

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт проблем безопасного развития атомной энергетики  
Российской академии наук

На правах рукописи



Аракелян Арам Айкович

КОМПЛЕКСНЫЙ МЕТОД ОБОСНОВАНИЯ РАДИАЦИОННОЙ  
БЕЗОПАСНОСТИ И ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ПРИЕМЛЕМОСТИ  
ОБЪЕКТОВ ЯДЕРНОЙ ТЕХНИКИ

Специальность 2.4.9. «Ядерные энергетические  
установки, топливный цикл, радиационная безопасность»

Автореферат  
диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Москва – 2024

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте проблем безопасного развития атомной энергетики Российской академии наук.

Научный руководитель:

Арутюнян Рафаэль Варназович,  
доктор физико-математических наук  
Линге Игорь Иннокентьевич,  
доктор технических наук

Официальные оппоненты:

Клочков Владимир Николаевич,  
доктор технических наук,  
Федеральный медицинский биофизический центр имени А.И. Бурназяна ФМБА России

Екидин Алексей Акимович,  
кандидат физико-математических наук,  
Институт промышленной экологии Уральского отделения Российской академии наук

Ведущая организация:

Федеральное государственное унитарное предприятие «Объединенный эколого-технологический и научно-исследовательский центр по обезвреживанию РАО и охране окружающей среды» (ФГУП «РАДОН»)

Защита состоится 25 сентября 2024 года в 11:00 на заседании диссертационного совета 24.1.496.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте проблем безопасного развития атомной энергетики Российской академии наук по адресу: 115191, г. Москва, ул. Б. Тульская, д. 52.

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

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2024 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
к.т.н.

В. Е. Калантаров

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы исследования

Реализуемая Российской Федерацией стратегия развития ядерной энергетики предусматривает сооружение новых энергоблоков атомных электростанций (АЭС), в том числе за рубежом. В то же время в ряде стран, в том числе относящихся к крупнейшим экономикам мира, реализуются меры по закрытию АЭС, в основе которых лежат различного рода экологические предосторожности в отношении радиационной безопасности (РБ). На глобальном уровне в условиях консенсуса по наличию экологических проблем, связанных с загрязнением окружающей среды и глобальным потеплением, консенсус по позитивной роли АЭС до настоящего времени не достигнут. В этой связи развитие методов обоснования экологической приемлемости ядерных технологий приобретает особую актуальность. При этом опыт большого количества исследований показывает, что рассмотрение отдельной конкретной АЭС или модельной ядерной установки или исключительно факторов РБ подобные задачи в полном объеме не решает.

Представляется, что ситуация существенно улучшится, если будут выполнены:

- реалистичные оценки экологического воздействия на население (радиоактивных и вредных химических веществ), проживающее в районе расположения промышленных площадок всех типов предприятий атомного энергопромышленного комплекса (далее АЭПК), обеспечивающих атомную генерацию;
- оценки негативного воздействия на окружающую среду и население предприятий АЭПК для всех загрязнителей;
- сопоставление негативного воздействия площадок АЭПК с воздействием иных предприятий – загрязнителей, то есть будет учитываться реальная экологическая обстановка в районе их размещения.

Требования к выбору площадки и составу проектных решений по планируемой или текущей деятельности уже эксплуатируемых объектов широко представлены в нормативно-правовой базе Российской Федерации. Для целей их подтверждения предусмотрены такие процедуры, как экспертизы радиационной и экологической безопасности и общественные слушания. Центральными документами при этом являются материалы отчётов по обоснованию безопасности (ООб) и оценок воздействия на окружающую среду (ОВОС). Подобная система обоснования РБ экологической приемлемости не позволяет учитывать влияние всех источников потенциального воздействия на население, определяя лишь квоты на выбросы и сбросы радиоактивных веществ конкретного объекта использования

атомной энергии (ОИАЭ). Существующие на сегодняшний день методы обоснования РБ в виде подготовки и утверждения материалов ООБ и ОВОС, проектов допустимых выбросов и сбросов, – проводимые с редкой периодичностью и лишь при существенных изменениях в деятельности ОИАЭ не позволяют проводить фактическую оценку безопасности на любом этапе эксплуатации и жизненного цикла в целом, отслеживать динамику изменения радиационного и экологического воздействия ОИАЭ. Соблюдение установленных нормативных уровней сбросов и выбросов в ходе эксплуатации ОИАЭ подтверждает безопасность лишь на качественном уровне, тогда как для количественной оценки необходимо проводить более детальный и глубокий анализ факторов воздействия.

В этой связи представляется важным развитие комплексных методов обоснования радиационной безопасности и экологической приемлемости для их непосредственного применения в планировании мер по улучшению экологической обстановки, информационной работе и, возможно, последующей имплантации в материалы ООБ и ОВОС.

Наибольшим потенциалом в этой области обладает методология анализа риска. Её применению должно предшествовать решение задачи систематизации промышленных площадок и объектов ядерной техники, выделение типовых ситуаций и отработка методологии на этих типовых ситуациях (промышленная площадка АЭПК и селитебная зона района расположения) с акцентом на повышение реалистичности путем учёта того, что радиационное воздействие оказывается на фоне иных значимых техногенных факторов, которым подвергается население, объекты живой природы и экосистема в целом в условиях локальных специфик (биогеохимическое разнообразие территорий, санитарно-эпидемиологическая, медико-демографическая обстановка и др.). Таким образом, требуется иной подход, в рамках которого все эти особенности можно будет учесть и доказательно продемонстрировать, что экологическое воздействие производств АЭПК находится не только в допустимых (приемлемых) пределах, но и количественно определить его роль. Для реализации подхода необходимо разработать метод, включающий определение зон потенциального воздействия и расчетного инструментария, позволяющего от экологической нагрузки отдельного предприятия перейти к формированию полей потенциального воздействия, выраженных, в том числе, в единицах риска для здоровья человека. Моделирование различных процессов, создание и применение базы данных фактических и расчётных параметров экологической обстановки составляют основу такого инструментария.

Кроме того, актуальность развития комплексных методов обоснования экологической приемлемости обусловлена потребностью оптимизации расходов на обеспечение РБ в условиях действия существенно более опасных факторов.

Оценке радиационного воздействия на окружающую среду и анализу радиозэкологических проблем в целом и для ряда определённых территорий посвящено большое количество работ, среди которых наиболее фундаментальные монографии Р. М. Алексахина (2006 г.), И. И. Крышева и Е. П. Рязанцева (2010 г.). История исследований канцерогенного и токсического воздействий и рисков, с ними связанных, насчитывает несколько десятилетий. Целью этих исследований в большинстве случаев являлось уточнение соответствующих дозовых коэффициентов и коэффициентов риска. В некоторых случаях цель исследований была более близкой к рассматриваемой теме. Это в первую очередь монографии Н. С. Бабаева и Л. А. Ильина (1982 г.), Л. А. Ильина и И. П. Коренкова (2002 г.) по экологической цене тепловой и атомной электроэнергии. В рамках этих работ, как и в большинстве иных, рассматривается, как правило, только АЭС, а не все периоды ядерного топливного цикла (ЯТЦ) и ограниченный набор факторов.

#### **Цель и задачи исследования**

Цель диссертационного исследования – разработка и применение комплексного метода оценки радиационных и химических рисков для населения при обосновании радиационной безопасности и экологической приемлемости предприятий АЭПК.

Для достижения поставленной цели сформулированы и решены следующие задачи:

- систематизация условий функционирования основных предприятий АЭПК России и выделение типовых объектов и ситуаций;
- анализ существующих методологических подходов к оценке эффектов вредного воздействия радиоактивных и химических веществ и обоснование выбора наилучших для сравнительной оценки рисков в районе расположения предприятий АЭПК;
- разработка и обоснование программных средств для оценки полей воздействия различных вредных веществ в пространстве городской среды с учётом характеристик площадок и региональных особенностей районов их расположения;
- выполнение оценок радиационных и химических рисков для населения районов расположения ряда основных типов ОИАЭ и их обобщение;
- разработка рекомендаций по применению комплексного метода и мер по управлению рисками.

### **Научная новизна работы**

В исследовании впервые:

Предложен комплексный метод обоснования РБ и экологической приемлемости производства АЭПК, позволяющий учитывать все основные виды негативного воздействия объекта и оценивать радиационные и химические риски с учетом локальных особенностей его размещения и проживания населения.

Систематизированы условия функционирования всех предприятий ядерного топливного цикла России и определен набор типовых площадок;

Получены результаты сравнительной оценки риска для типовых объектов АЭПК (АО «АЭХК», АО «ГНЦ РФ–ФЭИ», АО «НИФХИ им. Л. Я. Карпова», АО «УЭХК», Ленинградской АЭС, Ленинградское отделение филиала «Северо-Западный ТО» ФГУП «РАДОН», ФГУП «НИТИ им. А.П. Александрова», АО «ГНЦ НИИАР» и ПАО «МСЗ»), подтверждающие их РБ и экологическую приемлемость.

### **Практическая значимость работы**

Полученные оценки радиационных и химических рисков стали основой информационных геоэкологических пакетов предприятий Госкорпорации «Росатом», созданных совместно ИБРАЭ РАН, ФГБУ «Гидроспецгеология» и АНО НИИПЭ.

Результаты работы применяются предприятиями АЭПК для подготовки ООБ и ОВОС, работы с общественностью по вопросам обоснования РБ и экологической приемлемости, в том числе представления на официальных сайтах организаций, а также в монографии «Экология атомной отрасли» (М., 2020 г.).

Решены задачи по разработке и применению комплексного метода, средств анализа, прогнозирования и оценки состояния радиационной безопасности, выявлению рисков в этой области и управлению ими, предусмотренные «Основами государственной политики в области обеспечения ядерной и радиационной безопасности Российской Федерации на период до 2025 года и дальнейшую перспективу».

Разработанный алгоритм и программные средства применимы для оценки РБ и экологической приемлемости других ОИАЭ, а также в иных сферах (экологическое обоснование размещения новых ОИАЭ, разработка мер по обеспечению благополучия городской среды в части загрязнения атмосферного воздуха и управление рисками в этой области, оптимизация мониторинга). Для этих целей подготовлены рекомендации по применению комплексного метода.

### **Основные положения, выносимые на защиту**

1. Комплексный метод проведения оценки рисков, основанный на совокупном учете рисков радиационной и химической природы, локальных экологических и медико-демографических особенностей.
2. Идентификация значимых факторов техногенного воздействия на здоровье населения в районах расположения типовых ОИАЭ на основе сбора и анализа данных по мониторингу радиационной и экологической обстановки, а также по характеристикам источников потенциального воздействия.
3. Базы радиоэкологических данных и расчётные программные средства для оценки радиационных и химических рисков для различных сценариев воздействия на население субъектов РФ с учётом метеорологических, демографических и эпидемиологических особенностей региона.
4. Результаты сравнительной оценки рисков для населения 6 городских агломераций, на территории которых размещены ОИАЭ, и ранжирование факторов воздействия, демонстрирующие, что радиационные риски ниже химических на 2–6 порядков величины.
5. Рекомендации по применению комплексного метода обоснования РБ и экологической приемлемости ОИАЭ.

### **Достоверность результатов**

Достоверность результатов и выводов, полученных в рамках диссертационного исследования, подтверждается тем, что в качестве исходных использованы данные, полученные лицензированными службами радиационного и экологического контроля (ОИАЭ, федеральных, региональных, муниципальных и иных государственных органов, коммерческих организаций) с применением утвержденных методик и средств измерений.

Результаты моделирования рассеивания атмосферных выбросов в воздушной среде верифицированы на расчётах, полученных с помощью программного средства, аттестованного в Ростехнадзоре, а также валидированы на данных контроля загрязнения атмосферного воздуха в селитебных зонах. Результаты мониторинга загрязнения радиоактивными и вредными химическими веществами (РВ и ВХВ) качественно и количественно, совпадают с расчётными значениями, полученными в исследовании.

В основе проведённой оценки радиационных и химических рисков лежат рекомендации международных организаций: МАГАТЭ, НКДАР ООН, ВОЗ, МКРЗ, МАИР, а также руководства и нормативные документы, утверждённые в РФ.

Полученные результаты оценки рисков коррелируют с литературными данными для ряда других районов расположения ОИАЭ и ТЭС в РФ, а также промышленных развитых стран.

### **Личный вклад автора**

Все результаты научных работ по теме исследования получены лично или при непосредственном участии автора:

- разработан комплексный метод обоснования радиационной безопасности и экологической приемлемости, основанный на сравнительной оценке радиационных и химических рисков;
- систематизированы и проанализированы данные по контролю загрязнения окружающей среды РВ и ВХВ, в том числе и его потенциальными источниками, размещёнными в районе расположения предприятий АЭПК;
- разработаны программные средства для расчёта пространственного распределения загрязнения вследствие выбросов вредных примесей стационарными источниками, а также канцерогенных рисков, создаваемых экспозицией радиоактивных и вредных химических веществ;
- проведены оценки и сопоставление радиационных и химических рисков для населения районов их расположения;
- выполнено ранжирование потенциально опасных техногенных факторов воздействия на здоровье человека для типовых объектов ядерной техники по основным переделам ЯТЦ.

### **Апробация результатов**

Основные результаты проведённого исследования докладывались и обсуждались на следующих научных мероприятиях:

- X Региональный общественный форум-диалог «Атомная энергия. Технологии будущего — снижение нагрузки на окружающую среду», г. Екатеринбург, 22–24 мая 2017 г.
- 4<sup>th</sup> International Conference on Radioecology and Environmental Radioactivity (ICRER 2017), г. Берлин, Германия, 2–9 сентября 2017 г.
- Научно-техническая конференция «Зарождение радиоэкологии, ее развитие и роль в обеспечении радиационной безопасности природной среды и человека», г. Озерск, 10–12 октября 2017 г.
- XI международная научно-техническая конференция «Безопасность, эффективность и экономика атомной энергетики», г. Москва, 23–24 мая 2018 г.

- II Международная научно-практическая конференция «Экологическая, промышленная и энергетическая безопасность – 2018», г. Севастополь, 24–27 сентября 2018 г.
- 3-й Международный Форум Научного совета РФ по экологии человека и гигиене окружающей среды на тему: «Современные проблемы оценки, прогноза и управления экологическими рисками здоровью населения и окружающей среды, пути их рационального решения», г. Москва, 13–14 декабря 2018 г.
- XI Российская научная конференция «Радиационная защита и радиационная безопасность в ядерных технологиях» г. Москва, 26–29 октября 2021 г.
- Ежегодный отраслевой научно-практический семинар «Радиационная безопасность и охрана окружающей среды в атомной отрасли» 22–25 мая 2023 г.
- Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием «Актуальные вопросы радиационной гигиены» 10–11 октября 2023 г.

### **Публикации**

По теме диссертации опубликовано 12 научных работ, из них разделы в 3 монографиях, 3 статьи в журналах, индексируемых в международной базе данных Scopus и входящих в Russian Science Citation Index, а также 2 статьи в ведущих реферируемых отечественных журналах из списка, рекомендованного ВАК при Минобрнауки России. Список публикаций приведен в конце автореферата.

### **Структура и объём диссертации**

Диссертация содержит введение, 5 глав, заключение, список литературы из 138 использованных источников. Объём диссертации составляет 143 страницы, включая 53 рисунка и 33 таблицы.

## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы её основные цели, задачи, научная новизна, практическая значимость, основные положения, выносимые на защиту, степень достоверности, личный вклад автора, апробация и публикации.

В работе при рассмотрении объектов ядерной техники используется терминология Федерального закона № 170 и понятие «объект использования атомной энергии» (ОИАЭ)

**В главе 1** представлен обзор эволюции требований и подходов к обоснованию РБ и экологической приемлемости ОИАЭ. Изучены и представлены основные действующие требования законодательства в области использования атомной энергии и в области охраны окружающей среды в России

Обеспечение РБ населения районов расположения ОИАЭ, связано с поступлением РВ в окружающую среду посредством выбросов и сбросов, которое происходит на всех стадиях ЯТЦ (рис. 1). При оценке необходимо учитывать технологические особенности, характерные для различных стадий, пути и факторы воздействия на окружающую среду, что в настоящей работе было выполнено при идентификации основных факторов экологического воздействия (таблица 1).

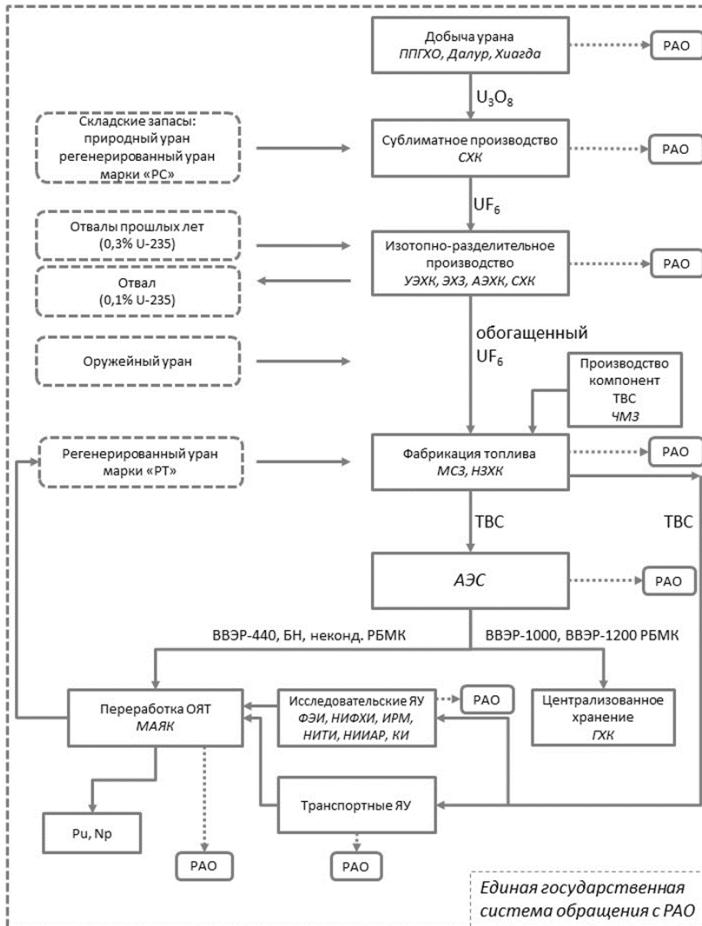


Рисунок 1 – Принципиальная схема ЯТЦ, включающего в себя предприятия АЭПК

Таблица 1 — Ранжирование основных факторов экологического воздействия на различных этапах ЯТЦ

Стадии ЯТЦ	Факторы*				
	Выбросы РВ	Сбросы РВ	Образование РАО	Отчуждение земель	Радиационные аварии
Добыча руды	1	1	2	1	3
Переработка руды	2	2	2	3	2
Изготовление топлива	3	3	2	3	1
Эксплуатация ЯУ	2	2	1	3	1
Обращение с ОЯТ	2	1	1	3	2
Обращение с РАО	3	**1	3	**1	3
Захоронение РАО	3	3	3	2	3

Примечания: \* 1 – высокая значимость фактора, 2- средняя, 3 - низкая  
 \*\*\_ для особых РАО (например, ТКВ)

В разделе 1.1 показано, что развитие методов обоснования экологической приемлемости должно быть ориентировано на адресность, то есть учет совокупности источников вредного воздействия на население и условия его проживания в районе расположения ОИАЭ; комплексный учет основных вредных факторов от всех объектов с учетом стадии их жизненного цикла и возможность определения уровней воздействия одного действующего или проектируемого объекта на фоне общей картины негативного воздействия РВ и ВХВ от иных источников.

В разделе 1.2 проанализированы основные публикации МКРЗ и НКДАР ООН, в которых предложены концептуальная методология и расчётные методы оценки радиационного риска.

Показано, что понятие радиационного риска, определенное в основных нормах безопасности МАГАТЭ (ОНБ-2014), на практике фактически свелось к использованию двух коэффициентов номинального риска для злокачественных новообразований и наследственных эффектов. Такое понимание ущерба, выраженное в терминах риска, вошло и в отечественный нормативный документ НРБ-99/2009.

Для научной литературы отмечены примеры как локальных оценок риска от определенных энергетических технологий, так и более широких региональных исследований многофакторного воздействия на здоровье населения.

**В разделе 1.3** проведен обзор наиболее значимых работ по оценке радиационных и химических рисков для населения регионов расположения АЭС и ТЭС в целом и отдельно взятых ОИАЭ в России. В своем большинстве они включали сравнение заболеваемости и онкологической смертности населения в районах производства электроэнергии.

Важно, что представленные оценки рисков за счёт воздействия объектов ядерной техники представляют неполную картину, поскольку замыкаются лишь на выбросах предприятий ТЭК и сложившейся экологической ситуации на территории их расположения. С целью учёта возможного воздействия всех значимых источников и в силу недостаточности данных существующих систем мониторинга для решения задач оценке риска в комплексном методе определена необходимость идентификации источников загрязнения ВХВ воздушной среды.

**В главе 2** определены и систематизированы основные характеристики и условия функционирования площадок АЭПК, выступающие в качестве критериев выбора типовых объектов ядерной техники для проведения оценок, и представлено обоснование непосредственно выбора объектов в качестве примеров для апробации предлагаемого подхода к обоснованию их экологической приемлемости.

**В разделе 2.1** для исследования были определены как типовые площадки АЭПК различного типа назначения и стадий ЯТЦ: АО «АЭХК» (г. Ангарск Иркутской обл., население – 221 тыс. чел.), АО «ГНЦ РФ – ФЭИ», АО «НИФХИ им. Л. Я. Карпова» (г. Обнинск Калужской обл., население – 125 тыс. чел.), Ленинградская АЭС, Ленинградское отделение филиала «Северо-Западный ТО» ФГУП «РАДОН» (бывш. ФЭО/РосРАО), ФГУП «НИТИ им. А. П. Александрова» (г. Сосновый Бор Ленинградской области, население – 65 тыс. чел.), АО «УЭХК» (г. Новоуральск Свердловской обл., население – 84 тыс. чел.), ПАО «МСЗ» (г. Электро-сталь Московской обл., население – 146 тыс. чел.), АО «ГНЦ НИИАР» (г. Димитровград Ульяновской обл., население – 111 тыс. чел.).

Для них проведена предварительная идентификация основных техногенных факторов опасности: радиационный, химический, тепловой, образование РАО и иные, характерные для района расположения объектов. Для начальной стадии ЯТЦ сравнение рисков не представляется целесообразным в силу очевидного доминирования радиационного фактора и вкладов техногенной и природной составляющих радиационного воздействия.

**В разделе 2.2.** идентифицированы опасные факторы воздействия. Для каждой площадки выполнены: сбор и анализ данных по выбросам основных стационарных источников (суммарно и в отдельности по наиболее значимым); индикация номенклатуры и объёма поступающих в атмосферу ВХВ и РВ. Для ряда площадок определен недостаток данных контроля состояния качества окружающей среды и характеристик источников её загрязнения в силу низкого охвата сетью мониторинга исследуемой территории, в том числе по радиационному фактору, редкой частоты измерений и узкого спектра контролируемых загрязняющих веществ. Для его компенсации предусмотрено моделирование распространения и расчёт уровней содержания РВ и ВХВ за счёт выбросов предприятий, как наиболее значимого фактора с точки зрения негативного воздействия на население.

Основные зоны потенциального воздействия рассмотренных ОИАЭ – селитебные зоны с постоянно проживающим населением. Для них систематизированы параметры радиационной и санитарно-гигиенической обстановки и необходимый объем данных по показателям заболеваемости и смертности от злокачественных новообразований (ЗНО) и прочих соматических заболеваний.

В заключении главы подведены итоги работ по подготовке исходных данных для 6 площадок АЭПК, определенных как типовые для апробации предлагаемого в исследовании метода. Для них систематизированы данные по выбросам и содержанию в компонентах окружающей среды наиболее значимых РВ:  $^{238}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$ ,  $^{234}\text{U}$  (производство топлива в Ангарске, Новоуральске, Электростали),  $^3\text{H}$ ,  $^{131}\text{I}$  (исследовательские ЯУ в Обнинске),  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{134}\text{Cs}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{90}\text{Sr}$  (обращение с РАО в Сосновом Бору)  $^{41}\text{Ag}$ ,  $^{85}\text{Kr}$ ,  $^{87}\text{Kr}$ ,  $^{88}\text{Kr}$ ,  $^{135}\text{Xe}$ ,  $^{133}\text{Xe}$  (энергетические и исследовательские ЯУ в Димитровграде и Сосновом Бору) – и ВХВ: диоксида азота, диоксида серы, оксида углерода, формальдегида, бенз(а)пирена, бензола, хрома, свинца, никеля, кадмия, взвешенных веществ (ВВ).

**В разделе 2.3** рассмотрено существующее облучение вследствие загрязнения от крупных радиационных аварий. По данным мониторинга загрязнения почвенного покрова выполнены консервативные оценки доз облучения и радиационного риска, который существенно ниже уровней химического риска от предприятий ТЭК.

**В главе 3** обоснован выбор процедур оценки радиационных и химических рисков, под которыми понимается вероятность наступления неблагоприятных эффектов (онкологической заболеваемость (ЗНО) и смертность от ЗНО и других соматических эффектов). Они имеют схожую концепцию в отношении организации и этапов выполнения оценки: идентификация опасности (вредности), оценка экспозиции (длительности и величины воздействия), расчет рисков.

Для выбранных процедур в разделе 3.1 разработан алгоритм проведения оценки рисков, четыре этапа которого предусматривают: идентификацию опасных факторов, сбор необходимого массива исходных данных (мониторинг состояния компонентов окружающей среды, данные по выбросам и сбросам источников загрязнения, метеопараметры, характеристики селитебных зон, медико-демографические данные) для расчетов, расчет и сравнительный анализ рисков радиационного и химического происхождения (рис. 2). Радиационные и химические риски возникновения ЗНО и смертности по этой причине рассчитываются в предположении линейной беспороговой концепции.

В разделе 3.2 показано, как показатель избыточного абсолютного или относительного радиационного риска ( $EAR$  или  $ERR$ ) для солидных раков и лейкозов, согласно рекомендациям НКДАР ООН (Effects of ionizing radiation, UNSCEAR 2006), определяется с учётом особенности онкологической ситуации на изучаемой территории:

$$EAR(e, s, D, a) = ERR(e, s, D, a) \cdot h_0(e, s, a),$$

$$ERR_{solid}(e, s, D, a) = 601 \cdot D \cdot \exp(0,6 \cdot s + \ln(a - e) - 2,6 \ln(a));$$

$$ERR_{leukemia}(D, a) = (865 \cdot D + 1021 \cdot D^2) \cdot \exp(-1,65 \ln(a)),$$

где  $D$  – эффективная доза облучения,  $h_0(e, s, a)$  – фоновая онкологическая заболеваемость (смертность) группы лиц пола  $s$ , в диапазоне лет от возраста облучения  $e$  до возраста дожития  $a$  в регионе.

Для химических канцерогенов на единицу концентрации (дозы) приходится определённая вероятность негативных эффектов, которая в области малых значений доз характеризуется фактором канцерогенного потенциала ( $SF$ ). При расчётах использованы значения, рекомендованные Руководством по оценке риска Роспотребнадзора Р 2.1.10.1920-04, гармонизированным с классификацией канцерогенных веществ Международного агентства по исследованию рака (МАИР) и моделями доказанной канцерогенности US EPA (Risk assessment guidance for Superfund). Среди контролируемых в выбросах рассмотренных предприятий ВХВ наибольшим фактором канцерогенного потенциала при ингаляционном поступлении обладают шестивалентный хром и бенз(а)пирен – 42 и 3,9 мг/(кг·сут)<sup>-1</sup>, соответственно. Риск, в соответствии с рекомендациями Роспотребнадзора, рассчитывается как:

$$ICR = LADD \cdot SF$$

где  $LADD$  – потенциальная суточная доза, усредненная за весь период жизни человека, рассчитываемая с учётом физических параметров индивида, мг/(кг·сут),  $SF$  – фактор канцерогенного потенциала, (мг/(кг·сут))<sup>-1</sup>.

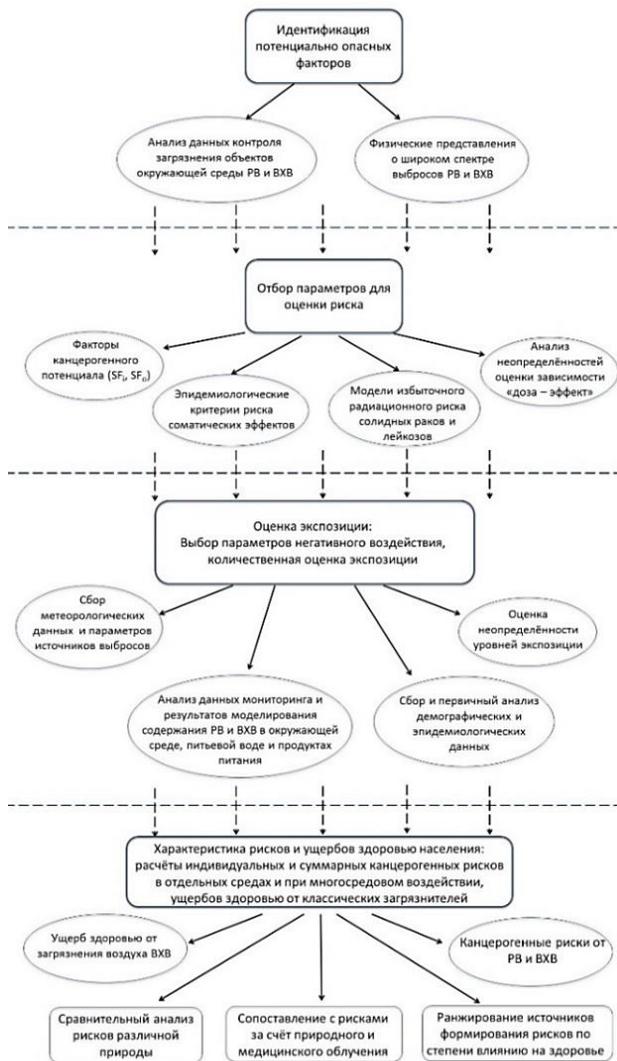


Рисунок 2 — Общая схема выполнения оценки радиационных и химических рисков в рамках комплексного метода

**Раздел 3.3** посвящен методике оценки химических рисков неканцерогенного характера (ущербов здоровью вследствие других соматических заболеваний при токсическом воздействии). В отношении этих эффектов предполагается

наличие порога – референтного уровня экспозиции, ниже которого вероятность неблагоприятных эффектов будет нулевой.

В основе моделей оценки риска для токсических веществ лежит подход, изложенный в монографии С. М. Новикова (2002), определяющий наступление неблагоприятных эффектов как функцию от кратности превышения фактической концентрации над референтным уровнем:

$$\Delta \text{случаев} = -(y_0 \times (e^{\beta \times \Delta \text{вещества}} - 1)) \times \text{pop}$$

где  $\Delta \text{случаев}$  – количество дополнительных случаев развития определённого заболевания (увеличения смертности) при воздействии ВХВ;  $y_0$  – фоновый уровень регистрации заболевания (смертности по его причине) для изучаемой популяции;  $\beta$  – параметр модели, определяемый для каждого эффекта и каждого химического вещества (например, при расчёте дополнительной смертности от воздействия ВВ  $\beta = 0,006408$ );  $\Delta \text{вещества}$  – превышение среднесуточной концентрации ВХВ референтного уровня;  $\text{pop}$  – численность изучаемой популяции.

В разделе 3.4 представлены разработанные программные средства для расчёта пространственного распределения среднегодовых значений концентраций и плотности поверхностных выпадений от нескольких источников непрерывного действия (1); радиационных рисков (2), химических канцерогенных рисков (3).

Программный модуль (1) обеспечивает оценку пространственного распределения уровней содержания загрязняющих веществ в атмосферном воздухе от нескольких источников непрерывных выбросов химических и/или радиоактивных примесей. Расчёт проводится с помощью локальной гауссовой модели рассеивания с учётом характеристик источника выбросов (высота и ширина устья трубы, скорость истечения газоаэрозольной смеси и др.), номенклатуры, объёма и физических свойств выбрасываемых веществ, характера поведения их газовой и аэрозольной фракций, а также ландшафтных и метеорологических параметров расчётной области (шероховатость поверхности, ежесуточные данные по скорости и направлению ветра, типу и интенсивности осадков и др.).

Расчётные значения, полученные с помощью моделирования распространения выбросов РВ и ВХВ и пространственного распределения содержания их в воздухе, валидированы на результатах контроля служб мониторинга фактического загрязнения воздуха в районах расположения ОИАЭ. Например, среднегодовое для г. Ангарска значение концентрации диоксида серы за счёт выбросов основных стационарных источников по результатам расчёта – 45 мкг/м<sup>3</sup>, по данным мониторинга УГМС – 54 мкг/м<sup>3</sup>, по данным АО «АНХК» – 5 (разброс 1÷500) мкг/м<sup>3</sup> (рис. 3).

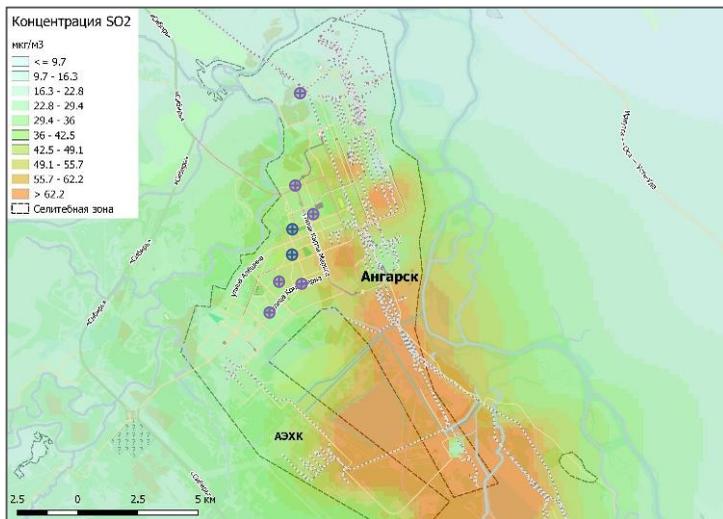


Рисунок 3 — Расчетные среднегодовые концентрации SO<sub>2</sub> от выбросов в г. Ангарске (интерполяции в ГИС)

При проведении оценки рисков в качестве единого показателя эффектов воздействия был выбран риск дополнительной смертности. В программных модулях (2) и (3) реализованы расчётные алгоритмы выбранных в разделе 3.2 мультипликативной модели НКДАР ООН оценки радиационного риска и модели Роспотребнадзора химического риска. При проведении расчётов использованы данные мониторинга и полученные результаты пространственного распределения содержания РВ и ВХВ в селитебных зонах, созданная база данных по статистике онкологической заболеваемости/смертности для каждого субъекта РФ.

**Глава 4** посвящена апробации метода. Для шести типовых объектов проведены расчет и сравнение техногенных рисков различной природы с допустимыми (приемлемыми) уровнями, ранжирование факторов риска по степени их потенциальной опасности, оценка вклада ОИАЭ и определение критических участков территорий и путей негативного воздействия для населения.

В районе расположения АО «АЭХК» ведущими факторами загрязнения окружающей среды, влияющими на здоровье населения Ангарска, являются взвешенные вещества (85%), бензол и диоксид серы. Основными источниками выбросов ВХВ являются ТЭЦ (три предприятия ПАО «Иркутскэнерго»), нефтеперерабатывающий комплекс (АО «АНХК») и автотранспорт, а загрязнение воздуха городской среды ВХВ формирует уровень риска в диапазоне неприемлемого ни для населения, ни для профессиональных групп.

Выбросы РВ от всех источников (за счёт содержания урана в золе ТЭЦ) и АО «АЭХК» в отдельности создают пренебрежимо малый риск, составляющий  $10^{-5}$  от суммарного значения.

Таблица 2 — Ранжирование факторов негативного воздействия на здоровье населения г. Ангарска

Параметр	Риск	% вклада в суммарный риск
взвешенные вещества	$3,0 \cdot 10^{-3}$	85,8
бензол	$2,5 \cdot 10^{-4}$	7,1
диоксид серы	$2,0 \cdot 10^{-4}$	5,7
формальдегид	$2,7 \cdot 10^{-5}$	0,8
оксид углерода	$2,0 \cdot 10^{-5}$	0,6
никель	$2,9 \cdot 10^{-6}$	0,08
бенз(а)пирен	$1,3 \cdot 10^{-6}$	0,04
уран (от всех источников)	$4,9 \cdot 10^{-7}$	0,014
уран (от выбросов АЭХК)	$2,5 \cdot 10^{-8}$	< 0,001
свинец	$1,6 \cdot 10^{-8}$	0,005
Сумма техногенных факторов	$3,5 \cdot 10^{-3}$	100,0

В районе расположения АО «ГНЦ НИИАР» суммарное значение риска за счёт всех факторов составило  $1,3 \cdot 10^{-3}$ , что относится к неприемлемому уровню риска. Вклад техногенного радиационного фактора в общую структуру риска менее 0,003 %, значения концентраций всех «классических» ВХВ, выбрасываемых предприятием, на 2–6 порядков ниже референтных уровней. Уровень воздействия АО «ГНЦ НИИАР» соответствует пренебрежимо малым значениям канцерогенных рисков, а его вклад в загрязнение воздуха города ВВ, которые являются основным фактором техногенного риска, не превышает 0,008%.

В районе расположения ПАО «МСЗ» значение риска практически полностью (на 96%) определяется загрязнением атмосферного воздуха двумя «классическими» ВХВ: диоксидом азота и ВВ. Радиационный риск от выбросов предприятия не превышал  $1,4 \cdot 10^{-8}$ , а за счёт содержания РВ в компонентах окружающей среды –  $1,9 \cdot 10^{-6}$ , что в 200 раз ниже значения химического риска. В то же время риски для населения г. Электростали за счёт природного ( $1,5 \cdot 10^{-4}$ ) и медицинского ( $1,4 \cdot 10^{-5}$ ) облучения находятся на уровне выше, чем формируют выбросы ПАО «МСЗ», в 11000 и 1000 раз соответственно.

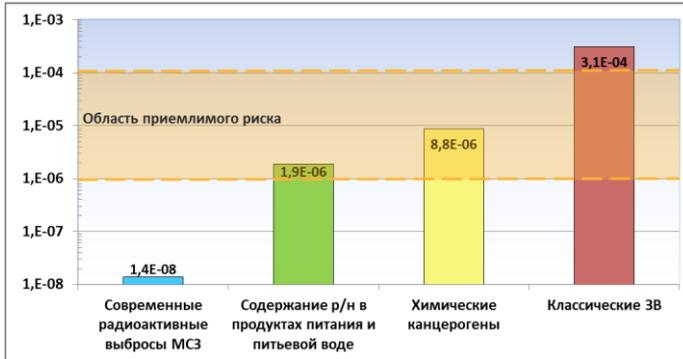


Рисунок 4 — Уровни техногенных рисков для г. Электростали

В районе расположения АО «ГНЦ РФ – ФЭИ» и АО «НИФХИ им. Л. Я. Карпова» в структуре рисков также подавляющий вклад вносит загрязнение воздуха ВВ (90%). Значение радиационного риска от выбросов предприятий г. Обнинска составило  $7,4 \cdot 10^{-9}$ , что на 3 порядка величины ниже приемлемого, а вклад в суммарное значение техногенного риска не превысил 3,5%.

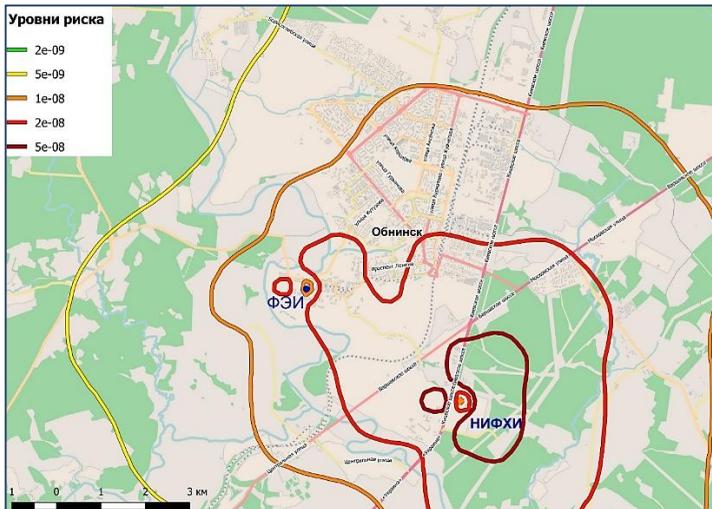


Рисунок 5 — Оценка уровней радиационного риска, обусловленных радиоактивными выбросами ОИАЭ г. Обнинска

В районе расположения АО «УЭХК» ведущими экологическими факторами риска является содержание в воздухе диоксида серы и оксидов азота, превы-

шавшее в ряде точек мониторинга уровни ПДК. Средний для города уровень радиационного риска за счёт выбросов АО «УЭХК» составило  $1,9 \cdot 10^{-8}$ , что в 50 раз ниже нижней границы области допустимого риска для населения и классифицируется как пренебрежимо малый.

Район расположения Ленинградской АЭС – моногород с преимущественным развитием предприятий атомной отрасли, в результате чего среди основных факторов потенциального экологического воздействия – предприятия АЭПК и автотранспорт. Выбросы РВ и ВХВ в период 2015–2020 гг. формировали техногенные риски для населения на уровне пренебрежимо малых как в отдельности, так и в сумме, которая в среднем для территории селитебной зоны составляла  $2,8 \cdot 10^{-7}$ . Среди трёх предприятий АЭПК наибольший вклад вносит Ленинградская АЭС – 16 % от суммарного значения техногенного риска (в ситуациях существующего и планового облучения) и более 90 % при рассмотрении рисков исключительно от выбросов всех ОИАЭ г. Сосновый Бор.

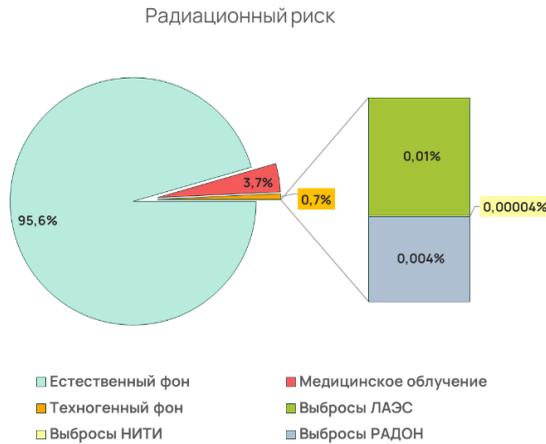


Рисунок 6 – Структура радиационного риска в г. Сосновый Бор

В целом, следует отметить столь низкий вклад планируемого облучения вследствие выбросов всех предприятий АЭПК города в общую структуру суммарной дозы облучения и, как следствие, радиационного риска – 0,014 %. Риск за счёт сложившегося техногенного радиационного фона, при этом, выше в 50 раз; за счёт медицинского облучения – в 2600 раз; а за счёт естественного радиационного фона – в 68 000 раз (рис. 6).

Полученные пренебрежимо малые уровни риска и их вклад в общую структуру техногенного риска для всех рассмотренных площадок

свидетельствуют об экологической приемлемости и РБ эксплуатируемых ЯУ.

Полученные результаты оценки рисков позволяют выделить типовые ситуации для экологической обстановки районов расположения площадок АЭПК: благоприятная с преобладанием радиационного фактора (ППГХО), благоприятная с преобладанием химического фактора и незначительным вкладом радиационного (ЛАЭС, УЭХК), неблагоприятная с уровнем химического риска, неприемлемым ни для населения, ни для профессиональных групп, и с пренебрежимо малым вкладом радиационного фактора (НИИАР, АЭХК, МСЗ).

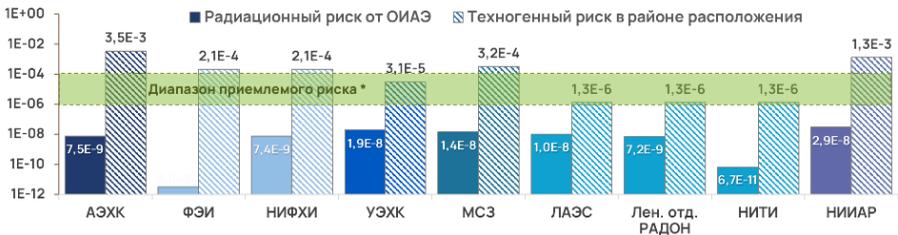


Рисунок 6 — Результаты оценки уровней риска для населения за счёт воздействия рассмотренных ОИАЭ и суммарных техногенных рисков

В **Главе 5** предложены направления применения комплексного метода или его отдельных компонентов: обоснование радиационной и экологической безопасности при размещении новых ОИАЭ в рамках подготовки материалов, сопровождающих этапы размещения, проектирования и сооружения; оптимизация сети наблюдения за состоянием окружающей среды на городских территориях; организация расширенного снятия фоновых характеристик и оптимизация мер по улучшению экологической ситуации.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ

Цель исследования – разработка и применение комплексного метода оценки радиационных и химических рисков для населения при обосновании радиационной безопасности и экологической приемлемости предприятий АЭПК, достигнута.

- Разработан комплексный метод оценки радиационных и химических рисков для населения в районе расположения предприятий АЭПК, который включает алгоритм сравнительной оценки рисков, базы радиоэкологических данных и программные средства для расчёта рисков с учётом метеорологических, демографических и эпидемиологических особенностей региона.

- Определены 6 типов объектов ядерной техники, соответствующие стадиям ЯТЦ (переработка урановой руды, производство топлива, генерация энергии, обращение с РАО) и назначению ядерных реакторов (энергетические и исследовательские) и систематизированные по параметрам зоны воздействия и характеру их радиационного воздействия на население и окружающую среду.
- Сформированы базы данных по мониторингу радиационной, экологической обстановки, а также по характеристикам источников потенциального воздействия на здоровье населения в районах расположения ОИАЭ.
- Разработаны программные средства для расчёта полей воздействия различных вредных веществ в пространстве городской среды и оценки радиационных и химических канцерогенных рисков.
- Выполнены сравнительная оценка и анализ рисков радиационной и химической природы для населения и определены типовые ситуации экологического состояния районов расположения 6 промышленных площадок: АО «АЭХК»; АО «ГНЦ РФ–ФЭИ» и АО «НИФХИ им. Л. Я. Карпова»; АО «УЭХК»; Ленинградской АЭС, Ленинградское отделение филиала «Северо-Западный ТО» ФГУП «РАДОН» и ФГУП «НИТИ им. А. П. Александрова»; АО «ГНЦ НИИАР», ПАО «МСЗ», – демонстрирующие, что вклад радиационного фактора в структуру рисков техногенного происхождения пренебрежимо мал и по абсолютному значению на 2–6 порядков величины ниже уровней приемлемого риска, что характерно для всех стадий ЯТЦ (кроме первой – добычи урана) и подтверждает высокую конкурентоспособность ядерных технологий в вопросах культуры безопасности и экологической приемлемости типовых ОИАЭ.

## **ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

1. Панченко С. В., Линге И. И., Аракелян А. А. и др. Радиоэкологическая обстановка в регионах расположения предприятий Государственной корпорации по атомной энергии «Росатом». – Изд.2-е, испр. и доп.; М., 2021. — 555 с. (провёл сбор и анализ данных радиоэкологического мониторинга, моделирование рассеивания газоаэрозольных выбросов ОИАЭ, оценку доз облучения населения для ряда регионов в рамках подготовки разделов «Фоновые параметры радиоэкологической обстановки», «Оценка радиоэкологического воздействия предприятий отрасли»).

2. Аракелян А. А. Разработка и применение комплексного метода обоснования радиационной и экологической безопасности объектов использования атомной энергии. // Вопросы радиационной безопасности. – 2024. – № 2 (114).
3. Аракелян А. А. и др. Опыт практических исследований, по сравнительной оценке, радиационных и химических рисков здоровью населения от воздействия факторов окружающей среды // Гигиена и санитария. – 2019. – Т. 98. – № 12. – С. 1425–1431.
4. Аракелян А. А., Ведерникова М. В., Гаврилина Е. А., Печкурова К. А. Оценка вклада Государственного научного центра «НИИ атомных реакторов» в формирование техногенных рисков для населения Димитровграда. // Медицинская радиология и радиационная безопасность. – 2020. – Т. 65. – № 3. – С. 13–19.
5. Аракелян А. А. и др. Анализ рисков для здоровья населения Обнинска от воздействия выбросов вредных веществ в атмосферу // Проблемы анализа риска. – 2018. – Т. 18. – № 5. – С. 26–38.
6. Аракелян А. А., Ведерникова М. В., Панченко С. В. Сравнительная оценка радиационных и химических рисков для населения г. Обнинска // Сборник статей по материалам международной научно-практической конференции «Экологическая, промышленная и энергетическая безопасность – 2018». – 2018. – С. 103–106.
7. Аракелян А. А. и др. Сравнительный анализ радиационных и химических рисков в регионе размещения Ленинградской АЭС // Сборник трудов Одиннадцатой международной научно-технической конференции «Безопасность, эффективность и экономика атомной энергетики» – 2018. – С. 410–416.
8. Экология атомной отрасли. Абрамов А. А., Адамчик С. А., Аракелян А. А. и др. – Под редакцией Грачёва В. А. – 2018. – 364 с. (провёл обзор нормативно-правовой базы в области регулирования рисков, оценку и анализ радиационных и химических рисков для населения г. Ангарска в рамках подготовки раздела «Радиация и риск»).
9. Панченко С. В., Новиков С. М., Шашина Т. А., Аракелян А. А. Ранжирование радиационных и химических рисков для здоровья населения, проблемы и пути решения. // Сборник статей по материалам международной научно-практической конференции «Экологическая, промышленная и энергетическая безопасность – 2018». – 2018. – С. 930–933.
10. Панченко С. В., Аракелян А. А., Ведерникова М. В. и др. Сравнительная оценка радиационных и токсических рисков в Ангарске // Радиация и риск (Бюллетень Национального радиационно-эпидемиологического регистра). – 2017. – Т. 26. – № 2. – С. 83–96.
11. Панченко С. В., Линге И. И., Аракелян А. А. и др. Практические рекомендации по вопросам оценки радиационного воздействия на человека и биоту. –

2015. – 265 с. (Подготовил анализ существующих подходов к оценке радиационных и химических рисков и нормированию техногенных рисков в рамках раздела «Оценка риска – современный инструмент оценки воздействия»).

12. A. Arakelyan, S. Panchenko. Comparative assessment of radiological and chemical risks from air pollution in settlements: the case study of Angarsk //Abstracts book 4<sup>th</sup> International Conference on Radioecology and Environmental Radioactivity. – 2017. – p.68–69.

Аракелян Арам Айкович

Комплексный метод обоснования радиационной безопасности и экологической приемлемости объектов ядерной техники

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Подписано в печать 16.07.2024  
Формат 60 × 84 1/16. Усл. печ. л. 1,25. Уч.-изд. л. 1,05.

Тираж 100 экз.  
Печать на аппарате Rex-Rotary.  
ИБРАЭ РАН. 115191, Москва, ул. Б.Тульская, 52  
Телефон: 8-495-955-22-66