма 1985 г и СХК 1993 г. Результаты верификации показали соответствие расчетных и измеренных параметров радиационной обстановки со среднеквадратическим отклонением не превышающим 30%.

Таким образом, разработана общая модель (состав, принципы взаимодействия моделей) и программное средство прогнозирования радиационной обстановки и доз облучения населения для выработки

рекомендаций по применению защитных мероприятий при обосновании радиационной безопасности населения при запроектных радиационных авариях.

3 РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО СРЕДСТВА ДЛЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ АТМОСФЕРНОГО ВЫБРОСА

3.1 Методика восстановления параметров радиационной обстановки

В главе 1 настоящей диссертационной работы были определены основные методы и способы контроля и мониторинга радиационной обстановки, на основе чего было показано, что на ранней фазе развития аварии доступны результаты измерений мощности дозы и плотности поверхностных выпадений по наиболее значимым радионуклидам. За счет использования датчиков АСКРО может быть доступна динамика мощности дозы, позволяющая отследить приход облака, его прохождение над детектором, распад короткоживущих радионуклидов. Поскольку выбранная система моделей не позволяет корректно описывать временную динамику прохождения облака на начальной стадии, для решения задачи восстановления параметров атмосферного выброса будут рассматриваться показания датчиков АСКРО после прохождения облака и распада большинства короткоживущих радионуклидов с периодами полураспада порядка нескольких минут или менее. Таким образом, будем полагать, что имеются точечные данные по мощности дозы и плотность поверхностных выпадений для каждого радионуклида, сделанные в различных точках пространства на различные моменты времени после выброса $\vec{x} = (x_1, x_2, \dots, x_N)^T$.

В силу того, что в различных ситуациях параметры атмосферного выброса могут быть разными (рассматривается задача восстановления неизвестных параметров модели, перечень и количество которых не зафиксировано жестко), то восстановление должно быть адаптивным.

К основным параметрам, которые можно восстанавливать, относятся:

- блок метеорологических параметров;
 - категория устойчивости атмосферы;
 - направление ветра;
 - интенсивность осадков;
 - шероховатость подстилающей поверхности;

- блок оценки высоты подъема облака;
 - высота подъема облака;
 - ширина и высота облака (для расчета параметров виртуального источника);
- блок выбора радионуклидов
 - активность радионуклидов в выбросе.

В случае выхода радионуклидов в атмосферу вследствие взрыва важнейшим параметром является распределение активности по размерам частиц в выбросе [95]. Имеется несколько блоков восстанавливаемых параметров, описывающих различные типы полидисперсного распределения:

- блок монодисперсного распределения:
 - диаметр;
 - плотность;
 - температура;
- блок полидисперсного распределения (логнормальное распределение) [96]:
 - плотность;
 - температура;
 - максимальное значение диаметра;
 - активностный медианный аэродинамический диаметр (АМАД);
 - среднее геометрическое отклонение (СГО);
- блок полидисперсного распределения (паро-воздушное распределение) [142, 119, 77]:
 - температура;
 - максимальное значение диаметра;
- блок пользовательского полидисперсного распределения (произвольное распределение) [95]:
 - набор диаметров и их доли в общем выбросе.

Следует отметить, что фактическое число оцениваемых параметров не должно превышать число измерений в силу того, что задача в этом случае

становится некорректной. Также необходимо отметить, что скорость ветра на высоте выброса в рамках использования гауссовой модели не восстанавливается одновременно с активностью и обычно в литературе объединяется в единый параметр с активностью [143]. В рамках разрабатываемого программного средства будет восстанавливаться либо скорость ветра, либо активность выброса, которую, как было ранее отмечено, можно оценить исходя из результатов расчета с использованием тяжелоаварийных кодов, либо по соотношениям между радионуклидами, вычисленных по таблицам с интегральными характеристиками облученного ядерного топлива [102], либо исходя из исходного радионуклидного состава ОЯТ. При использовании соотношений между активностями радионуклидов выход в атмосферу для каждого радионуклида считается пропорционально с сохранением этих соотношений в пределах физико-химической группы радионуклидов, состав которой определяется в соответствии с классификацией расчетного кода MELCOR[100].

Ниже представлена методика восстановления параметров атмосферного выброса, полученная путем адаптации совокупности методов для оценивания параметров к рассматриваемой задаче [144].

В основе методики лежит метод нелинейного регрессионного анализа с использованием последовательного байесового оценивания для задачи восстановления параметров атмосферного выброса [110], дополненный методами повышения устойчивости задачи и устранения некорректности поставленной задачи [145].

Первым шагом необходимо подготовить предварительные оценки параметров модели $\vec{a} = (a_1, a_2, \dots, a_p)^T$ и диапазоны возможного изменения уточняемых параметров. Так, всегда можно определить верхние и нижние границы для всех параметров атмосферного выброса, исходя из данных измерений и общих физических соображений.

В самом консервативном варианте радионуклидный состав можно определить, исходя из данных по начальному радионуклидному составу ОЯТ или

наработки за кампанию для РУ. Высота подъема облака, исходя из ограничений выбранной модели, не может превышать высоту пограничного слоя атмосферы. Использование таких ограничений позволяет сузить область поиска решений и частично устранить некорректность задачи, связанную с не единственностью решений, превращая задачу безусловной минимизации функционала в задачу минимизации с ограничениями [146].

Пример:

Выброс из вентиляционной трубы, расположенной на промплощадке АЭС. Высота трубы известна, однако вследствие перегрева и начального импульса поднялось на некоторую высоту, которая, соответственно, не ниже высоты трубы, а верхняя граница не превышает две высоты трубы (например, визуально). С использованием метеомачты определены направления ветра на разных высотах, которые различны по времени и высоте, по этим данным можно определить минимальное и максимальное значение. Состав выброса и активность радионуклидов в выбросе может быть оценена по данным автоматизированной системы радиационного контроля (АСРК) АЭС. Остальные параметры известны:

- *стратификация атмосферы (может быть определена исходя из данных о профиле температуры по высоте);*
- *скорость ветра на высоте 10 м;*
- *тип и интенсивность осадков;*
- *шероховатость подстилающей поверхности;*
- *координаты трубы;*
- *радионуклидный состав.*

Таким образом, определены неизвестные параметры (эффективная высота подъема облака и направление ветра), их априорные значения и границы варьирования для повышения устойчивости решения задачи.

Следующим шагом проводится разбиение на серии (для того чтобы избежать потери данных при свертке всех измерений в единый функционал)[110].
Серии представляют собой блоки измерений, сгруппированных по типу

измерения (мощность дозы/плотность поверхностных выпадений), по измеряемым радионуклидам для спектрометрического измерения плотности поверхностных выпадений (измерения плотности поверхностных выпадений для разных радионуклидов относятся к разным сериям). При большом количестве исходных данных дополнительно проводится разбиение по количественному принципу. Поскольку значения измерений на оси следа и на периферии могут отличаться на несколько порядков, то логичным является их отнесение к разным сериям (вклад в итоговый функционал от измерений на периферии намного меньше, чем вклад от измерений на оси следа), поэтому если измерение отличается более чем на 10^5 от среднего по серии, то это измерение следует рассматривать в другой серии). Таким образом, измерения в области оси радиоактивного следа отделяются от измерений на периферии (число измерений в получившихся сериях не должно быть меньше чем число восстанавливаемых параметров). Первыми ставятся серии с измерениями плотности поверхностных выпадений.

Далее все восстанавливаемые параметры разбиваются на частные (влияющие только на расчеты в пределах выбранной серии и общие, влияющие на расчеты для всех серий). В данном случае общие параметры – все параметры кроме активностей радионуклидов в выбросе a_1, \dots, a_r , а частные – активности радионуклидов a_{k+1}, \dots, a_p (на основе результатов осаждения на подстилающую поверхность вычисляется либо плотность поверхностных выпадений радионуклида, либо мощность дозы как свертка плотностей поверхностных выпадений и соответствующих дозовых коэффициентов).

Пример:

Датчиками АСКРО в зоне наблюдения зафиксировано превышение значений мощности дозы над фоновыми значениями. Проводится обработка этих данных с целью получения значений мощности дозы после прохождения радиоактивного облака. Также в зоне наблюдения работают группы радиационного контроля, которые проводят отбор проб и измеряют значения мощности дозы и проводят спектрометрический анализ плотности поверхностных выпадений в точках по

маршруту движения группы. Все измерения имеют погрешность. Измерения мощности дозы и плотности выпадений распределяются в отдельные серии. Одна из серий измерения мощности дозы. Если есть спектрометрические измерения плотности поверхностных выпадений, то добавляется еще N серий, соответствующих измерениям для каждого радионуклида. Если измерений много, то полученные серии дополнительно дробятся по количественному признаку (но итоговое количество измерений в серии не должно быть меньше числа восстанавливаемых параметров). Серии выстраиваются в следующем порядке:

плотность поверхностных выпадений;

мощность дозы.

Таким образом, получены измерения мощности дозы на местности и плотности поверхностных выпадений радионуклидов с погрешностями измерений в зоне наблюдения. Все параметры разбиваются на общие (все уточняемые параметры кроме активностей радионуклидов) и частные (активности радионуклидов в выбросе).

Далее проводится минимизация функционала аналогичного, применяемому в методе наименьших квадратов, для первой серии:

$$Q(\vec{a}) = S(\vec{a}) = \sum_{i=1}^N w_i^2 (g_i - f_i)^2 \quad (70)$$

где $w_i^2 = 1/\sigma^2$ - набор весов, известных для каждой точки наблюдений (берется в соответствии с погрешностью измерений с дисперсией σ^2 в каждой точке (погрешность измерений мощности дозы определяется приборной погрешностью дозиметра, погрешность измерений плотности поверхностных выпадений определяется приборной погрешностью спектрометра и погрешностью при обработке спектра), g_i - результаты измерений в точках серии (может быть либо мощность дозы, либо плотность поверхностных выпадений радионуклида из списка определенного в ходе анализа спектра), f_i - результаты расчета с использованием модели. Таким образом, функционал (70) можно переписать следующим образом:

для плотности поверхностных выпадений:

$$Q(\vec{a}) = S(\vec{a}) = \sum_{i=1}^N w_i^2 (g_i - D_s(x_i, y_i, t_i))^2, \quad (71)$$

где $D_s(x_i, y_i, t_i)$ определяется во всех точках серии в соответствии с формулами (20) и (21) для радионуклида текущей серии, и для мощности дозы:

$$Q(\vec{a}) = S(\vec{a}) = \sum_{i=1}^N w_i^2 (g_i - \dot{H}_s^{ext}(x_i, y_i, t_i))^2, \quad (72)$$

где мощность дозы внешнего облучения от поверхностных выпадений $\dot{H}_s^{ext}(x_i, y_i, t_i) = B_s \cdot k_{\text{Э}} \cdot D_s(x_i, y_i, t_i)$, интеграл от которой соответствует формуле (60).

Минимизация функционала (70) для всех серий проводится с использованием информационной матрицы Фишера [148], которая в случае отсутствия дополнительных ограничений описывает форму n -мерного эллипсоида области допустимых оценок:

$$A_{a_k a_l} = \frac{1}{2} \frac{\partial^2 Q(\vec{a})}{\partial a_k \partial a_l}, \quad k, l = 1, \dots, p \quad (73)$$

В случае минимизации методом наименьших квадратов выражение (73) можно переписать в виде:

$$\mathbf{A} = \mathbf{V}^T \mathbf{V}; \quad (74)$$

где \mathbf{V} - матрица $p \times N$, называемая функцией рассеяния точки (ФРТ) [149], элементы которой определяются выражением [110]:

$$V_{a_k i} = w_i \frac{\partial f(x_i, \vec{a})}{\partial a_k} \quad (75)$$

При этом матрица \mathbf{A} для общих и частных параметров может быть записана в следующем виде:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_{00} & \mathbf{A}_{01} \\ \mathbf{A}_{01}^T & \mathbf{A}_{11} \end{bmatrix}, \quad (76)$$

где \mathbf{A}_{00} соответствует общим параметрам.

В данной работе рассматривается квазилинейный подход к проблеме оценки точности восстановления параметров регрессионной модели. Так в линейном

приближении (линеаризовать модель можно простым разложением функционала в точке в ряд) ковариационная матрица может быть получена в следующем виде:

$$\mathbf{C} = s^2 \mathbf{A}^{-1} \quad (77)$$

где $s^2 = \frac{S(\vec{a})}{N-p}$ - значение взвешенной дисперсии для текущей серии, а p - число

неизвестных параметров. Исходя из этого, \mathbf{F} -матрица строится в виде:

$$\mathbf{F} = \frac{1}{s^2} \mathbf{A} \quad (78)$$

Таким образом, в результате минимизации функционала (70) для первой серии имеется оценка общих параметров и активности радионуклида (если серия построена на измерениях плотности поверхностных выпадений) или активностей всех радионуклидов в выбросе (если серия составлена на основе данных измерений мощности дозы), оценка взвешенной дисперсии для серии и число степеней свободы, определяемое как число измерений минус число оцениваемых параметров $N_f = N - p$.

Обработка последующих серий проводится с учетом оценок на предыдущей серии, при этом априорные значения параметров новой серии берутся равными апостериорным значениям параметров предыдущей серии, в противном случае – априорные значения при задании исходных данных для расчета, априорная оценка дисперсии полагается равной апостериорной для предыдущей серии. Априорная информационная матрица строится следующим образом:

$$\mathbf{H} = \frac{1}{s^2} \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{A}} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix}, \quad (78)$$

где $\tilde{\mathbf{A}}$ имеет размерность $r \times r$, соответствующую количеству общих параметров в расчете. Ее можно вычислить в соответствии с (76) следующим образом [110]:

$$\tilde{\mathbf{A}} = \mathbf{A}_{00} - \mathbf{A}_{01} \mathbf{A}_{11}^{-1} \mathbf{A}_{01}^T \quad (79)$$

априорное число степеней свободы N_0 равно $N - N_f - p + r$, где N_f - число степеней свободы предыдущей серии, p - число оцениваемых параметров для

текущей серии. В соответствии с этим функционал для текущей серии строится в виде [147]:

$$Q(\vec{a}) = S(\vec{a}) + s_0^2 \left[N_0 + (\vec{a} - \vec{b})^T \mathbf{H}(\vec{a} - \vec{b}) \right]; \quad (80)$$

где s_0^2 - априорная оценка взвешенной дисперсии, N_0 - априорное число степеней свободы для предыдущей серии, \mathbf{H} - \mathbf{F} -матрица для общих элементов, построенная в квазилинейном приближении.

Так в соответствии с (78)-(80) проводится обработка всех серий. Таким образом, после выполнения процедуры оценок для всех серий будут получены оценки параметров, входящих в используемую модель, и оценки дисперсий этих параметров. На основе этих данных строятся оценки результатов экстраполяции модели для точек области, где проводится анализ радиационной обстановки [110].

Минимизация функционала. Помимо ошибок измерения плотности поверхностных выпадений и мощности дозы (приборная погрешность, локальные неоднородности) также присутствует и точность модели (если все параметры заданы правильно и не нарушены условия применимости моделей, то точность прогнозирования оценивается в пределах фактора 2-3 от измеряемого значения), поэтому на основе данных работы [146] для повышения устойчивости вводится стабилизирующий член в функционалы (71), (80):

$$Q(\vec{a}) = S(\vec{a}) + \frac{\lambda}{2} \vec{a}^T \vec{a}, \quad (81)$$

В соответствии с рекомендациями работы [110] минимизация функционала (81) проводится с использованием алгоритма Левенберга-Маквардта с автоматическим выбором параметра регуляризации λ [111], обладающего по сравнению с методом Гаусса-Ньютона высокой скоростью и гарантированной сходимостью.

Согласно работе [149] степень определенности параметра a_k (полагая неопределенности остальных параметров равными нулю) можно оценить по формуле:

$$a_k = a_k \pm \left(\frac{2\varepsilon}{A_{a_k a_k}} \right)^{1/2} \quad (82)$$

где погрешность определяется как корень из диагональных элементов ковариационной матрицы. ε - точность определения минимизируемого функционала (80), которую можно оценить исходя из значений неопределенности результатов измерений.

Таким образом, определяется в каких пределах можно варьировать тот или иной параметр, оставаясь в приемлемой области оценок, которые ограничены погрешностью измерений [150]. Данный подход позволяет также определять масштабы шкалы варьирования параметров задачи, поскольку в случае минимизации градиентными методами для ускорения сходимости проводится коррекция шага.

Плохая определенность параметра может быть вызвана либо недостаточностью количества данных - тогда следует проводить варьирование наиболее значимых параметров задачи, ожидая поступление новых результатов; либо это свойство присуще плану - тогда появляются критерии для выбора стратегии пробоотбора; либо это недостаток используемой модели. Ответ на этот вопрос дает спектр собственных значений λ информационной матрицы Фишера, где отношение максимального собственного значения матрицы (73) к минимальному называется числом обусловленности (чем больше это число, тем меньшую точность имеет решение системы уравнений), а величина $(2\varepsilon/\lambda_k)^{1/2}$ устанавливает длину полуосей многомерного эллипсоида неопределенностей. Таким образом, в случае малого количества измерений и большого количества неопределённых параметров осуществляется выборка по значимости оцениваемых параметров с последующей фиксацией параметров с малой значимостью.

3.2 Разработка архитектуры программного средства для восстановления параметров атмосферного выброса

На основе разработанной в разделе 1 методики восстановления параметров атмосферного выброса в данном разделе разрабатывается состав и принцип взаимодействия моделей в составе программного средства. Поскольку модели атмосферной дисперсии программного средства, разработанного в главе 2, построены в виде динамически типизированных библиотек, то их можно использовать и для данного программного средства, при этом не требуется использование дозиметрических моделей, поскольку рассматривается два вида измерений. Также база данных по свойствам радионуклидов и дозовым коэффициентам может использоваться без изменений. На рисунке 31 представлена структурная схема программного средства.

Здесь основными новыми элементами являются графический интерфейс пользователя, основанный на использовании средств кроссплатформенной разработки приложений с графическим интерфейсом и геоинформационной системой и реализующий функции ввода и отображения данных, инструменты для работы с результатами расчета и расчетный модуль, реализующий методику восстановления параметров атмосферного выброса.

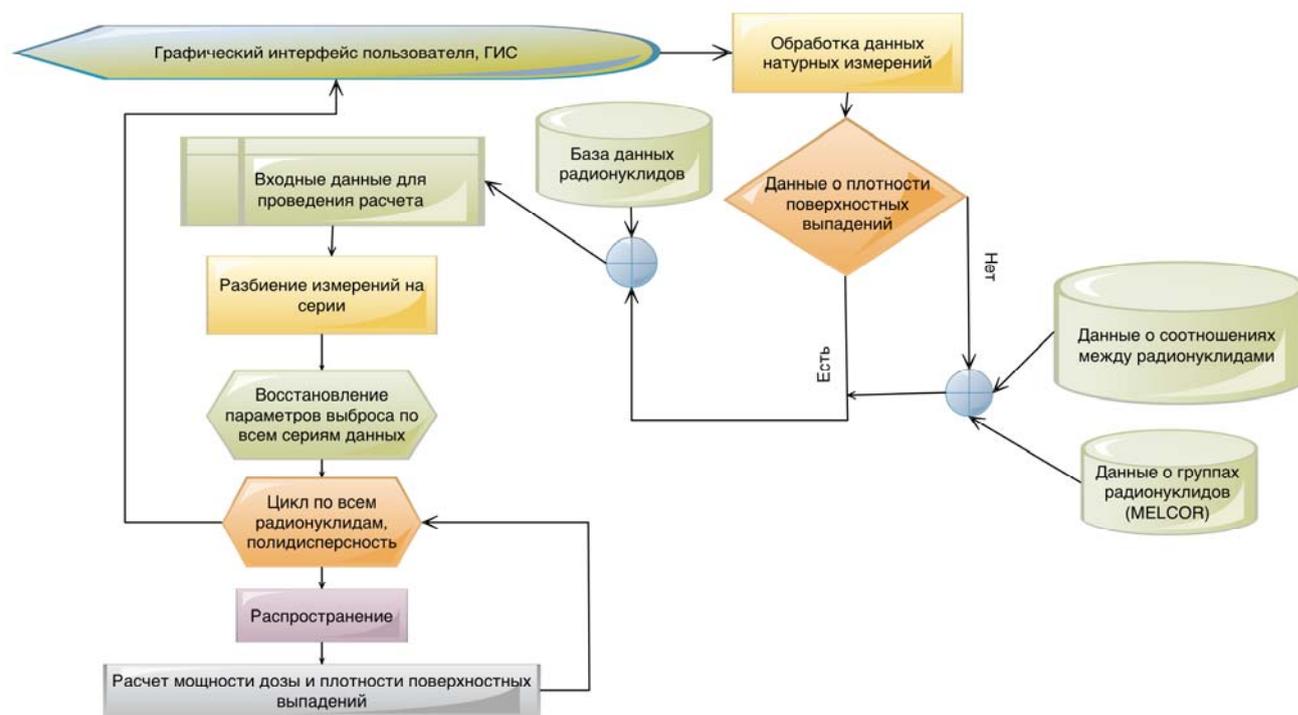


Рисунок 31 – Схема взаимодействия частей программного средства восстановления параметров атмосферного выброса

Для удобства работы в качестве связующего звена между расчетным модулем и графическим модулем используется скрипт на языке Lua, содержащий динамические списки параметров расчета, представленные выше, для проведения расчета и содержащий результаты расчета после окончания обработки серий.

3.3 Программное средство для восстановления параметров выброса

3.3.1 Графический интерфейс пользователя

На основе разработанной методики восстановления параметров атмосферного выброса и разработанной архитектуры программного средства с использованием тех же инструментальных средств разработки, что и для программного средства для выработки рекомендаций по применению защитных мероприятий при обосновании радиационной безопасности населения при запроектных радиационных авариях было разработано программное средство восстановления параметров атмосферного выброса.

Интерфейс пользователя включает в себя окно приложения с тремя основными вкладками, предоставляющими инструменты ввода исходной

информации (рисунок 32), установки точек, в которых проводились измерения плотности выпадений и мощности дозы (рисунок 33) и окно отображения результатов расчета (рисунок 34). Формирование входного скрипта и дальнейший запуск расчетного модуля осуществляется в соответствии с результатами заполнения формы ввода исходных данных.

По факту завершения расчета отображаются полученные оптимальные параметры модели в окне ввода исходных данных (только выбранных для оптимизации параметров), а также отображаются линии уровня для мощности дозы и плотности выпадений на картографической подложке с возможностью трассировки.

Источник выброса Точки измерений

Метеоданные

var

Устойчивость С (слабонеустойчиво)

Скорость ветра 4 м/с

Высота ветра 10 м

Направление 225 ° ССЗ

Интенсивность 0 мм/ч

Тип осадков дождь

Шероховатость трава до 60 см 0.10 м

Дисперсность

Тип выброса По умолчанию Распределение

Выброс

var

Координаты В.Д. 84.8663 На карте

Координаты С.Ш. 56.6173

Длительность 0.28 ч

Высота выброса 100 м

Расстояние Y 0 м

Расстояние Z 0 м

Доза

Нуклид, Бк Время выдержки, дн Данные о РУ ВВЭР_440_3рб_1

<input type="checkbox"/> I-131	3.7e+13
<input type="checkbox"/> I-133	7.4e+13
<input type="checkbox"/> I-134	1.1e+14
<input type="checkbox"/> I-135	1.5e+14
<input type="checkbox"/> Cs-134	1.8e+14
<input type="checkbox"/> Cs-137	2.2e+14

H-3
C-14
Na-22
Na-24
P-32
P-33
S-35
Cl-36
K-40
K-42
Ca-45

Рисунок 32 – Окно задания исходных данных программного средства для восстановления параметров атмосферного выброса

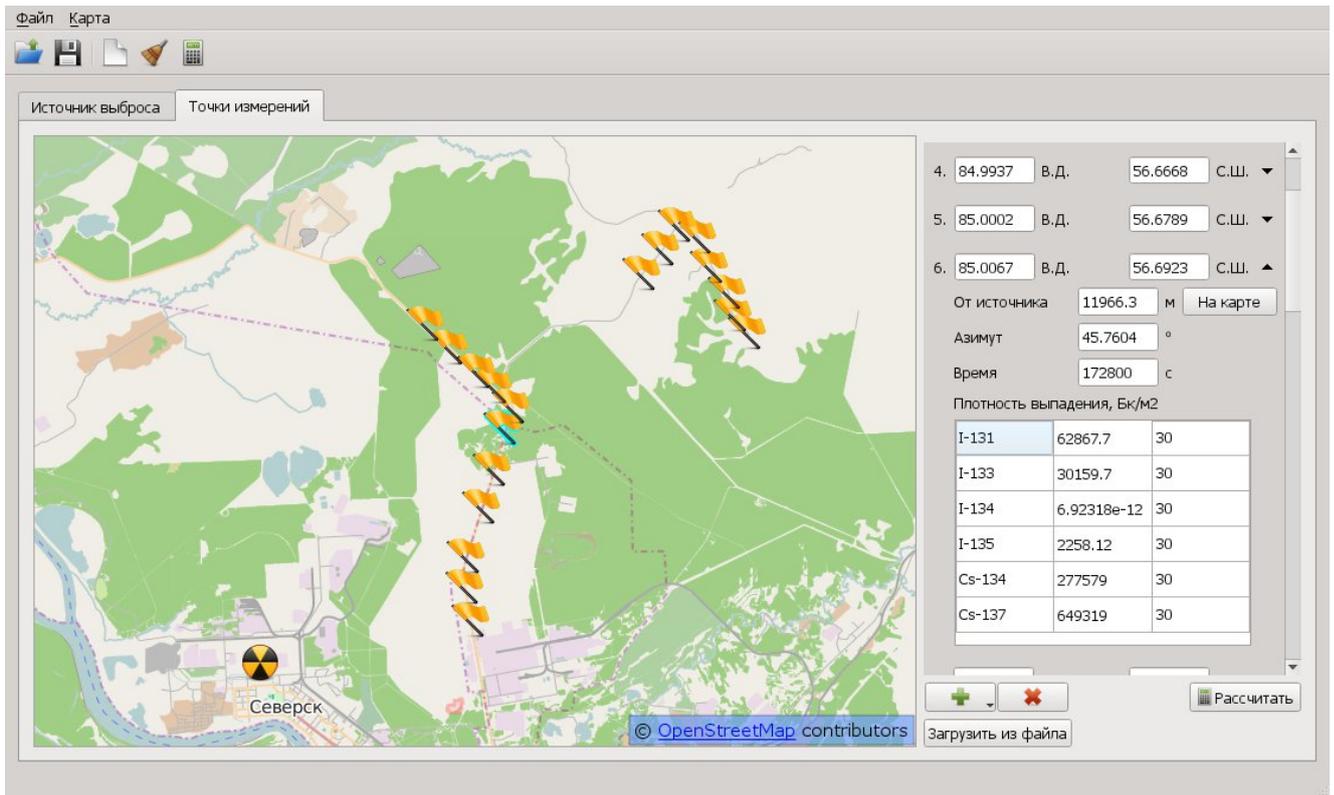


Рисунок 33 – Окно установки измерений на картографической подложке [124]

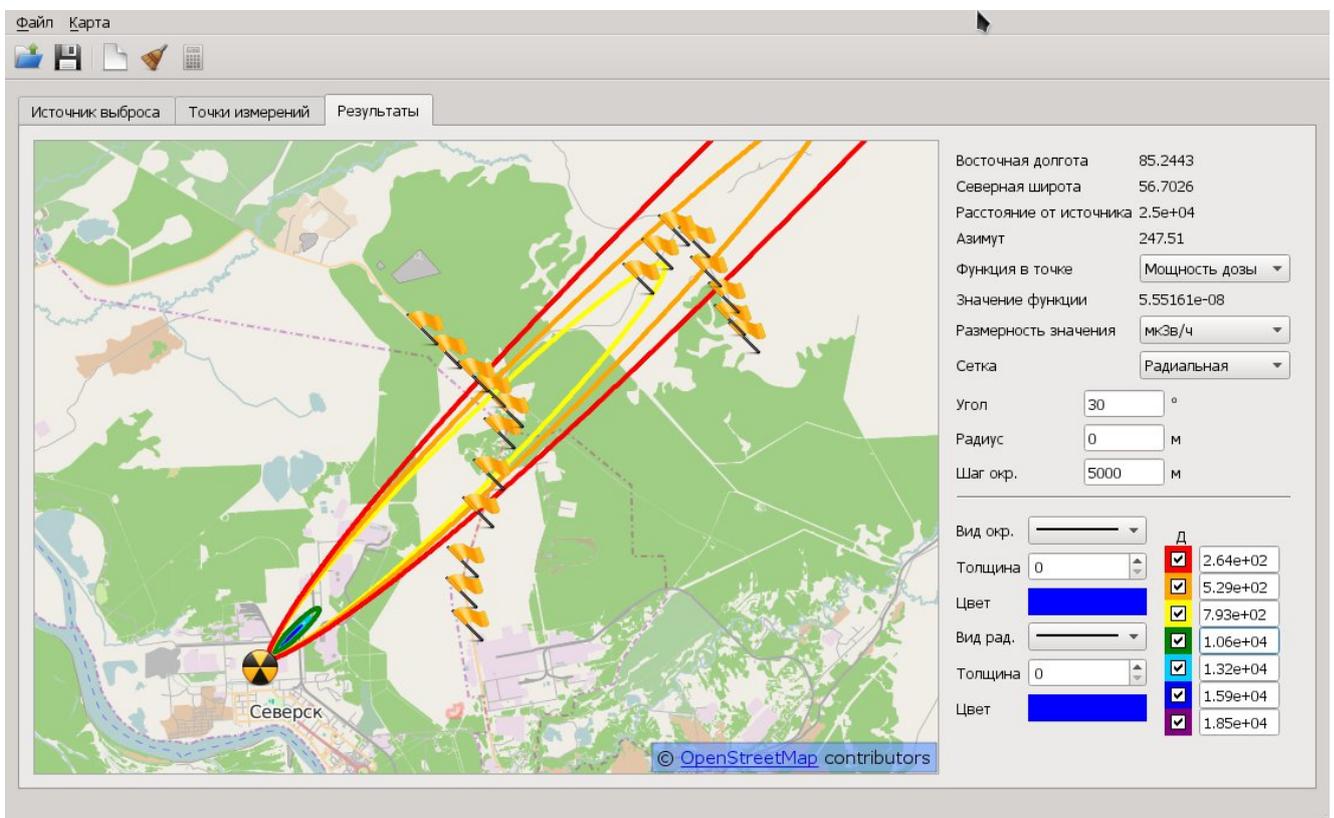


Рисунок 34 – Отображение результатов расчета на карте [124]

3.3.2 Верификация и апробация программного средства

Верификация на модельных экспериментах

В расчете №1 проводилось восстановление активности радионуклидов в выбросе на базе модельных расчетов программного средства для выработки рекомендаций по применению защитных мероприятий при обосновании радиационной безопасности населения при запроектных радиационных авариях с искусственно наложенной погрешностью 10%. Источник располагался в точке с координатами 56.61733 СШ, 84.86629 ВД.

Для прямого расчета брались следующие параметры атмосферы:

- категория устойчивости – D;
- скорость ветра на высоте флюгера – 5 м/с;
- осадки отсутствуют;
- шероховатость подстилающей поверхности – 0.4 м;
- высота подъема облака – 100 м;
- направление ветра – 206.06°.

Активности радионуклидов для расчета представлены в таблице 18. В таблице 19 представлены результаты прямого расчета плотности выпадений и мощности дозы. На основе этих данных было проведено восстановление активности источника посредством использования программного средства для восстановления параметров атмосферного выброса, результаты которого представлены в таблице 20.

Как видно из таблицы 18, оценка активности в самом простейшем варианте проведена удовлетворительно со среднеквадратической ошибкой, не превышающей 10%. Данный расчет является наиболее простым и позволяет сделать вывод о правильности подхода в целом.

Таблица 18 – Радионуклидный состав, полученный в результате расчета

Радионуклид	Данные расчетного модуля, Бк				Значение в прямой задаче, Бк
	мин. знач. диапазона варьирования	макс. знач. диапазона варьирования	стартовое значение	результат работы расчетного модуля	
Zr-95	1.0E+14	5.0E+14	1.0E+12	2.56E14	2.5e+14
Nb-95	1.0E+14	1.0E+15	1.0E+12	7.4E14	7.5e+14
Ru-103	1.0E+13	4.0E+13	1.0E+12	1.54E13	1.5e+13
Ru-106	1.0E+12	2.0E+15	8.4E+12	1.77E14	1.7e+14

Таблица 19 – Результаты прямого расчета в точках проведения измерений

Пункт индикации	Плотность выпадений (на 2 суток), кБк/м ²		Мощность дозы (на 2 суток), мкЗв/ч
	Радионуклид	Значение	
1 (56.63735 СШ, 84.87419 ВД)	Zr-95	192.9	1.5
	Nb-95	572.6	
	Ru-103	11.4	
	Ru-106	133.55	
2 (56.63886 СШ, 84.91092 ВД)	Zr-95	0.4	3.1E-3
	Nb-95	1.2	
	Ru-103	0.02	
	Ru-106	0.275	
3 (56.67339 СШ, 84.88929 ВД)	Zr-95	26.8	0.21
	Nb-95	79.5	
	Ru-103	1.69	
	Ru-106	18.5	
4 (56.68546 СШ, 84.94904 ВД)	Zr-95	136.4	1.1
	Nb-95	404.7	
	Ru-103	8.1	
	Ru-106	94.4	

Более сложный пример подразумевает дополнительно неопределенность по высоте выброса, являющейся экспертно-оцениваемой величиной. Из тестового расчета №1 заимствованы параметры атмосферы. Результаты измерений, смоделированных программой прогнозирования радиационной обстановки, представлены в таблице 19. Параметры расчетного модуля системы гибридного мониторинга, а также результаты расчета отображены в таблице 18. В качестве начального значения высоты подъема облака было взято 50 м с диапазоном от 10 до 300 м. В результате расчета было получено, что высота подъема наиболее хорошо описывающая результаты измерений, составляет 94 м, что практически совпадает с заложенной в прямой задаче. Восстановленные активности радионуклидов в составе выброса соответствуют исходным с точностью 10%. Радионуклидный состав, полученный в результате расчета, представлен в таблице 20:

Таблица 20 – Радионуклидный состав, полученный в результате расчета

Радионуклид	Данные расчетного модуля, Бк				Значение в прямой задаче, Бк
	мин. знач. диапазона варьирования	макс. знач. диапазона варьирования	стартовое значение	результат работы расчетного модуля	
Zr-95	1.0E+14	5.0E+14	1.0E+12	2.33E14	2.5e+14
Nb-95	1.0E+14	1.0E+15	1.0E+12	7.4E14	7.5e+14
Ru-103	1.0E+13	4.0E+13	1.0E+12	1.4E13	1.5e+13
Ru-106	1.0E+12	2.0E+15	8.4E+12	1.6E14	1.7e+14

Третий тестовый расчет является наиболее приближенным к реальности. В нем проведено сопоставление при 12 проведенных модельных расчетах с погрешностью 30% (таблица 22). Расположение точек измерений и источника представлено на рисунке 35. Источник располагался в точке с координатами 56.61733 СШ, 84.86629 ВД. Проводились оценки активностей радионуклидов,

входящих в состав выброса из источника. Моделирование мощности дозы и плотности выпадений проводилось с использованием радионуклидного состава в таблице 21. Для проведения прямого расчета брались следующие параметры атмосферы:

- категория устойчивости – С;
- скорость ветра на высоте флюгера – 3 м/с;
- осадки отсутствуют;
- шероховатость подстилающей поверхности – 0.1 м/с;
- высота подъема облака – 120 м;
- направление ветра – 312.44°.

Радионуклидный состав приведен в таблице 21. Смоделированные программным средством прогнозирования радиационной обстановки измерения плотности поверхностных выпадений и мощности дозы представлены в таблице 22.

Высота подъема облака с диапазоном возможных значений от 10 до 300 м и направление ветра с диапазоном возможных значений от 300° до 350° при восстановлении заданы неизвестными.

В результате восстановления были получены активности радионуклидов в выбросе (таблица 21), оптимальная высота – 180 м и оптимальный угол – 312.32, что хорошо (с учетом неопределенностей задачи) согласуется с данными прямой задачи.

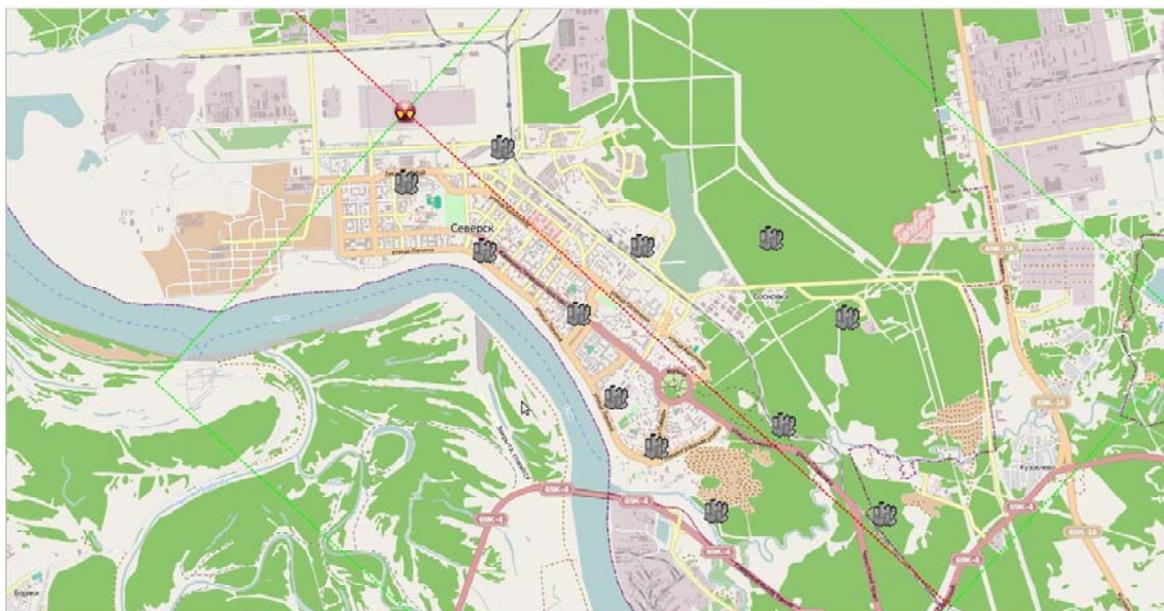


Рисунок 35 – Точки измерения радиационной обстановки и источник радиоактивного загрязнения [124]

Таблица 21 – Радионуклидный состав, полученный в результате расчета

Радионуклид	Данные расчетного модуля, Бк				Значение в прямой задаче, Бк
	мин. знач. диапазона варьирования	макс. знач. диапазона варьирования	стартовое значение	результат работы расчетного модуля	
Zr-95	1.0E+12	2.0E+15	1.0E+13	4.3E+14	3.6e+14
Nb-95	1.0E+12	2.0E+15	1.0E+13	1.34e+14	1.5e+14
Co-60	1.0E+11	2.0E+15	1.0E+13	1.1e+12	1.2e+12
Cs-137	1.0E+11	2.0E+15	1.0E+13	2.8e+12	2.7e+12

Таблица 22 – Результаты прямого расчета в точках проведения измерений

Пункт индикации	Плотность выпадений (на 2 суток), кБк/м ²		Мощность дозы (на 2 суток), мкЗв/ч
	Zr-95	Nb-95	
1 (56.60864 СШ, 84.86629 ВД)	1.61E-16	5.24E-17	2.93E-019

	Co-60	3.92E-19	
	Cs-137	9.03E-19	
2 (56.61298 СИ, 84.88758 ВД)	Zr-95	4.83E+00	1.40E-002
	Nb-95	5.50E+00	
	Co-60	1.68E-02	
	Cs-137	3.98E-02	
3 (56.60184 СИ, 84.946976 ВД)	Zr-95	4.78E	1.46E-004
	Nb-95	2.48E	
	Co-60	1.46E	
	Cs-137	3.57E	
4 (56.578964 СИ, 84.94972 ВД)	Zr-95	1.46E+03	3.35E+000
	Nb-95	5.37E+02	
	Co-60	4.21E+00	
	Cs-137	1.01E+01	
5 (56.57631 СИ, 84.92157 ВД)	Zr-95	1.67E+02	4.34E-001
	Nb-95	7.46E+01	
	Co-60	6.98E-01	
	Cs-137	1.49E+00	
6 (56.60033 СИ, 84.88380 ВД)	Zr-95	4.32E+01	9.36E-002
	Nb-95	2.04E+01	
	Co-60	1.40E-01	
	Cs-137	3.65E-01	
7 (56.59258 СИ, 84.90440 ВД)	Zr-95	1.18E+03	3.43E+000
	Nb-95	7.07E+02	
	Co-60	4.67E+00	
	Cs-137	1.07E+01	
8 (56.567995 СИ, 84.9720 ВД)	Zr-95	1.08E+03	2.02E+000
	Nb-95	4.04E+02	
	Co-60	2.88E+00	

	Cs-137	8.08E+00	
9 (56.56837 СШ, 84.93479 ВД)	Zr-95	2.16E+02	4.42E-001
	Nb-95	8.53E+01	
	Co-60	5.98E-01	
	Cs-137	1.15E+00	
10 (56.601 СШ, 84.9185 ВД)	Zr-95	1.95E+02	4.84E-001
	Nb-95	8.76E+01	
	Co-60	6.88E-01	
	Cs-137	1.55E+00	
11 (56.59201 СШ, 84.9638 ВД)	Zr-95	3.88E+00	8.08E-003
	Nb-95	1.23E+00	
	Co-60	1.05E-02	
	Cs-137	2.50E-02	
12 (56.58237 СШ, 84.9126 ВД)	Zr-95	1.90E+02	5.55E-001
	Nb-95	1.03E+02	
	Co-60	7.78E-01	
	Cs-137	1.81E+00	

Апробация на данных натуральных измерений радиационной обстановки при аварии на ПО «Маяк»

Рассматриваемая авария произошла на территории производственного объединения «Маяк» 29 сентября 1957 г. в 16:22 вследствие взрыва емкости, содержащей высокоактивные жидкие отходы, образовавшиеся в результате переработки облученного ядерного топлива по цельноацетатной осадительной схеме [151]. Было показано, что ее наиболее вероятной причиной был взрыв сухих солей нитрата и ацетата натрия, образовавшихся в результате выпаривания растворов в емкости из-за их саморазогрева при нарушении условий охлаждения. Масса взорвавшегося осадка составляла 70-80 т, и соответствующая высота подъема радиоактивного облака превышала высоту пограничного слоя

атмосферы [152, 153]. На основе многолетних наблюдений для территории ПО «Маяк» в сентябре-октябре характерны погодные условия, соответствующие категории атмосферной устойчивости “С” или “D” по Пасквиллу с соответствующей высотой пограничного слоя атмосферы 400-800 м, от которого в концепции постановки граничных условий для гауссовой модели атмосферной дисперсии, происходит отражение примеси. На основе данных работы [97] для проведения оценок была принята категория “С” по Пасквиллу, для которой высота пограничного слоя атмосферы составляет 800 м, скорость ветра на высоте флюгера - 5 м/с.

В результате аварии произошел выброс грубодисперсной примеси [97], которая распределилась по высоте взрывного столба, высота которого принималась равной 800 м, а характерная ширина – 40 м, что примерно соответствует удвоенному размеру взрывной воронки. Для моделирования начальных размеров облака использовалась концепция фиктивного источника, включенная в систему моделей программного средства, разработанного в главе 1. При этом расчетные расстояния до фиктивного источника составляет 50 и 3300 м для y и z направлений (рисунок 36). Расчетное значение скорости ветра на эффективной высоте выброса (~400 м) составляло 8,7 м/с.

Суммарная активность выброса на момент аварии оценивается около 20 МКи, из них на долю ^{90}Sr приходилось 1,2 МКи. Выброс формировался грубодисперсными частицами (размеры десятки-сотни микрон). В последних работах приводится следующий состав выброса по основным радионуклидам: $^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$ – 5,4%; $^{95}\text{Zr}+^{95}\text{Nb}$ – 24,8%; $^{106}\text{Ru}+^{106}\text{Rh}$ – 3,7%; ^{137}Cs – 0,35%; $^{144}\text{Ce}+^{144}\text{Pr}$ – 65,8% [154]. Однако, при данном составе наблюдаются противоречия между активностью выброса ^{90}Sr (1,2 МКи или 44,4 ПБк) [155], которая удовлетворительно соответствует результатам измерений, и наблюдавшимися значениями мощностей доз гамма-излучения в выселенных населенных пунктах. В силу того, что выброс произошел в результате взрыва, распределение активности в выбросе носило полидисперсный характер с высокой долей грубодисперсной фракции. С помощью разработанного программного средства

[153] был определен оптимальный состав, исходя из данных плотности поверхностных выпадений в опорных точках по оси следа. Расчеты показали, что наилучшее совпадение профилей выпадений было достигнуто при трехкомпонентном составе выброса, для диаметра частиц 69 мкм, 138 мкм, 252 мкм с долями в выбросе 15, 20, 65% соответственно.

Результаты расчета программным комплексом удовлетворительно согласуются с результатами натурных измерений (рисунки 37, 38) даже, несмотря на то, что рассматриваемая область выходит за рамки применимости гауссовой модели.

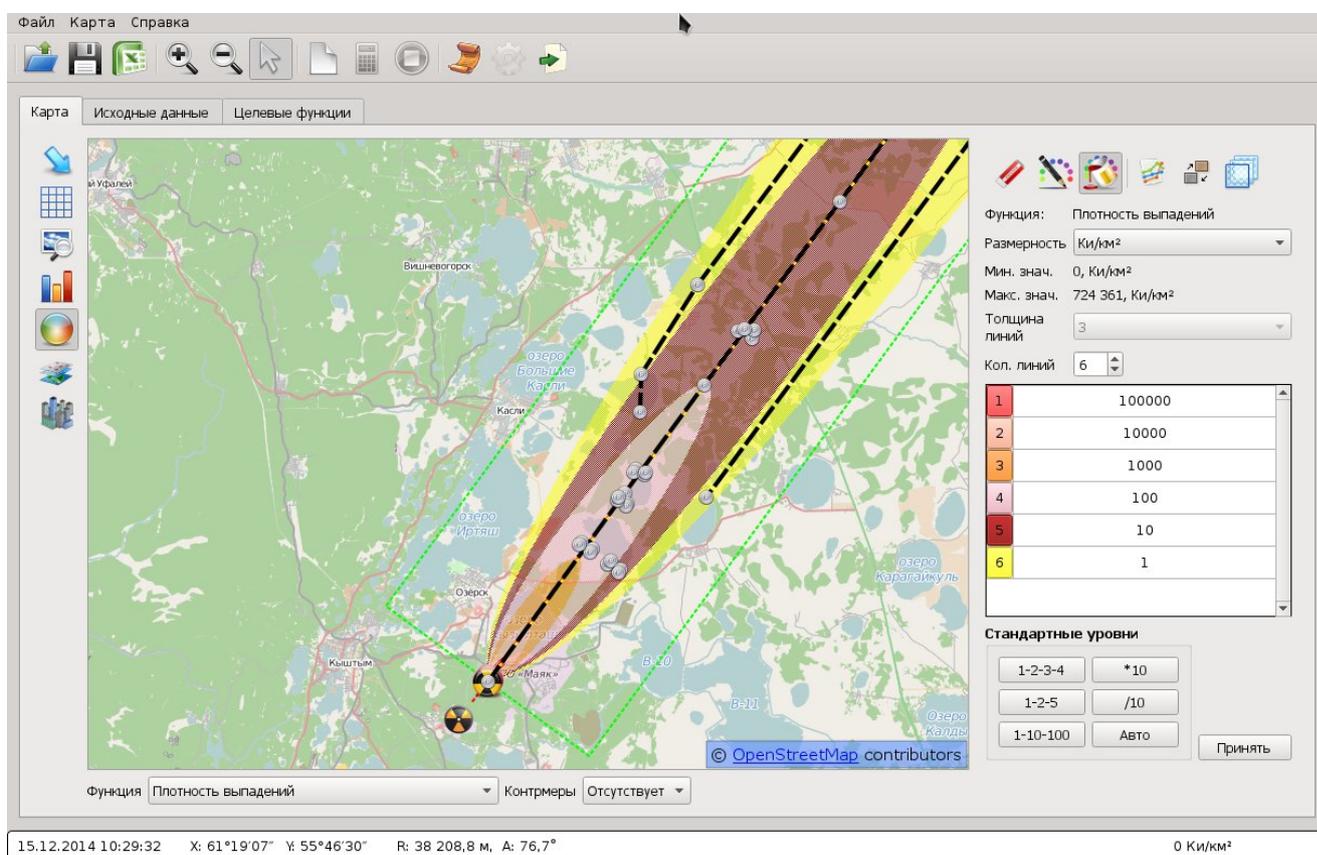


Рисунок 36 – Результаты расчета в концепции фиктивного источника плотности поверхностных выпадений Sr-90 программным комплексом [124]

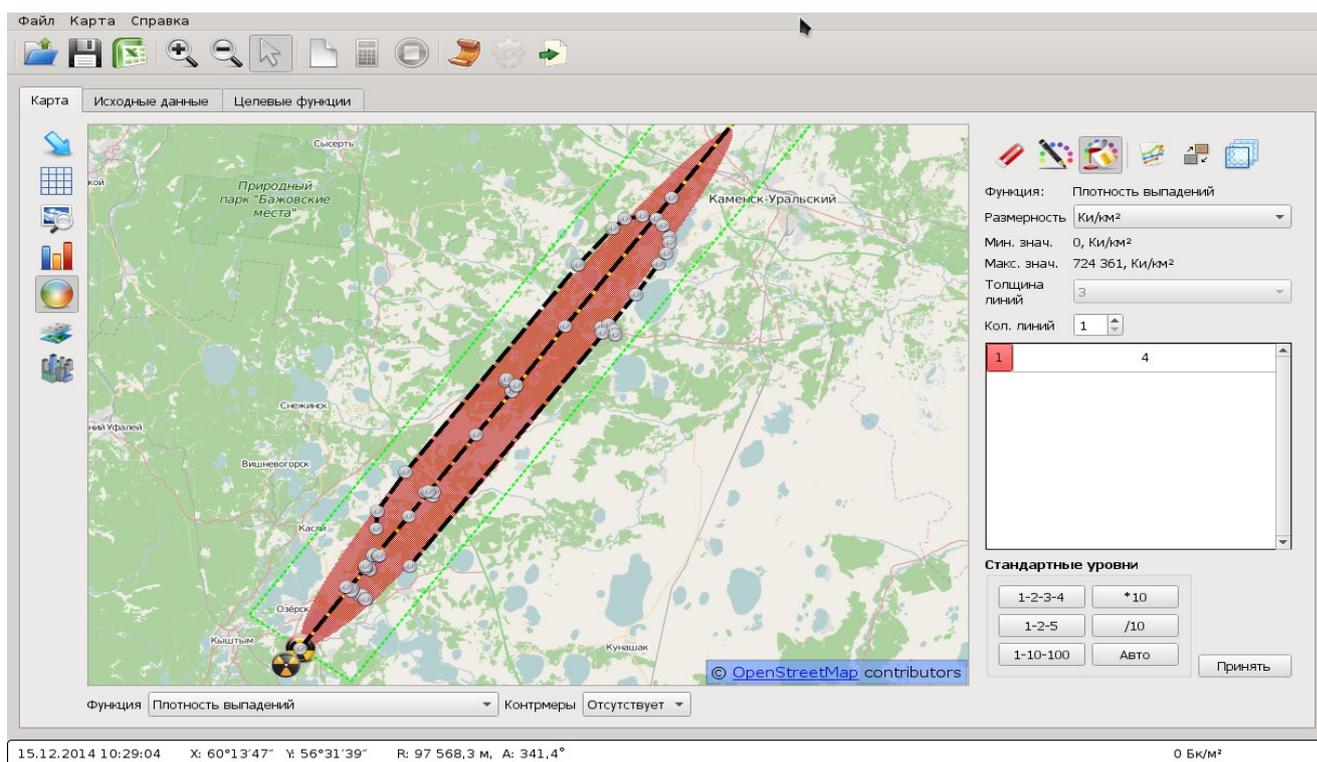


Рисунок 37 – Результаты сопоставления зоны в 4 Ки/км^2 по Sr-90; заливка – результаты расчета, линией обведена зона, составленная по результатам измерений [124]

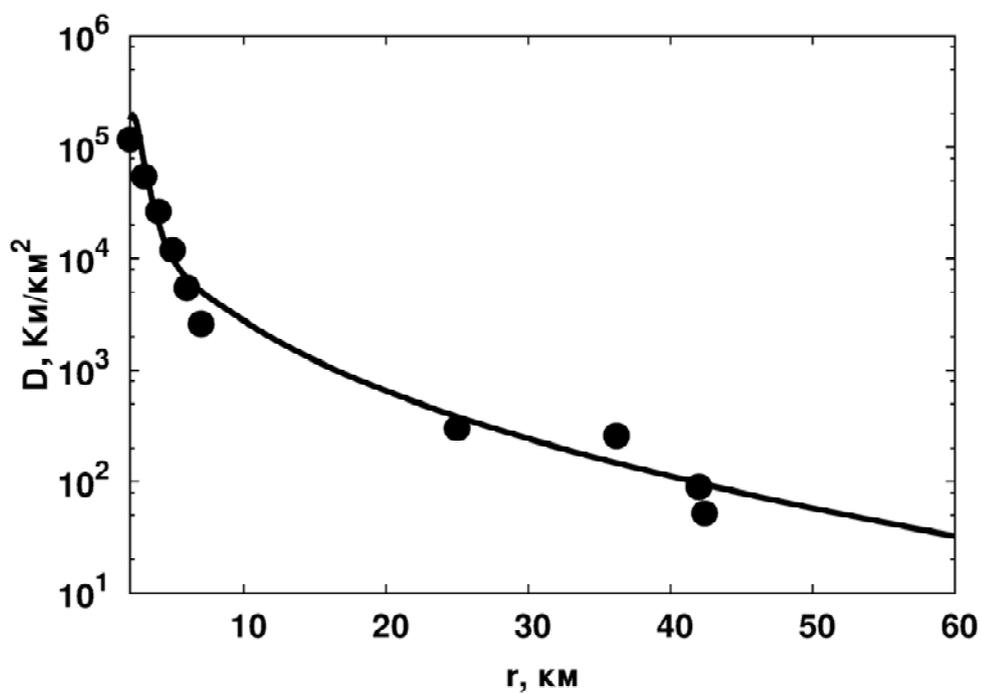


Рисунок 38 – Расчетные (—) и экспериментальные (●) значения плотности поверхностных выпадений Sr-90 при аварии на ПО «Маяк»

В таблице 23 представлено сопоставление расчетных и измеренных данных о плотности поверхностных выпадений Sr-90 в населенных пунктах на территории Восточно-Уральского радиоактивного следа.

Таблица 23 – Измеренная и расчетная плотность выпадений ^{90}Sr в населенных пунктах

Населенный пункт	Расстояние от источника, км	Средняя плотность загрязнения ^{90}Sr , кБк/м ²	
		измерения [14]	ПРОЛОГ
Бердениш	12,5	$2,4 \cdot 10^4$	$2,1 \cdot 10^4$
Салтыково	18	$1,5 \cdot 10^4$	$3 \cdot 10^4$
Галикаево	20	$1,5 \cdot 10^4$	$2,2 \cdot 10^4$
Расская Караболка	35	$2,4 \cdot 10^3$	$6,1 \cdot 10^3$
Юго-Конево	55	370	1100
Багаряк	75	37	190

3.4 Выводы по главе 3

В главе 3 разработана комплексная методика коррекции и восстановления параметров атмосферного выброса по данным контроля и мониторинга радиационной обстановки с учетом внедрения спектрометра с возможностью в полуавтоматическом режиме измерять плотность поверхностных выпадений в онлайн режиме в комплект оснащения ПРЛ и моделей программного средства для выработки рекомендаций по применению защитных мероприятий при обосновании радиационной безопасности населения при запроектных авариях на объектах ядерной энергетики. На ее основе разработана архитектура и непосредственно программное средство для коррекции и восстановления параметров атмосферного выброса. Для удобства обработки информации и эффективного использования данного программного средства в условиях радиационной аварии программный модуль оснащен графическим интерфейсом пользователя с компонентами ГИС в его основе. Его верификация и апробация

проводилась на модельных экспериментах и данных натуральных измерений при радиационной аварии на ПО «Маяк» в 1957 г и показала высокую эффективность программного средства для определения оптимальных параметров атмосферного выброса, в частности, в результате взрывов.

4 СОЗДАНИЕ ИНТЕГРАЛЬНОГО ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ РАСЧЕТНОГО ОБОСНОВАНИЯ РАДИАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ НАСЕЛЕНИЯ ПРИ ЗАПРОЕКТНЫХ АВАРИЯХ НА ОБЪЕКТАХ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

4.1 Схема интеграции разработанных программных средств и расчетного кода СОКРАТ в единый программный комплекс

Ключевым звеном при разработке интегрального программного комплекса для расчетного обоснования радиационной безопасности населения при запроектных авариях на объектах ядерной энергетики является схема интеграции разработанных программных средств в единый логически связанный программный комплекс. При этом должны быть соблюдены условия последовательного уточнения прогноза по мере поступления дополнительной информации.

На рисунке 39 представлена разработанная схема взаимодействия частей программного комплекса, включающая два разработанных программных средства и тяжелоаварийный код для проведения оценок выхода из-под ЗО радионуклидного состава и активности его компонентов.

Вышеописанная схема позволяет интегрировать практически любой тяжелоаварийный код, основной задачей которого является получение радионуклидного состава, вышедшего в атмосферу. В данной работе из соображений удобства был интегрирован тяжелоаварийный код СОКРАТ.

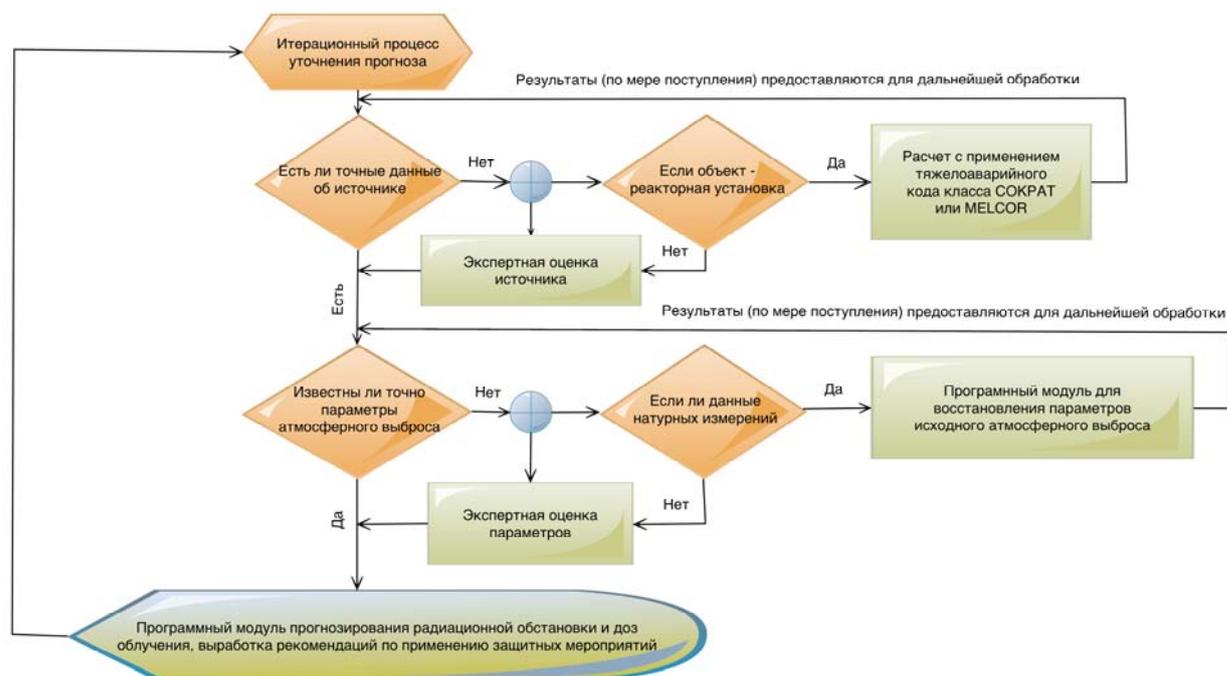


Рисунок 39 –Схема взаимодействия программных средств в рамках единого программного комплекса

Интеграция расчетного кода СОКРАТ в программный комплекс обеспечивает решение задачи расчетного обоснования радиационной безопасности населения при запроектных авариях на АЭС с реакторными установками типа ВВЭР. При этом результат работы кода СОКРАТ используется программным средством прогнозирования радиационной обстановки для выработки рекомендаций по применению защитных мероприятий в качестве начальных данных в режиме односторонней передачи данных. Следует отметить, что для анализа безопасности в рамках одной гипотетической аварии на АЭС необходимо проводить пакетные расчеты последствий атмосферного переноса, рассматривая различные метеорологические условия (различные направления и силы ветра, наличие или отсутствие осадков, различная устойчивость атмосферы и т.д.). Поэтому для одного сценария развития аварии на РУ, рассчитываемого кодом СОКРАТ потребуется несколько расчетов программным средством прогнозирования радиационной обстановки и доз облучения населения. Возможность проведения таких расчетов обеспечивается тем, что на типичных сетках программное средство прогнозирования радиационной обстановки и доз

облучения считает быстрее реального времени с возможностью использования аппаратного ускорения с применением технологий параллельного программирования.

Исходя из вышесказанного принято, что передача данных от кода СОКРАТ к программному средству прогнозирования радиационной обстановки и доз облучения населения и программному средству восстановления параметров атмосферного выброса производится через внешний текстовый файл данных с использованием модуля, реализующего расширяемую связь с результатами моделирования. Модуль реализован в виде скрипта на языке Python, подключаемого к программе в процессе исполнения. При этом текст модуля открыт для редактирования, что обеспечивает возможность замены тяжелоаварийного кода.

Для организации интерфейса по обмену данными между кодами СОКРАТ и другими программными средствами программного комплекса, существует следующая структура выходного текстового файла.

1 строка – имя файла.

2 строка – имена столбцов.

Далее идет временная зависимость активности в Бк, вышедших в окружающую среду изотопов. В столбцах находятся следующие данные (время в с, активность в Бк).

Time	-	текущее время,
L_A_TOT_FP_I_131	-	полная активность изотопа ^{131}I ,
L_A_TOT_FP_I_132	-	полная активность изотопа ^{132}I ,
L_A_TOT_FP_I_133	-	полная активность изотопа ^{133}I ,
L_A_TOT_FP_I_134	-	полная активность изотопа ^{134}I ,
L_A_TOT_FP_I_135	-	полная активность изотопа ^{135}I ,
L_A_I2_131	-	активность изотопа ^{131}I , вышедшего в молекулярной форме (I_2),
L_A_I2_132	-	активность изотопа ^{132}I , вышедшего в молекулярной форме (I_2),
L_A_I2_133	-	активность изотопа ^{133}I , вышедшего в молекулярной форме (I_2),
L_A_I2_134	-	активность изотопа ^{134}I , вышедшего в молекулярной форме (I_2),
L_A_I2_135	-	активность изотопа ^{135}I , вышедшего в молекулярной форме (I_2),
L_A_CH3I_131	-	активность изотопа ^{131}I , вышедшего в органической форме (CH_3I),
L_A_CH3I_132	-	активность изотопа ^{132}I , вышедшего в органической форме (CH_3I),
L_A_CH3I_133	-	активность изотопа ^{133}I , вышедшего в органической форме (CH_3I),

L_A_CH3I_134	-	активность изотопа ^{134}I , вышедшего в органической форме (CH_3I),
L_A_CH3I_135	-	активность изотопа ^{135}I , вышедшего в органической форме (CH_3I),
L_A_AER_I_131	-	активность изотопа ^{131}I , вышедшего на аэрозолях,
L_A_AER_I_132	-	активность изотопа ^{132}I , вышедшего на аэрозолях,
L_A_AER_I_133	-	активность изотопа ^{133}I , вышедшего на аэрозолях,
L_A_AER_I_134	-	активность изотопа ^{134}I , вышедшего на аэрозолях,
L_A_AER_I_135	-	активность изотопа ^{135}I , вышедшего на аэрозолях,
L_A_XE_133	-	полная активность изотопа ^{133}Xe ,
L_A_XE_135m	-	полная активность изотопа $^{135\text{m}}\text{Xe}$,
L_A_XE_135	-	полная активность изотопа ^{135}Xe ,
L_A_KR_85m	-	полная активность изотопа $^{85\text{m}}\text{Kr}$,
L_A_KR_87	-	полная активность изотопа ^{87}Kr ,
L_A_KR_88	-	полная активность изотопа ^{88}Kr ,
L_A_FP_CS_134	-	полная активность изотопа ^{134}Cs ,
L_A_FP_CS_137	-	полная активность изотопа ^{137}Cs ,
L_A_FP_TE_129m	-	полная активность изотопа $^{129\text{m}}\text{Te}$,
L_A_FP_TE_132	-	полная активность изотопа ^{132}Te ,
L_A_FP_SR_90	-	полная активность изотопа ^{90}Sr ,
L_A_FP_NB_95	-	полная активность изотопа ^{95}Nb ,
L_A_FP_ZR_95	-	полная активность изотопа ^{95}Zr ,
L_A_FP_RU_103	-	полная активность изотопа ^{103}Ru ,
L_A_FP_RU_106	-	полная активность изотопа ^{106}Ru ,
L_A_FP_BA_140	-	полная активность изотопа ^{140}Ba ,
L_A_FP_LA_140	-	полная активность изотопа ^{140}La ,
L_A_FP_CE_144	-	полная активность изотопа ^{144}Ce .

Центральной частью программного комплекса является программное средство прогнозирования радиационной обстановки и доз облучения населения для выработки рекомендаций по применению защитных мероприятий при обосновании радиационной безопасности населения при запроектных радиационных авариях. На его основе осуществляется моделирование переноса радионуклидов в атмосфере, их осаждение на подстилающую поверхность и оценка дозовых воздействий. От двух вспомогательных программных средств могут быть получены необходимые для расчета параметры. Так с использованием тяжелоаварийного кода, в случае аварии на РУ, определяется радионуклидный состав, который может быть использован как в основном программном средстве, так и в программном средстве восстановления параметров атмосферного выброса

при снятых флагах восстановления радионуклидного состава. При проведении уточнения с использованием программного средства для восстановления параметров атмосферного выброса результат работы (уточненные значения) становится исходным для проведения нового расчета программным средством для выработки рекомендаций по применению защитных мероприятий.

База данных по характеристикам радионуклидов и коэффициентам конверсии для двух разработанных программных средств – общая, причем в силу того, что программный комплекс не требует использования конкретного тяжелоаварийного кода, она не распространяется на него.

4.2 Работа с программным комплексом

При разработке программного комплекса предполагается использование подхода постоянного уточнения прогноза с постепенным снижением консервативности оценок по мере поступления данных. Поэтому основной расчетный блок – программное средство прогнозирования радиационной обстановки и доз облучения населения для выработки рекомендаций по применению защитных мероприятий при обосновании радиационной безопасности населения при запроектных радиационных авариях. В нем проводится задание исходных данных атмосферного выброса и оценка последствий для населения, включая расчеты всех дозовых функционалов.

Поскольку одним из наиболее значимых и в тоже время трудно оцениваемых параметров является радионуклидный состав атмосферного выброса. Для оценок до выброса предусмотрено использование тяжелоаварийного кода, моделирующего внутриреакторные процессы вплоть до выхода радионуклидов из под ЗО. Из соображений удобства в программный комплекс был интегрирован расчетный код СОКРАТ [156], разработанный в ИБРАЭ РАН, для моделирования внутриреакторных процессов при тяжелых авариях на АЭС с ВВЭР, поэтому на данный момент проведение сквозного моделирования последствий радиационной аварии возможно только для ВВЭР, однако путем замены тяжелоаварийного кода возможно расширение на другие типы реакторных установок.

После выброса начинает поступать информация о параметрах радиационной обстановки измеренных датчиками АСКРО и группами радиационного контроля [157], теперь уточнение проводится программным средством восстановления параметров атмосферного выброса, корректирующим данные предварительных оценок с учетом реальной ситуации. После такой коррекции формируются новые значения параметров, учитывающие данные измерений, которые далее ложатся в основу для расчета нового прогноза. Таким образом, уменьшается погрешность прогностических оценок за счет уточнения оценочных параметров и формируется достаточно надежный прогноз и в тоже время консервативный, позволяющий принимать решения по обоснованию радиационной безопасности населения и по применению защитных мероприятий для ее обеспечения. Также такой подход позволяет проводить оптимизацию маршрутов групп радиационного контроля для оконтуривания зон с превышающими пределы значениями доз.

Для удобства работы с разработанными программными средствами реализован графический интерфейс пользователя, позволяющий минимизировать ошибки на этапе ввода исходных данных и ошибок при обработке результатов. При этом работа осуществляется с использованием современных ГИС-технологий, позволяя накладывать результаты на актуальные картографические данные, пропуская этап подготовки данных об инфраструктуре и населении вокруг объекта ядерной энергетики. Таким образом, работа с программным комплексом требует минимального количества времени на его освоение и позволяет использовать его как в режиме оценок последствий радиационных аварий, так и при проведении противоаварийных тренировок на этапе подготовки персонала. Следует отметить, что разработанный программный комплекс требует относительно минимальное количество исходных данных, которые могут быть получены на ранней фазе развития аварии на основе данных метеомачт и данных о характере повреждений при аварии. При получении дополнительной информации об аварии или измерениях радиационной обстановки возможно как расширение входных параметров за счет использования моделей расчета эффективной высоты подъема облака или параметров полидисперсного

распределения, так и восстановления параметров атмосферного выброса. Результаты расчета отображаются на картографической подложке для каждой целевой функции:

- доза внешнего облучения от облака и поверхности;
- ингаляционная доза от облака и вторичного пылеподъема;
- дозы по пищевым цепочкам;
- суммарная эффективная доза;
- доза на щитовидную железу;
- предотвращаемые дозы;
- автоматическое сопоставление с критериями НРБ и МАГАТЭ.

4.3 Возможности расширения области применения интегрального программного комплекса

В силу модульной структуры программного комплекса для расчетного обоснования радиационной безопасности населения при запроектных авариях на объектах ядерной энергетики, возможна замена программного средства в зависимости от объекта ядерной энергетики. На данный момент для оценки выхода радионуклидов в атмосферу при авариях на АЭС с РУ типа ВВЭР используется расчетный код СОКРАТ, который может быть заменен либо на другой тяжелоаварийный код для моделирования внутриреакторных процессов для других РУ, либо на другой расчетный код, моделирующий выход радионуклидов в атмосферу при авариях на других объектах ядерной техники. В качестве консервативных расчетов могут, например, использоваться данные о радионуклидном составе топлива после окончания кампании или данные об исходном составе ОЯТ.

4.4 Верификация интегрального программного комплекса на данных натуральных измерений при аварии на АЭС Фукусима-1 (Япония)

Верификация интегрального программного комплекса проводилась на данных натуральных измерений на северо-западном радиоактивном следе при аварии на АЭС “Фукусима-1” (Япония), сформировавшегося 15 марта 2011 г. [158]. Эта

авария является сложной с точки зрения моделирования переноса радиоактивности в силу того, что в районе АЭС наблюдались сильно неоднородные метеорологические поля, включая локальные осадки, также следует отметить, что распространение проходило над сильно неоднородной местностью (рисунок 40). Для реконструкции последствий аварии применялись программные комплексы и методики различной степени сложности, однако цель данной работы – апробация упрощенного подхода, заложенного в программный комплекс, с использованием минимального количества исходных данных, доступных на ранней фазе развития аварии и связки тяжелоаварийного кода с программным средством прогнозирования радиационной обстановки и доз на население.

Так проводилось сквозное моделирование, начиная от исходного события, связанного с потерей теплоотвода от активной зоны, до расчета параметров радиационной обстановки в результате поверхностных выпадений радионуклидов. Моделирование с помощью интегрированного в программный комплекс расчетного кода СОКРАТ физических процессов на основных стадиях развития аварии на втором энергоблоке АЭС “Фукусима-1”, показало, что примерно на 73-м часе началось осушение и разогрев активной зоны (рисунок 41) [158].

Залив водой перегретой активной зоны сопровождался интенсивным парообразованием, что через 86 ч после начала аварии вызвало по расчетным оценкам пик давления в системе реактор–защитная оболочка. В результате произошло частичное разрушение защитной оболочки в области водного бака, сопровождавшееся громким звуком, зафиксированным персоналом.

Вследствие разгерметизации тора, предполагаемого в расчетах, и парообразования при заливе водой расплавленной активной зоны произошел выход радионуклидов в помещения реакторного здания. Выход радионуклидов в свободный объем водного бака ЗО был рассчитан в предположении, что радионуклиды в процессе барботажа абсорбировались в водном баке контейнента. Оценка выхода радионуклидов представлена в таблице 24:

Таблица 24 – Оценка выхода радионуклидов из активной зоны во второй половине дня 15 марта 2011 г, ПБк

Нуклид	Тор защитной оболочки	Атмосфера после фильтрации в торе
^{127m}Te	36	0,7
^{127}Te	110	2,3
^{129m}Te	110	2,2
^{129}Te	71	1,4
^{131m}Te	39	0,7
^{131}Te	8,7	0,2
^{132}Te	1300	26
^{131}I	1600	32
^{132}I	1300	27
^{133}I	96	1,9
^{134}Cs	830	17
^{136}Cs	110	2,1
^{137}Cs	480	9,6

Для расчета распространения радионуклидов в атмосфере брались усредненные данные [159] – скорость ветра на высоте флюгера 2 м/с, направление ветра $137,0^\circ$, категория устойчивости атмосферы С, шероховатость подстилающей поверхности 0.4 м, высота подъема облака 20 м (предполагалось, что при барботаже через водный бак контейнмента аэрозоли термализуются и подъемом за счет сил плавучести можно пренебречь).

С использованием программного комплекса были проведены расчеты переноса примеси. Были рассчитаны прогностические значения плотности поверхностных выпадений радионуклидов ^{137}Cs и мощность дозы γ -излучения от поверхности.

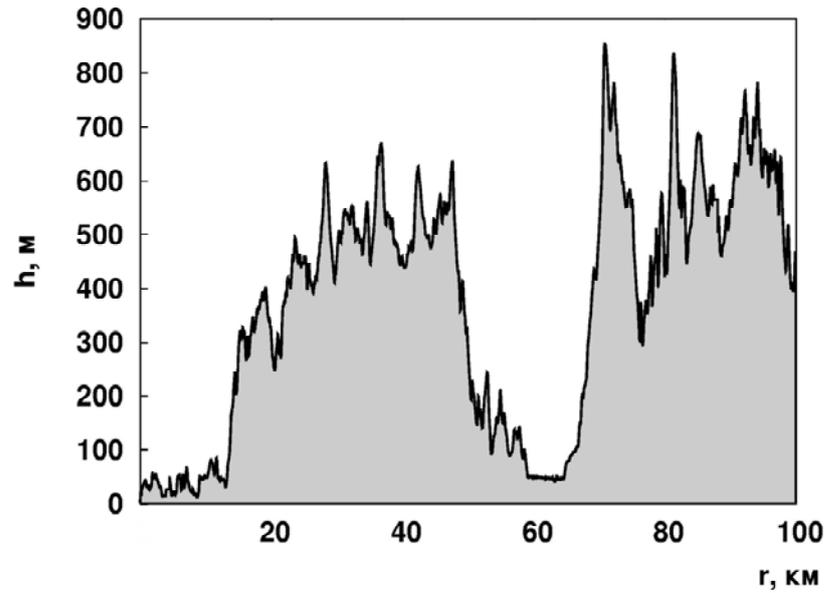


Рисунок 40 – Профиль рельефа по оси следа [136]

Рисунок 41 демонстрирует начало осушения и разогрев активной зоны примерно на 72 часа:

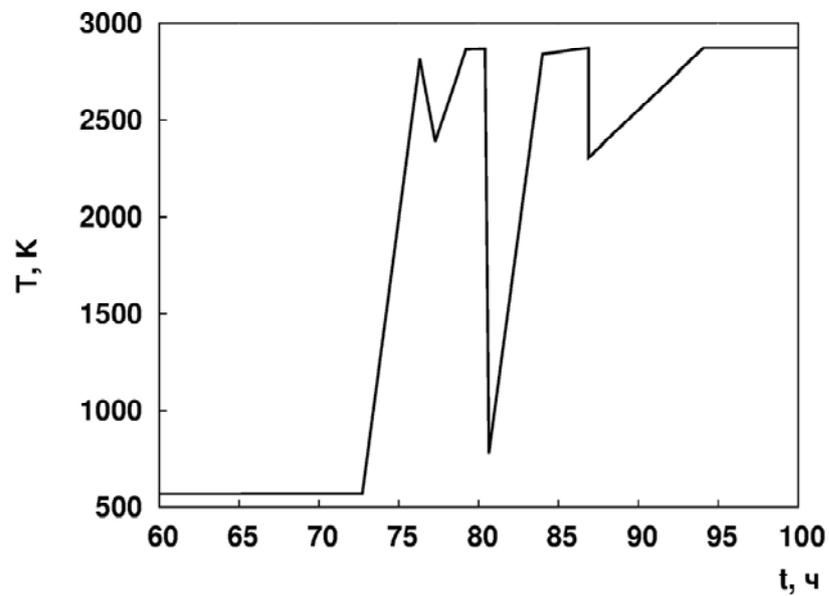


Рисунок 41 – Изменение температуры в активной зоне второго энергоблока АЭС “Фукусима-1” в ходе аварии

На рисунке 42 представлены результаты расчета плотности поверхностного загрязнения по ^{137}Cs без учета орографии местности, видно, что прогноз превышает результаты измерений.

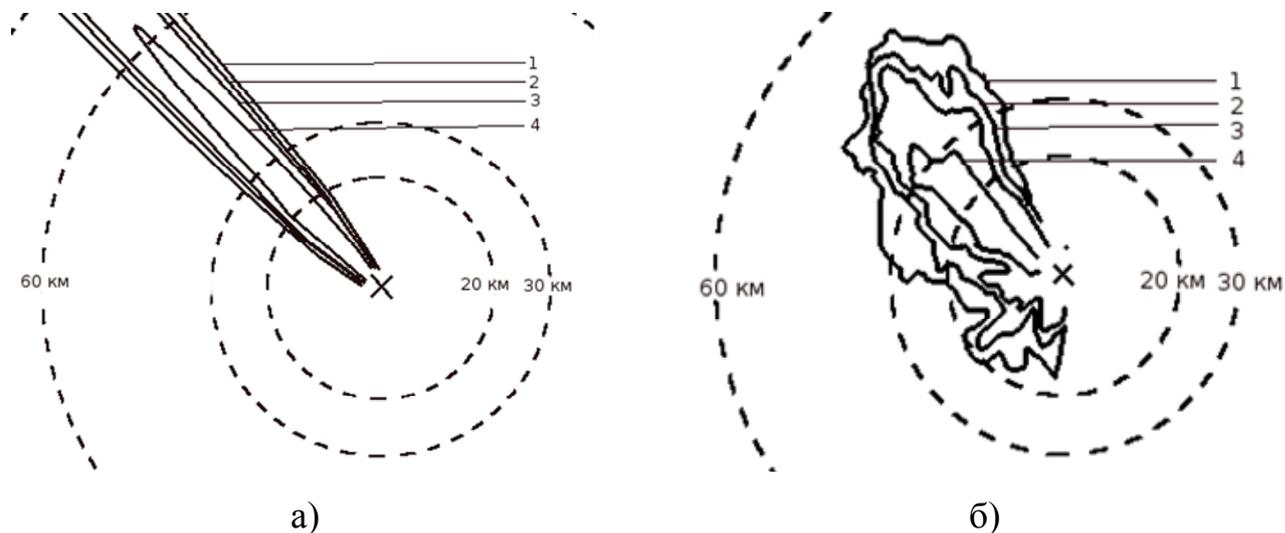


Рисунок 42 – Расчетная (а) и измеренная (б) плотность выпадений ^{137}Cs 0,3 (1), 0,6 (2), 1 (3), 3 МБк/м² (4) [160]

Плотность поверхностных выпадений ^{137}Cs по оси радиоактивного следа представлена на рисунке 43а. С учетом данных о радионуклидном составе полученных с помощью тяжелоаварийного кода СОКРАТ, интегрированного в программный комплекс, была рассчитана мощность дозы в зависимости от расстояния от источника (рисунок 43б).

Полученные результаты для анализа радиационной аварии на ранней фазе ее развития дают соответствие с данными измерений со среднеквадратическим отклонением, составляющим 300% для мощности дозы, что для таких сложных условий и с учетом упрощенности подхода является удовлетворительным результатом. Таким образом, была верифицирована работа программного комплекса в режиме сквозного моделирования.

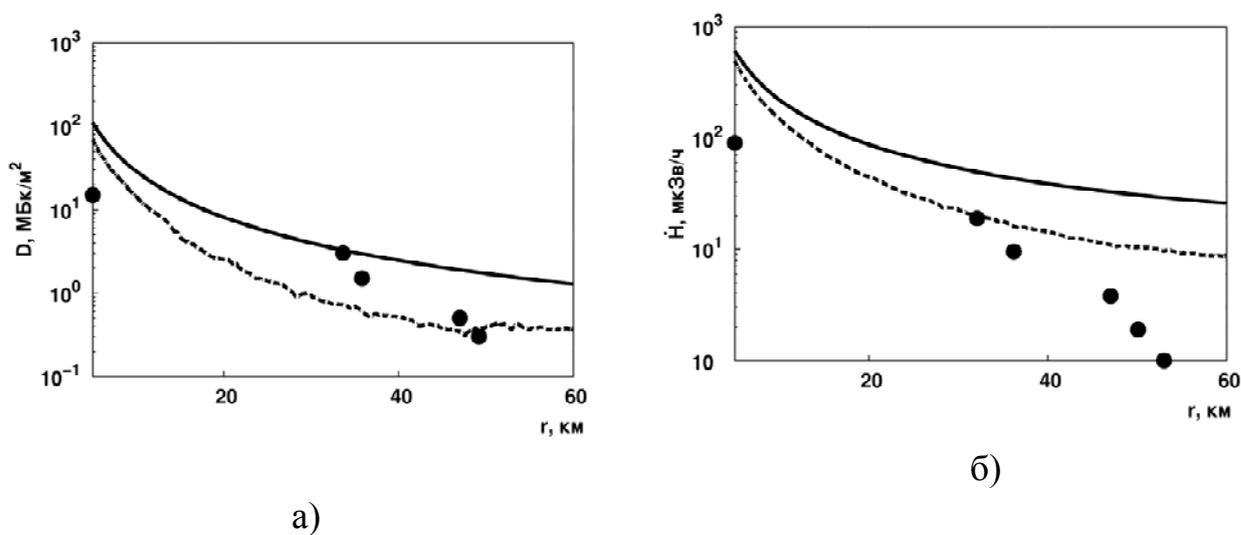


Рисунок 43 – Расчетная с учетом (---) и без учета орографии местности (—) и измеренная (●) плотность выпадений ^{137}Cs (а) и мощность дозы (б) по оси следа на 29 апреля 2011 г [160]

4.5 Выводы по главе 4

В четвертой главе проведено описание результатов разработки схемы интеграции двух разработанных программных средств и модуля реализующего расширяемую автоматизированную связь с результатами моделирования внутриреакторных процессов современными тяжелоаварийными кодами при запроектных авариях на АЭС в единый программный комплекс. При этом, поскольку основной задачей тяжелоаварийного кода является оценка выхода радионуклидов в атмосферу, его интеграция осуществляется через модуль обработки оценки выхода радионуклидов в атмосферу. Поэтому замена одного тяжелоаварийного кода на другой осуществляется путем замены интерфейсного модуля и не представляет проблемы.

Также в главе 4 представлены результаты разработки программного комплекса для расчетного обоснования радиационной безопасности населения при запроектных авариях на объектах ядерной энергетики на примере интеграции тяжелоаварийного кода СОКРАТ, разработанного в ИБРАЭ РАН. Показаны логические и программные связи программных модулей и описаны возможности

работы программного комплекса как для аварий с известным выбросом радионуклидов в атмосферу, так и для аварий на реакторных установках, где имеется необходимость использования тяжелоаварийных кодов.

Апробация программного комплекса была проведена на примере аварии на АЭС Фукусима 1. Был реконструирован северо-западный радиоактивный след. При этом при помощи тяжелоаварийного кода был оценен выход радионуклидов в атмосферу. С использованием программного средства для выработки рекомендаций по применению защитных мероприятий проведены оценки распространения загрязнения в атмосфере рассчитаны плотность поверхностных выпадений и мощность дозы. Сопоставление с данными натурных измерений показало, что прогностические значения параметров радиационной обстановки удовлетворительно описывают измеренные значения, обеспечивая разумную консервативность расчетных данных, что позволяет использовать программный комплекс для расчетного обоснования радиационной безопасности населения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе проведен анализ существующей отечественной и международной нормативно-правовой базы и методов и способов обоснования радиационной безопасности населения при запроектных радиационных авариях. Было показано, что обоснование радиационной безопасности строится на основе комплексного анализа радиационной обстановки, где ключевым звеном являются прогностические оценки с использованием моделей атмосферного переноса и имеется проблема повышения точности таких оценок. В связи с этим возникла необходимость разработки интегрального программного комплекса, объединяющего в себе компоненты прогнозирования и компоненты уточнения прогноза с использованием данных натурных измерений с использованием метеомачт и датчиков АСКРО и сквозного моделирования аварии от исходного события до прогностических доз на население. Требование к консервативности проводимых расчетов, скорости расчетов и измерениях, проводимых на ранней фазе развития аварии определили систему моделей прогноза и восстановления параметров атмосферного выброса.

На основе отобранных моделей была разработана общая модель (состав, принцип взаимодействия) и программное средство прогнозирования радиационной обстановки и доз облучения населения для выработки рекомендаций по применению защитных мероприятий при расчетном обосновании радиационной безопасности населения при запроектных радиационных авариях. В программное средство интегрированы модели расчета распространения радионуклидов в атмосфере, модели учета топографии местности, параметров фиктивного источника, эффективной высоты подъема облака загрязняющего вещества, параметров полидисперсного распределения активности по диаметрам в выбросе, дозиметрические модели и модели расчета предотвращаемых доз при проведении защитных мероприятий. Проведена верификация программного средства на данных реальных аварий, данных экспериментов и путем сопоставления с результатами модельных расчетов другими программными средствами по атмосферной дисперсии.

Для минимизации неопределенностей прогноза распространения загрязняющих веществ на основе применения метода нелинейного регрессионного анализа с использованием метода последовательного байесового оценивания и с учетом современного технического оснащения групп радиационной разведки была разработана методика восстановления параметров атмосферного выброса в рамках используемой общей модели прогнозирования распространения загрязнения в атмосфере. На основе этой методики разработано программное средство для восстановления параметров атмосферного выброса. Он был верифицирован как на модельных задачах, так и на данных натурных измерений при реальной радиационной аварии.

Разработан интегральный программный комплекс для расчетного обоснования радиационной безопасности населения при запроектных авариях на объектах ядерной энергетики, связанных с выходом радиоактивных веществ в атмосферу, усовершенствующий систему научно-технической поддержки при выработке рекомендаций по применению защитных мероприятий. Он включает три программных средства, обеспечивающих расчеты последствий радиационных аварий на объектах ядерной энергетики для населения, и предоставляющий возможность работы в режиме постоянного уточнения прогноза по мере поступления данных при комплексном анализе радиационной аварии и оценки выхода радионуклидов из под защитной оболочки в атмосферу при авариях на реакторных установках. На примере интеграции расчетного кода СОКРАТ выполнена верификация программного комплекса в режиме сквозного моделирования при реконструкции северо-западного радиоактивного следа после аварии на АЭС Фукусима-1.

Разработанный автором программный комплекс внедрен в Северский филиал ФГУП «Аварийно-технический центр Минатома России», ФГУП «СКЦ Росатома», центр технической поддержки ИБРАЭ РАН, ОАО «ПО «Электрохимический завод».

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

- АСКРО – автоматизированная система контроля радиационной обстановки
- АЭС – атомная электростанция
- ВАБ – вероятностный анализ безопасности
- ВВЭР – водо-водяной энергетический реактор
- ЗО – защитная оболочка
- ИРГ – инертный радиоактивный газ
- ЛПЭ – линейная передача энергии
- МАГАТЭ – Международное Агентство по атомной энергии
- МКРЗ – Международная комиссия радиологической защиты
- НП – нормы и правила
- НРБ – Нормы Радиационной Безопасности
- ОБЭ – относительная биологическая эффективность
- ОВОС – Оценка воздействия на окружающую среду
- ООБ – отчет по оценке безопасности
- ОСПОРБ – Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности
- ОЯТ – отработавшее ядерное топливо
- ПК – программный комплекс
- ПОО – потенциально опасный объект
- ПООБ – предварительный отчет по оценке безопасности
- ПРЛ – передвижная лаборатория радиационного контроля
- ПС – программное средство
- РБ – руководство по безопасности
- РБМК – реактор большой мощности канальный
- РУ – реакторная установка
- СЗЗ – санитарно-защитная зона
- СХК –ОАО «Сибирский химический комбинат»
- СЦР – самоподдерживающаяся цепная реакция деления
- ТВС – тепловыделяющая сборка

ТВЭЛ – тепловыделяющий элемент

ЦТП – центр технической поддержки

ЯРОО – ядерно-радиационноопасный объект

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. НП-016-05 Общие положения обеспечения безопасности объектов ядерного топливного цикла ОПБ ОЯТЦ. Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору. – 2005. – 2 дек.
2. НП-001-97 (ПНАЭ Г-01-011-97) Общие положения обеспечения безопасности атомных станций ОПБ-88/97. – 1998.
3. Об утверждении Положения об оценке воздействия намечаемой хозяйственной и иной деятельности на окружающую среду в Российской Федерации. Приказ Госкомэкологии РФ № 372. – 2000. – 16 май.
4. Требования к содержанию отчета по обоснованию безопасности АС с реакторами типа ВВЭР. НП-006-98 (ПНАЭ Г-01-036-95). – М., 1998.
5. Об экологической экспертизе. Федеральный закон № 174-ФЗ // Рос. газ. – 1995. – 30 ноя.
6. Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ 99/2010) СП 2.6.1.2612-10. – М., 2010.
7. Положение о порядке объявления аварийной обстановки, оперативной передачи информации и организации экстренной помощи атомным станциям в случае радиационно опасных ситуаций НП-005-98. – М., 2000.
8. 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. – 8 июн.
9. ISBN 92-0-111503-2 Method for developing arrangements for response to a nuclear or radiological emergency EPR-Method (2003). – IAEA. Vienna, 2003.
10. ICRP Publication 103. The 2007 Recommendation of International Commission on Radiological Protection. – The International Commission on Radiological Protection, 2007. – 273 с.
11. Сайт гильдии экологов: [Электронный ресурс]. URL: <http://www.ecogiuld.ru>.

12. Методика расчета концентраций в атмосферном воздухе вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий. ОНД-86.- Л:Гидрометеоиздат,1987.- 93 с.
13. Сайт НПО «Гарант»:[Электронный ресурс]. <http://garant.hut.ru/programs/universal.html>.
14. EPA-454/R-98-009. A comparison of CALPUFF modeling results to two tracer field experiments. – U.S. Environmental Protection Agency Office of Air Quality Planning and Standards Emissions, Monitoring, and Analysis Division Research Triangle Park, NC 27711, 1998. – 48 с.
15. B.A. Boughton, J.M. DeLaurentis Description and Validation of ERAD: An Atmospheric Dispersion Model for High Explosive Detonations. Sandia report. SAN92-2069 US-702, 2008. – 80 с.
16. АРМ анализа и прогноза радиационной обстановки. Руководство пользователя. Книга 2. НПО «Тайфун». – Обнинск, 1995.
17. Модель мезо-масштабного переноса радиоактивных веществ в атмосфере. Руководство пользователя. НПО «Тайфун». – Обнинск, 2000.
18. Нострадамус. Компьютерная система прогнозирования и анализа радиационной обстановки на ранней стадии аварии на АЭС. Инструкция пользователя. ИБРАЭ РАН, инв. №3429. –М., 2001.
19. Халевин Р.Г., Бердников А.В. Компьютерные программы для экологов//Экологические системы и приборы.- 2002.-№3.-С. 35-38.
20. Яцало Б.И., Демин В.Ф. Поддержка принятия решений по управлению техногенно загрязненными территориями на основе анализа риска с применением геоинформационной технологии// Атомная энергия.- 2002.- Т.93.- Вып. 2. - С. 128-136.
21. 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.
22. 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.

23. Программа ДОЗА-RRC. ОФАП-ЯР, N 393 от 28.12.96.

24. Еремеев М.С., Еременко В.А., Жернов В.С. и др. Гибридный мониторинг радиационной обстановки перспективный подход к оперативному контролю и прогнозированию радиационных загрязнений среды выбросами и сбросами АЭС. - Атомная энергия, 1985, т. 59, вып. 5, С. 370-372.

25. Еремеев И.О., Жернов В.С., Клименко М.А., Коцарь Ю.Ю., Скаткин В.В. Цели и средства мониторинга радиоактивного загрязнения среды. Атомная энергия, т. 65, вып. 6, декабрь 1988, С. 437-439.

26. Об утверждении и введении в действие раздела II «Государственное регулирование безопасности при использовании атомной энергии» перечня нормативных правовых актов и нормативных документов, относящихся к сфере деятельности Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору (П-01-01-2013). –М., 2013.

27. О гарантиях безопасного и устойчивого функционирования атомной энергетики Российской Федерации. Указ Президента РФ №1012. –М., 1996.

28. Об утверждении Положения о разработке и утверждении федеральных норм и правил в области использования атомной энергии. Постановление Правительства РФ №1511. – М., 1997.

29. О защите населения и территорий от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера. Федеральный закон РФ №68-ФЗ. – М., 1994.

30. Об использовании атомной энергии. Федеральный закон РФ №170-ФЗ. – М., 1995.

31. Об охране окружающей среды. Федеральный закон РФ №7-ФЗ. – М., 2002.

32. О радиационной безопасности. Федеральный закон РФ №3-ФЗ. – М., 1996.

33. О санитарно-эпидемиологическом благополучии населения. Федеральный закон РФ №52-ФЗ. – М., 1999.

34. Об утверждении Положения о государственной санитарно-эпидемиологической службе Российской Федерации и Положения о государственном санитарно-эпидемиологическом нормировании. Постановление Правительства РФ №554. – М., 2000.

35. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009)». Санитарные правила и нормативы СанПин 2.6.1.2523-09. – М., 2009.

36. Положение о порядке объявления аварийной готовности, аварийной обстановки и оперативной передачи информации в случае радиационно-опасных ситуаций на предприятиях ядерного топливного цикла (НП-078-06). Постановление Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору №15. – М., 2006.

37. Положение о повышении точности прогностических оценок радиационных характеристик радиоактивного загрязнения окружающей среды и дозовых нагрузок на персонал и население (РБ-053-10). Приказ Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору № 465. – М., 2010.

38. Готовность и реагирование в случае ядерной и аварийной ситуации. МАГАТЭ. – Вена, 2004.

39. Руководство по радиационной защите при авариях ядерных реакторов IAEA-TECDOC-953. МАГАТЭ, 1998 .

40. Руководство по радиационной защите при авариях на ядерных реакторах IAEA-TECDOC-955. МАГАТЭ, 1998.

41. Руководство по мониторингу при ядерных или радиационных авариях IAEA-TECDOC-1092. МАГАТЭ, 2002.

42. Общие инструкции оценки и реагирования на радиологические аварийные ситуации IAEA-TECDOC-1162. МАГАТЭ, 2004.

43. Организация готовности к ядерной или радиационной аварийной ситуации»GS-G-2.1. МАГАТЭ, 2007.

44. Критерии для использования при обеспечении готовности и реагирования в случае ядерной или радиологической аварийной ситуации GSG-2. МАГАТЭ, 2012.

45. Хамаза А.А., Строганов А.А., Шаповалов А.С. Современные подходы к оценке радиационных последствий аварий, сопровождающихся выбросом радиоактивных веществ. Уроки аварии на АЭС «Фукусима-Дайичи». Труд ФБУ «НТЦ ЯРБ».

46. Radiation protection and safety of radiation sources: international basic safety standards. General safety requirements. International atomic energy agency. 2014.

47. International basic safety standards for protection against ionizing radiation and for the safety of radiation sources. International atomic energy agency, 1996.

48. The ICRP Database of Dose Coefficients: Workers and Members of the Public, version 2.0.1, an extension of ICRP Publications 68 and 72 developed by Task Group on Dose Calculations on Committee 2 of the International Commission on Radiological Protection. CDROM. PergamonPress, Oxford, UK, 2001.

49. Кадацкая М.М. О соответствии базы данных дозовых коэффициентов МКРЗ 1996 рекомендациям МКРЗ 2007 года, Минск.

50. Nuclear decay data for dosimetric calculations/ ICRP Publication 107. ICRP, 2007.

51. Radionuclide Transformations - Energy and Intensity of Emissions. ICRP Publication 38. ICRP 11-13, 1983.

52. Radiation protection and safety of radiation sources: international basic safety standards. Interim edition. General safety requirements. International atomic energy agency, 2011.

53. Keith F. Eckerman, Jeffery C. Ryman. External exposure to radionuclides in air, water, and soil. Oak Ridge national laboratory, 1993. – 238 с.

54. Conversion coefficients for Radiological Protection Quantities for external radiation exposure. ICRP Publication 116, Ann. ICRP, 2010.

55. Beck H.L., J. DeCampo, and C.V.Gogolak. "In situ Ge(Li) and NaI(Tl)Gamma-ray Spectrometry". US DOE Report HASL-258 (1972).

56. Елохин А.П., Рау Д.Ф., Рыжов Н.В. Концепция создания автоматизированной системы контроля радиационной обстановки в районе размещения атомных станций России. Тезисы докладов Международного симпозиума по радиационной безопасности. Москва, 1994. – т. 1, с. 31.

57. Антоний Е.В., Арутюнян Р.В., Богатов С.А. «Развитие систем аварийного реагирования и радиационного мониторинга»./ В кн. Труды ИБРАЭ РАН под редакцией члена-корреспондента РАН Л.А.Большова. М.:«Наука», 2013 г.

58. Елохин А.П. Оптимизация методов и средств автоматизированных систем контроля радиационной обстановки окружающей среды. Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. М.: МИФИ, 2001, 325 с.

59. Богатов С.А., Киселев А.А. Шведов А.М. Развитие существующих систем АСКРО в концепции гибридного мониторинга./ В кн. Труды ИБРАЭ РАН под редакцией члена-корреспондента РАН Л.А.Большова. М.:«Наука», 2013 г.

60. Библиотека констант для расчетов радиационных последствий аварий (обзор и предварительные рекомендации): реферат/Иванов Е.А. Кочанов В.А. Коренев А.И. Булгаков В.Г. Семенов В.Н. Бакин Р.И. – Москва: ИБРАЭ РАН, 2000. – 20 с.

61. Гигиенические требования к проектированию предприятий и установок атомной промышленности (СПП ПУАП-03). Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы СанПиН 2.6.1.07-03 Утв. Главным государственным санитарным врачом Российской Федерации 8 января 2003 г., с 1 июня 2003 г.

62. 2.6.1. Ионизирующее излучение, радиационная безопасность. Контроль радиационной безопасности. Общие требования. Методические указания МУ 2.6.1.14-2001.

63. Наставление гидрометеорологическим станциям и постам. Вып. 3, часть 1, Л.: Гидрометеиздат, 1985. – 301 с.

64. Учет внешних воздействий природного и техногенного происхождения на объекты использования атомной энергии. НП-064-05. Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору. – М., 2005.

65. Савельева-Трофимова Е.А., Киселев А.А. Метод регуляризации решения линейного интегрального уравнения для задачи аэрогамма-съемки. Тезисы. Сборник трудов XI научной школы молодых ученых ИБРАЭ РАН. Препринт /Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН, апрель 2010, №ИБРАЭ-2010-01).-М. ИБРАЭ РАН, 2010. – 188 с.

66. Савельева-Трофимова Е.А., Киселев А.А. Метод регуляризации решения линейного интегрального уравнения для задачи аэрогамма-съемки. Тезисы. Международный молодежный научный форум «Ядерное будущее»: Сборник тезисов докладов/ Отв. редактор Д.Н. Давыдова – Москва, 2011. – 231с.

67. Богатов С.А., Шведов А.М. Восстановление фонового спектра для обработки данных аэрогамма съемки. Атомная энергия, т.111, вып. 1, июль 2011. – С. 37-41.

68. Богатов С.А., Егорова М.Е., Савельева Е.А., Ткаченко С.А., Шведов А.М. Обработка и интерпретация данных для задач аэрогамма съемки. Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций, ВИНТИ, №6, 2011. – С. 87-97.

69. Богатов С.А., Долгов В.Н., Егорова М.Е. Применение геоинформационных технологий для представления данных аэрогамма спектрометрического комплекса. Вестник компьютерных и информационных технологий, №3, 2011. – С. 16-21.

70. Методические указания по расчету радиационной обстановки в окружающей среде и ожидаемого облучения населения при кратковременных выбросах радиоактивных веществ в атмосферу. МПА-98. Минатом России, М., 1998.

71. Методы расчета распространения радиоактивных веществ в окружающей среде и доз облучения населения. МХО ИНТЕРАТОМЭНЕРГО, М., 1992

72. Талерко Н.Н. Физические особенности и ограничения моделей атмосферного переноса радионуклидов для различных пространственно-временных масштабов. Научно-технический сборник “Проблемы безопасности атомных станций и Чернобыля”, вып. 11. – 2009.

73. Методика расчета рассеяния загрязняющих веществ в атмосфере при аварийных выбросах. РД 52.18.717-2009. Обнинск, ООО «ПРИНТ-СЕРВИС» - 2009.

74. Богатов С.А., Киселев А.А. Предварительные результаты верификации модели ПРОЛОГ на натуральных экспериментах. Тезисы. 55-я научная конференция МФТИ, 2012.

75. Доза-М – программное средство для расчета доз облучения населения вокруг атомных станций при авариях. Верификационный отчет. Москва, Российский научный центр “Курчатовский институт” 1998.

76. Steven R. Hanna, Gary A. Briggs, Rayford P. Hosker, Jr. Handbook on atmospheric diffusion. Atmospheric Turbulence and diffusion laboratory National Oceanic and Atmospheric Administration. Technical information center US department of energy, 1982. – 110 с.

77. Богатов С.А., Киселев А.А., Шведов А.М. Методические подходы для оценок радиационной обстановки, ожидаемого облучения и эффективности контрмер при кратковременных выбросах радиоактивных веществ в атмосферу в модели ПРОЛОГ: Препринт ИБРАЭ №ИВРАЕ-2011-02, 2011.

78. Машкович В.П., Кудрявцева А.В. Защита от ионизирующих излучений: Справочник 4-е изд., перераб. и доп. 1995. – 496 с.

79. Итоговый отчет по договору №2-10(316)-1-1802/1985-5-96/2008 от 01.04.2008 «Разработка математической модели для расчетов процессов осаждения загрязнителя на горизонтальные и вертикальные поверхности с учетом трехмерного распространения загрязняющей примеси». РФЯЦ-ВНИИЭФ, ИТМФ, Саров-2008.

80. User's Guide for the Industrial Source Complex (ISC3) Dispersion Models. V. II – Description of Model Algorithms. EPA-454/B-95-003b. US Environmental Protection Agency, September 1995.

81. Библиотека констант для расчетов радиационных последствий аварий (обзор и предварительные рекомендации.: реферат/Иванов Е.А. Кочанов В.А. Коренев А.И. Булгаков В.Г. Семенов В.Н. Бакин Р.И. – Москва: ИБРАЭ РАН, 2000. – 20 с.

82. Беликов В.В., Головизнин В.М., Семенов В.Н., и др. Инженерная методика расчета конвективного подъема струи аварийного выброса. Труды ИБРАЭ РАН. Вып. 9. 2008, – С. 22–40.

83. Alan J. Cimorelli, U. S., Steven G. Perry, Akula Venkatram AERMOD: description of model formulation. EPA-454/R-03-004. U.S. Environmental Protection Agency Office of Air Quality Planning and Standards Emissions Monitoring and Analysis Division Research Triangle Park, 2004.

84. Арутюнян Р.В., Беликов В.В., Беликова Г.В., Сороковикова О.С. и др. Новые эффективные численные методики моделирования процесса распространения радионуклидов в атмосфере и их практическое использование. Известия академии наук, серия Энергетика, № 4, 1995.

85. Safety reports series №14. International atomic energy agency. 1996. – 95с.

86. RadEnvir 3.1. Облучение населения при загрязнении сельскохозяйственной, сельской и городской окружающей среды различными радионуклидами. Укр. ИРЗ, МАГАТЭ – 2005.

87. Прогнозирование радиоактивного загрязнения местности и его воздействия на население на случай аварийного взрыва ядерного боеприпаса внутри высокопрочного инженерного сооружения. 2.6.1 Ионизирующее излучение. Радиационная безопасность. Методические указания. Государственная санитарно-эпидемиологическая служба Российской Федерации, МУ 2.6.1.019-03. Министерство обороны Российской Федерации, Федеральное управление медико-

биологических и экстремальных проблем при Министерстве здравоохранения Российской Федерации, Москва 2003.

88. Гусев Н.Г., Беляев В.А. Радиоактивные выбросы в биосфере: Справочник. 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1991– 256 с.

89. Ильин Л.А., Архангельская Г.В., Константинов Ю.О., Лихтарев И.А. Радиоактивный йод в проблеме радиационной безопасности. – М.: Атомиздат, 1972 – 272 с.

90. B. Addepalli, K. Sikorski, E.R. Pardyjak Source characterization of atmospheric releases using stochastic search and regularized gradient optimization, 2011.

91. Расчетный код «СОКРАТ/В1», Аттестационный паспорт программного средства, Рег. номер 275, 13.05.2010.

92. C. M. Allison, R. J. Wagner, RELAP/SCDAPSIM/MOD3.2 Supplemental Input Manual, Innovative Systems Software, LLC., 2001.

93. Программное средство «SULTAN» оперативного прогнозирования радиационной обстановки за пределами станции в случае аварии на АЭС. Инструкция пользователя. Утв. Техническим директором «Концерн Росэнергоатом» 12.10.2000. – М., 2000.

94. Nuclear Fuel Cycle Facility Accident Analysis Handbook, NUREG-1320. 1988.

95. Nuclear Fuel Cycle Facility Accident Analysis Handbook. NUREG/CR-6410. U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC 20555-0001, March 1988.

96. Bloom S. G. Models for close-in atmospheric dispersion, explosive releases, and particle deposition. ORNL/TM-12452, U.S. Department Of Energy, 1993.

97. Алексахин Р.М., Булдаков Л.А., Губанов В.А. и др. Крупные радиационные аварии: последствия и защитные меры / Под общ. ред. Л.А.Ильина и В.А.Губанова. – М.: ИздАТ, 2001. – 752 с.

98. Елохин А.П., Рау Д.Ф. Гибридный метод прогнозирования загрязнения окружающей среды радиоактивной примесью, поступающей в

атмосферу при выбросах с АЭС. В сб. Методы расчета распространения радиоактивных веществ в окружающей среде и доз облучения населения. М.: МХО Интератомэнерго, 1992. – С. 91, 283-303.

99. Требования к планированию и обеспечению готовности к ликвидации последствий аварий при транспортировании ядерных материалов и радиоактивных веществ НП 074-06. Постановление Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору №8, 2006.

100. MELCOR Accident consequence code system (MACCS). Model description. NUREG/CR-4691, SAND86-1562. V.2, 1990.

101. Верификационный отчет базовой версии расчетного комплекса СОКРАТ/В1. Отчет ИБРАЭ РАН, 930 с.

102. Колобашкин В.М., Рубцов П.М., Ружанский П.А. Радиационные характеристики облученного ядерного топлива: Справочник Энергоатомиздат, 1983.

103. Талерко Н.Н. Восстановление параметров Чернобыльского выброса по измерениям мощности экспозиционной дозы в г. Припять. Ядерная физика и энергетика №2, 2010.

104. Branko Ristic, Ajith Gunatilaka, Ralph Gailis Bayesian likelihood-free localisation of a biochemical source using multiple dispersion models. Defence Science and Technology Organisation. – Australia, 2014.

105. Шведов А.М., Долгов В.Н., Пименов А.Е., Ткаченко С.А., Гаврилов С.Л., Богатов С.А. Определение загрязнения почвы Cs-137 на территории Брянской области с использованием различных методов измерений и обработки экспериментальных данных. Сборник трудов XV научной школы молодых ученых ИБРАЭ РАН, проходившей 24-25 апреля 2014 г. – (Препринт / Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН, апрель 2014, № IBRAE-2014-02). – М. ИБРАЭ РАН, 2014. – С. 227-230.

106. Douglas C Montgomery Design And Analysis Of Experiments, 5Th Edition Arizona State University, USA, 2001.

107. Машеров Е.Л. Методы оценивания зависимостей, использующие сингулярное разложение. Смещенные и несмещенные оценки: дис. ...к-та техн.наук: 05.13.16/Машеров Евгений Леонидович. – Одесса, 1991. – 127 с.

108. Стрижов В.В., Крымова Е.А. Методы выбора регрессионных моделей. Вычислительный центр РАН. – М., 2010.

109. Тихонов А. Н., Арсенин В. Я., Методы решения некорректных задач. М.: Наука, изд.2-е, 1979.

110. Померанцев А.Л. методы нелинейного регрессионного анализа для моделирования кинетики химических и физических процессов: дис. ...физ.мат.наук: 01.04.17/Померанцев Алексей Леонидович. – М.,2003. – 304 с.

111. Комиссаров Ю. А., Дам Куанг Шанг, “Использование алгоритма Левенберга–Марквардта для нахождения параметров бинарных пар в уравнениях Вильсона, НРТЛ и ЮНИКВАК”, Вестн. Астрахан. гос. техн. ун-та. Сер. управление, вычисл. техн. информ., 2011, № 2, – С. 37–42.

112. Богатов С.А., Киселев А.А., Шведов А.М. Развитие существующих систем АСКРО в концепции гибридного мониторинга./ В кн. Труды ИБРАЭ РАН под редакцией члена-корреспондента РАН Л.А.Большова. М.:«Наука», 2013.

113. Good practice guide for atmospheric dispersion modeling. National institute of water and atmospheric research, Aurora Pacific limited and Earth Tech Incorporated for Ministry for the Environment, 2004.

114. ARI-RR-1384 SOURCE CHARACTERIZATION MODEL (SCM) A PREDICTIVE CAPABILITY FOR THE SOURCE TERMS OF RESIDUAL ENERGETIC MATERIALS FROM BURNING AND/OR DETONATION ACTIVITIES SERDP PROJECT CP-1159 FINAL REPORT, 2004.

115. Steven R. Hanna, Bruce A. Egan, John Purdum, and Jen Wagler EVALUATION OF THE ADMS, AERMOD, AND ISC3 DISPERSION MODELS WITH THE OPTEX, DUKE FOREST, KINCAID, INDIANAPOLIS, AND LOVETT FIELD DATA SETS.

116. Беликов В.В., Головизнин В.М., Семенов В.Н., Модель конвективного подъема примесей при выбросе в атмосферу со взрывным

выделением энергии. Труды ИБРАЭ РАН. Вып. 9: Моделирование распространения радионуклидов в окружающей среде, ИБРАЭ. –М., 2008.– С. 8-21.

117. Юрченко А.А. Физические процессы выброса пылегазового облака при массовых взрывах в карьерах. Науковий вісник НГУ, № 2, 2010. – С. 85-88 .

118. Руководство по установлению допустимых выбросов радиоактивных веществ в атмосферу (ДВ-98). Минатом России, Госкомэкология России, Москва, 1999.

119. Cooling Tower Drift Dye Tracer Experiment. Environmental System Corporation, PPSP-CPCTP. 1977.

120. Information technology — Programming languages — C++, ISO/IEC 14882:2011.

121. Бьёрн Страуструп Язык программирования C++. Специальное издание = The C++ programming language. Special edition. — М.: Бином-Пресс, 2007. — 1104 с. — ISBN 5-7989-0223-4.

122. Roberto Ierusalimschy. Programming in Lua Lua.org, ISBN 859037985X, 2013.

123. Саммерфилд М. Qt. Профессиональное программирование. Разработка кроссплатформенных приложений на C++. ISBN 978-5-93286-207-0— СПб.: «Символ-Плюс», 2011. — 560 с.

124. Интерактивный картографический портал: [Электронный ресурс], URL: <http://www.openstreetmap.org/>.

125. Левин М.П. Параллельное программирование с использованием OpenMP. М.:Интернет-университет информационных технологий; Бином. Лаборатория знаний, 2008. – 118 с.

126. Benedict Gaster, Lee Howes, David R. Kaeli, Perhaad Mistry, Dana Schaa Heterogeneous Computing with OpenCL, Second Edition: Revised OpenCL 1.2 Edition.

127. Сандерс Дж., Кэндрот Э. Технология CUDA в примерах: введение в программирование графических процессоров: пер. с англ. Слинкина А.А., научный редактор Борисков А.В. – М.:ДМК Пресс, 2011. – 232 с.

128. Научно-технический отчет “Анализ результатов проведения противоаварийных тренировок экспертов по радиационной безопасности АЭС, Кризисного центра “Концерн Росэнергоатом” и его центров технической поддержки”, Москва 2004.

129. Богатов С.А., Киселев А.А. Тестирование программного комплекса ПРОЛОГ на базе результатов расчетов параметров радиационной обстановки аттестованными программными средствами. Тезисы. Сборник трудов XIV научной школы молодых ученых ИБРАЭ РАН. Препринт /Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН, апрель 2013, №ИВРАЕ-2013-03).- М. ИБРАЭ РАН, 2013. – 181 с.

130. J.Pasler-Sauer Comparative calculations and validation studies with atmospheric dispersion models. //Report KfK 4164, 1986. – 130 с.

131. Богатов С.А., Киселев А.А. Предварительные результаты верификации модели ПРОЛОГ на натуральных экспериментах. Тезисы. 55-я научная конференция МФТИ, 2012.

132. Арутюнян Р.В., Данилян В.А., Высоцкий В.Л. и др. Анализ и оценка радиоэкологических последствий ядерной аварии в бухте Чажма: Препринт ИБРАЭ №ИВРАЕ-98-09, 1998.

133. Bogatov S. Kiselev A. Model “PROLOG” for countermeasures efficacy assessment and its calculation algorithm verification on the base of the Chazhma Bay accident data. International Journal of Information Systems for Crisis Response and Management (IJISCRAM), Issue 2, 2013. – С. 60-67.

134. Богатов С.А., Киселев А.А. Моделирование распространения радионуклидов при аварии в бухте Чажме с учетом полидисперсности и орографии местности. Атомная энергия № 112, 2012. – С. 233-236.

135. Богатов С.А. , Киселев А.А. Характерные особенности модели «ПРОЛОГ»: предварительное тестирование. Сборник трудов XII научной школы

молодых ученых ИБРАЭ РАН. Препринт /Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН, апрель 2011, №ИБРАЭ-2011-03).-М. ИБРАЭ РАН, 2011. – 166 с.

136. Shuttle Radar Topography Mission:[Электронный ресурс].URL: "<http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/>".

137. The radiological accident in the reprocessing plant at Tomsk, International atomic energy agency (IAEA), Vienna, 1998.

138. Вакуловский С.М., Шершаков В.М., Бородин Р.В. Анализ и прогноз радиационной обстановки в районе аварии на сибирском химическом комбинате Радиация и риск, вып. 3, приложение 2, 1993.

139. Богатов С.А., Киселев А.А. Прогнозирование радиационной обстановки программным комплексом ПРОЛОГ на примере аварии в ПО Маяк в 1957 г и аварии на СХК в 1993 г. Труды 56-я научной конференции МФТИ, 2013.

140. Богатов С.А., Киселев А.А., Уткин С.С. и др. Оценка объема дополнительного поступления воды на акваторию и водосборную площадь Теченского каскада водоемов с атмосферными выбросами из градирен проектируемой Южно-Уральской АЭС Вопросы радиационной безопасности, № 2 (70), 2013. – С. 64-70.

141. Аттестационный паспорт программного средства НОСТРАДАМУС / Федеральный надзор России по ядерной и радиационной безопасности. – Регистрац. номер паспорта аттестации 158 от 28.03.2003.

142. Bogatov S. Kiselev.A Model “PROLOG” for countermeasures efficacy assessment and its calculation algorithm verification on the base of the Chazhma Bay accident data. Proceedings of the 9th International ISCRAM Conference – Vancouver, Canada, April 2012.

143. Wade D., Senocak I. Stochastic reconstruction of multiple source atmospheric contaminant dispersion events Atmospheric Environment 74, 2013 – С. 45-51.

144. Зедгинидзе И.Г. Планирование эксперимента для исследования многокомпонентных систем. М., «Наука», 1976. – 390 с.

145. Hastie T., Tibshirani R., Friedman J., *The Elements of Statistical Learning : Data Mining, Inference, and Prediction*. — Springer-Verlag, 2001. — 533 с.
146. Димиденко Е.З. *Линейная и нелинейная регрессии* Издательство “Финансы и статистика”, 1981. – 303 с.
147. Крянев А.В., Лукин Г.В. *Математические методы обработки неопределенных данных* ISBN 5-9221-0412-8.. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. – 216. с.
148. Бард И. *Нелинейное оценивание параметров*. – М.: Статистика, 1979.
149. Теребиж В.Ю. *Введение в статистическую теорию обратных задач*.- М.: ФИЗМАТЛИТ. 2005. – 376 с.
150. Айвазян С.А. и др. *Прикладная статистика: Исследование зависимостей: Справ. Изд. /С.А. Айвазян, И.С. Енюков, Л.Д. Мешалкин; под. Ред.С.А. Айвазян.-М.: Финансы и статистика, 1985. – 487 с.*
151. Никипелов Б.В., Дрожко Е.Г. *Взрыв на Южном Урале*. – *Природа*, №5, 1990. – С. 48-49.
152. Авраменко М.И., Аверин А.Н., Лобойко Б.Г., и др. *Авария 1957 г. Оценка параметров взрыва и анализ характеристик радиоактивного загрязнения территории*. –*Вопросы радиационной безопасности*, 1977, №3, С. 18–28.
153. Богатов С.А., Киселев А.А., Крылов А.Л. *Реконструкция загрязнения на Восточно-Уральском радиоактивном следе программным комплексом ПРОЛОГ Атомная энергия*. – 2013. – № 115. С. 233-236.
154. Peremyslova L.M., Tolstykh E.I., Vorobiova M.I. et al. *Analytical review of data available for the reconstruction of doses due to residence on the East Ural Radioactive Trace and the territory of windblown contamination from lake Karachay. US–Rus. Joint Coordinating Com. on Rad. Effects Research. Project 1.1 - Further Studies on Uncertainty, Confounding, and Validation of the Doses in the Techa River Dosimetry System. Final Rep. for Milestone 10, September 2004.*
155. *Последствия техногенного радиационного воздействия и проблемы реабилитации Уральского региона*. М.: МЧС, 2002. – 204 с.

156. Авакумов А.В., Алипченков В.М., Зайчик Л.И. и др. Верификация расчетного комплекса СОКРАТ/ВЗ. – в сб.: Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР, ОКБ «ГИДРОПРЕСС», Подольск, 2009.

157. Арутюнян Р.В. Авария на АЭС «Фукусима-1»: опыт реагирования и уроки Труды ИБРАЭ РАН / под. общ. ред. чл.-кор. РАН Л. А. Большова; Ин-т проблем безопасного развития атомной энергетики РАН. — М. : Наука, 2007 — . Вып. 13 : / науч. ред., 2013.– 246 с.

158. Арутюнян Р.В., Бакин Р.И., Долганов К.С., Киселев А.А. Реконструкция северо-западного радиоактивного следа при аварии на АЭС «Фукусима-1» (ЯПОНИЯ) с помощью программных комплексов СОКРАТ/ВЗ и ПРОЛОГ. Атомная энергия. – 2014. - № 116. С. 171-174.

159. Katata, G., et al., Numerical reconstruction of high dose rate zones due to the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant accident. –Journal of Environmental Radioactivity, V. 111, 2012 – С. 2–12.

160. Distribution Map of Radiation Dose. – Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology (MEXT), 2011.

СПИСОК ИЛЛЮСТРИРОВАННОГО МАТЕРИАЛА

1. Таблица 1 – Верификация и кросс-верификация моделей и участков сопряжения программных средств в рамках программного комплекса, страница 15.
2. Таблица 2 – Критерии для принятия неотложных решений в начальном периоде радиационной аварии [35], страница 21.
3. Таблица 3 – Критерии для решений об отселении и ограничении потребления загрязненных пищевых продуктов [35], страница 21.
4. Таблица 4 – Прогнозируемые уровни облучения, при которых необходимо срочное вмешательство [35], страница 22.
5. Таблица 5 – Рекомендованные значения тканевых весовых множителей, страница 26.
6. Таблица 6 – Критерии для защитных действий и других мер реагирования, принимаемых в ситуациях аварийного облучения с целью снижения риска детерминистических эффектов [52], страница 28.
7. Таблица 7 – Критерии для защитных действий и других мер реагирования, принимаемых в ситуациях аварийного облучения с целью снижения риска стохастических эффектов [52], страница 28.
8. Рисунок 1 – Общая схема сбора информации о радиационной обстановке территориальной АСКРО [57], страница 32.
9. Таблица 8 – Значения параметров c_3 для шероховатости подстилающей поверхности вне диапазона от 0.1 до 3 м [73], страница 38.
10. Рисунок 2 – Интеграл приземной концентрации трассера в эксперименте (E1) и рассчитанный с использованием модели РД 2009 (PR), страница 40.
11. Таблица 9 – Параметр m для профиля ветра [73], страница 41.
12. Таблица 10 – Величины коэффициентов kL и p для вычисления масштаба Монины-Обухова [79], страница 44.
13. Рисунок 3 – Экспериментальное распределение капель по диаметрам в устье градирни [119], страница 45.

- 14.Рисунок 4 – Схема расчета доз внешнего облучения, страница 51.
- 15.Таблица 11 – Рекомендуемые значения для параметра $K_{\alpha 1}$ [87], страница 54.
- 16.Таблица 12 – Рекомендуемые значения коэффициентов ослабления для различных населенных пунктов [88], страница 55.
- 17.Рисунок 5 – Коэффициент ослабления дозы на щитовидную железу от действия радионуклидов йода в зависимости от времени проведения мероприятия йодная профилактика (Отрицательное значение времени соответствует приему препарата до ингаляции)[89], страница 56.
- 18.Рисунок 6 – Пример факторного пространства для мощности дозы при варьируемых параметрах скорость ветра - высота подъема. Линиями уровня обозначены соответствующие значения мощности дозы гамма излучения, страница 58.
- 19.Таблица 13 – Разбиение радионуклидов по группам [100], страница 61.
- 20.Таблица 14 – Таблица с активностями части изотопов Cs, накопленных в реакторной установке за время кампании [102], Бк/т, страница 61.
- 21.Рисунок 7 – Схема взаимодействия моделей программного средства для выработки рекомендаций по применению защитных мероприятий при обосновании радиационной безопасности населения, страница 72.
- 22.Рисунок 8 – Окно задания исходных данных для расчета, страница 76.
- 23.Рисунок 9 – Окно задания целевых функций расчета, контрмер и критериев принятия решений, страница 77.
- 24.Рисунок 10 – Пример отображения результатов расчета в программном средстве [124], страница 78.
- 25.Рисунок 11 – Зависимость скорости расчета от числа узлов расчетной сетки для последовательный расчета (—), технологии OpenMP (---), OpenCL (· · ·), CUDA (-·-), страница 79.
- 26.Рисунок 12 – Сопоставление прогностических доз для населения с использованием ПС НОСТРАДАМУС (доза от облака (—), доза от поверхности (---), доза ингаляционная на детей (-·-·-),доза ингаляционная

на взрослых (---)) и разработанного программного средства (доза от облака (+), доза от поверхности (×), доза ингаляционная на детей (□), доза ингаляционная на взрослых (Δ)): категория устойчивости – А, скорость ветра – 1 м/с, шероховатость – 4 м (а); категория устойчивости – В, скорость ветра – 2 м/с, шероховатость – 1 м (б); категория устойчивости – С, скорость ветра – 5 м/с, шероховатость – 0.4 м (в); категория устойчивости – D, скорость ветра – 5 м/с, шероховатость – 0.1 м (г); категория устойчивости – Е, скорость ветра – 3 м/с, шероховатость – 0.04 м (д); категория устойчивости – F, скорость ветра – 2 м/с, шероховатость – 0.01 м (е), страница 81.

27. Рисунок 13 – Значения эффективной дозы внешнего облучения, полученные с использованием ПС НОСТРАДАМУС (---) и разработанным программным средством (•), страница 83.
28. Таблица 15 – Расстояния, на которых следует применить экстренные меры защиты по уровню Б [35] (в километрах), страница 83.
29. Рисунок 14 – Значения эффективной дозы внешнего облучения, полученные с использованием ПС НОСТРАДАМУС (---) и разработанным программным средством (•), страница 84.
30. Таблица 16 – Расстояния, на которых следует применить экстренные меры защиты по уровню А [35] (в километрах), страница 85.
31. Рисунок 15 – Значения эффективной дозы внешнего облучения, полученные с использованием ПС НОСТРАДАМУС (---) и разработанным программным средством (•), страница 86.
32. Таблица 17 – Расстояния, начиная с которых следует рассматривать возможность применения защитных мероприятий (уровень А таблицы 6.3 НРБ-99/2009), км, страница 86.
33. Рисунок 16 – Окно «Карта» с результатами расчета проинтегрированной по времени концентрации в эксперименте E1 [124], страница 88.
34. Рисунок 17 – Интеграл приземной концентрации трассера в эксперименте E1 (PR – модель разработанного программного средства,

- NSI* - модель ИБРАЭ «Нострадамус», *R* - гауссова *puff* модель (Дания), *L* - лагранжева модель *IABG* (Германия), *Du* - эйлерова модель (Германия)), страница 88.
35. Рисунок 18 – Окно карта с результатами расчета проинтегрированной по времени концентрации в эксперименте E2 [124], страница 90.
36. Рисунок 19 – Интеграл приземной концентрации трассера в эксперимент E2 (*PR* – модель разработанного программного средства, *NSI* - модель ИБРАЭ «Нострадамус», *R* - гауссова *puff* модель (Дания), *L* - лагранжева модель *IABG* (Германия), *Du* - эйлерова модель (Германия)), страница 90.
37. Рисунок 20 – Окно карта с результатами расчета проинтегрированной по времени концентрации в эксперименте E3 [124], страница 92.
38. Рисунок 21 – Интеграл приземной концентрации трассера в эксперимент E3 (*PR* – модель разработанного программного средства, *NSI* - модель ИБРАЭ «Нострадамус», *R* - гауссова *puff* модель (Дания), *L* - лагранжева модель *IABG* (Германия), *Du* - эйлерова модель (Германия)), страница 92.
39. Рисунок 22 – Окно карта с результатами расчета проинтегрированной по времени концентрации в эксперименте E4 [124], страница 94.
40. Рисунок 23 – Интеграл приземной концентрации трассера в эксперимент E4 (*PR* – модель разработанного программного средства, *NSI* - модель ИБРАЭ «Нострадамус», *R* - гауссова *puff* модель (Дания), *L* - лагранжева модель *IABG* (Германия), *Du* - эйлерова модель (Германия)), страница 94.
41. Рисунок 24 – Направление оси следа при аварии в бухте Чажма [124], страница 96.
42. Рисунок 25 – Результаты оценки эффективной высоты подъема программным комплексом, страница 97.
43. Рисунок 26 – Профиль рельефа по оси следа (по данным SRTM-съемки), страница 97.
44. Рисунок 27 – Результаты расчета плотности выпадений, страница 98.

- 45.Рисунок 28 – Расчетные (--) и экспериментальные (•) значения плотности поверхностных выпадений(а) Со-60 и мощности дозы (б) при аварии в бухте Чажма, страница 98.
- 46.Рисунок 29 – Расчетные (—) и экспериментальные (•) значения плотности поверхностных выпадений Ru-106 при аварии на радиохимическом заводе Сибирского химического комбината (СХК) по срезам следа на расстояниях 4,5 (а) и 12 км (б), страница 100.
- 47.Рисунок 30 – Результаты оценок дополнительных годовых поступлений от выпадений от планируемых градирен Южно-Уральской АЭС, мм/год (Картографические данные – Google), страница 101.
- 48.Рисунок 31 – Схема взаимодействия частей программного средства восстановления параметров атмосферного выброса, страница 115.
- 49.Рисунок 32 – Окно задания исходных данных программного средства для восстановления параметров атмосферного выброса, страница 116.
- 50.Рисунок 33 – Окно установки измерений на картографической подложке [124], страница 117.
- 51.Рисунок 34 – Отображение результатов расчета на карте [124], страница 117.
- 52.Таблица 18 – Радионуклидный состав, полученный в результате расчета, страница 119.
- 53.Таблица 19 – Результаты прямого расчета в точках проведения измерений, страница 119.
- 54.Таблица 20 – Радионуклидный состав, полученный в результате расчета, страница 120.
- 55.Рисунок 35 – Точки измерения радиационной обстановки и источник радиоактивного загрязнения [124], страница 122.
- 56.Таблица 21 – Радионуклидный состав, полученный в результате расчета, страница 122.
- 57.Таблица 22 – Результаты прямого расчета в точках проведения измерений, страница 122.

- 58.Рисунок 36 – Результаты расчета в концепции фиктивного источника плотности поверхностных выпадений Sr-90 программным комплексом [124], страница 126.
- 59.Рисунок 37 – Результаты сопоставления зоны в 4 Ки/км² по Sr-90; заливка – результаты расчета, линией обведена зона, составленная по результатам измерений [124], страница 127.
- 60.Рисунок 38 – Расчетные (—) и экспериментальные (●) значения плотности поверхностных выпадений Sr-90 при аварии на ПО «Маяк», страница 127.
- 61.Таблица 23 – Измеренная и расчетная плотность выпадений ⁹⁰Sr в населенных пунктах, страница 128.
- 62.Рисунок 39 –Схема взаимодействия программных средств в рамках единого программного комплекса, страница 131.
- 63.Таблица 24 – Оценка выхода радионуклидов из активной зоны во второй половине дня 15 марта 2011 г, ПБк, страница 138.
- 64.Рисунок 40 – Профиль рельефа по оси следа [136], страница 139.
- 65.Рисунок 41 – Изменение температуры в активной зоне второго энергоблока АЭС “Фукусима-1” в ходе аварии, страница 139.
- 66.Рисунок 42 – Расчетная (а) и измеренная (б) плотность выпадений ¹³⁷Cs 0,3 (1), 0,6 (2), 1 (3), 3 МБк/м² (4) [160], страница 140.
- 67.Рисунок 43 – Расчетная с учетом (---) и без учета орографии местности (—) и измеренная (●) плотность выпадений ¹³⁷Cs (а) и мощность дозы (б) по оси следа на 29 апреля 2011 г, страница 141.