

На правах рукописи

НОСОВ АНДРЕЙ ВИКТОРОВИЧ

**ПРОГНОЗ И ОПЕРАТИВНЫЙ КОНТРОЛЬ
РАДИАЦИОННОЙ ОБСТАНОВКИ И МИКРОКЛИМАТА
В РАЙОНЕ РАСПОЛОЖЕНИЯ ПРЕДПРИЯТИЙ ЯТЦ**

специальность 25.00.30-

метеорология, климатология, агрометеорология

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

доктора физико-математических наук

Москва

2005г.

Работа выполнена в федеральном государственном унитарном предприятии
«Научно-исследовательский, проектно-конструкторский и
изыскательский институт «Атомэнергопроект» Росатома

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук, чл.-корр. РАН Г. П. Курбаткин

доктор физико-математических наук А. И. Дегтярев

доктор технических наук, профессор А. М. Матущенко

Ведущая организация: Институт Экспериментальной
Метеорологии НПО "Тайфун"

Защита состоится 29 декабря 2005г. в 11 часов на заседании
Диссертационного совета Д 002.049.01 Института глобального климата и
экологии Росгидромета и РАН по адресу:
РФ, 107258 Москва, ул. Глебовская, д. 20Б

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГУ " ИНСТИТУТ
ГЛОБАЛЬНОГО КЛИМАТА И ЭКОЛОГИИ РОСГИДРОМЕТА И РАН"

Автореферат разослан 29 декабря 2005г.

Ученый секретарь

Диссертационного совета,

Доктор географических наук



Г. М. Черногаева

2006-4
28239

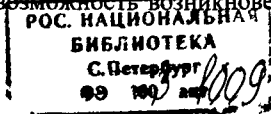
2254199
3

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Длительное функционирование предприятий ядерно-топливного цикла (ЯТЦ), атомного флота и предприятий оборонной промышленности в стране привело к появлению большого количества радиационно-опасных объектов. В настоящее время на территории России находится: 10 атомных электростанций; 45 исследовательских реакторов и 53 критических стенов; 16 хранилищ радиоактивных отходов; 10 предприятий по добыче и переработке радиоактивных руд; радиохимические предприятия; ядерные энергетические установки подводных и надводных судов; военные объекты, оснащенные ядерным оружием.

При нормальной работе предприятий ЯТЦ выбросы, и сбросы радиоактивных веществ, как правило, не представляют угрозы для населения и окружающей природной среды. Определение и учет вклада всех потенциальных источников в радиоактивное загрязнение окружающей среды является необходимым звеном при прогнозировании и контроле радиационной обстановки. Одним из возможных источников поступления трития в приземную атмосферу могут являться содержащие этот нуклид водоемы-охладители и другие водные объекты, используемые в технологических целях. Процессы, определяющие поступление и перенос трития в приземной атмосфере, зависят от метеорологических параметров, поэтому изучение микроклиматических особенностей района расположения водных объектов, используемых предприятиями ЯТЦ, является важным условием, необходимым при проведении экологического мониторинга.

Наибольшую опасность загрязнения окружающей среды представляют радиационные инциденты и аварии. На всем протяжении развития атомной промышленности и энергетики (к настоящему времени мировой опыт эксплуатации энергетических реакторов превышает 10700 реакторо-лет) совершенствованию систем надежности и безопасности уделяется особое внимание, однако полностью исключить возможность возникновения аварийных ситуаций пока не удается.



Учитывая большую потенциальную опасность радиоактивных веществ для населения и природной среды, вопросы прогнозирования и оперативного контроля радиационного состояния окружающей водной среды, решаемые в данной диссертационной работе являются актуальными.

Цель работы. Разработать и усовершенствовать методы прогноза и оперативного контроля радиационной обстановки в районах расположения водных объектов, находящихся в зоне воздействия предприятий ЯТЦ, для обеспечения радиационной безопасности населения и окружающей среды при нормальной эксплуатации радиационно-опасных объектов, а также с целью принятия обоснованных и своевременных решений при возникновении аварийных ситуаций.

Задачи исследований. Для достижения поставленной цели необходимо было решить ряд экспериментальных и теоретических задач. *В плане натурных и экспериментальных исследований:*

- разработать методологию контроля радиационной обстановки в районе расположения водоемов, подвергающихся радиоактивному загрязнению;
- сконструировать специальное пробоотборное оборудование и разработать методы его использования для определения уровней загрязнения верхнего, обменного слоя донных отложений и нахождения его водно-физических свойств;
- изучить радиационную обстановку и определить основные параметры миграции радионуклидов в водных объектах при нормальной эксплуатации предприятий ЯТЦ и в аварийных ситуациях;
- провести исследования и выполнить анализ изменений микроклимата в районе водоема – охладителя действующей АЭС;
- определить уровни загрязнения водной среды и приземной атмосферы тритием в районах расположения предприятий ЯТЦ;
- провести физические модельные эксперименты в лабораторных и натурных условиях с целью изучения процессов сорбции, диффузионного массообмена, выноса радионуклидов на пойму, водной эрозии загрязненной пойменной почвы и определить численные значения основных параметров, определяющих процессы

переноса и перераспределения радиоактивных веществ.

В области математического моделирования:

- Разработать комплекс математических моделей, учитывающих основные механизмы миграции радионуклидов и позволяющих оперативно прогнозировать содержание радиоактивных веществ в воде, донных отложениях и пойменной почве рек и водоемов при различных сценариях загрязнения;
- Предложить необходимые расчетные зависимости для определения входных параметров моделей и определить наиболее вероятный, числовой диапазон их изменения;
- Найти расчетные соотношения, позволяющие прогнозировать содержание трития в приземной атмосфере по данным измерений метеорологических параметров и содержанию этого радионуклида в воде водных объектов;
- Провести валидацию предложенных математических моделей и расчетных зависимостей на основании данных натурных исследований и результатов физического моделирования.

Научная новизна работы:

– разработанная в диссертационной работе методология дает возможность оперативно контролировать радиационную обстановку на реках и водоемах, выявлять локальные участки загрязнения, определять содержание и вклад в загрязнение короткоживущих радионуклидов, оценивать несанкционированные источники радиоактивного загрязнения и определять параметры миграции радионуклидов;

– результаты изучения микроклиматических особенностей в районе водоема-охладителя действующей АЭС в сочетании с исследованиями содержания трития в объектах окружающей среды, позволили оценить масштабы изменения микроклимата, и впервые определить вклад водоема – охладителя в содержание трития в приземной атмосфере;

– результаты натурных исследований водных объектов, подвергнувшихся аварийному радиоактивному загрязнению, позволили определить важную роль верхнего обменного слоя донных отложений в процессах перераспределения

радиоактивных веществ между водной массой и донными отложениями. Разработанная аппаратура в сочетании с теоретической моделью образования обменного слоя впервые позволили определять его водно-физические свойства и основные параметры в зависимости от гидрометеорологических условий;

– впервые выдвинута гипотеза, объясняющая механизм радиоактивного загрязнения малых рек в условиях атмосферных выпадений на снежный и ледовый покров. Гипотеза подтверждена результатами радиоэкологических исследований;

– разработанный комплекс математических моделей позволяет прогнозировать содержание радиоактивных веществ в воде, донных и пойменных отложениях рек и водоемов при различных сценариях их загрязнения и оценивать вторичное загрязнение воды, связанное с поступлением радионуклидов из донных отложений. В основу комплекса положена трехкамерная модель, в которой донные отложения водных объектов рассматриваются в качестве двухслойной среды с верхним обменным слоем. Это позволило впервые учесть влияние вертикальной неоднородности донных отложений на процессы миграции радионуклидов и повысить точность прогнозов. База данных входных параметров к разработанным моделям позволяет использовать расчетный комплекс для прогнозирования загрязнения водных объектов на всем жизненном цикле предприятий ЯТЦ, включая стадию проектирования.

Автор выносит на защиту

1. Методологию оперативного контроля рек и водоемов, подвергающихся радиоактивному загрязнению, с помощью мобильного измерительного комплекса и специально разработанной аппаратуры;
2. Результаты многолетних радиоэкологических исследований р. Енисей ниже сбросов Красноярского ГХК, выполненных по разработанной методологии;
3. Адекватность результатов исследования влияния водоема-охладителя действующей АЭС на изменение микроклимата и содержание трития в приземной атмосфере;

4. Гипотезу, объясняющую природу радиоактивного загрязнения малой реки в условиях аварийных атмосферных выпадений на снежный и ледовый покров водосбора, подтвержденную результатами натурных исследований речной сети в районе г. Северска после радиационного инцидента на Сибирском химическом комбинате;

5. Комплекс математических моделей и расчетных зависимостей, позволяющих оперативно прогнозировать содержание радиоактивных веществ в воде, донных отложениях и пойменной почве при различных сценариях поступления радиоактивных веществ.

Практическая значимость работы. Результаты диссертационной работы нашли применение при разработке:

- Методических указаний "Методика прогнозирования состояния загрязнения водоемов при нарушении нормальной эксплуатации АЭС" РД 52.26.174-88. - М.: Госкомгидромет, 1988. – 49с.;
- Методических указаний "Методика расчета предельно допустимых сбросов радиоактивных веществ в проточные водоемы". РД 52.26.175-88. – М.: Госкомгидромет СССР, 1988. - 88 с.;
- Руководства "Методы расчета распространения радиоактивных веществ с АЭС и облучения окружающего населения". //Нормативно-технический документ. – М.: МХО Интератомэнерго, 1994. – 165с.
- Сборника методик по радиационному контролю. - М.: Госкомэкологии России, 1998.

Разработанная автором методология натурных исследований и комплекс моделей прогноза были использованы при:

- выполнение работ по обследованию загрязненных территорий СССР после аварии на ЧАЭС, в рамках целевых программ Росгидромета;
- организации радиозологических исследований в Удомельском районе Тверской области и организации опытного участка АСКРО "Источник" в районе Калининской АЭС в рамках Федеральной целевой программы «Ядерная и

радиационная безопасность России», подпрограмма №10 «Создание ЕГАСКРО»(постановление Правительства РФ №149 от 22.02.2000);

- разработке научного, нормативного и методического обеспечения в области радиационной безопасности (Государственные контракты МПР РФ № 02-10Э/2-01 и МЯ-03-51/262);
- выполнение работ в рамках международного проекта в период 2000-2003гг. "Source development and transport of radioactive contamination in the environment through the use of satellite imagery"(STREAM) Contract number: ERB-IC15-CT98-0219 in the EC's Copernicus Programme.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на:

- Всесоюзной конференции "Радиационные аспекты Чернобыльской аварии" (Обнинск, 1988г.);
- Всесоюзном научно-техническом совещании по основным результатам ликвидации последствий аварии на Чернобыльской АЭС. (Чернобыль, 1988г.);
- Всесоюзном симпозиуме "Изотопы в гидросфере" (Каунас, 1989г);
- Советско-американском симпозиуме "Охрана окружающей среды при авариях на АЭС" (Москва, 1989г.);
- Международной конференции "Миграция радионуклидов в водных системах" (Обнинск, 1995г.);
- Международной конференции "Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека" (Томск, 1996);
- Всероссийской научно-практической конференции «Состояние и развитие единой государственной автоматизированной системы контроля радиационной обстановки на территории Российской Федерации» (Обнинск, 2001);
- The 5th International Conference on Environmental Radioactivity in the Arctic and Antarctic (St. Petersburg, Russia, 2002);
- Отраслевом семинаре РОСАТОМА "Вопросы экологической безопасности при проектировании, строительстве и эксплуатации АЭС" (Москва, 2005).

Личный вклад автора. Все натурные исследования выполнялись при непосредственном участии автора. Методология исследований, комплекс

оборудования и математические модели разрабатывались диссертантом лично. При разработке методологии натурных исследований также использовались научные результаты, ранее полученные Ю. А. Израэлем, С. М. Вакуловским, Е. Д. Стукиным, В. Н. Петровым.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения.

Общий объем 232 стр., в том числе 40 рис. и 65 табл. Список литературы включает 250 цитируемых источников.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ.

Введение содержит обоснование актуальности темы работы, определяет цели и задачи исследования, научную новизну и практическое значение результатов работы.

Глава 1 "Проблема радиоактивного загрязнения водных объектов. Обзор методов моделирования" состоит из четырех разделов.

Раздел 1.1 посвящен анализу научно-методического обеспечения контроля радиоактивного загрязнения поверхностных вод. Анализ показывает, что приобретенный после Чернобыльской аварии опыт работ на реках, озерах и водохранилищах позволяет существенно детализировать и усовершенствовать методы контроля радиационной обстановки на водных объектах с учетом современной приборной базы и технологических возможностей. Схема организации контроля должна включать не только измерения концентрации радионуклидов в основных объектах водной среды, но также измерение ряда необходимых гидрологических параметров. На основе результатов контроля и выявления источников загрязнения осуществляется прогноз уровней радиоактивного загрязнения основных компонентов водного объекта, с помощью которого принимаются управленческие решения, направленные на предотвращение развития загрязнения водной среды.

Раздел 1.2 посвящен особенностям поведения радионуклидов в пресноводных водоёмах. Выполнен краткий анализ литературных источников, освещающих процессы сорбции и миграции радионуклидов в водоёмах.

Отмечено, что для несложных моделей, описывающих миграцию радиоактивных веществ в водоёмах, допустимо использовать упрощающие предположения о линейной и обратимой сорбции радионуклидов взвесью и донными отложениями. Показано, что вследствие особенностей водоёмов и различия физико-химических форм существования радионуклидов, использовать накопленный экспериментальный материал можно только на стадии предварительных прогнозов. Точные прогнозы уровней радиоактивного загрязнения воды и донных отложений водоёмов должны основываться на натуральных исследованиях и конкретных модельных экспериментах, направленных на определение параметров сорбции и миграции радионуклидов в исследуемом водоёме.

В разделе 1.3 рассмотрены принципы построения моделей миграции загрязняющих веществ в водоёмах. Приведён обзор наиболее распространённых моделей миграции радионуклидов в России и за рубежом и программных продуктов, созданных на их основе. Выполнена условная классификация рассмотренных моделей и рассмотрены возможности их применения для целей прогноза радиоактивного загрязнения.

В разделе 1.4 рассматривается влияние водных объектов в районах расположения предприятий ЯТЦ на изменение микроклиматических условий и связанное с этим поступление трития в приземную атмосферу. С парами тритиевой воды этот радионуклид может мигрировать в приземной атмосфере на значительном удалении от водоема – источника.

Значительное место в разделе уделено обзору математических моделей, позволяющих прогнозировать микроклиматические особенности и влагосодержание в приземной атмосфере в зависимости от теплового и гидродинамического режима водоема.

Выполненный в главе 1 анализ дает основание автору сделать следующие выводы:

1. Приобретенный после Чернобыльской аварии опыт работ на реках и водоемах позволяет существенно детализировать и усовершенствовать методы

контроля радиационной обстановки на водных объектах с учетом современной приборной базы и технологических возможностей;

2. В настоящее время разработано значительное количество моделей миграции загрязняющих веществ в водоемах, в том числе и радиоактивных. В тоже время, ни одна из рассмотренных моделей миграции радионуклидов в водных объектах не может в полной мере быть использована в качестве модели для прогноза радиоактивного загрязнения водоемов. Это связано главным образом с двумя основными причинами:

- в основе подавляющего большинства моделей лежит представление о донных отложениях, как о среде с едиными, осредненными по глубине, сорбционными и водно-физическими свойствами. При расчетах уровней радиоактивного загрязнения водоемов, вызванных аварийными поступлениями РВ, такое упрощение приводит к серьезным ошибкам, вследствие резкого отличия водно-физических и сорбционных свойств верхнего, не учитываемого в моделях, слоя донных отложений. Исследования показали, что именно этот слой играет определяющую роль в процессах обмена РВ между водной массой и дном на ранних стадиях загрязнения водоема. Загрязнение верхнего слоя донных отложений также обуславливает вторичное загрязнение водной массы, возникающее при неблагоприятных гидрометеороусловиях;
- наличие большого числа параметров в сложных моделях, в значительной степени, затрудняет их использование на практике. Модели такого типа, естественно, не могут быть применены для оценки возможных уровней радиоактивного загрязнения водоемов на стадии проектных расчетов.

3. Водоемы-охладители АЭС и другие водоемы, используемые предприятиями ЯТЦ в технологических целях, часто содержат тритий. Изменение микроклиматических условий в районах таких водоемов, вызванное, в основном, тепловым загрязнением может стать причиной достоверно регистрируемого поступления трития в приземную атмосферу. В настоящее время существуют научные работы, рассматривающие миграцию и содержание трития в

поверхностных и подземных водах, но практически отсутствуют исследования, в которых тритиевое загрязнение поверхностных вод связывалось бы с содержанием этого радионуклида в приземной атмосфере в зависимости от микроклиматических особенностей.

Глава 2 посвящена экспериментальным исследованиям водных объектов.

Глава состоит из 6 разделов.

В разделе 2.1 рассматривается методика проведения радиозоологических исследований. Изложена концепция использования мобильных измерительных комплексов при обследовании радиационного состояния водных объектов. Оснащение теплоходов или автомобилей мобильными спектрометрическими установками типа системы 7500В или NOMAD Plus фирмы ORTEC, оснащенных детекторами из сверхчистого германия позволяет создать мобильные лаборатории и проводить спектрометрические измерения большого числа загрязненных радиоактивными веществами проб на месте, не прибегая к их транспортировке. Используемый тип оборудования позволял проводить измерение в диапазоне энергий гамма-излучения от 0.1 до 2 МэВ. Относительная эффективность регистрации фотопика мобильной спектрометрической установки на линии 1,33 МэВ составляла 20%. Энергетическое разрешение на линии 122 кэВ находилось на уровне 850 эВ, а на линии 1,33 МэВ – 1,8 кэВ. К неоспоримым достоинствам мобильных измерительных комплексов можно отнести: 1) возможность оперативно выявлять локальные участки водных объектов, на которых отмечается повышенное радиоактивное загрязнение, часто связанное с наличием несанкционированных источников загрязнения; 2) возможность анализировать на месте загрязнение водных объектов короткоживущими радионуклидами, часто присутствующих в сбросах.

В разделе рассматривается необходимое оборудование, которое надежно зарекомендовало себя в полевых условиях и методы его использования для радиозоологического обследования водного объекта и отбора проб. Приводится ряд оригинальных установок, использование которых, в сочетании с традиционными методами исследований, позволяет дополнить

радиоэкологические исследования и повысить их эффективность. Прежде всего, к таким установкам относится вакуумный пробоотборник и методология его использования для изучения верхнего, обменного слоя донных отложений.

В разделе 2.2 рассматриваются основные результаты натуральных исследований, выполненных на р. Енисей в период с 1990 по 2000гг. Основным источником радиоактивного загрязнения реки в течение более 30 лет являлись промышленные реакторы Горно-химического комбината (ГХК). В 1992 году эти реакторы были выведены из эксплуатации. Для изучения радиационной обстановки на р. Енисей, в 1990, 1991гг - в период работы промышленных реакторов, а также после их закрытия в 1993, 1994, 1998 и 2000гг были организованы научные экспедиции, которые проводились с использованием теплоходов, оборудованных мобильными измерительными комплексами. Исследования включали изучение радиоактивного загрязнения реки и её поймы на участке от г. Красноярска до г. Игарка, протяженностью более 2000 км.

В период работы реакторов шлейф загрязнённой воды прослеживался на расстоянии свыше 600 км. Объемная активность некоторых короткоживущих радионуклидов в зоне сброса в 1991 составляла (Бк/дм³): ²⁴Na (1.0 · 10⁴), ⁵⁶Mn (8.0 · 10³), ⁵¹Cr (4.0 · 10²), ⁷⁶As (1.4 · 10²), ²³⁹Np (2.6 · 10²), ³²P (1.1 · 10²). После остановки реакторов содержание короткоживущих радионуклидов в сбросных водах ГХК резко снизилось и по измерениям, выполненным в 1994 и 1998 гг., в зоне смешения с речными водами не превышало (Бк/дм³): ²⁴Na - 3.0±20.0, ⁵¹Cr - 0.3±1.0, ²³⁹Np - 0.4±0.8. Объемная активность долгоживущих радионуклидов ниже сброса ГХК не превышала сотых долей Бк/дм³. Снижения концентрации ⁶⁰Co и ¹³⁷Cs в воде ниже пос. Атаманово практически не отмечалось из-за вторичного загрязнения воды.

Дно Енисея загрязнено неравномерно. В наибольшей степени загрязнены песчано-илистые отложения, накапливающиеся в местах разгрузки основного потока и притоков от взвешенных наносов. Снижение уровня радиоактивного загрязнения донных отложений за период 1992-1994 гг. происходило, в основном, за счет распада более короткоживущих нуклидов, таких как ⁶⁵Zn,

^{54}Mn , ^{58}Co и др. Наиболее серьезно донные отложения загрязнены на ближнем от сброса участке реки. В районе о. Атамановский суммарная плотность долгоживущих нуклидов на локальных участках достигает 1000 кБк/м^2 , по ^{137}Cs - 400 кБк/м^2 . Изменение пространственного распределения пятен радиоактивного загрязнения на дне реки с течением времени не наблюдалось. В табл.1 приведены пределы изменения удельной активности долгоживущих радионуклидов в донных отложениях р. Енисей толщиной 30см.

Таблица 1. Пределы изменения удельной активности радионуклидов в донных отложениях р. Енисей

Место отбора проб	Расстояние от сброса, км.	Удельная активность, Бк/кг.		
		^{60}Co	^{137}Cs	^{152}Eu
Фон	15 выше	-	5 ÷ 15	-
о. Атамановский	6 ниже	100 ÷ 2000	200 ÷ 2000	200 ÷ 2000
о. Березовый	16	100 ÷ 1500	100 ÷ 1000	250 ÷ 600
о. Предивинский	100	20 ÷ 250	20 ÷ 400	20 ÷ 350
о. Черемухов	250	40 ÷ 200	50 ÷ 500	20 ÷ 250
о. Черный	1330	>15	10÷100	>15
о. Монастырский	1470	>15	10÷100	>15

Существенный вклад в формирование пространственного распределения и уровней радиоактивного загрязнения поймы р. Енисей внесли летние паводки 1966, 1972 и 1988 гг., а также зимние заторные и зажорные наводнения. В табл.2 приведены значения МЭД на высоте 1 м от поверхности, а также содержание долгоживущих радионуклидов в почвах ряда островов р. Енисей. Уровни загрязнения почвы на затопляемых в половодье островах, расположенных в 300 км и ниже по течению от ГХК, часто соизмеримы с загрязнением почвы в ближней от сброса зоне. До впадения Ангары вследствие влияния Красноярской ГЭС темп осадконакопления мал и характер распределения радионуклидов по глубине почвы практически не изменяется с течением времени. Ниже по течению реки скорость осадконакопления значительно выше, что приводит к естественному "захоронению" радиоактивности.

Одной из задач экспедиционных исследований являлось нахождение и оценка мощности сбросов несанкционированных источников радионуклидного загрязнения Енисея. Для этого были исследованы выпуски сточных вод ГХК,

Таблица 2. Содержание долгоживущих радионуклидов в почвах ряда островов р. Енисей.

Место отбора проб	Расстояние от сброса, км.	МЭД, мкР/ч	Содержание, кБк/м ²		
			⁶⁰ Со	¹³⁷ Cs	¹⁵² Eu
Фон	10 выше	13	-	1 + 3	-
о. Атамановский	6	60 ÷ 210	70 ÷ 500	200 + 1000	300 ÷ 2500
о. Берёзовский	15	20 + 80	20 ÷ 90	20 ÷ 200	20 + 200
о. Предивинский	96	20 ÷ 60	10 ÷ 70	10 ÷ 100	10 + 65
о. Черёмуховый	250	20 + 50	50 ÷ 140	50 + 190	30 ÷ 100
о. Сумароков	945	15 ÷ 20	5 + 10	30 ÷ 50	5 + 10
о. Сургутинский	1080	15 ÷ 20	1 ÷ 5	100 ÷ 250	1 ÷ 5
о. Монастырский	1470	13 ÷ 15	1 + 5	60 ÷ 110	1 + 5

ручьи, стекающие с территории санитарно-защитной зоны, а также водотоки в долины которых может предположительно происходить разгрузка водоносных горизонтов, используемых для закачки жидких радиоактивных отходов на полигоне «Северный». Используемая методика исследований позволила обнаружить несанкционированные источники поступления ²⁴Na, ⁵¹Cr, ⁷⁶As, ²³⁹Np и ряда других радионуклидов в Енисей. Повышенное содержание трития (40÷125 Бк/дм³) было обнаружено в нескольких ручьях и р. Шумихе. На основании полученных данных был оценен среднегодовой вынос трития в Енисей с ручейковой сетью, который составил примерно $2 \cdot 10^{12}$ Бк. Было выявлено, что появление радионуклидов в ручейковой сети связано с фильтрационными водами, поступающими из загрязненных технологических водоемов.

При радиоэкологических исследованиях Енисея большое внимание уделялось натурным исследованиям процессов переноса и миграции радионуклидов. Были найдены коэффициенты распределения основных радионуклидов – загрязнителей. Определено содержание взвешенных частиц в воде и доля активности переносимая взвесью. Для изучения механизмов

радиоактивного загрязнения поймы р. Енисей и процессов переноса радионуклидов, связанных с водной эрозией при затоплении загрязнённой поймы в периоды паводков, были выполнены физические модельные эксперименты с образцами почвы в натуральных условиях. Модельные эксперименты показали, что в период эксплуатации промышленных реакторов максимальный годовой вынос радионуклидов на пойму в 15км от сброса составил около 165 ± 30 кБк/(м²·год). Доля долгоживущих радионуклидов составляла 46%. Для ⁶⁰Co, ¹³⁷Cs и ¹⁵²Eu был оценен коэффициент диффузии в почве, значение которого находилось в интервале $(2+4) \cdot 10^{-8}$ см²/сек.

В результате физического моделирования выноса радиоактивных веществ с загрязненной поймы было установлено, что средний удельный смыв почвы от водной эрозии составил 0,25 кг/(сут·м²). При таком смыве, удельный вынос долгоживущих радионуклидов в период половодий, с загрязненной поймы Енисея может достигать 0,2 кБк/(м²·сут).

Раздел 2.3 посвящен натурным и экспериментальным исследованиям, выполненным на озерах Песьво и Удомля - водоемах-охладителях Калининской АЭС в период 1985 - 2000гг. В результате выполненных работ было определено содержание ⁵⁴Mn, ⁶⁰Co, ⁹⁰Sr, ^{137,134}Cs в воде, верхнем обменном и нижележащим слое донных отложений озёр, а также найдены основные параметры миграции этих радионуклидов. Исследования показали, что на участках дна озёр со средними глубинами 5÷7м толщина обменного слоя в среднем составляла 8мм, объемный вес слоя оказался равным $0,1 \pm 0,025$ г/см³. Скорость осадконакопления определялась с помощью осадкоуловителей и в среднем составила 2÷3 мм/год. Для определения параметров сорбции и миграции долгоживущих радионуклидов в донных отложениях было проведено физическое радиоизотопное моделирование с образцами донного грунта и загрязненной озёрной водой в лабораторных условиях. В качестве метки использовались ⁵⁴Mn и ¹³⁴Cs - радионуклиды, постоянно присутствующие в сбросах АЭС, а также ⁸⁵Sr, гамма

излучающий аналог ^{90}Sr . Эксперименты позволили определить коэффициенты распределения радионуклидов и оценить эффективные коэффициенты диффузии.

В разделе 2.4 рассматриваются результаты натуральных исследований Киевского водохранилища после аварии на ЧАЭС в период 1986 - 1987гг. Первое радиозоологическое обследование Киевского водохранилища было выполнено 14 мая 1986г, которое позволило оценить уровни радиоактивного загрязнения воды и донных отложений водохранилища в начальный период загрязнения. Было отмечено, что наиболее серьезно загрязнен верхний, обменный слой донных отложений толщиной несколько миллиметров. Для изучения водно-физической характеристики верхнего слоя донных отложений, в дальнейшем названного обменным слоем, и оценки его загрязнения был специально разработан вакуумный пробоотборник. Использование пробоотборника на Киевском водохранилище в период 1986 – 1987гг позволило определить объемный вес слоя, который в среднем составил $0,033 \text{ г/см}^3$, а также оценить толщину слоя. На различных участках водохранилища толщина обменного слоя находилась в пределах 1–8 мм. В результате натуральных исследований была изучена динамика изменений содержания радионуклидов в воде, обменном и нижележащем слоях донных отложений, в течение года после аварии. Определены наиболее важные параметры миграции радионуклидов, такие как коэффициенты распределения радионуклидов, в системе вода-взвесь и вода-донные отложения, а также найдены коэффициенты диффузии и массообмена.

В разделе 2.5 рассматриваются результаты исследования радиоактивного загрязнения поверхностных вод на территории Тульской области, выполненные в 1992г. Обследовались замкнутые и слабопроточные водоемы, а также основные реки, протекающие по загрязненной местности – р. Плава и ее приток р. Локна. В результате натуральных исследований были определены уровни радиоактивного загрязнения воды и донных отложений в реках и водоемах, выполнены оценки коэффициента распределения ^{137}Cs и других параметров миграции радионуклидов. Содержание ^{137}Cs на загрязненных участках дна рек не превышало 2500 Бк/кг, а в донных отложениях водоемов было выше, достигая

4900 Бк/кг. Обследование рек Плавы и Локны происходило в засушливый период времени, когда водное питание рек осуществлялось исключительно за счет подземного стока. Это дало основание предположить, что загрязнение речных вод в период обследования было целиком обусловлено вторичным загрязнением воды, вследствие поступления радионуклидов из донных отложений. Исследования показали, что с течением времени перемещение загрязненных ^{137}Cs русловых отложений за пределы "пятна" практически отсутствует.

В разделе 2.6 рассматриваются основные результаты исследования речной сети в районе г. Северска, после радиационного инцидента, произошедшего на Сибирском химическом комбинате 6 апреля 1993г. В отличие от радиационных аварий, происшедших ранее, радиоактивный след в районе г. Северска был образован в зимне-весенних условиях и лёг на достаточно глубокий снежный покров водосбора р. Самуьски. Выполненные работы позволили оценить запас основных γ -излучающих нуклидов на водосборе р. Самуьски, который по оценкам автора, составлял: ^{95}Zr - (3.4 ÷ 4.1) ТБк, ^{95}Nb - (7.0 ÷ 8.4) ТБк, ^{106}Ru - (4.9 ÷ 6.7) ТБк. Более 97% активности присутствующих в снеге радионуклидов было связано с взвешенными частицами. Особенностью загрязнения территории являлось присутствие большого количества "горячих" частиц.

В июне-июле 1993г., после прохождения половодья, работы по изучению радиоактивного загрязнения поверхностных вод были продолжены. В пробах воды радионуклиды аварийного выброса обнаруживались в индикаторных количествах, а в донных отложениях практически обнаружены не были. Анализ уровней содержания радионуклидов в реке до и после прохождения половодья позволил автору выдвинуть гипотезу, объясняющую механизм загрязнения малой реки при зимнем сценарии. Малые реки Сибири в условиях холодных зим сильно промерзают. При дружном весеннем снеготаянии талые воды начинают проходить по ещё не растаявшему ледовому покрытию, создавая большие разливы. Таким образом, ледовое покрытие надёжно защитило дно р. Самуьски и её притоков от радиоактивного загрязнения. Находящиеся на ледовой поверхности рек радиоактивные вещества, по сумме нуклидов примерно (70 ÷ 190

ГБк), были вынесены на пойму и только частично смыты паводковыми водами в р. Томь.

Глава 3 "Влияние водоемов-охладителей в районах предприятий ЯТЦ на микроклиматические условия и содержание трития в приземной атмосфере". В главе, на примере исследований, выполненных в районе Калининской АЭС, дается оценка микроклиматических особенностей района расположения озер-охладителей. Приводятся результаты исследований содержания трития в приземной атмосфере.

В разделе 3.1 рассматривается гидротермический режим озер Песьво и Удомля, сложившийся к 2002г при работе двух блоков ВВЭР-1000. Циркуляционный расход воды, забираемой из озера Удомля и сбрасываемый в озеро Песьво, составлял примерно $120 \text{ м}^3/\text{с}$. При таком расходе подогретых вод большая часть акватории озера Песьво остается свободной ото льда. С вводом в эксплуатацию второго блока КАЭС тепловая нагрузка на экосистему озер увеличилась с $70 \text{ Вт}/\text{м}^2$ до $150 \text{ Вт}/\text{м}^2$, что привело к повышению среднегодовой температуры воды в озерах с $9,2^\circ\text{C}$ до $13,5^\circ\text{C}$. В наиболее выраженном виде подогрев воды проявляется зимой. В настоящее время замерзает только северная часть озера Удомля. В озере Песьво температура воды зимой в среднем составляет $9 - 11^\circ\text{C}$. По данным летних гидротермических наблюдений 2001-2002гг экстремальная температура воды в озере Песьво достигала 33°C .

Раздел 3.2 посвящен изучению изменений микроклимата в регионе озер-охладителей КАЭС. Для анализа микроклиматических параметров рассматривается створ, проходящий от уреза воды озера Песьво в старой части г. Удомля. Створ расположен с подветренной стороны преобладающей розы ветров в зимней период, поэтому в нем наблюдаются максимальные изменения микроклимата. Исследования показали, что статистически достоверно изменение параметров микроклимата можно проследить на расстояние примерно $5 - 6 \text{ км}$ от уреза воды. В среднем за холодный период года отличие метеорологических элементов у уреза воды и фоновой точкой отстоящей на 5000 м составило: температура воздуха на $0,8^\circ\text{C}$ выше у уреза воды, относительная влажность у

уреза воды выше на 4%, парциальное давление водяного пара у уреза выше на 0,4 гПа, скорость ветра на высоте 2м от поверхности земли у уреза меньше на 0,6 м/с. В узкой прибрежной полосе (около 200 м вокруг оз. Песьво) в холодное время года часты туманы. Особенно часто они наблюдаются в период с октября по декабрь (примерно в 50% случаев).

В разделе 3.3 рассматриваются результаты исследований содержания трития в воде водных объектов региона КАЭС. Измерения выполнялись с использованием жидкосцинтилляционного бета - счетчика LKB 1220 "Qvantulus". Предел чувствительности измерений содержания трития в воде составлял не менее 0,4 Бк/дм³. Погрешность измерений не превышала 30%.

В период с 1987 по 2002гг в районе КАЭС проводилось изучение содержания трития в водных объектах. Исследовались озера-охладители, р. Съезжа, источники питьевого водоснабжения и малые водоемы, используемые для водопоя скота. Среднее многолетнее содержание трития в озерах Песьво и Удомля за период исследований находилось на уровне 145±90 Бк/дм³. Следует отметить, что согласно НРБ – 99 уровень вмешательства для трития в воде составляет 7700 Бк/дм³, что во много раз выше, чем наблюдаемое в озерах-охладителях.

В воде большинства сельских источников питьевого водоснабжения содержание трития в воде находилось на уровне меньшем, чем предел чувствительности метода измерений.

В разделе 3.4 рассматриваются результаты натурных исследований по определению содержания трития в приземной атмосфере в районе Калининской АЭС. Объемная активность трития в воздухе определялась отдельно для газообразного состояния и паров тритиевой воды с помощью установки «Туман». Объем прокачиваемой пробы воздуха составлял не менее 2 м³. В табл. 3 приведено содержание трития в приземной атмосфере у уреза воды от наветренного берега в осенне-зимний период с 1990 по 1993гг.

Таблица 3. Объемная активность трития в приземной атмосфере

Место отбора проб	Объемная активность, Бк/м ³		
	Февраль 1990	Сентябрь 1992	Ноябрь 1993
Районная больница	$3,7 \cdot 10^{-2}$	$1,0 \cdot 10^{-1}$	$1,1 \cdot 10^{-1}$
д. Ряд	$0,6 \cdot 10^{-2}$	$7,8 \cdot 10^{-2}$	$0,7 \cdot 10^{-2}$
д. Троица	$0,4 \cdot 10^{-2}$	-	$0,7 \cdot 10^{-2}$
Среднее	$1,6 \cdot 10^{-2}$	$8,9 \cdot 10^{-2}$	$4,1 \cdot 10^{-2}$

Примечание: допустимая активность трития в воздухе по НРБ-99 составляет $1,9 \cdot 10^3$ Бк/м³.

В разделе 3.5 рассматривается влияние микроклиматических условий в районе загрязненных тритием водных объектов на уровень содержания этого радионуклида в приземной атмосфере. На основании известных соотношений, определяющих связь парциального давления водяного пара и абсолютной влажности от температуры, в разделе приводится эмпирическая зависимость, позволяющая оценивать среднее объемное содержание трития в воздухе приземной атмосферы, связанное с испарением радионуклида из загрязненного водного объекта. Для этих целей должны использоваться статистически достоверные данные измерений температуры воздуха и относительной влажности в рассматриваемой и фоновой точках створа, расположенного с подветренной стороны, а также данные по содержанию радионуклида в воде водного объекта. Предполагается, что в фоновой точке влияние водоема-охлаждителя на микроклимат отсутствует и нет воздействия градиентов и других технологических водоемов. Расчетная зависимость имеет вид

$$C_T^{вод} = 0,2 \cdot C_T^{вод} \left(\frac{f \cdot 6,107 \cdot 10^{\frac{7,6326t}{241,9+t}}}{(273+t) \cdot 100\%} - \frac{f_{фон} \cdot 6,107 \cdot 10^{\frac{7,6326t_{фон}}{241,9+t_{фон}}}}{(273+t_{фон}) \cdot 100\%} \right), \text{ Бк/м}^3,$$

где: $C_T^{вод}$ - содержание трития в приземной атмосфере, связанное с поступлением из водного объекта; $C_T^{вод}$ - концентрация трития в воде, Бк/дм³; f и $f_{фон}$ - относительная влажность воздуха в рассматриваемой и фоновой точках соответственно, %; t - температура воздуха в рассматриваемой и фоновой точках

соответственно, °С.

Зависимость была проверена путем сравнения результатов расчета с данными измерений. Отличие расчетного содержания трития от результатов измерений не превысило 20%. В конце раздела приводится простое соотношение для оценки максимально возможного содержания трития, появление которого в приземной атмосфере связано с загрязненными водными объектами.

Глава 4 "Модели миграции радионуклидов в водоемах и реках" посвящена разработке комплекса моделей для рек и водоемов.

В разделе 4.1 рассматривается трехкамерная модель миграции радионуклидов в замкнутых и слабопроточных водоемах. Выбор вида и структуры модели определялись на основании того, что при загрязнении водоёмов радионуклидами важную роль в процессах обмена играет верхний, обменный слой донных отложений толщиной 3÷15 мм. За счёт процессов прямой сорбции и седиментации загрязнённой взвеси обменный слой быстро накапливает активность, определяя дальнейшие процессы перераспределения радиоактивных веществ между водной массой и дном водоема. В наибольшей степени принятым условиям удовлетворяет модель, построенная по трёхкамерной схеме с сосредоточенными параметрами, в которой донные отложения представлены последовательно соединёнными камерами верхнего обменного и нижележащего эффективного слоев. К основным механизмам переноса радионуклидов, которые учитываются моделью, относятся: распад, гидрологический перенос активности, осаждение загрязнённых взвешенных частиц, взмучивание донных осадков, диффузионный обмен между водной массой и донными отложениями, а также процесс осадкообразования (заиления) водоёма. При построении модели были приняты следующие упрощающие предположения: объём водоёма и его морфометрические характеристики не изменны; все механизмы переноса радионуклидов в водоёме описываются реакциями первого порядка с постоянными коэффициентами; перенос радиоактивности взвесью полидисперсного гранулометрического состава описывается с помощью механизма переноса радионуклидов

монодисперсными взвешенными частицами с характерным размером и эквивалентными сорбционными свойствами; процессы сорбции и десорбции радионуклидов между жидкой и твердой фазами мгновенны, обратимы и описываются линейной изотермой с постоянным коэффициентом распределения; не рассматривается накопление радиоактивных веществ в биологической компоненте водоёма, вследствие того, что активность абиотической компоненты значительно превышает содержание радионуклидов в биомассе; влияние отмершей биомассы на процессы сорбции и миграции радионуклидов учитываются эквивалентными коэффициентами распределения.

Система дифференциальных уравнений имеет вид

$$\begin{cases} \frac{dC_1}{dt} = -C_1\lambda_p - \frac{C_1Q}{V} - \frac{C_1q_H\alpha_{p1}K_{\Pi}}{V} - \frac{C_1q_{\phi}\alpha_{p1}}{V} - \frac{C_1\alpha_{T1}U}{H} - \frac{\gamma}{H}(C_1\alpha_{p1} - C_2\alpha_{p2}) + \\ + \frac{C_2\alpha_{T2}}{Hm_2}(US_1 - W_C m_3) + \frac{A_0}{V}\delta_+(t) + \frac{R_0}{V}\exp(-\mu t); \\ \frac{dC_2}{dt} = -C_2\lambda_p - \frac{C_2\alpha_{T2}US_1}{h_2m_2} - \frac{\beta}{h_2}(C_2\alpha_{p2} - C_3\alpha_{p3}) + \frac{\gamma}{h_2}(C_1\alpha_{p1} - C_2\alpha_{p2}) + \frac{C_1\alpha_{T1}U}{h_2}; \\ \frac{dC_3}{dt} = -C_3\lambda_p + \frac{C_2\alpha_{T2}W_C m_3}{h_3m_2} + \frac{\beta}{h_3}(C_2\alpha_{p2} - C_3\alpha_{p3}), \end{cases} \quad (1)$$

где C_1, C_2, C_3 - объемная активность радионуклидов в воде, обменном и эффективном слое донных отложений соответственно, Бк/м³; A_0 - активность мгновенного источника поступления радионуклидов, Бк; λ_p - постоянная распада, с⁻¹; V - объём водоёма, м³; Q - расход проточных вод, м³/с; q_{ϕ} и q_H - потери на фильтрацию и испарение, м³/с; H - средняя глубина водоёма, м; h_2, h_3 - толщина обменного и нижележащего, эффективного слоя донных отложений соответственно, м; S_1 - мутность воды, кг/м³; m_2 и m_3 - объёмный вес обменного и эффективного слоя донных отложений соответственно, кг/м³; U - скорость осаждения взвеси характерного размера, м/с; W_C - средняя скорость осадконакопления, м/с; γ - коэффициент диффузионного массообмена между водной массой и донными отложениями, м/с; β - коэффициент массообмена при диффузии радионуклидов между обменным и эффективным слоем, м/с; $\delta_+(t)$ -

односторонняя единичная импульсная функция; R_0 - мощность источника при хроническом поступлении нуклида, Бк/с; μ - коэффициент, учитывающий снижение активности, при хроническом загрязнении водоёма, 1/с; K_n - коэффициент распределения радионуклида между водой и паром над зеркалом водоёма, б/р; α_{p1} , α_{p2} , α_{p3} - доля радионуклида в растворе соответственно для воды, обменного и эффективного слоев, б/р; α_{T1} , α_{T2} , α_{T3} - доля радионуклида, сорбированного твёрдой фазой, соответственно в воде, обменном и эффективном слое, б/р.

Начальные условия к системе уравнений (1) имеют вид

$$\text{при } t = 0, \{C_1 = C_\Phi, C_2 = C_{д1}, C_3 = C_{д3}\},$$

где C_Φ , $C_{д1}$, $C_{д2}$ - начальное содержание радионуклида в воде, обменном и эффективном слое донных отложений, соответственно.

В качестве источника в модели рассматривается комбинация мгновенного и хронического поступления активности, заданного в экспоненциальной форме, что позволяет учесть наиболее характерные случаи загрязнения водоёмов. Двухслойное представление донных отложений, с верхним обменным слоем, позволяет оценивать вторичное загрязнение водной массы водоёмов, связанное с взмучиванием загрязнённых осадков обменного слоя при штормовых условиях.

В разделе 4.2 рассматривается упрощенный вариант модели миграции радионуклидов в водоеме. При рассматриваемых масштабах времени год и более трехкамерная модель может быть упрощена за счет исключения из рассмотрения камеры верхнего обменного слоя донных отложений. В двухкамерном варианте модели донные отложения рассматриваются в качестве среды с осредненными по толщине слоя сорбционными и водно-физическими характеристиками. Предлагаемая модель, требует меньше входных параметров и менее чувствительна к погрешностям в их определении, что делает удобным ее применение на стадии предварительных прогнозов при проектировании предприятий ЯТЦ.

Раздел 4.3 посвящен рассмотрению трехкамерной модели миграции радионуклидов в реке. В отсутствии заиливания, поле концентрации загрязняющих веществ в потоке с постоянным поперечным сечением, имеющим одно направление течения, при неустановившемся режиме и при условии представления донных отложений двухслойной средой с обменным слоем описывается системой дифференциальных уравнений

$$\begin{cases} \frac{\partial C_1}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_x \frac{\partial C_1}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_y \frac{\partial C_1}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_z \frac{\partial C_1}{\partial z} \right) - v \frac{\partial C_1}{\partial x} - C_1 \lambda_p - \frac{C_1 \alpha_{T1} U}{H} - \\ - \frac{\gamma}{H} (C_1 \alpha_{p1} - C_2 \alpha_{p2}) + \frac{C_2 \alpha_{T2}}{H m_2} (US_1) + F_1; \\ \frac{\partial C_2}{\partial t} = -C_2 \lambda_p - \frac{C_2 \alpha_{T2} US_1}{h_2 m_2} - \frac{\beta}{h_2} (C_2 \alpha_{p2} - C_3 \alpha_{p3}) + \frac{\gamma}{h_2} (C_1 \alpha_{p1} - C_2 \alpha_{p2}) + \frac{C_1 \alpha_{T1} U}{h_2}; \\ \frac{\partial C_3}{\partial t} = -C_3 \lambda_p + \frac{\beta}{h_3} (C_2 \alpha_{p2} - C_3 \alpha_{p3}), \end{cases} \quad (2)$$

где: x – продольная координата вдоль по течению, (м); y – поперечная координата, (м); z – вертикальная координата, (м); $D_{x,y,z}$ – коэффициенты турбулентной диффузии по оси x , y и z соответственно, (m^2/c); v – средняя скорость течения, м/с; F_i – источник поступления радиоактивности. Остальные параметры определены в пояснении к (1).

Система уравнений (2) может быть решена только численными методами. В большинстве случаев на практике эта система дифференциальных уравнений может быть упрощена.

В разделе 4.4 приводится описание двумерной модели миграции радионуклидов в реке, которая является упрощенным, двухкамерным вариантом модели (2). Модель основана на двумерном уравнении турбулентной диффузии. В качестве консервативных предположений считается, что: коэффициент турбулентной диффузии постоянен; отсутствуют сосредоточенные источники поступления активности; радиоактивная примесь распределена равномерно по глубине реки, и учитывается только поперечная составляющая турбулентной диффузии; диффузия в продольном направлении пренебрежимо мала по сравнению с адвективным переносом; морфометрические характеристики русла постоянны на всем

рассматриваемом участке реки. При постоянном сбросе радиоактивных веществ, решение системы дифференциальных уравнений, описывающее пространственное поле объемной активности радионуклида в воде, ниже источника поступления активности может быть получено в виде ряда

$$C_r(x, y) = \frac{R_0}{Q} \left[1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \exp\left(-\frac{n^2 \pi^2 x D_y}{B^2 \nu}\right) \cos\left(\frac{y_n \pi y}{B}\right) \cos\left(\frac{y_n \pi p}{B}\right) \right] \exp\left(-\frac{kx}{\nu}\right), \quad (3)$$

где: R_0 – мощность источника сброса радионуклида, Бк/с; B – ширина реки, м; y_s – координата источника сброса радиоактивности, м; Q – расход воды в реке, м³/с; k – коэффициент, учитывающий механизмы взаимодействия между водной массой и дном реки, а также распад, с⁻¹; остальные параметры определены в пояснении к (2).

Содержание радионуклида в донных отложениях определяется по содержанию в воде. Предложенная модель также может быть использована для оценки загрязнения поймы реки при половодьях. В тех случаях, когда время затопления поймы превышает несколько суток и выполняется условие $t_s \gg H/U$, процесс загрязнения поймы упрощенно можно считать установившимся и для оценки содержания радионуклидов в верхнем слое почвы использовать предложенную модель.

Модель также может быть с успехом использована в задачах контроля источника радиоактивного загрязнения реки. В этом случае решается обратная задача и по содержанию радионуклидов в воде или в донных отложениях в створе наблюдения оценивается мощность сброса радиоактивных веществ.

В разделе 4.5 рассматривается вторичное загрязнение воды в реке, связанное с поступлением радионуклидов из загрязненных донных отложений. Рассматривается возможность использования двухкамерной модели миграции радионуклидов для прогноза вторичного загрязнения, а также приводится двухслойная модель переноса загрязняющих веществ в реке, которую можно использовать для оценки вторичного загрязнения воды в тех случаях, когда загрязнённые донные отложения погребены под слоем более чистых наносов. Модель была использована для оценки вторичного загрязнения воды ¹³⁷Cs в р.

Енисей, после прекращения сбросов промышленных реакторов Красноярского ГХК. Прогноз показал, что максимальное содержание радионуклида в воде за счет вторичного загрязнения не превысит $0,4 \text{ Бк/м}^3$.

Раздел 4.6 посвящен рассмотрению входных параметров предложенных моделей и способам их численного нахождения. Приводится гипотеза образования обменного слоя. Автор предположил, что в заливаемых водоемах обменный слой образуется в пределах вязкого подслоя движущейся воды и поэтому его толщину допустимо оценивать по формуле

$$\delta = \frac{k\vartheta}{v_*},$$

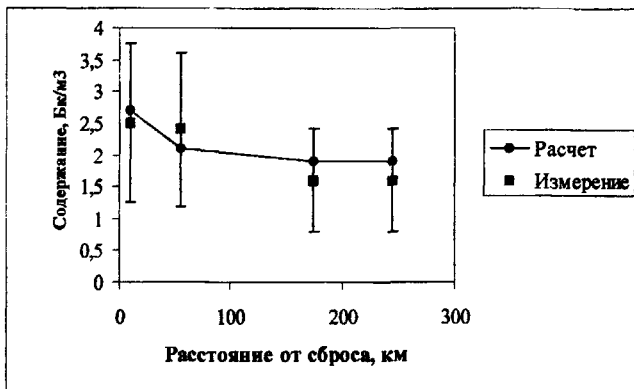
где : ϑ - кинематическая вязкость воды, м/с; v_* - динамическая скорость, м/с; k - коэффициент, равный $(12+30)$, б/р.

Для определения численных значений δ предложена расчетная схема. В разделе приводятся ряд расчетных зависимостей, позволяющих для различных радионуклидов оценивать коэффициенты массообмена между водой и дойными отложениями, определять толщину эффективного слоя донных отложений, а также оценивать параметры модели, характеризующие источник загрязнения водоема. Предложена количественная оценка входных параметров и определен численный диапазон их изменения, что позволяет использовать комплекс моделей для предварительных прогнозов на стадии проектирования АЭС и других предприятий ЯТЦ.

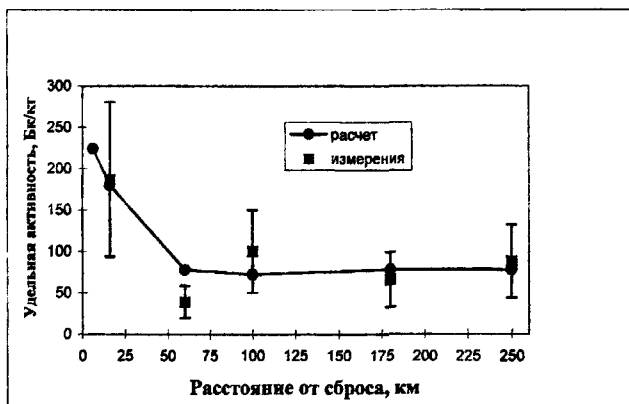
В Главе 5 "Валидация моделей", на основании данных натуральных исследований, проводится проверка предложенного комплекса математических моделей прогноза.

Раздел 5.1. посвящен проверке двухмерной модели миграции радионуклидов в реке, на примере р. Енисей. Для валидации модели были выбраны экспериментальные данные, полученные в 1991, в период работы промышленных реакторов и данные исследований 2000г, после вывода реакторов из эксплуатации. На рис.1 приведено сопоставление результатов расчета объемной и

удельной активности ^{137}Cs в воде и донных отложениях с данными измерений для условий постоянного сброса радиоактивных веществ в 2000г.



а)



б)

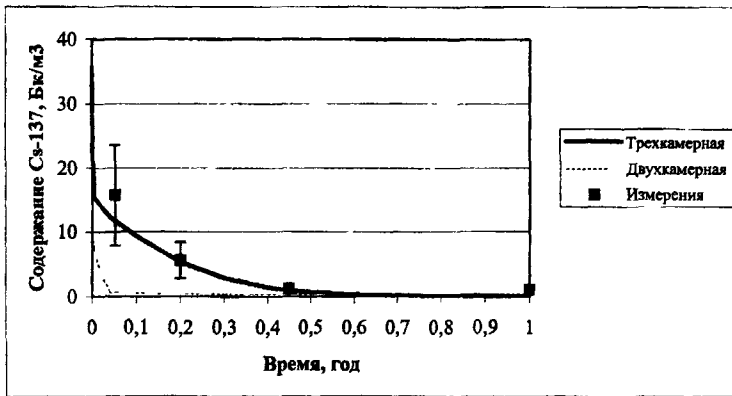
Рис. 1 Измеренное и расчетное содержание ^{137}Cs а) - в воде, б) - в верхнем слое донных отложений толщиной 5см.

Отличие расчетного и измеренного содержания ^{137}Cs в воде и донных отложениях для условий сброса 1991г и 2000г, в среднем, не превышало 25%.

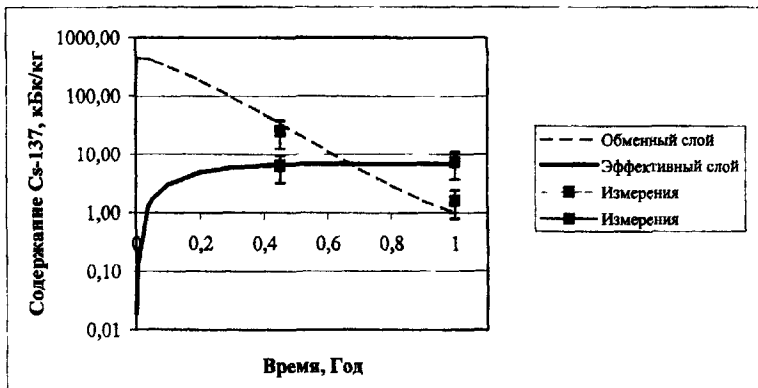
Возможность использования двухмерной модели миграции радионуклидов для целей прогнозирования загрязнения поймы рек в период половодий проверялась путем сравнения результатов расчета с данными физического моделирования загрязнения поймы Енисея. Валидация показала, что расхождение расчетной и измеренной удельной активности ^{137}Cs в образцах почвы не превышало 15%.

В разделе 5.2 выполнена проверка пригодности трехкамерной модели миграции для прогноза накопления радионуклидов в водоемах при нормальной эксплуатации предприятий ЯТЦ. Валидация проводилась на примере содержания ^{134}Cs и трития в воде и донных отложениях озер-охладителей Калининской АЭС. Необходимые для расчета параметры миграции ^{134}Cs выбирались с учетом натуральных измерений и данных физического моделирования. Отличие результатов измерений от расчетных данных не превышало 30%. Прогноз показал, что при работе КАЭС в номинальном режиме (3 блока) и неизменных сбросах трития, содержание этого нуклида в воде оз. Песьво и Удомля, при самых неблагоприятных условиях, не превысит $300,0 \text{ Бк/дм}^3$, что значительно ниже УВ по НРБ-99. Запас этого радионуклида в донных отложениях за счет диффузии может составить примерно $4 \cdot 10^{10} \text{ Бк}$.

В разделе 5.3 рассматривается валидация трехкамерной модели миграции, на примере аварийного загрязнения Киевского водохранилища ^{137}Cs в летне-осенний период 1986г. При расчете предполагалось, что средняя плотность атмосферных выпадений на акваторию водохранилища составляла 150 кБк/м^2 (4 Ки/км^2). Источник хронического загрязнения водохранилища оценивался по среднемесячному поступлению ^{137}Cs от рек Припять и Днепр. На рис.2 приведено расчетное и измеренное содержание ^{137}Cs в воде и донных отложениях Киевского водохранилища в зависимости от времени (в долях года) с момента аварии на ЧАЭС. На этом же рисунке приведен расчет по двухкамерной модели. Отличие расчетного содержания ^{137}Cs от результатов измерений в воде Киевского



а)



б)

Рис. 2. Расчетное и измеренное содержание ^{137}Cs а) - в воде, б) - в донных отложениях Киевского водохранилища в течении года с момента аварии на ЧАЭС

водохранилища не превысило 15%, а в донных отложениях достигало 30%. Из рисунка видно, что введение в рассмотрение обменного слоя донных отложений, позволяет трехкамерной модели более адекватно описывать процесс загрязнения водоема на начальном этапе загрязнения, по сравнению с более простой, двухкамерной моделью.

В разделе 5.4. выполнена валидация трехкамерной модели миграции радионуклидов в реке на примере реконструкции радиоактивного загрязнения р.

Плавы. При реконструкции радиоактивного загрязнения р. Плавы предполагалось, что одномоментное загрязнение реки, связанное с аэрозольным выпадением ^{137}Cs после аварии на ЧАЭС произошло на участке реки протяженностью в 20км. В расчетах принято, что средняя плотность выпадений составила $3,7 \cdot 10^5 \text{ Бк/м}^2$ (10 Ки/км^2). Сравнивая расчетные значения содержания ^{137}Cs в эффективном слое донных отложений р. Плавя (6 лет после аварии) с данными измерений 1992г, можно отметить, что для илистых отложений наблюдается удовлетворительное согласие. Отличие расчетной концентрации от средней измеренной концентрации ^{137}Cs в донных отложениях составило менее 20%.

В разделе 5.5 проведена валидация модели вторичного загрязнения на примере прогноза загрязнения воды в р. Плавя радионуклидом ^{137}Cs . Рассчитывалось вторичное загрязнение воды в реке при прохождении через "цезиевое пятно" в районе г. Плавск, на протяжении 20км. Предполагалось, что: начало координаты x расположено в точке на входе реки в зону радиоактивного следа; входные параметры модели взяты для условий 1992г из натуральных исследований (см. раздел 3.5); плотность загрязнения эффективного слоя донных отложений постоянна на всем протяжении радиоактивного следа и равна 40 кБк/м^2 ; начальное содержание ^{137}Cs в воде принималось равным 7.0 Бк/м^3 .

Сравнение результатов расчета с данными измерений показало удовлетворительное совпадение, отличие не превышало 20%.

В заключении на основании экспериментальных и теоретических исследований сформулированы основные результаты работы:

1. Многолетние радиозоологические исследования р. Енисей ниже сбросов Красноярского ГХК позволили: оценить уровни радиоактивного загрязнения основных компонентов экосистемы реки на участке протяженностью более 2000 км, выявить и исследовать локальные места загрязнения русла и поймы реки, оценить несанкционированные источники радиоактивного

загрязнения, изучить основные механизмы самоочищения и переноса радиоактивных веществ;

2. Анализ изменений микроклимата в районе расположения озер-охладителей Калининской АЭС показал, что статистически достоверно влияние подогретых водных масс на температуру воздуха, влажность, парциальное давление и скорость ветра можно проследить на расстояние до 5 км от уреза воды. Наиболее явно микроклиматические особенности проявляются в холодный период года, когда достаточно часто появляются туманы испарения;

3. Многолетние радиоэкологические, натурные исследования озер-охладителей Калининской АЭС в сочетании с проведенными физическими экспериментами позволили определить содержание радионуклидов в основных компонентах экосистемы озер, оценить скорость осадконакопления, толщину и водно-физические свойства обменного слоя донных отложений, а также параметры сорбции и диффузии ^{54}Mn , ^{60}Co , ^{90}Sr , $^{137,134}\text{Cs}$. Изучение содержания трития в приземной атмосфере и озерах Песьво и Удомля показало, что водоемы-охладители при неблагоприятных метеорологических условиях могут являться источниками поступления этого радионуклида в приземную атмосферу. На источник поступления трития из озер-охладителей, может приходиться до 10% от дозовой квоты, выделенной для газоаэрозольных выбросов.

4. Натурные исследования Киевского водохранилища после аварии на Чернобыльской АЭС позволили оценить радиационную обстановку, изучить наиболее важные механизмы миграции радиоактивных веществ. В результате исследований удалось выявить и оценить роль верхнего, обменного слоя донных отложений в процессах перераспределения радиоактивных веществ между водной массой и донными отложениями. Предложенная методология исследований обменного слоя позволила определить водно-физические характеристики слоя и измерить уровни его загрязнения. Объемный вес слоя в среднем составил $0,033 \text{ г/см}^3$, а толщина колебалась в пределах 1 – 8 мм.

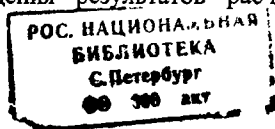
5. Анализ результатов радиоэкологических исследований в Тульской области позволил оценить масштабы и уровни загрязнения речной сети и

замкнутых водоемов радионуклидами ^{90}Sr и ^{137}Cs после аварии на ЧАЭС. Натурные исследования показали, что за шесть лет после аварии, в отсутствие интенсивных половодий, перемещение загрязнённых донных наносов за пределы радиоактивного пятна отсутствовало.

6. Натурные исследования радиационной обстановки в районе г. Северска после радиационного инцидента на Сибирском химическом комбинате позволили оценить масштабы и уровни загрязнения речной сети, после радиоактивных выпадений на снежный покров водосбора. Запас основных γ -излучающих нуклидов на водосборе р. Самуська составлял: ^{94}Zr - (3.4 + 4.1) ТБк, ^{94}Nb - (7.0 + 8.4) ТБк, ^{106}Ru -(4.9 + 6.7) ТБк. Анализ уровней загрязнения реки до и после прохождения половодья позволил автору выдвинуть гипотезу, объясняющую специфику загрязнения малых рек при зимнем сценарии загрязнения.

7. Разработанный комплекс математических моделей позволяет оперативно прогнозировать содержание радиоактивных веществ в основных компонентах водных объектов при различных сценариях загрязнения, в зависимости от рассматриваемой детализации процессов миграции радионуклидов. В основу комплекса положена трехкамерная модель, учитывающая влияние верхнего обменного слоя донных отложений на процессы перераспределения радиоактивных веществ. Это дает возможность учесть вертикальную неоднородность донных отложений и повысить точность прогнозирования уровней радиоактивного загрязнения воды и донных отложений, при аварийных ситуациях. Входные параметры всех рассматриваемых моделей определены на основании опыта многолетних натуральных исследований, что позволяет использовать расчетный комплекс для прогнозирования на всех стадиях жизненного цикла предприятий ЯТЦ, включая период проектирования.

8. Все рассматриваемые математические модели и расчетные зависимости в диссертационной работе прошли валидацию на основании данных натуральных исследований. Расхождения результатов расчета и измерений, в основном, не превышали 25%.



Основные публикации по теме диссертации

1. Носов А. В., Сухоручкин А. К., Писарев В. В. Баланс радиоактивности в водоеме-охладителе АЭС с учетом седиментации и диффузии нуклидов в донных отложениях // Труды ИПГ им. Е. К. Федорова. - 1986. Вып. 66. - С. 91-95.
2. Аверков В.А., Носов А.В., Писарев В.В., Сухоручкин А.К. Расчет концентраций изотопов стронция в водоеме-охладителе АЭС с учетом его заиливания // Радиозкологические исследования в зоне АЭС. - Свердловск: УрО АН СССР, 1988. - С. 53 - 57.
3. Открытый земляной водоем-охладитель, Авторское свидетельство N 14220111 / А. К. Сухоручкин, В. В. Писарев, А. В. Носов и др. // Открытия изобретения. 1988, № 32. - С. 119.
4. Писарев В. В., Носов А. В., Кузнецова В. М., и др. Изучение загрязнения Киевского водохранилища за период с 1986 по 1987г. // Чернобыль 88. 1989. Т. 5, ч. 2, М.: Энергоатомиздат. - С. 159 - 175.
5. Носов А. В. Оценка толщины обменного слоя донных отложений в замкнутых и слабопроточных водоемах // Метеорология и гидрология. 1989, № 10. - С. 108 - 110.
6. Носов А. В. Определение эффективного коэффициента диффузии радионуклидов в образцах донных отложений водоемов при помощи сканирующего коллимированного детектора // Радиационная безопасность и защита АЭС. Вып. 13. М.: Энергоатомиздат, 1991. - С. 231 - 236.
7. Беляев В. А., Писарев В. В., Носов А. В., и др. Методы расчета распространения радиоактивных веществ в окружающей среде и доз облучения населения. - М.: МХО Интератомэнерго, 1992. - 334с.

8. Дельвин Н. Н., Писарев В. В., Носов А. В. Нормирование термальных сбросов и разработка модели накопления радиоактивных веществ в водоемах охладителях АЭС. - М.: Отчет ИПГ № ГР 81018587 Инв. № 0021318, 1992. - 95с.
9. Вакуловский С. М., Никитин А. И., Носов А. В., и др. Динамика радиоактивного загрязнения рек Украины, РСФСР и Белоруссии, обусловленного аварией на ЧАЭС // Обнинск 1988: Тр. I Всесоюз. конф. – СПб: Гидрометеиздат, 1993. Т.1. - С. 324 - 331.
10. Носов А. В., Писарев В. В., Кузнецова В. М., и др. Изучение донных отложений Киевского водохранилища // Радиационные аспекты Чернобыльской аварии / под ред. Ю. А. Израэля. - СПб.: Гидрометеиздат, 1993. - С. 361 - 366.
11. Носов А.В., Ашанин М.В., Иванов А.Б., Мартынова А.М. Радиоактивное загрязнение Енисея, обусловленное сбросами Красноярского горно-химического комбината // Атомная энергия. 1993, т.74, вып. 2. - С. 144 - 149.
12. Носов А. В., Писарев В. В., Кузнецова В. М., Алексеенко В. А., и др. Изучение радиоактивного загрязнения водных объектов в Тульской области // Миграция радионуклидов в водных системах. - Обнинск: Тр. Междунар. конф., 1995. - С. 37- 42.
13. Воробьев В. А., Киселев В. П., Носов А. В. и др. Модель аварийного загрязнения водоемов радиоактивными веществами с учетом ветроволнового взмучивания // Известия Академии Наук. Сер. Энергетика, 1995, №4. - С. 59 - 68.
14. Носов А. В., Иванов А. Б., Бабина Т. И., Филатов В. М., и др. Изучение содержания трития в водных объектах и приземной атмосфере в районе расположения Калининской АЭС // Миграция радионуклидов в водных системах. - Обнинск: Тр. Междунар. конф., 1995. - С. 135-140.
15. Носов А. В., Мартынова А. М. Анализ радиационной обстановки на р. Енисей после снятия с эксплуатации прямоточных реакторов Красноярского ГХК // Атомная Энергия. 1996, т. 81, вып. 3. - С. 226 - 232.
16. Дельвин Н. Н., Иванов А. Б., Крылов В. А., Носов А. В. Изучение содержания трития в водных объектах и приземной атмосфере в районе

Калининской АЭС // Экология регионов атомных станций / Под ред. Ю. А. Егорова. Вып. 5. - М.: АЭП, 1996. - С. 264 - 273.

17. Носов А.В., Алексеенко В.А. Исследования радиоактивного загрязнения рек и малых водоемов в районах тульского "цезиевого пятна" в 1992г. // Метеорология и гидрология. 1996, №4. - С. 25 - 33.

18. Носов А. В., Иванов А. Б., Дельвин Н. Н. Изучение содержания трития в водных объектах и приземной атмосфере в районе расположения предприятий ядерной энергетики и промышленности // Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека. – Томск: Тр. Междунар. конф., 1996. - С. 183 - 187.

19. Носов А. В., Мартынова А. М. Оценка вторичного загрязнения воды Енисея // Атомная Энергия. 1997, т. 82, вып. 5.- С. 372 - 378.

20. Носов А. В. Исследование состояния речной сети в районе г. Северска после радиационной аварии на Сибирском химическом комбинате 6 апреля 1993г. // Атомная Энергия. 1997, т. 83, вып. 1.- С. 49 - 54.

21. Носов А. В. Исследование механизмов миграции радиоактивных веществ в пойме Енисея // Метеорология и Гидрология. 1997, №12. - С. 84 - 91.

22. Носов А. В., Иванов А.Б., Алексеенко В. А., и др. Методические рекомендации по радиационному контролю водных объектов // Сборник методик по радиационному контролю. - М.: Госкомэкологии России, 1998. -

23. Носов А.В., Иванов А.Б., Печкуров А.В., и др. Нормирование безопасного радиоактивного загрязнения воды и донных отложений в водных объектах // Атомная энергия. 1999, т. 86, вып. 5. - С. 398 - 407.

24. Кононович А.Л., Носов А. В., Иванов А. Б., Печкуров А. В. Стоимость радиационного ущерба в концепции ALARA // Атомная Энергия. 2000, т. 89, вып. 5. - С. 387 - 393.

25. Носов А. В., Мартынова А. М., Шабанов В. Ф. и др. Исследование выноса трития водотоками с территории Красноярского ГХК // Атомная Энергия. 2001, т. 90, вып. 1. - С. 77 - 80.

26. Кононович А. Л., Носов А. В. Продольный перенос вредных примесей речным потоком // Атомная Энергия. 2001, т. 90, вып. 1.- С. 35 - 38.
27. Носов А. В. Использование двумерной стационарной модели миграции радионуклидов для прогноза содержания ^{137}Cs в речной системе Енисея // Атомная Энергия. 2002, т. 93, вып. 2. - С. 137 - 143.
28. Крышев И. И., Печкуров А. В., Носов А. В. Методические указания по определению допустимых уровней поступления трития в моря Российской Федерации // Ядерная и радиационная безопасность России. - М.: Минатом РФ, 2002, вып.4(7). - С. 23 - 33.
29. Жилина Н. И., Казаков С. В., Носов А. В., и др. Компьютерное моделирование последствий поступления радиоактивных веществ в поверхностные водоемы // Известия Академии наук. Сер. Энергетика, 2004, №3. - С. 74 - 81.
30. Жилина Н. И., Казаков С. В., Носов А. В., и др. Численное моделирование распространения радиоактивных веществ в поверхностных водоемах при радиационных авариях // Инженерная экология. 2005, №1. - С. 33 - 41.
31. Носов А. В. Оценка источника поступления радиоактивных веществ в реку по данным измерения загрязнения донных отложений // Атомная Энергия. 2005, т. 99, вып. 3. - С. 221 - 226.
32. Крышев А. И., Носов А. В. Радиэкологическая модель переноса ^{90}Sr и ^{137}Cs в речной системе «Исеть-Тобол-Иртыш» // Известия вузов. Ядерная энергетика. 2005, № 3. - С. 16 - 25.
33. Vorobiev V., Nosssov A., Krylov A., Kiselev V., e. a. Bank of Models on Estimation of Surface Waters at the Places of Nuclear Submarines Utilization. The 4th International Conference on Environmental Radioactivity in the Arctic. Extended Abstracts, P. Strand (eds.), 1995, Osteras, Norway, pp.387- 394.
34. Bobrovitskaya N. N., Denison F., Nosssov A. V., Smith J., e. a. Operational models /Edited by Jastin Brown, NRPA – In: STREAM Deliverable report for project ERB IC 15-CT98-0219 in the EC's Copernicus Programme, 2001, 57p.

35. Brown J., Borhuis S., Nossov A., Linnik V., e. a. Source development and transport of radioactive contamination in the environment through the use of satellite imagery. – In: STREAM Final Report (01.03.99 - 01.06.02) Project ERB IC 15-CT98-0219 in the EC's Copernicus Programme, 183p.
36. Nossov A. V., Martynova A. M., Shishlov A. E., Savitsky Y. V. The analysis of radioactive contamination of the Yenisei River by results of expeditions for the period 1990 ÷ 2000. The 5th International Conference on Environmental Radioactivity in the Arctic and Antarctic, St. Petersburg, Russia, 16-20 June 2002. Extended Abstracts, P. Strand & T. Jolle (eds.), Osteras, Norway, pp.167-170.
37. Nossov A. V., Brown J. E., Martynova A. M, Bobrovitskaya N. N. Studies of Radiocesium Migration in Water and Bedload of the Yenisei River on the Results of Field Experiments in 2000 (STREAM Project). The 5th International Conference on Environmental Radioactivity in the Arctic and Antarctic, St. Petersburg, Russia, 16-20 June 2002. Extended Abstracts, P. Strand & T. Jolle (eds.), Osteras, Norway, pp.283-286.

Принято к исполнению 02/10/2005
Исполнено 03/11/2005

Заказ № 1179
Тираж: 100 экз.

ООО «11-й ФОРМАТ» ИНН 7726330900
Москва, Варшавское ш., 36
(095) 975-78-56
(095) 747-64-70
www.autoreferat.ru

№ 25222

РНБ Русский фонд

2006-4

28239