

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

Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Работа выполнена в Институте проблем безопасного развития атомной энергетики Российской академии наук.

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

Официальные оппоненты: Чесноков Александр Владимирович, доктор  
технических наук, НИЦ «Курчатовский  
институт», ученый секретарь,

Лопаткин Александр Викторович, доктор  
технических наук, АО «НИКИЭТ»,  
заместитель Директора - Генерального  
конструктора по НИОКР.

Ведущая организация: Федеральное государственное учреждение  
«Научно-технический центр по ядерной и  
радиационной безопасности» Ростехнадзора  
России.

Защита состоится 16 апреля 2015 г. в 15 ч. 00 мин. на заседании  
диссертационного совета Д 002.070.01 при Институте проблем безопасного  
развития атомной энергетики Российской академии наук по адресу: 115191,  
г. Москва, ул. Б.Тулская, д. 52.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Института  
проблем безопасного развития атомной энергетики Российской академии  
наук <http://www.ibrae.ac.ru/contents/283/>

Автореферат разослан « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2015 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
к.т.н.

В.Е.Калантаров

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Объекты ядерной энергетики относятся к классу потенциально опасных и представляют угрозу возникновения аварий с радиационным фактором, поэтому согласно Федеральным нормам и правилам "Общие положения обеспечения безопасности объектов ядерного топливного цикла (ОПБ ОЯТЦ)" НП-016-05 [1], для обеспечения безопасности должна быть реализована концепция глубоко эшелонированной защиты, основанная на использовании 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, приводящей к выбросам радиоактивных веществ за пределы промплощадки. 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 возникновении реальной аварийной ситуации, когда необходимо минимизировать ее последствия;
- проведение расчетов параметров радиационной обстановки и дозовых нагрузок на персонал и население при предварительном обосновании безопасности;
- выработка рекомендаций по применению защитных мероприятий.

Особенно это важно и актуально для запроектных аварий. Такие оценки должны проводиться с помощью современных комплексных программных средств, включающих в себя модели распространения радионуклидов в атмосфере, дозиметрические модели и модели учета влияния защитных мероприятий на прогностические значения доз на население. На данный момент существует широкий спектр отдельных программных средств, позволяющих проводить такие расчеты: программный комплекс "Чистый воздух – расчет рассеяния"[2], программный комплекс "Гарант универсал"[3], программное средство "RECASS"[4], программное средство "SULTAN"[5], программное средство "Доза"[6], программное средство "GENGAUSS"[7], программный комплекс "Призма"[8], программный комплекс "Нострадамус"[9], геоинформационная система "PRANA"[10], программный комплекс "АРИА" [11] и др. Однако, на ранней фазе развития аварии, когда формируются основные дозы, их использование затруднено из-за неопределенностей многих исходных данных, существенно снижающих точность прогнозирования и не позволяющих 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 программных комплексов типа СОКРАТ [12]). Информация об источнике во входных данных, в данном случае, один из решающих факторов адекватности прогноза и точности оценки опасности ситуации.

По мере поступления дополнительной информации (данных натуральных измерений) необходимо создавать методики, позволяющие откорректировать данные об источнике [7].

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. Такой программный комплекс должен обеспечивать, помимо расчетов параметров радиационной обстановки при различных исходных событиях и условиях распространения, сквозное моделирование аварийных ситуаций на объектах ядерной энергетики с реакторными установками и коррекцию параметров атмосферного выброса по данным мониторинга радиационной обстановки, предоставляя первичные оценки доз на население и эффективности применения защитных мероприятий. Если оценки превышают установленные нормативными документами пределы, то появляется необходимость оптимизации вмешательства в повседневную жизнь населения с применением защитных мероприятий, направленных на снижение воздействия радиации на человека.

Т.о. актуальность темы диссертации обеспечивается необходимостью научно-технического обоснования радиационной безопасности населения при запроектных авариях на объектах ядерной энергетики.

**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.

#### **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. используемые 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 распространению трассера. Кросс-верификация с несколькими известными моделями на основе сравнения с данными измерений	Модель атмосферной дисперсии
Модельные задачи, рассмотренные в ходе противоаварийных тренировок 2003 г (кросс верификация)	Модель атмосферной дисперсии, дозиметрические модели, модели расчета эффективности защитных мероприятий
Нострадамус (аттестованное ПС не гауссового типа)	Модель атмосферной дисперсии, дозиметрические модели
Авария в б. Чажма, 1985 г.	Модель подъема облака при взрыве, модель полидисперсности, модель учета орографии местности
Авария на СХК, 1993 г.	Проведение пакетных расчетов, модель атмосферной дисперсии
Имитация измерений от гипотетического выброса с искусственно наложенной погрешностью	Методика восстановления параметров атмосферного выброса
Авария на ПО Маяк, 1957 г.	Методика восстановления параметров атмосферного выброса, модель полидисперсности, модель фиктивного источника, модель атмосферной дисперсии
Авария на АЭС Фукусима-1	Режим сквозного моделирования с использованием тяжелоаварийного кода СОКРАТ, модель атмосферной дисперсии

**Апробация результатов.** Материалы диссертации докладывались на 55-й и 56-й Всероссийской научной конференции МФТИ, XII, XIII, XIV и XV научных школах молодых ученых ИБРАЭ РАН, на конференции-конкурсе молодых физиков 2012 в Физическом институте им. П.Н. Лебедева РАН, на международном совещании “Nuclear Future: New Nuclear Power Plants, from Design to Generation” в Государственном Орегонском Университете (OSU) в мае 2014 г. Результаты работы представлены на 9-ой международной конференции ISCRAM. Результаты работы обсуждались на Отраслевом совещании руководителей и специалистов служб охраны окружающей среды и радиэкологии, радиационной безопасности и охраны труда организаций Госкорпорации «Росатом» в июне 2014 г., III-ем расширенном заседании Совета проектировщиков ОАО «Концерн Росэнергоатом» в июле 2014 г. и на международной конференции ICRRER 2014 в сентябре 2014 г. Разработанный программный комплекс использовался для проведения анализа безопасности планируемой Южно-Уральской АЭС и для оценки возможных последствий при нанесении авиаударов по объектам ядерной энергетики в Дамаске и пригороде Дамаска в Сирии. Внедрен в Северском филиале ФГУП «Аварийно-технический центр Минатома России», центре технической поддержки ИБРАЭ РАН, ФГУП «СКЦ Росатома» и ОАО «ПО «Электрохимический завод».

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 16 научных работ, в том числе 4 работы – в рецензируемых журналах из Перечня ВАК. Список публикаций приведен в конце автореферата.

**Личный вклад.** Непосредственный личный вклад автора в работу состоит в следующем:

1. разработан состав, принципы взаимодействия модулей и непосредственно создано 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;
2. разработана методика восстановления параметров атмосферного выброса на основе данных радиационного мониторинга и комплексного анализа радиационной аварии и программное средство для восстановления параметров атмосферного выброса на ее основе;
3. создан интегральный программный комплекс, вынесенный на защиту.

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав и заключения. Работа изложена на 169 страницах, содержит 43 рисунка, 24 таблицы и список использованной литературы, включающий 160 наименований.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении.** Приводится обоснование актуальности темы диссертационной работы, описывается проблема и ставится задача, обосновывается научная новизна полученных результатов, их практическая значимость и определены положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** рассматриваются теоретические и практические вопросы выработки рекомендаций по применению защитных мероприятий при обосновании радиационной безопасности населения при запроектных авариях на объектах ядерной энергетики. **В первом разделе** выполнен анализ существующей отечественной и международной нормативно-правовой базы, регулирующей порядок проведения технических и организационных мер, направленных на обеспечение радиационной безопасности населения при запроектных радиационных авариях на объектах ядерной энергетики.

**Во втором разделе** рассматриваются 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.

Определены требования к программному комплексу для выработки рекомендаций по применению защитных мероприятий при обосновании радиационной безопасности населения, с учетом того, что оценка радиационной обстановки представляет собой итерационный процесс уточнения прогностических оценок с использованием всей информации по мере проведения комплексного анализа радиационной аварии. При этом необходимость принятия решений по защите населения до или непосредственно после аварии определяет требования к оперативности проводимых расчетов с использованием минимального количества данных с сохранением консервативности прогноза. На основе этого проведен отбор моделей с учетом различных условий возникновения аварий и переноса радиоактивных веществ в атмосфере для прогнозирования и выработки



рекомендаций по применению защитных мероприятий с учетом российских и международных требований и рекомендаций по обеспечению радиационной безопасности населения. Так в качестве базовой модели атмосферной диффузии была взята гауссова модель РД 52.18.717-2009[13], для описания параметризации скорости ветра в приземном слое - модель НИЦ КИ "Dosa\_m"[14], модели уточнения с учетом орографии местности – ISC3[15], модель расчета скоростей гравитационного и сухого осаждения – ISC3, модель подъема облака при взрывах и пожарах – модель ИБРАЭ [16,17], модель виртуального источника – NUREG-6410 [18], дозиметрические модели - МПА-98[19], модель расчета ингаляционной дозы при вторичном пылеподъеме – МУ 2.6.1.019-03[20]. Рекомендации по применению защитных мероприятий строятся путем сопоставления расчетных значений с российскими и международными критериями [21,22].

Рассмотрены возможные неопределенности при определении исходных параметров для моделей атмосферной дисперсии, а также методы и способы их минимизации с использованием средств радиационного контроля и мониторинга объектов окружающей среды и тяжелоаварийных кодов класса MELCOR или СОКПАТ для оценки радионуклидного состава атмосферного выброса и проведения сквозного моделирования радиационной аварии от исходного события до рекомендаций по обеспечению радиационной безопасности населения.

**В третьем разделе** обосновываются цель и задачи диссертационной работы. Показана актуальность разработки программного комплекса. В частности на основе проведенного анализа определено, что программный комплекс для расчетного обоснования радиационной безопасности населения при запроектных авариях на объектах ядерной энергетики для эффективной работы должен состоять из следующих модулей:

- 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;
- программное средство восстановления и уточнения параметров исходного атмосферного выброса радиоактивных веществ с использованием средств радиационного контроля и мониторинга объектов окружающей среды для минимизации ошибок прогностических оценок параметров радиационной обстановки;
- тяжелоаварийный код для оценки радионуклидного состава в атмосферном выбросе при запроектных радиационных авариях реакторных установок.

**Во второй главе** разработано программное средство прогнозирования радиационной обстановки и доз облучения населения для выработки рекомендаций по применению защитных мероприятий при обосновании радиационной безопасности населения. На основе проведенного в главе 1 анализа был выполнен отбор математических моделей атмосферного переноса, дополнительных моделей для учета орографии местности, учета конечного размера облака в начальный момент времени, доз облучения и моделей учета защитных мероприятий. Все эти модели изначально были разработаны для разных программных комплексов и разных задач. Поэтому их интеграция в единую подсистему моделей требует выработки требований по их взаимодействию в рамках единого логически связанного программного средства и соответствующей доработки моделей.

В **первом разделе** представлены результаты доработки системы математических моделей, отобранных в главе 1. Основным требованием для доработки является консервативность проводимых расчетов с сохранением замкнутости системы моделей. Для учета полидисперсности примеси, в программном средстве за основу были взяты расчеты распространения монодисперсной фракции в атмосфере с использованием локальной гауссовой модели РД 52.18.717-2009 путем запуска пакетных расчетов с разными скоростями сухого и гравитационного осаждения и разными дозовыми коэффициентами, при этом для корректного учета гравитационного осаждения была возвращена интегральная форма множителя, отвечающего за обеднение за счет сухого осаждения (в классических гауссовых моделях используется аналитическое выражение при постоянной высоте центра облака).

Распространение с учетом орографии является уточняющим и, соответственно, в предельном случае должно давать одинаковый результат с результатами расчета с использованием базовой модели.

В силу того, что исходная модель давала существенные отличия при верификации на серии европейских экспериментов на основе подходов, принятых в модели НИЦ КИ “Dosa\_m”, была изменена параметризация скорости ветра в приземном слое и добавлена возможность ее вычисления, исходя из данных измерений на различных высотах с использованием метеомачт. Это позволило получить более качественное описание результатов атмосферной дисперсии при верификации программного средства.

Учет орографии местности проводится на основе применения подходов модели ISC3, которые были экстраполированы на применение в рамках основной системы моделей. Так, при отсутствии данных об орографии местности, результаты расчета с использованием основной модели и модели переноса в условиях орографии местности совпадают. В рамках настоящей работы охвачены и модели простого рельефа, когда эффективная высота выброса превышает высоту рельефа и модель сложного рельефа, когда высота рельефа превышает эффективную высоту выброса, причем в последнем случае используется секторная модель распространения.

Еще одним существенным изменением для моделей переноса стало введение цепочек радиоактивного распада, позволяющих учесть накопление дочерних радионуклидов. При этом для оценки дозовых воздействий в случае, когда дочерние радионуклиды можно считать находящимися в равновесии с материнскими, дозовые коэффициенты были свернуты в эффективные, а неравновесные дочерние радионуклиды в автоматическом режиме включаются в расчет, что исключает случайные ошибки при расчете на этапе подготовки радионуклидного состава выброса.

Во **втором разделе** для интеграции в единую подсистему моделей для проведения прогностических оценок параметров радиационной обстановки и выработки рекомендаций по применению защитных мероприятий при обосновании радиационной безопасности населения была разработана схема взаимодействия модулей программного средства, представленная на рисунке 1.

Результатом работы программного средства прогнозирования радиационной обстановки и доз облучения населения для выработки рекомендаций по применению защитных мероприятий при обосновании радиационной безопасности населения являются следующие функционалы за выбранный промежуток времени:

- интеграл концентрации;
- плотность поверхностных выпадений;

- доза внешнего и внутреннего облучения от проходящего облака (учитывается длительность выброса);
- доза внешнего и внутреннего облучения от поверхностных выпадений (учитывается вторичный пылеподъем);
- доза при пероральном поступлении радионуклидов;
- мощность дозы  $\gamma$ -излучения от поверхностных выпадений;
- дозовые функционалы с учетом применения защитных мероприятий (йодная профилактика, укрытие, эвакуация, ограничение по потреблению продуктов);
- предотвращаемые дозы в результате проведения защитных мероприятий и результаты сопоставления с критериями НРБ-99/2009 и МАГАТЭ.

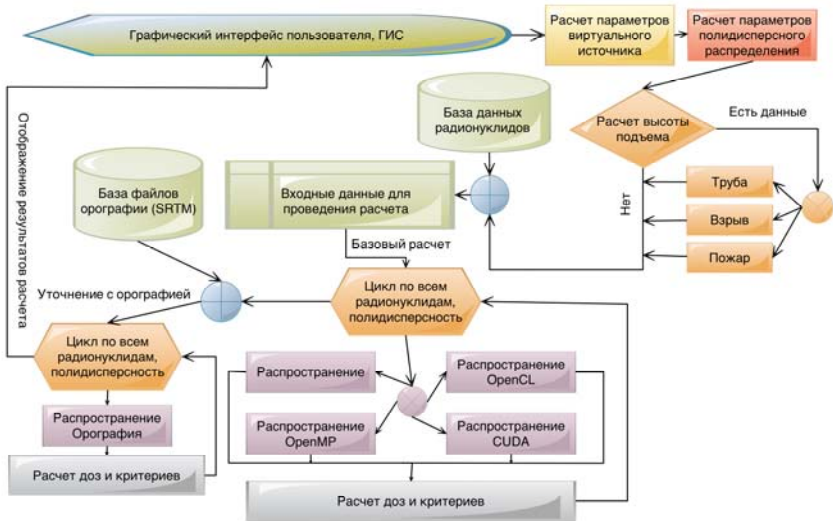


Рисунок 1 – Схема взаимодействия частей программного средства прогнозирования радиационной обстановки и доз облучения населения для выработки рекомендаций по применению защитных мероприятий при обосновании радиационной безопасности населения

Обеспечена оценка всех основных дозовых функционалов, необходимых для принятия решений по обеспечению радиационной безопасности населения при выбросах радионуклидов в атмосферу.

В **третьем разделе** дано описание программного средства с использованием упомянутых выше группы моделей и разработанной логической схемы их совместной работы в составе единого программного средства. Для удобства пользователя и облегчения работы с программным средством реализован графический интерфейс пользователя, включающий в себя формы ввода данных и обработку результатов расчета с использованием ГИС-технологий (Рисунок 2).

Для ускорения работы программы в режиме проведения многовариантного анализа радиационной обстановки и/или сложного полидисперсного состава загрязняющего вещества в облаке разработаны дублирующие модули, реализующие технологии параллельных вычислений. Так задействованы технологии OpenMP для параллельных вычислений на центральных

процессорах, OpenCL в режиме одинарной и двойной точности и CUDA в режиме одинарной и двойной точности для параллельных вычислений на графических картах, позволяющие существенно повысить скорость расчета.

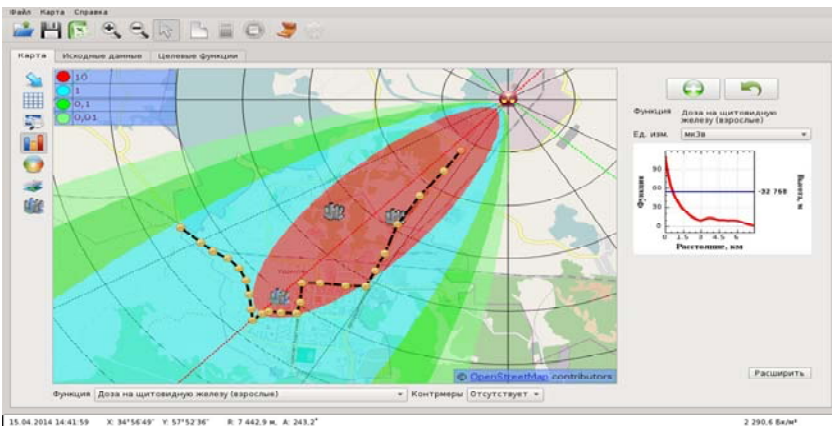


Рисунок 2 – Графический интерфейс пользователя программного средства выработки рекомендаций по применению защитных мероприятий при обосновании радиационной безопасности населения (используются картографические данные OpenStreetMap [23])

В четвертом разделе представлены результаты верификации программного средства на основе данных серии модельных экспериментов по атмосферной дисперсии, предназначенных для верификации моделей атмосферного переноса и на данных натуральных измерений при аварии в бухте Чажма.

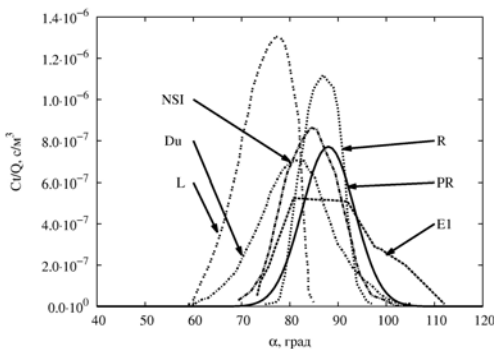


Рисунок 3 – Нормированный интеграл концентрации: E1 – результаты эксперимента, L – лагранжева модель IABG, Du – эйлера модель (Германия), PR – программное средство, разработанное в настоящей работе, R – гауссова puff модель (Дания), NSI – модель ИБРАЭ РАН

проводилось в условиях с сильным градиентом скорости ветра в вертикальном направлении. Полученные результаты, с учетом введенных изменений в модель атмосферной дисперсии, позволяют описать результаты экспериментальных

На рисунке 3 представлены результаты сопоставления расчетных значений различными программными средствами нормированного интеграла концентрации в эксперименте E1 из серии европейских экспериментов для верификации моделей атмосферной дисперсии [24]. В данном эксперименте расплылся трассер на высоте 100 м в течение одного часа. Пробоотбор проводился аспирационными установками на расстоянии 5,0 км. Распыление

данных с отклонением 40% (вместо 100% при использовании старой параметризации), что позволяет сделать вывод о применимости доработанной системы моделей. Также в диссертационной работе проведено сопоставление с экспериментальными данными для других трех экспериментов из серии европейских экспериментов, проведено сопоставление с другими моделями и проведена кросс-верификация с аттестованным программным средством НОСТРАДАМУС, реализующим лагранжеву модель атмосферной дисперсии.

В качестве верификации на данных реальной аварии проведена реконструкция радиоактивного следа, вследствие возникновения самоподдерживающейся цепной реакции в «свежей» активной зоне атомной подводной лодки проекта 675, проходившей плановый ремонт на судоремонтном заводе в бухте Чажма. Апробация проводилась с учетом экспериментально установленных данных о степени заглубления радионуклидов для плотности выпадений и мощности дозы от поверхностных выпадений  $^{60}\text{Co}$ , полученных и опубликованных через 6 лет после аварии.

С использованием разработанного программного средства была проведена реконструкция радиоактивного следа с использованием системы моделей по расчету эффективной высоты подъема облака, учету полидисперсности выброса при взрыве, учету орографии местности, получение которой автоматизировано в рамках использования программного комплекса. Реализовано использование данных радарной топографической съемки (SRTM [25]). Результаты расчета (Рисунок 4) согласуются с данными измерений в пределах ошибки 30 %, причем проводившиеся ранее расчеты для примеси с «классической» скоростью сухого осаждения и без учета орографии местности не позволяли достичь согласия с измерениями.

Также была проведена апробация разработанного программного средства при анализе безопасности размещения проектируемой Южно-Уральской АЭС в части оценки атмосферного переноса паровоздушных выбросов в ходе работы градирен и возможности переполнения Теченского каскада водоемов вследствие их выпадений. Данный пример демонстрирует возможность проведения пакетных расчетов переноса примеси в атмосфере и ее осаждение на подстилающую поверхность.

**Третья глава** посвящена разработанному программному средству для восстановления параметров атмосферного выброса. В **первом разделе** описывается методика восстановления параметров радиационной обстановки с использованием средств радиационного контроля и мониторинга объектов окружающей среды. Методика основана на применении метода нелинейного регрессионного анализа, являющегося одним из основных инструментов для восстановления неизвестных параметров при моделировании и прогнозировании поведения сложных многофакторных процессов. В данной работе использовались разработанные в диссертации нелинейные модели распространения радионуклидов в

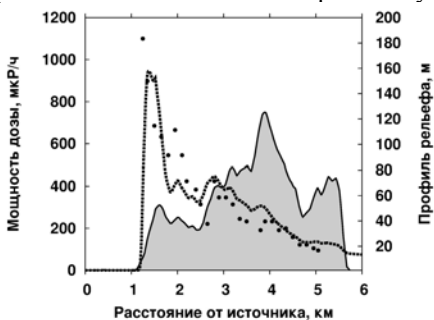


Рисунок 4 – Расчетная (---) и измеренная (●) мощность дозы по оси следа (закрашенная область – профиль рельефа [25])

атмосфере для проведения нелинейного регрессионного анализа и восстановления неизвестных параметров. В качестве исходных параметров для корректировки и восстановления выступают исходные данные прогностических моделей:

- метеорологические параметры (скорость и направление ветра, стратификация);
- радионуклидный состав, включая активности компонентов;
- параметры полидисперсного распределения;
- геометрические параметры источника.

Список этих параметров формируется исходя из условий возникновения и развития аварийной ситуации.

Коррекция параметров проводится в on-line режиме по мере поступления информации при комплексном анализе радиационной обстановки на ее основе. Эта информация включает в себя измерения динамики мощности дозы датчиками АСКРО, мощности дозы и плотности выпадений при проведении радиационной разведки, оценки радионуклидного состава и активностей радионуклидов в выбросе и метеорологические параметры, полученные с использованием метеомачт.

Для задачи восстановления и корректировки параметров атмосферного выброса на основе измерений мощности дозы и спектрометрических измерений плотности поверхностных выпадений, решаемой в диссертационной работе, сформулирована методология оценки параметров – последовательное байесовское оценивание. Общие принципы этого подхода для задач химической физики изложены в работе [26]. Этот метод является эффективной процедурой при проведении восстановления на основе данных измерений различного типа в рамках единой системы моделей, упрощающей моделирование и позволяющей достичь тех же результатов, которые дают традиционные подходы – метод наименьших квадратов и метод максимального правдоподобия. Позволяет получать результаты, сопоставимые по точности со статистическими методами, но на несколько порядков быстрее [27].

Исходя из общих принципов метода последовательного байесовского оценивания для задач химической физики, сформулирована методология разбиения поступающих данных измерений на так называемые серии, в соответствии с их типом и по количественному признаку (разделение на большие значения, предположительно вблизи оси следа и остальные).

В основе метода байесовского оценивания параметров лежит использование результатов обработки предыдущей серии, в качестве априорной оценки следующей, превращая процесс оценивания в итерационный процесс.

Запускается итерационный процесс стандартным образом без априорной информации (в случае наличия спектрометрических данных о выпадениях они должны служить первой серией). Минимизируется функционал:

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

где  $w_i^2 = 1/\sigma^2$  - набор весов, известных для каждой точки наблюдений (берется в соответствии с погрешностью измерений с дисперсией  $\sigma^2$  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.

Последующие серии учитывают результаты предыдущей серии посредством преобразования минимизируемого функционала с использованием априорной информации [26].

Основная проблема в минимизации функционала, заключается в том, что восстанавливаемые и корректируемые параметры не фиксированы (набор восстанавливаемых параметров может быть разным для разных аварийных ситуаций), соответственно возникают проблемы со сходимостью, которая должна быть обеспечена. Для решения этой проблемы в диссертационной работе реализован алгоритм Левенберга-Маквардта с автоматическим выбором параметра регуляризации, обладающий по сравнению с методом Гаусса-Ньютона высокой скоростью и гарантированной сходимостью [28]. На основе разработанной в диссертационной работе методики разработана архитектура программного средства. Схема взаимодействия частей программного средства восстановления параметров атмосферного выброса представлена на рисунке 5. Представленная методика реализована в виде программного модуля, который включен в интегральный программный комплекс. Для удобства обработки информации и эффективного использования данного программного средства в условиях радиационной аварии программное средство оснащено графическим интерфейсом пользователя с компонентами ГИС.

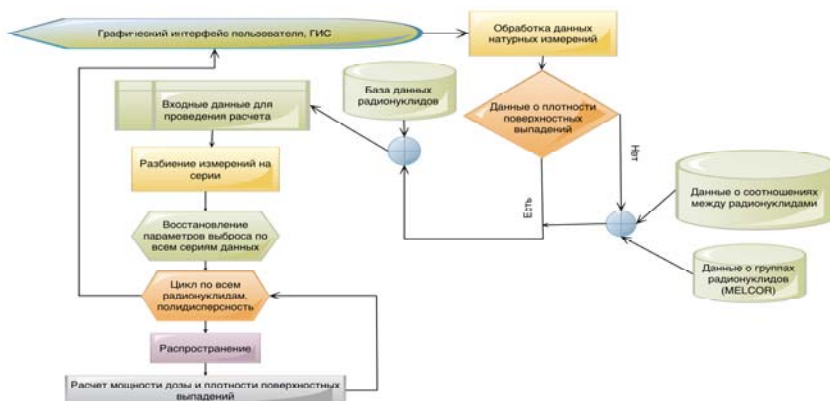


Рисунок 5 – Схема взаимодействия частей программного средства восстановления параметров атмосферного выброса

Проведена верификация и апробация созданного программного модуля. Верификация выполнена на серии модельных экспериментов с искусственно созданными шумами. Восстанавливались исходные невозмущенные параметры. Кроме того, программный модуль был использован для моделирования последствий радиационной аварии (Маяк в 1957 г). Его применение показало высокую эффективность для определения оптимальных параметров атмосферного выброса во всех рассмотренных случаях. В частности его верификация проводилась при реконструкции загрязнения на Восточно-Уральском радиоактивном следе. Авария произошла 29 сентября 1957 г. вследствие нарушения условий охлаждения. В результате взрыва образовалось облако, в котором распределение активности по диаметрам частиц имело

полидисперсный характер с преобладающей крупнодисперсной фракцией. С использованием программного средства для восстановления параметров атмосферного выброса были получены параметры полидисперсного распределения, которые наилучшим образом описывают результаты измерений в контрольных точках. На основе полученных результатов были проведены прогнозные оценки выпадений  $^{90}\text{Sr}$  с использованием концепции фиктивного источника, использовавшейся для учета исходных геометрических размеров облака. Полученные результаты описывают с ошибкой 40% как распределение выпадений по оси следа (Рисунок 6б), так и характерные геометрические характеристики зоны в  $4 \text{ Ки/км}^2$  выпадений  $^{90}\text{Sr}$ , представленной на рисунке 6а.

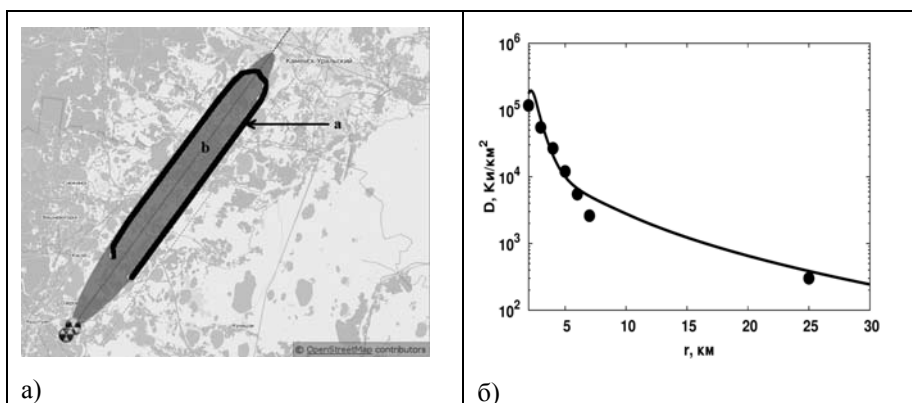


Рисунок 6 – Карта Восточно-Уральского радиоактивного следа (а), здесь отмечены расчетная (b) и измеренная (а) области, где плотность выпадений  $^{90}\text{Sr}$  превышает  $4 \text{ Ки/км}^2$ ; сопоставление результатов расчетов (—) с экспериментальными (●) данными по оси следа (б) (используются картографические данные OpenStreetMap [23])

**В четвертой главе** дано описание интегрального программного комплекса для расчетного обоснования радиационной безопасности населения при запроектных авариях на объектах ядерной энергетики. Схема взаимодействия модулей комплекса представлена на рисунке 7.

Он состоит из трех основных программных модулей, направленных на снижение неопределенностей прогностических оценок, и выполняющих разные задачи, что в итоге позволяет проводить расчетное обоснование радиационной безопасности населения при тяжелых запроектных авариях на объектах ядерной энергетики:

- программный модуль прогнозирования радиационной обстановки и доз облучения населения для выработки рекомендаций по применению защитных мероприятий при обосновании радиационной безопасности населения при запроектных радиационных авариях (реализация комплекса моделей, описанных в главе 1);
- программный модуль для коррекции параметров атмосферного выброса радиоактивных веществ с использованием средств радиационного контроля и мониторинга объектов окружающей среды для минимизации ошибок прогностических оценок параметров радиационной обстановки;
- модуль интеграции расчетного кода СОКРАТ для оценки радионуклидного состава в атмосферном выбросе в случае запроектных радиационных аварий на АЭС с водо-водяными реакторными установками.



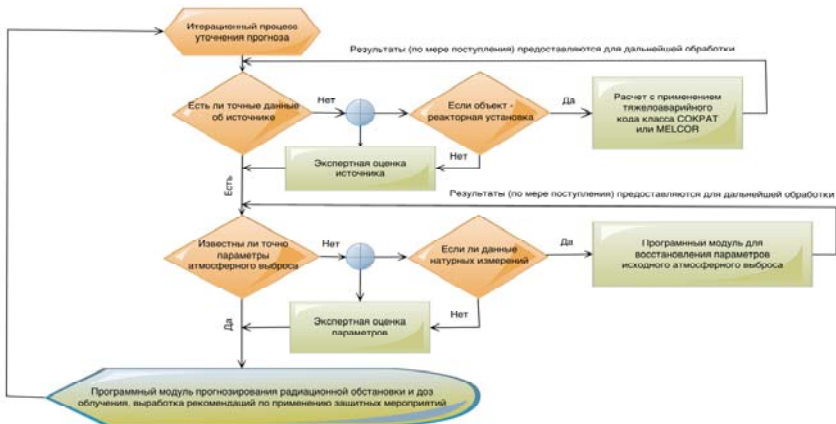


Рисунок 7 – Схема интеграции разработанных программных средств и расчетного кода СОКРАТ в интегральный программный комплекс

В главе 4 диссертационной работы отмечено, что замена тяжеловарийного кода СОКРАТ на другой код для моделирования внутриреакторных процессов, процессов под защитной оболочкой и выхода продуктов деления из под защитной оболочки может расширить область применения разработанного программного комплекса на другие типы реакторных установок.

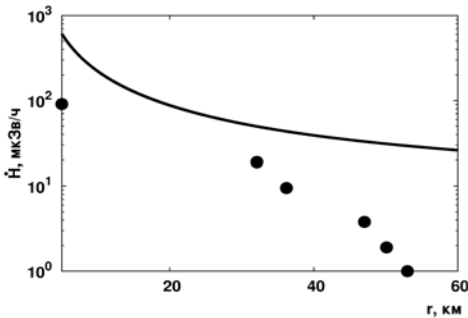


Рисунок 8 – Расчетная (—) и измеренная (●) мощность дозы по оси следа

Верификация работы программного комплекса проводилась на данных натуральных измерений мощности дозы от поверхностных выпадений на северо-западном радиоактивном следе, образовавшемся в ходе аварии на АЭС “Фукусима-1” (Япония). Данная задача является сложной с точки зрения моделирования в силу того, что в районе АЭС наблюдались сложные метеорологические условия, сопровождавшиеся локальными неоднородными осадками, однако целью данной работы является проверка работоспособности

упрощенного подхода для прогнозирования на ранней фазе развития аварии с целью обеспечения радиационной безопасности населения. Радиоактивный след в основном обусловлен выбросами 15 марта 2011 во второй половине дня. С помощью расчетного кода СОКРАТ было проведено моделирование физических процессов в ходе аварии на втором энергоблоке. Получен выход продуктов деления из-под защитной оболочки в атмосферу в предположении разгерметизации водного бака защитной оболочки и абсорбции продуктов деления при прохождении через водный бассейн. С использованием программного средства по оценке радиационных последствий для населения была оценена мощность дозы от поверхностных выпадений (Рисунок 8). Как видно из графика, расчетные значения мощности дозы и измеренные отличаются на несколько порядков величины (относительная

среднеквадратическая ошибка составляет 300 %) с приоритетной консервативностью оценок, что при оценках в режиме анализа реальной аварийной ситуации с использованием упрощенного подхода для проведения оценок является удовлетворительным прогностическим результатом, учитывая, что на ранней фазе развития аварии ни детальные метеорологические условия, ни радионуклидный состав выброса не были известны, а моделирование проводилось без использования алгоритмов уточнения в соответствии с известными данными с целью верификации работы программного комплекса в режиме сквозного моделирования радиационной аварии от исходного события до оценок доз для населения. Следует отметить, что применимость гауссовой модели ограничивается ближней зоной радиационно-опасного объекта (~30 км), однако допускается расширение границ применимости в случаях, когда не нарушается условие однородности атмосферы в характерных масштабах распространения.

**В заключении диссертации** проводится обобщение результатов работы над программным комплексом, сделаны выводы о его применимости для расчетного обоснования радиационной безопасности населения при запроектных авариях на объектах ядерной энергетики. Также в заключении отмечены возможности расширения применимости программного комплекса для других типов реакторных установок путем замещения расчетного кода моделирования внутриреакторных процессов другим тяжелоаварийным расчетным кодом.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

1. Разработан состав, принципы взаимодействия модулей и создано программное средство на их основе для прогнозирования радиационной обстановки и доз облучения населения для выработки рекомендаций по применению защитных мероприятий при обосновании радиационной безопасности населения при запроектных радиационных авариях. В программное средство включены модель расчета распространения загрязняющих веществ в атмосфере, модели учета орографии местности, эффективной высоты подъема облака загрязняющего вещества, параметров фиктивного источника, параметров полидисперсного распределения активности по диаметрам в выбросе, дозиметрические модели и модели расчета предотвращаемых доз при проведении защитных мероприятий.
2. На основе применения метода нелинейного регрессионного анализа в рамках комплекса моделей, задействованных в программном средстве для прогностических оценок и принятия решений по защите населения при запроектных радиационных авариях, разработана методика коррекции параметров атмосферного выброса, позволяющая скорректировать результаты оценок параметров радиационной обстановки с использованием средств контроля и мониторинга радиационной обстановки. На ее основе разработано программное средство для восстановления параметров атмосферного выброса.
3. Проведена верификация разработанных программных средств на результатах экспериментов по атмосферной дисперсии, данных натурных измерений при реальных авариях и путем кросс-верификации с аттестованным программным средством НОСТРАДАМУС и другими моделями, реализованными в виде программных средств.
4. На основе разработанных программных средств и тяжелоаварийного кода для оценки радионуклидного состава в атмосферном выбросе автором был создан интегральный программный комплекс для расчетного

обоснования радиационной безопасности населения при запроектных авариях на объектах ядерной энергетики. Программный комплекс предназначен для работы на персональных компьютерах под управлением операционных систем MS Windows, Linux и Mac OS.

5. Работа интегрального программного комплекса была верифицирована на основе натуральных измерений при аварии на АЭС Фукусима-1 при реконструкции северо-западного радиационного следа.
6. 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».

Таким образом, разработан программный комплекс для расчетного обоснования радиационной безопасности населения при запроектных авариях на объектах ядерной энергетики, связанных с выходом радиоактивных веществ в атмосферу, который позволяет усовершенствовать систему научно-технической поддержки обеспечения радиационной безопасности. Программный комплекс предоставляет возможность работы в режиме постоянного уточнения прогноза по мере поступления данных при комплексном анализе радиационной аварии и оценок выхода радионуклидов в атмосферу.

### **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. Сайт гильдии экологов: [Электронный ресурс]. URL: <http://www.ecogiuld.ru>.
3. Сайт НПО «Гарант»: [Электронный ресурс]. URL: <http://garant.hut.ru/programs/universal.html>.
4. Модель мезо-масштабного переноса радиоактивных веществ в атмосфере. Руководство пользователя. НПО «Тайфун». – Обнинск, 2000.
5. 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.
6. Программа ДОЗА-RRС. ОФАП-ЯР, N 393 от 28.12.96.
7. 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 июня.
8. Халевин Р.Г., Бердников А.В. Компьютерные программы для экологов//Экологические системы и приборы.- 2002.-№3.-С. 35-38.
9. Нострадамус. Компьютерная система прогнозирования и анализа радиационной обстановки на ранней стадииаварии на АЭС. Инструкция пользователя. ИБРАЭ РАН, инв. №3429. –М., 2001.
10. 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.

11. 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.
12. Расчетный код «СОКРАТ/В1», Аттестационный паспорт программного средства, Рег. номер 275, 13.05.2010.
13. Методика расчета рассеяния загрязняющих веществ в атмосфере при аварийных выбросах. РД 52.18.717-2009. Обнинск, ООО «ПРИНТ-СЕРВИС» - 2009.
14. Доза-М – программное средство для расчета доз облучения населения вокруг атомных станций при авариях. Верификационный отчет. Москва, Российский научный центр “Курчатовский институт” 1998.
15. 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.
16. Беликов В.В., Головизнин В.М., Семенов В.Н., и др. Инженерная методика расчета конвективного подъема струи аварийного выброса. Труды ИБРАЭ РАН. Вып. 9: Моделирование распространения радионуклидов в окружающей среде. –М., 2008. – С. 22–40.
17. 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.
18. Nuclear Fuel Cycle Facility Accident Analysis Handbook. NUREG/CR-6410. U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC 20555-0001, March 1988.
19. 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.
20. 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.
21. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009)». Санитарные правила и нормативы СанПин 2.6.1.2523-09. – М., 2009.
22. Radiation protection and safety of radiation sources: international safety basic standards. Interim edition. General safety requirements. International atomic energy agency, 2011.
23. Картографические данные предоставлены <http://www.openstreetmap.org>
24. J.Pasler-Sauer Comparative calculations and validation studies with atmospheric dispersion models. //Report KfK 4164, November 1986,130 с.
25. Shuttle Radar Topography Mission <http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/>

26. Померанцев А.Л. методы нелинейного регрессионного анализа для моделирования кинетики химических и физических процессов: дис. док. физ.мат.наук: 01.04.17/Померанцев Алексей Леонидович. – М.,2003. – 304 с.
27. Bystritskaya E.V., Pomerantsev A.L., Rodionova O.Ye., Non-linear regression analysis: new approach to traditional implementations J. Chemometrics, 14 (2000), 667-692.
28. 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.

### **Список работ, опубликованных автором по теме диссертации**

1. 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, №ИВРАЕ-2011-03).-М. ИБРАЭ РАН, 2011. – 166 с.
2. 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» (часть 1). Препринт ИБРАЭ №ИВРАЕ-2011-02, 2011. – 40 с.
3. 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» (часть 2). Препринт ИБРАЭ №ИВРАЕ-2011-02, 2011. – 69 с.
4. Богатов С.А., Киселев А.А. Разработка программного комплекса «ПРОЛОГ» и тестирование его расчетных модулей. Сборник трудов XIII научной школы молодых ученых ИБРАЭ РАН. Препринт /Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН, апрель 2012, №ИВРАЕ-2012-02).-М. ИБРАЭ РАН, 2012. – 146 с.
5. S. Bogatov, A. Kiselev 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.
6. S. Bogatov, A. Kiselev 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, pages 60-67, 2013.
7. Богатов С.А., Киселев А.А. Предварительные результаты верификации модели ПРОЛОГ на натуральных экспериментах. Труды 55-ой научной конференции МФТИ, 2012.
8. Богатов С.А., Киселев А.А. ТЕСТИРОВАНИЕ ЛОКАЛЬНОЙ ГАУССОВОЙ МОДЕЛИ «ПРОЛОГ» ПО ДАННЫМ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ ПОСЛЕДСТВИЙ АВАРИИ В БУХТЕ ЧАЖМА. Приложение к журналу Физическое образование в вузах. Т. 18, No 1, 2012.

9. 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.
10. Богатов С.А., Киселева А.А. Тестирование программного комплекса ПРОЛОГ на базе результатов расчетов параметров радиационной обстановки аттестованными программными средствами Сборник трудов XIV научной школы молодых ученых ИБРАЭ РАН. Препринт /Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН, апрель 2013, №IBRAE-2013-03).-М. ИБРАЭ РАН, 2013. – 181 с.
11. Богатов С.А., Киселев А.А. Моделирование распространения радионуклидов при аварии в бухте Чажме с учетом полидисперсности и орографии местности. Атомная энергия. – 2012. - № 112. С. 233-236.
12. Богатов С.А., Киселев А.А., Уткин С.С., Берегич Д.А., Мокров К.Ю. 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. – 2013. – № 2 (70). С. 64-70.
13. 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.
14. Арутюнян Р.В., Бакин Р.И., Долганов К.С., Киселев А.А., Ткаченко А.В., Томащик Д.Ю., Цаун С.В. 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.
15. Киселев А.А. Модуль восстановления параметров атмосферного выброса для программного комплекса ПРОЛОГ. Сборник трудов XV научной школы молодых ученых ИБРАЭ РАН. Препринт /Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН, апрель 2014, №IBRAE-2014-02).-М. ИБРАЭ РАН, 2014. – 230 с.
16. Бакин Р.И., Бирюков Д.В., Илюшкин А.И., Киселев А.А., Ковальчук Д.В., Красноперов С.Н., Линге И.И., Савкин М.Н., Шикин А.В. Ранжирование ядерно и радиационно опасных объектов по потенциальной опасности. Препринт ИБРАЭ №IBRAE-2014-07. Москва: ИБРАЭ РАН, 2014. – 16 с.

Киселев Алексей Аркадьевич

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

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Подписано в печать 05.02.15  
Формат 60 × 84 1/16. Усл. печ. л. 1,25. Уч.-изд. л. 1,05.

Тираж 120 экз.  
Печать на аппарате Rex-Rotary. ИБРАЭ РАН.  
115191, Москва, ул. Б.Тульская, 52  
Телефон: 8-495-955-22-66