НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНЫ
ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ БЕЗОПАСНОСТИ АТОМНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ
НАН УКРАИНЫ

БОНДАРЬКОВ МИХАИЛ ДМИТРИЕВИЧ

УДК 631.039.586

НАУЧНОЕ ОБОСНОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ МЕТОДОВ ОБЕСПЕЧЕНИЯ РАДИОЭКОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ И КОНТРОЛЯ РАО АЭС

21.06.01 – экологическая безопасность

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени
доктора технических наук

Киев-2012

На правах рукописи

Работа выполнена в Государственном научно-исследовательском учреждении Чернобыльский центр по проблемам ядерной безопасности, радиоактивных отходов и радиоэкологии, Международная радиоэкологическая лаборатория. г. Славутич

Официальные оппоненты: Доктор физико-математических наук, профессор
Академик НАН Украины
Барьяхтар Виктор Григорьевич,
Директор Института магнетизма НАН Украины

Доктор технических наук, с.н.с.
Яковлев Евгений Александрович
Главный научный сотрудник
Института стратегических исследований при
Президенте Украины

Доктор физико-математических наук, профессор
Прийменко Георгий Иванович,
Заместитель заведующего кафедрой ядерной физики
Физического факультета
Киевского национального университет им.Т.Г.Шевченко

Защита диссертации состоится "26__" _апреля_____ 2012 в _12___ час. на заседании диссертационного совета Д 27.201.01 при Институте проблем безопасности атомных электростанций НАН Украины по адресу: 03680, г.Киев, ул. Лысогорская, 12.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института проблем безопасности атомных электростанций НАН Украины по адресу: 03680, г.Киевская обл. , г Чернобыль, ул ..Кирова 36а.

Автореферат разослан "__24__" ____марта_____ 2012

Ученый секретарь
диссертационного совета к.т.н., с.н.с. А. Кучмагра

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Проблема защиты окружающей среды давно стала глобальной мировой проблемой, которая занимает одно из центральных мест в обеспечении устойчивого развития человеческого общества. Важнейшим вопросом стратегии управления качеством окружающей природной среды является вопрос создания системы, способной определять критические источники и факторы техногенного воздействия на население и состояние окружающей среды, выделять наиболее уязвимые элементы и звенья биосферы, подверженные такому воздействию и оценивать степень этого воздействия. Таким образом, экологический мониторинг как "система регулярных, длительных наблюдений в пространстве и во времени, дающая информацию о состоянии окружающей среды с целью оценки прошлого, настоящего и прогнозов на будущее параметров окружающей среды, имеющих значение для человека", (ЮНЕСКО 1974) является ключевой системой обеспечения качества окружающей природной среды.

К сожалению, значительные территории земного шара как в результате военно-промышленного использования ядерных технологий, так и в результате аварий на энергетических ядерных объектах подверглись радиоактивному загрязнению (и площадь их продолжает увеличиваться свидетельством чего является недавняя крупномасштабная аварии на японской АЭС Фукусима-1). Это придает особую актуальность совершенствованию системы организации и проведения радиационного мониторинга, как важной составляющей экологического мониторинга. Радиационный мониторинг включает: контроль источников загрязнения на данной территории; контроль распределения радионуклидов в компонентах биосферы, оценку их миграционных свойств в конкретных экологических цепочках и способность концентрироваться в отдельных звеньях трофических цепей (в т.ч. загрязнение сельскохозяйственных угодий, почв, воды водоемов, кормов, растительной и животноводческой продукции); контроль доз облучения населения и биоты на данной территории.

За 25-летний период времени, прошедший после катастрофы, проведено огромное количество мониторинговых исследований в Чернобыльской зоне отчуждения (далее - ЧЗО). Весь этот период проводится постоянный экологический мониторинг.

Радиоэкологические характеристики ЧЗО позволяют рассматривать ее как уникальный комплексный научный полигон для исследований долговременных радиоэкологических процессов, результаты которых необходимы для обоснования решений по минимизации последствий Чернобыльской катастрофы, а при необходимости - и других радиационных аварий и возможных актов ядерного терроризма.

Специфика распределения и перераспределения радионуклидов в природных и техногенных объектах ЧЗО, процессы автореабилитации биоценозов, трансформация различных форм выпадений в почвах и включение радионуклидов в цепи миграции (биологический круговорот), деятельность по выводу ЧАЭС из эксплуатации и соответствующей оптимизации производственной инфраструктуры ЧЗО обуславливают возникновение специфических для поздней фазы аварии радиоэкологических проблем на территории ЧЗО. Эти новые задачи связаны как с естественными процессами, к которым относится перераспределение радиологической значимости

изотопов, повышение роли америция и плутония, переход основной массы радиоцезия в связанное состояние, так и с законодательными инициативами, а именно - изменение концепции радиационной защиты окружающей среды (103 рекомендация МКРЗ), новые подходы к характеризации РАО с соответствующим изменением в законодательстве. Все это требует изменений в системе радиоэкологического мониторинга и в процессах обработки РАО. Если в Советском Союзе требования к организации и объему радиоэкологического мониторинга определялись специальным руководством и требованиями санитарных норм и правил в атомной энергетике (СП АЕС-79., 1979), то сейчас мы ориентируемся на рекомендации, изложенные международными учреждениями: ICRP и IAEA (ICRP 1985, IAEA 2005, 2010).

Отметим, что каждая из этих проблем требует проведения масштабных измерений всех основных радиологически значимых изотопов.

Таким образом, ряд нерешенных вопросов, возникших на поздней фазе аварии побуждает к поиску путей дальнейшей оптимизации методов радиоэкологического мониторинга, разработки новых методов исследований, которые позволили бы детально описывать текущее радиоэкологическое состояние ЧЗО и проводить постоянный радиоэкологический мониторинг, особенно если учесть, что "…к 25 годовщине мы фиксируем максимальное за все годы после аварии свертывание мониторинговой деятельности" (Пристер Б.С., 2011). Такая характеризация позволит принимать научно обоснованные решения о дальнейшей стратегии и тактике проведения работ в ЧЗО.

Именно разработке новых подходов и методов к научным исследованиям и радиоэкологическому мониторингу ЧЗО на поздней стадии аварии и посвящена данная работа.

Связь работы с научными программами, планами, темами. Диссертационная работа выполнена в Международной радиоэкологической лаборатории (МРЛ, которую возглавляет автор) Чернобыльского центра по проблемам ядерной безопасности, радиоактивных отходов и радиоэкологии как составная часть программ научных исследований МРЛ в ЧЗО в 2000 - 2009 гг., а также в рамках плановых научно-исследовательских тем, которые внесены в Государственный реестр НИОКР: "Многолетние исследования мелких млекопитающих на стационарных участках" Рыжего Леса ", 2000-2005 гг. № 0102U004236," Особенности метаболизма радионуклидов в организме мелких млекопитающих в условиях Чернобыльской зоны ", 2002-2003 гг. № 0102U004731," Исследование популяционной динамики и уровней накопления радионуклидов в мелких млекопитающих Чернобыльской зоны ", 2001-2006 гг. № 0101U005342," Оценка переноса радионуклидов птицами в Чернобыльской зоне отчуждения ", 2004-2006 гг. № 0104U008325," Разработка документа: "Радиационно-экологический паспорт ГСП" ЧАЭС ", 2004 г., № 0104U007878.

Цель и задачи исследования. Целью работы является научный анализ методов обеспечения радиоэкологического мониторинга окружающей среды ЧЗО на поздней фазе радиационной аварии, методов контроля РАО АЭС, определение и обоснование направлений их оптимизации и обоснование рекомендаций по применению указанных методов для оценки радиоэкологической ситуации на территории ЧЗО.

Для достижения указанной цели автором были сформулированы и решены следующие основные **задачи**:

1. Провести анализ опыта организации системы и методов обеспечения радиоэкологического мониторинга. Изучить стратегии, методы ведения, гарантии качества. Обосновать принципы организации и пути оптимизации обеспечения радиоэкологического мониторинга и критерии его ведения с учетом современных требований радиационной защиты окружающей среды и радиоэкологической ситуации на поздней фазе аварии.
2. Разработать и внедрить комплекс методов проведения радиоэкологического мониторинга природных и урбанизированных экосистем ЧЗО на поздней фазе радиационной аварии, включая:
   - экспрессные методы измерений радионуклидов ^{90}Sr, $^{238\text{-}240}$Pu и ^{241}Am, которые не будут нуждаться процедуре радиохимического анализа, но обеспечат необходимую точность и надежность результатов;
   - гамма-бета-спектрометрический комплекс в составе мобильной лаборатории, что позволяет проводить массовые измерения непосредственно на загрязненных территориях;
   - спектрометрический комплекс для прижизненного определения содержания ^{90}Sr и ^{137}Cs в организме мелких животных для использования в полевых и лабораторных условиях.
3. Разработать комплекс методов контроля радионуклидов в жидких и твердых РАО АЭС с целью оптимизации расхода времени и человеческого ресурса. Провести исследования радиационных, сорбционных характеристик и пористости графита ГРП-2-125 реактора энергоблока № 2 ЧАЭС, необходимых для разработки программы снятия ее с эксплуатации.
4. С использованием разработанных методов оценить характеристики радиоэкологической обстановки в ЧЗО, в частности:
   - изучить пространственное и вертикальное распределение радионуклидов ^{90}Sr, ^{137}Cs, ^{154}Eu, изотопов Pu и ^{241}Am в почвах наиболее загрязненной части ЧЗО, провести расчеты параметров их вертикальной миграции и выполнить прогнозные оценки развития радиоэкологической ситуации в зоне;
   - продемонстрировать результаты ранее недоступных прижизненных исследований особенностей радиоэкологии птиц, мышевидных грызунов, землероек, летучих мышей и амфибий с показом принципиально новых возможностей развитых методов;
   - выполнить оценку дозовых нагрузок биоты при радиоэкологической характеризации опытных участков ЧЗО и определить прогнозные радиологические риски для биоты;
   - провести исследование особенностей радиоэкологии урбанизированного ландшафта на примере г. Припять и предоставить их комплексную радиоэкологической оценку;
   - в связи с запланированным осушением водоема-охладителя ЧАЭС провести характеризацию прибрежных природных комплексов, их радиационного и экологического состояния, подобрать исследовательские полигоны и объекты

мониторинга для последующего наблюдения за развитием ситуации с целью оценки рисков;

- провести исследование и сравнительный анализ «горячих» частиц, отобранных на различных полигонах ЧЗО и в объекте "Укрытие". Изучить вклад различных видов выпадений, в том числе глобальных.

5. Проанализировать ограничения и возможности разработанных методов с целью предоставления рекомендаций по их применению.

Объект исследования - радиологические характеристики составляющих экологической системы ЧЗО, которые являются главным депо радионуклидов, РАО.

Предмет исследования - система организации и проведения радиационного мониторинга в ЧЗО и на объектах ЧАЭС. Методы измерений радиоактивности объектов окружающей среды. Содержание радионуклидов в образцах почв, биоты, РАО, отобранных на опытных полигонах ЧЗО, на ЧАЭС и Южно-Украинской АЭС.

Методы исследования - радиометрическое, альфа-бета-гамма-спектрометрическое и радиохимическое определение активности радионуклидов в образцах объектов окружающей среды, методы математической статистики, моделирования радиоэкологических процессов.

Научная новизна. Обоснованы принципы организации и пути оптимизации обеспечения мониторинга и критерии его ведения с учетом современных требований радиационной защиты окружающей среды и радиоэкологической ситуации на поздней фазе аварии.

Разработан комплекс новых методов радиоэкологического мониторинга природных и урбанизированных экосистем ЧЗО на поздней фазе радиационной аварии, в том числе: методы измерений радионуклидов ^{90}Sr, $^{238\text{-}240}$Pu и ^{241}Am, не требующие радиохимического анализа, методы определения активности жидких и твердых РАО АЭС, метод прижизненного измерения содержания ^{90}Sr в организме мелких животных

На основе анализа около 6000 образцов абиотических и биотических компонентов экосистем ЧЗО, отобранных в 2001 - 2009 гг., было:

- изучено пространственное и вертикальное распределение радионуклидов в почвах наиболее более загрязненной части ЧЗО. Это позволило впервые оценить параметры вертикальной миграции $^{238\text{-}240}$Pu и ^{241}Am. Уточнены параметры вертикальной миграции ^{90}Sr, ^{137}Cs. Осуществлены расчеты экологических и эффективных периодов полуочищенния различных типов почв от вышеуказанных изотопов;
- продемонстрирована возможность изучения особенностей радиоэкологии птиц, мышевидных грызунов, землероек, летучих мышей и амфибий с использованием предложенного метода прижизненного измерения содержания ^{90}Sr в мелких животных, реализованного в виде мобильного комплекса, что открывает принципиально новые возможности определения радиоэкологических параметров окружающей среды для исследователей;
- проведена оценка дозовых нагрузок на биоту ЧЗО и впервые выполнена радиоэкологическая характеризация исследовательских участков, необходимых при дальнейшем сопровождении работ в ЧЗО, в частности на водоеме-охладителе. Даны рекомендации по организации и проведению радиоэкологи-

ческого мониторинга при выводе из эксплуатации водоема-охладителя ЧАЭС с учетом требований Рекомендаций МКРЗ, изложенные в Публикации 103, выбраны контрольные участки, референтные объекты контроля;

- исследованы особенности радиоэкологического загрязнения урбанизированного ландшафта на примере г. Припять. Впервые изучено проникновение радионуклидов в стройматериалы различных видов;
- впервые проведены работы по оценке содержания радионуклидов в РАО Южно-Украинской АЭС (ЮУАЭС), что позволило разработать новые методы ускоренной характеризации РАО АЭС;
- впервые проведено исследование радиационных, сорбционных характеристик и пористости графита ГРП-2-125 реактора энергоблока № 2 ЧАЭС. В частности анализ результатов исследований графита показал:
- активность облученного графита ГРП-2-125 определяется прежде содержанием ^{14}C, а также содержанием радионуклидов примесного и технологического происхождения (^{3}H, ^{36}Cl, ^{55}Fe, ^{59}Ni, ^{60}Co, ^{63}Ni, ^{93m}Nb, ^{108m}Ag, ^{133}Ba) и продуктов распада топлива (^{90}Sr, ^{134}Cs, ^{137}Cs, ^{154}Eu, ^{155}Eu);
- в пределах погрешности измерений можно считать, что ^{14}C, ^{3}H и ^{36}Cl имеют гомогенное распределение. Для ^{60}Co, ^{90}Sr и ^{137}Cs обнаружена неоднородность распределения в пределах одного образца;
- показана неизменность удельной активности исследованных нуклидов в процессе нагрева до 500 °С в пределах погрешности измерений;
- впервые проведены измерения пористости облучаемого графита и показано, что полная пористость образцов практически одинакова для облученного и необлученного графита и равна соответственно $P_{опр} = 0,145 \pm 0,029$ и $P_{неопр} = = 0,153 \pm 0,018$.

На основании сравнительного анализа полученных результатов показано, что при концентрации трансурановых радионуклидов в почвах ЧЗО на уровне $(4–5) \cdot 10^{-3}$ Бк/г необходимо учитывать вклад глобальных выпадений в суммарную активность.

Практическое значение полученных результатов. Разработанные методы нерадиохимичного определения содержания активности радиостронция, альфа-излучающих изотопов плутония и америция прошли метрологический контроль и позволяют существенно ускорить и облегчить оценку концентрации соответствующих нуклидов в объектах окружающей среды, а также существенно снизить экономические затраты, что важно для организации и проведения радиоэкологического мониторинга и оценки экологической безопасности населения. Метод прижизненного измерения содержания ^{90}Sr в мелких животных, реализованный в виде мобильного комплекса для оценки содержания ^{90}Sr и ^{137}Cs, открывает принципиально новые возможности для исследователей радиоэкологии и радиобиологии. Разработанные и изготовленные приборы в течение 10 лет демонстрируют их надежность и эффективность.

Полученный большой массив данных о радионуклидном составе в абиотических и биотических компонентах экосистем ближней зоны ЧАЭС на поздней стадии аварии позволяет внести практические предложения при разработке комплексных

программ реабилитации загрязненных территорий, в частности: определить направления и очередность этапов реабилитации загрязненных территорий; объемы реабилитационных мероприятий, провести зонирование загрязненных территорий в зависимости от реабилитационных мероприятий.

Разработанные методы активно применяются как в научных исследованиях, так и в повседневной работе атомных станций. В частности, методы характеризации РАО используют на АЭС Украины (ЮУАЭС и ЧАЭС).

Личный вклад соискателя состоит в определении наиболее актуальных направлений исследования, аналитического обзора структуры радиоэкологического мониторинга ЧЗО, информационно-технологической оптимизации современных методов обеспечения радиоэкологического мониторинга и измерений, разработке соответствующих приборов. Автор самостоятельно определил цели и разработал программу исследования. При проведении работ, результаты которых представлены в диссертации, автор принимал участие на всех этапах исследования: в постановке задач и выборе метода их решения, выполнении альфа-бета-гамма-спектрометрических и радиометрических измерений, получении экспериментальных данных, выполнении модельных расчетов и статистической обработке полученных данных. Проанализировал проблемы ограничений в применении предложенных им методов.

Апробация результатов диссертации. Основные положения диссертации докладывались и обсуждались на: международных конференциях «ECORAD» (Франция 2001, 2004, Норвегия 2008), «Radioactivity in the Environment» (Монако 2002, Франция 2005), «In situ nuclear metrology as a tool for radioecology. INSINUME »(Бельгия, 2002),« Protection of the Environment from the Effects of Ionizing Radiation »(Швеция, 2003),« 20 лет Чернобыльской катастрофы. Взгляд в будущее »(Киев, Украина 2006),« Двадцать пять лет Чернобыльской катастрофы. Безопасность будущего» (Киев, Украина 2011),« Радиобиологические и радиоэкологические аспекты Чернобыльской катастрофы »(Славутич, Украина 2011),« 48 Совещание по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра »(Санкт-Петербург, Россия 1998),« Международная конференция по ядерной спектроскопии »(Воронеж, Россия 2008),« Биологические эффекты малых доз ионизирующей радиации и радиоактивное загрязнение среды. БИОРАД-2009 »(Сыктывкар, Россия 2009), ежегодных конференциях Института ядерных исследований НАН Украины в 2003, 2004, 2006, 2011 гг., III съезде по радиационным исследованиям" Радиобиология и радиоэкология »(Киев, Украина 2003), V и VI съездах по радиационным исследованиям "Радиобиология, радиоэкология, радиационная безопасность» (Москва, Россия 2006, 2010), конференциях Чернобыльского центра и Международной радиоэкологической лаборатории «Радиоэкология Чернобыльской зоны» (Славутич, 2001 - 2008).

Публикации. По теме опубликовано 53 работы, в том числе 46 в виде статей в профильных реферируемых отечественных и зарубежных изданиях. Во всех работах автор самостоятельно проводил экспериментальные исследования, анализ полученных результатов, сформулировал основные задачи. В диссертации не использовались идеи или результаты, принадлежащих соавторам публикаций.

Структура и объем диссертации. Материалы диссертации изложены на 326 страницах. Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения, списка литературы и приложений. Диссертация содержит 65 таблиц и 108 рисунков.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первом разделе описано общепринятую систему радиоэкологического мониторинга, контроля РАО АЭС и методов их обеспечения, рассмотрено проблемы ее использования на поздней фазе аварии.

Первый параграф посвящен месту радиоэкологического мониторинга в системе управления экологическим состоянием окружающей среды.

Система управления окружающей средой может быть представлена как ряд организационных структур, предназначенных для планирования, реализации и постоянного совершенствования деятельности, направленной на сохранение и защиту окружающей среды, эффективное и бережное использование природных ресурсов. Такие системы внедряются на всех уровнях управления, начиная от отдельной организации в отрасли в целом, а также на отдельных территориях разного иерархического уровня: от локального до государственного.

Определяющее значение в управлении окружающей средой занимает организация и проведение мониторинга его состояния, то есть создание системы, способной определять основные характеристики состояния экосистемы. Радиационный мониторинг играет важнейшую роль в управлении радиационно загрязненными территориями (полигоны испытаний ядерного оружия, промышленные территории ЯТЦ, территории загрязненные вследствие радиационных аварий, таких как ЧЗО и т.д.).

Основные принципы и задачи организации радиационного мониторинга, требования к разработке программ его осуществления сформулированы в Рекомендациях МКРЗ и МАГАТЭ. При разработке программы радиоэкологического мониторинга должны учитываться: активность и состав радионуклидов; пространственные и временные характеристики радиационных полей вокруг источника; санкционированные выбросы и их мощность; возможные вклады от любой производственной деятельности или других источников загрязнения окружающей среды, пути поступления радионуклидов в окружающую среду , пути облучения населения и биоты, экологические особенности региона, в том числе ландшафтно-географические, особенности и привычки населения, подвергающегося облучению.

В пункте проанализированы работы отечественных и зарубежных авторов, документы международных организаций, приведен обширный список литературы по статистике и методах пробоотбора и анализа содержания радионуклидов во внешней среде, проблемах оптимизации радиационного мониторинга.

В параграфе 2 кратко рассматриваются методы и технические средства обеспечения радиоэкологического мониторинга в рамках действующей системы мониторинга. Огромное количество активности инжектировано в окружающую среду в результате производства ядерного оружия и испытаний (по некоторым оценкам до 10^{22} Бк или 10 ТКи), что стало предметом многих исследований и внимания научной общественности. Организация масштабных работ по оценке распределения радионуклидов требовала разработки соответствующей измерительной и контрольной

техники. Параллельно происходило развитие автоматизированных систем мониторинга и лабораторной измерительной техники от простейших счетчиков типа Гейгера - Мюллера в современных спектрометрических систем, позволяющих легко выполнять обработку сложных спектров и получать достаточно точные результаты.

Предметом мониторинга являются радионуклиды - продукты ядерного распада с коротким (^{89}Sr, ^{95}Zr, ^{99}Mo, ^{103}Ru, ^{131}I, ^{133}Xe) и средним временем жизни (^{90}Sr, ^{85}Kr, ^{106}Ru, ^{110m}Ag, ^{137}Cs, ^{134}Cs, ^{124}Sb, ^{125}Sb, ^{154}Eu, ^{99}Tc, ^{129}I, ^{135}Cs, ^{236}U, ^{238,239,240}Pu, ^{241}Am, ^{243}Cm). Кроме того, предметом радиационного мониторинга являются продукты активации конструкционных материалов ядерных установок (^{54}Mn, ^{57}Co, ^{58}Co, ^{60}Co, ^{110m}Ag), воздуха и воды (^{3}H, ^{14}C). В зависимости от особенностей объекта (территории) мониторинга перечень радионуклидов и их приоритетность могут меняться. Например, для ЧЗО, с момента полного прекращения и снятия с эксплуатации ядерных энергоблоков АЭС, контроль продуктов активации становится неактуальным.

Особого внимания требуют мониторинговые и научные исследования, проведенные на территориях, подвергшихся аварийному загрязнению. В этом направлении от аналитических методов исследования требуется не только высокая точность, но и достаточная простота, скорость и минимальная стоимость выполнения измерений, поскольку объем мониторинговых исследований в таких случаях многократно увеличивается. Разработка и совершенствование экспресс-методов анализа является по-прежнему весьма актуальными.

В **третьем параграфе** описаны методы анализа радиологически значимых изотопов в образцах окружающей среды.

Первые методы определения радиоактивности в окружающей среде были ориентированы на получение общих, суммарных оценок количества гамма-, бета-, альфа-излучающих радионуклидов. Это были довольно простые измерительные установки, основанные на газоразрядных счетчиках с пересчетных установками. Сейчас преимущества отдают методам оценки конкретных радионуклидов, поскольку при оценке доз облучения должен учитывать вклад каждого радионуклида. Однако когда нормативными требованиями предусматривается определение суммарной активности альфа- или бета-излучающих радионуклидов, такие измерения также включаются в программу мониторинга.

В мониторинговой практике наибольшее применение имеют такие методы измерения:

- гамма-спектрометрия с энергетическим диапазоном от 20 до 2 000 кэВ. Такие методы имеют нижнюю границу чувствительности около 1 Бк / кг для большинства радионуклидов. В данной работе использован большой набор гамма-спектрометров (преимущественно производителей Canberra и Ortec), причем энергетический диапазон этого оборудования заметно шире стандартного, указанного выше;

- альфа-спектрометрия для альфа-излучающих радионуклидов (особенно изотопов Pu, Am и Cm). В данной работе использовали альфа-спектрометры Alpha Analyst (Canberra). Определение альфа-излучателей обычно требует предварительного радиохимического анализа, последовательного селективного выделения радионуклидов и изготовление тонких твердых источников, готовых к альфа-спектрометрии

Как видно из вышеприведенного, при измерении нескольких альфа-и бета-излучателей в образце применение радиохимических методов выделения и очистки радионуклидов является неотъемлемым этапом анализа. Как правило, это наиболее затратный в объеме, времени и ресурсах этап. Это одна из причин, почему в данной работе автор стремился разработать методы, которые обходят этот затратный этап. Однако полностью отказаться от радиохимических методов автор не смог. Автор использовал известные стандартные радиохимические методы, но так как не занимался их развитием или улучшением, то не предоставил подробного обзора существующих радиохимических методик.

Четвертый параграф посвящен анализу информационной и технологической структуры радиоэкологического мониторинга на АЭС, а также контроля РАО и его месту в системе мониторинга.

Радиационный мониторинг источника (выбросы и сбросы), образования РАО и мониторинг окружающей среды составляют важнейшую часть системы организации радиационной защиты на АЭС.

Главной целью контроля внешней среды является надзор за безопасностью работы АЭС. Система мониторинга должна обеспечивать охрану здоровья населения и персонала и радиационный контроль в близлежащих районах и выполнения требований природоохранного законодательства, как в нормальном, так и в аварийном режимах работы АЭС, то есть обеспечивать сохранение экологически допустимых уровней загрязнения, которые гарантируют безопасность населения, окружающей среды и устойчивость функционирования народного хозяйства. Для аварийного режима должен быть разработан ряд первоочередных мер, которые позволят предотвратить необоснованное облучение персонала и населения.

Очевидно, программы мониторинга окружающей среды вокруг АЭС существенно меняются в случае возникновения аварийной ситуации и на разных ее стадиях, а также в процессе ликвидации последствий аварии (ЛПА). При этом если на ранних стадиях ЛПА на первом плане находятся вопросы обеспечения радиационной защиты персонала, участвующего в работах на загрязненных территориях, то на поздних стадиях возникает необходимость оценки и долгосрочных прогнозов развития радиоэкологической ситуации, что требует существенных дополнений в стандартные программы мониторинга.

Проблема обращения с РАО в ядерной энергетике занимает сегодня одно из центральных мест. Перечень радионуклидов для различных видов отходов достаточно большой и разнообразный, некоторые из них могут быть легко определены с помощью неразрушающих методов анализа, другие трудно определить (особенно альфа-и бета-излучатели) и они требуют обязательных лабораторных исследований с последующей обработкой результатов с помощью сложных компьютерных программ.

В связи с большой гетерогенностью физико-химических свойств отходов и форм их радионуклидного содержания полное определение состава и активности радионуклидов в каждом контейнере практически невозможно.

Поэтому в этой работе было признано целесообразным использовать корреляционные соотношения радионуклидов, характерных для данной АЭС. Применение такого метода требует предварительных детальных исследований содержания

радионуклидов в отходах для каждой станции и соответствующих изменений программы радиационного мониторинга на конкретной АЭС.

В пятом параграфе рассмотрена роль радиобиологических исследований в системе радиоэкологического мониторинга.

Радиоэкологическая оценка экосистемы путем исследования определенных биологических видов-индикаторов дает возможность интегральной характеристики качества среды с учетом многих факторов, влияющих на него: как химических, так и радиационных. Именно живые организмы формируются в ответ на весь комплекс присутствующих воздействий, а не на каждый из них отдельно. Как правило, в процессе радиоэкологического мониторинга используют наиболее типичные для данной экосистемы виды, на примере которых исследуют основные радиационные характеристики, в том числе содержание токсичных веществ (радионуклидов) в биологических объектах, который предложено использовать как общий индикатор загрязнения экосистем. Выбор объектов мониторинга осуществляется в ходе специальных исследований.

Кроме того, установленные в системе радиационной защиты человека допустимые концентрации содержания радионуклидов в сельхозпродуктах пищевой цепи рассчитаны исходя из условий непревышения установленных дозовых пределов, что вызывает необходимость мониторинга содержания радионуклидов в продуктах сельского хозяйства и промышленных животных. Поэтому контроль содержания радионуклидов в живых объектах окружающей среды включался в программы радиационного мониторинга в районах расположения АЭС и других ядерных объектов.

Развитие радиоэкологии привело к необходимости оценки влияния радиоактивных веществ на компоненты биоты экосистемы в целом.

В последние десятилетия раздел радиоэкологического мониторинга становится существенным разделом радиационного мониторинга как элемент радиационной защиты непосредственно окружающей среды (*non-human biota*). Это связано с ужесточением требований общества к системе радиационной защиты в связи с реализацией стратегии устойчивого развития. Кроме того, известно много радиоэкологических ситуаций, когда в экосистемах человек отсутствует, а радиационная защита биоты должна быть обеспечена. Такие ситуации происходят, например, в ЧЗО, где отсутствует постоянное население, или в местах морского захоронения РАО, например, вблизи ядерных объектов в Селафилди (Великобритания), а оцененные дозы облучения биоты могут быть в 10 - 100 раз выше, чем для человека .

Реагируя на потребности общества, Международная комиссия по радиационной защите (МКРЗ) предоставила ряд рекомендаций, в которых, исходя из новых радиоэкологических взглядов и полученных результатов исследований, МКРЗ сочла необходимым пересмотреть основной антропоцентрический принцип: "соблюдение стандартов контроля окружающей среды, необходимых для защиты человека в той мере, которая признается в настоящее время желанной, обеспечит также отсутствие риска и для других видов живых организмов ", изложенный в Публикации 60.

В новых рекомендациях по радиационной защите (Публикация 103) указано (пункт 16): "*Комиссия полагает, что необходимо развитие более ясной структуры для оценки соотношений между облучением и дозой, между дозой и результатом, и*

последствий этой этих результатов для бесчеловечных видов, построенной на общей научной основе "(курсив наш).

Учитывая вышеизложенные новые подходы к радиационной защите окружающей среды, проведение всеобъемлющего радиобиологического мониторинга должно решать следующие задачи:

- оценка и выбор биологических видов-индикаторов, представительных (референтных) для конкретного региона. Эти виды должны быть широко распространенным существенным элементом экосистемы региона, весьма чувствительными к воздействию излучения, удобными для радиоэкологических исследований;
- контроль содержания радиоактивности в организме-индикаторе;
- определение параметров накопления радионуклидов в организме, а также необходимых данных для оценки последствий облучения и соотношения "доза - эффект" для выбранных объектов фауны и флоры, в том числе исследования жизненного цикла данного вида, включая: рацион питания, продолжительность жизни, плодовитость, рождаемость, заболеваемость и смертность;
- оценку доз, которые получают индикаторные виды;
- анализ результатов мониторинга и сравнения с рекомендуемыми пределами доз.

Радиоэкологический мониторинг в зонах, которые подвергались аварийному загрязнению, например в ЧЗО, имеет особое значение, поскольку именно по данным радиоэкологического контроля можно реально оценить степень экологического ущерба на данной территории и характер, и скорость экологической реабилитации. Поэтому развитие радиоэкологического мониторинга, подбор наиболее референтных видов мониторинга, развитие методов оценки доз были одной из задач данной работы.

В **параграфе 6** приведен краткий исторический экскурс в становление радиоэкологического мониторинга ЧЗО и описание его нынешнего состояния.

До аварии 1986 г. система мониторинга окружающей среды в районе расположения ЧАЭС осуществлялась специалистами отдела охраны труда и техники безопасности АЭС и соответствовала всем нормативным требованиям того времени.

Период 1987-1988 гг является началом развития широкомасштабного комплексного радиационного мониторинга ЧЗО. К 1989 г. сеть мониторинга, который осуществлялся Управлением дозиметрического контроля, охватывала всю ЧЗО и включала 78 постов наблюдения за состоянием воздушного бассейна, 42 постов за атмосферными выпадениями, 20 гидрологических постов для наблюдения поверхностных вод, 60 постов для подземных вод, в районах участков крупнейшего загрязнения, а также в местах расположения ПЗРО и ПВЛРО. Кроме постоянных дозиметрических постов широко практиковались разовые или сезонные отборы проб объектов окружающей среды. Большое количество разовых точек отбора (более 30 тыс.) были использованы для составления подробных карт загрязнения территории ЧЗО. Система организации радиационного мониторинга ЧЗО также включала метрологическое обеспечение оборудования, регламент измерений, периодически утверждался, аттестованные методы пробоотбора и методики лабораторных измерений.

В настоящее время в сети мониторинга входят 146 пунктов наблюдения различного назначения (места производственной деятельности персонала, ландшафт-

ные полигоны, гидрологические створы, пункты отбора проб приземного слоя атмосферы и планшеты атмосферных радиоактивных выпадений т.п.), 138 наблюдательных скважин, 11 населенных пунктов. Так, например, только в 2009 г. отобрано и исследовано более 880 проб почвы, 1400 проб воздуха и атмосферных выпадений, более 1300 проб поверхностных и подземных вод, 700 проб биологических объектов - всего более 4490 проб. Выполнено 1247 полевых гидрогеологических и гидрометрических измерений и 9953 радиохимических и спектрометрических оценок удельной активности радионуклидов ^{137}Cs, ^{90}Sr, и трансурановых элементов (Киреев С. И. и др., 2011).

Выводы. Из вышеизложенного обзора системы организации, проведения и информационной полноты радиоэкологического мониторинга становится понятным, насколько широкой и объемной является сфера его задач. Невозможно в одном исследовании охватить все направления радиоэкологического мониторинга, поэтому работу сосредоточили лишь на отдельных наиболее крупных важных аспектах его оптимизации. В задачи данного раздела входили обоснование актуальности темы исследовательской работы, необходимость совершенствования существующих методов экспресс-анализа радионуклидов для нужд мониторинга, развития косвенных методов контроля содержания активности в РАО, важности радиоэкологического мониторинга биоты и разработки методов его реализации in situ, внедрение в практику радиационной защиты методов оценки радиационного риска для биотических объектов ЧЗО на поздней стадии аварии.

Во **втором разделе** изложены методы, разработанные в данной работе, необходимой для успешного решения задач радиоэкологического мониторинга на поздне фазе аварии.

Первый параграф посвящен методу одновременной оценки содержания ^{90}Sr и ^{137}Cs в организме мелких животных и других объектах окружающей среды, разработанного для условий ЧЗО, которая характеризуется сложностью структуры и градиетнисностью радиационных полей составляющих окружающей среды. В результате проведенных разработок создан гамма-бета-спектрометрический комплекс, смонтированный на мобильной базе (автобус) и снабжен автономным электропитанием. Комплекс включает следующие составные части:

- защитную камеру с экранирующими свинцовыми стенками 100-150 мм толщиной и стальным выдвижным коробом (100 х 300 х 100 мм) для контейнера с животным (позиция 1 на рис. 1). Выдвижной короб имеет отверстие сбоку диаметром 90 мм, расположенное напротив детектора гамма-излучения;
- бета-детектор (сцинтилляционный пластиковый тонкопленочный 0,1 мм, 60 мм в диаметре), установленный вертикально над камерой в 11 см от дна выдвижного короба (позиция 2 на рис. 1);
- гамма-спектрометр Canberra-Packard с сцинтилляционным NaI (Tl) детектором (63 мм в диаметре), установленным в камеру горизонтально (позиция 3 на рис. 1), энергетическая разрешение детектора 50,1 кэВ на 661 кэВ, спектр собирался с 1024 каналов;
- анализатор ASA-100 (CANBERRA) с соответствующим программным обеспечением «Beta +» для обработки бета-спектра (Институт ядерных исследований НАН Украины, Киев) (позиция 4 на рис. 1);

- многоканальный анализатор InSpector с соответствующим программным обеспечением GENIE-2000 (Canberra) для обработки гамма-спектра (позиция 5 на рис.1);
- персональный компьютер.

Кроме животных объектов, данный комплекс позволяет оценивать общее содержание ^{90}Sr и ^{137}Cs в подготовленных образцах почвы и растений.

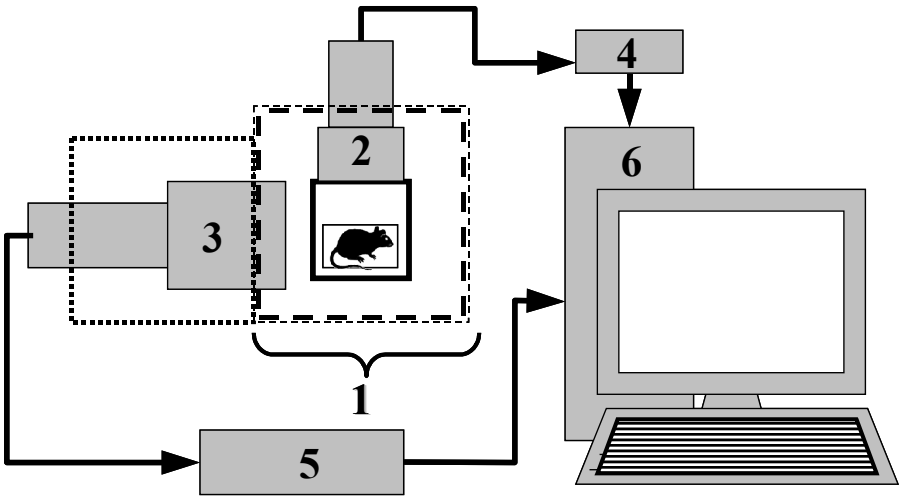

Рис. 1. Общая схема устройства гамма-бета-спектрометрического мобильного комплекса.

Технические основы метода измерения ^{90}Sr у животных. В большинстве случаев для измерения ^{90}Sr и ^{137}Cs достаточно одного бета-гамма-детектора. На рис. 2 приведены бета-гамма-спектры образцов, измеренные с помощью такого детектора с толщиной слоя сцинтиллятора 1,0 мм.

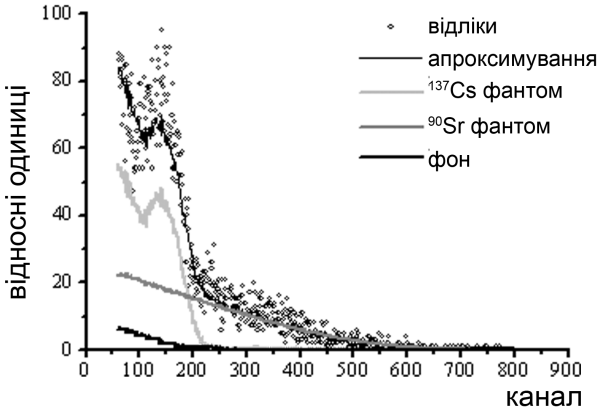

Рис. 2. Экспериментальный бета-гамма-спектр (точки), подогнанные и калибровочные спектры (сплошная линия) для пластикового детектора толщиной 1 мм. Пик в районе 150 канала соответствует 630 - 640 кэВ и является суммарным пиком конверсионных электронов и гамма-квантов 661 кэВ ^{137}Ba.

Обработку экспериментального спектра проводили методом сравнения с калибровочным спектром, т.е. со спектрами, полученными на этом же спектрометре с

использованием стандартных источников ^{137}Cs и $^{90}Sr + ^{90}Y$ (фантомов). Чтобы получить высокую статистическую надежность в оценке ^{90}Sr, калибровочные источники измеряли: в полевых условиях 2 ч, в стационарной лаборатории 24 часа несколько раз в месяц. В течение такого же времени и с такой же периодичностью осуществляли измерения и фона.

Качество результатов, полученных с помощью мобильной гамма-бета-спектрометрической установки, была оценена сравнением их с результатами стандартных радиохимических анализов тех же образцов.

Данный метод удовлетворительно работает для животных мелких размеров, хотя неопределенность, связанная с топографией скелета, размерами тела и условиями, в которых проводятся измерения, остается. Поэтому работая с очередной принципиально новой по анатомии группой организмов, следует провести предварительную оценку отклонения результатов бета-спектрометрии ^{90}Sr от результатов, полученных с использованием радиохимического метода анализа.

Относительно почв и растительности, которые заранее и тщательно гомогенизированы, использование бета-гамма-спектрометрического метода определения ^{90}Sr и ^{137}Cs возможно и не зависит от размера образца (рис. 3).

Изложенный выше метод и оборудование раскрывают огромные возможности для исследователей ЧЗО. Преимущества, которые представляются (оперативность, возможность работы с живыми животными, возможность работы с животными непосредственно на участках, где они живут, возможность одновременной оценки ^{90}Sr и ^{137}Cs и др.) полностью перекрывают существующие ограничения, а степень точности оценок вполне соответствует требованиям большинства

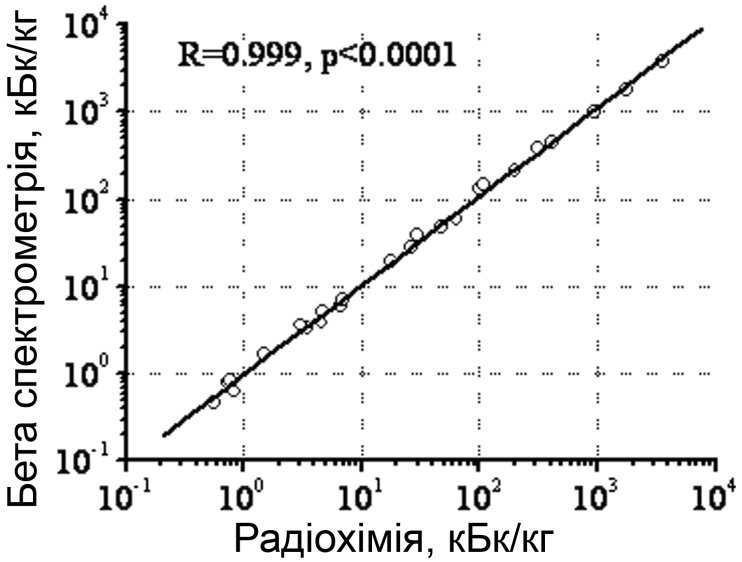

Рис. 3. Сравнение результатов измерения активности ^{90}Sr в образцах почвы (n = 24) методами бета-спектрометрического и радиохимического анализов, кБк/кг.

радиоэкологических исследований. С использованием данной технологии были изучены особенности радиоэкологии птиц, мышевидных грызунов и землероек, рукокрылых и амфибий на территории ЧЗО. Без использования радиохимического мето-

да анализа изучено пространственное и вертикальное распределение радионуклидов в почвах наиболее загрязненной части ЧЗО - полигоне «Рыжий лес». Мобильная гамма-бета-спектрометрическая лаборатория неоднократно использовалась при оценках дозовых нагрузок у биоты при радиоэкологической характеризации опытных участков.

Во **втором параграфе** описаны результаты определения активности жидких и твердых РАО на примере ЮУАЭС и разработанные на их основе методы анализа.

Характеризация РАО, включающая их соответствующее описание, классификацию и декларирования, является предпосылкой для передачи их на захоронение и должна быть включена в производственный цикл АЭС.

С целью разработки упрощенного метода определения общей активности РАО нами в 2004 - 2005 гг. проведены измерения содержания гамма -, бета - и альфа-излучающих радионуклидов в жидких (ЖРО) и твердых (ТРАВ) радиоактивных отходах ЮУАЭС. Анализ, в том числе и корреляционный, полученных данных позволил разработать метод расчета удельной активности радиологически важных радионуклидов в РАО по результатам измерений активности только ^{60}Co и ^{137}Cs.

РАО, используемые для отработки описанных методов, отобраны по схеме управления РАО, принятой на ЮУАЭС. Всего было исследовано 32 образца РАО разных типов: средств индивидуальной защиты, тепло- и противопожарной изоляции, ЖРО. Результаты измерений показали, что удельная активность для различных образцов и различных радионуклидов отличается на несколько порядков, поэтому при анализе полученных данных часто использовали логарифмическую шкалу. Для иллюстрации полученных результатов по содержанию радионуклидов в баках кубового остатка ЮУАЭС приведены диаграммы на рис. 4.

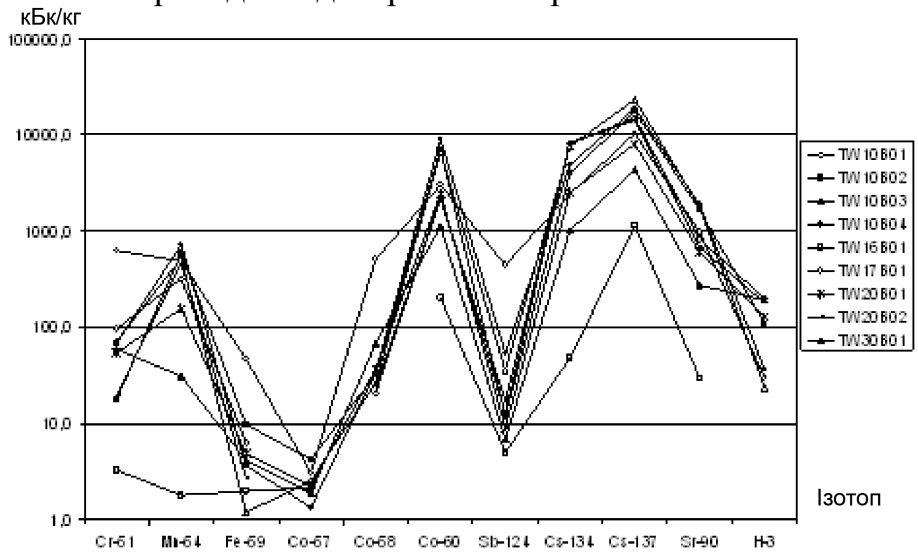

Рис. 4. Сводная диаграмма результатов измерений удельной активности радионуклидов в образцах ЖРО, кБк/кг

Диаграмма демонстрирует заметную разницу вклада отдельных радионуклидов в суммарную активность ЖРО в различных баках.

Для удобства работы с вышеупомянутым методом, автор стремился найти корреляцию не между любыми радионуклидами, а между основным вкладчиком -

^{137}Cs, который легко измеряется и другими радионуклидами. В табл. 1 приведены коэффициенты детерминации R^2 содержания радионуклидов в ЖРО и основного вкладчика ^{137}Cs.

Таблица 1

Значения коэффициентов детерминации R^2 содержания радионуклидов в ЖРО относительно основного вкладчика ^{137}Cs

Радионуклиды	$^{137}Cs/^{60}Co$	$^{137}Cs/^{54}Mn$	$^{137}Cs/^{124}Sb$	$^{137}Cs/^{134}Cs$	$^{137}Cs/^{90}Sr$	$^{137}Cs/^{94}Nb$	$^{137}Cs/^{63}Ni$
R^2	0,683	0,826	0,512	0,622	0,837	0,764	0,477
Радионуклиды	$^{137}Cs/^{59}Fe$	$^{137}Cs/^{57}Co$	$^{137}Cs/^{3}H$	$^{137}Cs/^{51}Cr$	$^{137}Cs/^{14}C$		
R^2	0,012	0,003	0,021	0,158	0,089		

Как видно, корреляция содержания ^{137}Cs и ^{51}Cr, ^{59}Fe, ^{57}Co, ^{14}C, ^{3}H отсутствует. Сейчас суммарный вклад этих изотопов в общую активность составляет около одного процента, а время жизни невелико. Значения коэффициентов детерминации для всех других радионуклидов в переводе на качественную шкалу Чеддока показывает, что корреляция высокая или очень высокая.

Содержание радионуклидов в пробах ТРАО.

На рис. 5 представлены сводные данные о результатах измерений удельной активности радионуклидов в образцах ТРАО ЮУАЭС.

Несмотря на большой разброс значений активности по всем пробам ТРАО, относительный вклад отдельных радионуклидов в суммарную активность ТРАО остается практически неизменным и, соответственно, значения коэффициентов детерминации R^2, полученные для пар исследованных радионуклидов, очень высоки. Здесь как основной изотоп избран ^{60}Co, что хотя он и не вносит главного вклада в активность, но очень легко измеряется с помощью любого детектора, в том числе и сцинтилляционного.

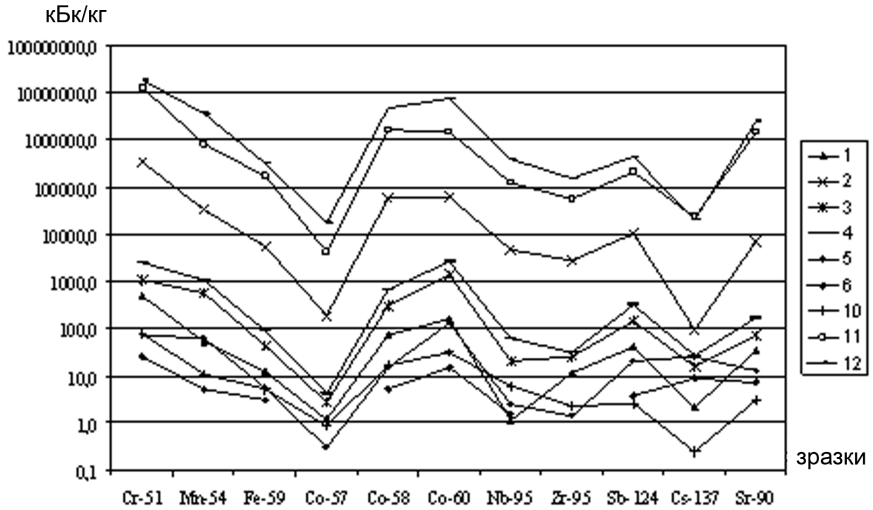

Рис. 5. Сводная диаграмма результатов измерений концентрации радионуклидов в образцах ТРАО, кБк/кг.

Как видно, корреляция между ^{60}Co и другими гамма-и бета-излучающими радионуклидами в ТРАО очень высока.

Данные корреляционного анализа для гамма-и бета-излучающих нуклидов (табл. 1 и 2) подтверждают и так хорошо заметную согласованную смену удельной активности многих радионуклидов (см. рис. 4 и 5), причем в ТРАО это очень высокая корреляция по сравнению с ^{60}Co, а в ЖРО высокая по сравнению с основным вкладчиком ^{137}Cs. Анализ также показывает, что ^{60}Co и ^{137}Cs являются хорошо наблюдаемыми и, кроме того, довольно значимыми компонентами для всех образцов РАО. Это важно отметить и в связи с показанными выше расчетам, с изменением удельной активности ^{60}Co и ^{137}Cs хорошо коррелирует изменение удельного концентрации большинства других радионуклидов.

Таблица 2

Значения коэффициентов детерминации R^2 содержания радионуклидов в ТРАО и ^{60}Co

Радионуклиды	$^{60}Co/^{51}Cr$	$^{60}Co/^{55}Mn$	$^{60}Co/^{59}Fe$	$^{60}Co/^{57}Co$	$^{60}Co/^{58}Co$	$^{60}Co/^{95}Nb$	$^{60}Co/^{95}Zr$
R^2	0,810	0,999	0,915	0,997	0,978	0,987	0,976
Радионуклиды	$^{60}Co/^{90}Sr$	$^{60}Co/^{124}Sb$	$^{60}Co/^{137}Cs$	$^{60}Co/^{63}Ni$	$^{60}Co/^{94}Nb$	$^{60}Co/^{14}C$	$^{60}Co/^{3}H$
R^2	0,866	0,927	0,856	0,726	0,604	0,356	0,261

Следует подчеркнуть, что ^{60}Co и ^{137}Cs в образцах РАО имеют разное происхождение: ^{60}Co - это радионуклид наведенной в результате облучения нейтронами активности, а ^{137}Cs может появиться только как продукт распада.

Таким образом, при измерении активности ^{60}Co и ^{137}Cs и пользовании корреляционными соотношениями радионуклидов можно не только контролировать содержание в РАО основной части радиологически значимых радионуклидов, но и оба канала образования РАО.

К сожалению, содержание ^{60}Co и ^{137}Cs в ЖРО коррелирует не со всеми радионуклидами (см. табл. 1). Но поскольку вклад обоих бета-излучателей - ^{3}H и ^{90}Sr - и некоторых других радионуклидов в общую активность не превышает долей процента и мало меняется от пробы к пробе, то для оценки содержания таких радионуклидов достаточно умножить определенное в течение эксперимента Aj - рядовое значение удельной активности j-го изотопа на общую массу отходов. Для ^{3}H и ^{90}Sr, например, Aj (^{3}H) = 111 кБк/кг и Aj (^{90}Sr) = 969 кБк/кг. Внесенная при этом ошибка будет несущественной и не превышать долей процента.

Анализ полученных результатов для ЖРО показывает, что метод определения их радиоактивности легко свести к измерению ^{60}Co и ^{137}Cs. При этом активность каждого гамма-излучающего радионуклида Ai будет определяться формулой

$$A_i = A_{Cs\text{-}137} \cdot k_i \cdot m, \qquad (1)$$

где A_i – активность радионуклида, которая определяется в ЖРО; $A_{Cs\text{-}137}$ – измеренное значение удельной активности ^{137}Cs; m - масса ЖРО; k_i - коэффициент, определяющий значение удельной активности i-го радионуклида по удельной активности ^{137}Cs, которая определяется эмпирическим путем для каждого изотопа в резуль-

тате измерений образцов ЖРО в лаборатории. Как правило, для него используется обычное линейное приближение, хотя иногда применяются степенные и полиномиальные функции, для которых коэффициент детерминации может быть выше. В частности, для пары ^{60}Co и ^{137}Cs хорошо работает простейшая функция y=2 · x + 5085, R^2=0,7, но для степенной функции y = 24 · x0,8 R2 = 0,9.

С учетом вышеизложенного суммарная радиоактивность определяется как сумма активности всех радионуклидов:

$$A_{\Sigma} = \sum_{i=1}^{n} A_i + \mathrm{m} \cdot \sum_{j=1}^{m} A_j \ , \qquad (2)$$

где i = 1…n - число радионуклидов, определяемые в ЖРО по корреляционным соотношениями; j = 1…m - число радионуклидов, которые не коррелируют с ключевыми, но не вносят существенного вклада в общую активность РАО.

Очевидно, что при этом желательно периодически проводить контрольные измерения всех радионуклидов в специализированной лаборатории и использовать полученные результаты для уточнения средних значений удельной активности.

Применение такого же подхода для ТРАВ, как это описано выше для ЖРО, увы, невозможно. Выгоды, вытекающие из высокой корреляции содержания различных радионуклидов в ТРАВ, нивелируются тем, что разница между удельными активностями отдельных образцов в ТРАВ намного больше и достигает пяти порядков величин, т.е. использование средних значений без дополнительных исследований недопустимо. Решение этой проблемы возможно двумя путями: измерение спектра гамма-излучения, или измерения мощности дозы гамма-излучения от контейнера с ТРАВ в реперных местах контейнера.

В связи с тем, что соответствующего гамма-спектрометра на ЮУАЭС не было, были проведены измерения мощности дозы в реперных точках контейнера, тем более что такой подход вошел даже в справочники.

Выводы. Проводить сравнение предложенного метода с другими тяжело из-за их отсутствия, однако нами показано, что с использованием стандартного гамма-спектрометра со сцинтилляционным детектором вполне возможно проводить текущую характеризацию РАО АЭС.

В **третьем параграфе** изложен метод определения содержания альфа-излучающих изотопов плутония с рентгеновским излучением урана.

С целью разработки метода измерения содержания альфа-излучающих радионуклидов $^{238\text{-}240}$Pu и ^{241}Am проведены тщательные исследования характеристического Lx-излучению урана с помощью полупроводниковых спектрометров с тонким бериллиевым окном.

Процесс альфа-распада изотопов плутония с вероятностью около 25% приводит к возбуждению низкоэнергетических состояний соответствующих изотопов урана с энергией, меньше энергии связи К-электронов (см., например, схему распада ^{238}Pu на уровень 43,5 кэВ на рис. 6).

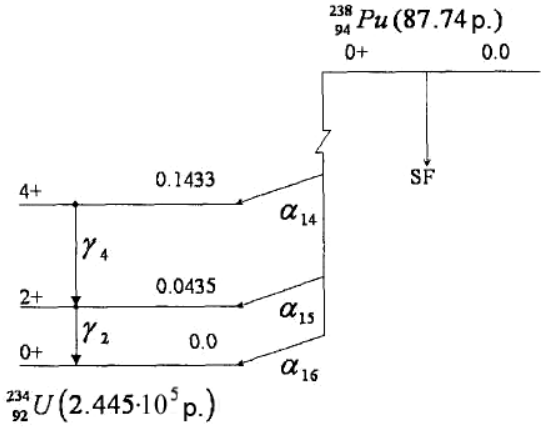

Рис. 6. Фрагмент схемы распада ^{238}Pu.

Есть уровни с примерно такой же энергией при распаде ^{239,240} Pu (51 и 45 кэВ соответственно). Поскольку энергия, выделяющаяся при распаде этих состояний, меньше энергии связи К-электронов, то распад происходит посредством внутренней конверсии гамма-фотонов с последующим характеристическим рентгеновским излучением с энергией, лежащей в диапазоне 13 - 23 кэВ. Соответствующий фрагмент спектра, полученный с помощью детектора из сверхчистого германия объемом 1 см3 бериллиевой окном и разрешением 300 эВ на линии 17 кэВ и разложен на составляющие его компоненты, показано на рис. 7

Как видно на рис. 7, высокое разрешение детектора и метод обработки экспериментального спектра вписыванием в него «приборной линии», полученной на этом самом детекторе, позволяет однозначно и с хорошей точностью (≈5 %) разделить L-группы нептуния, сопровождающих распад 241Am, и L -группы урана, сопутствующих альфа-распад изотопов плутония. Измерения показали, что соответствующие интенсивности рентгеновского излучения на распад составляют (%): I(Lβ) = = 5,2 ± 0,2 і I(Lα) = 3,9±0,2

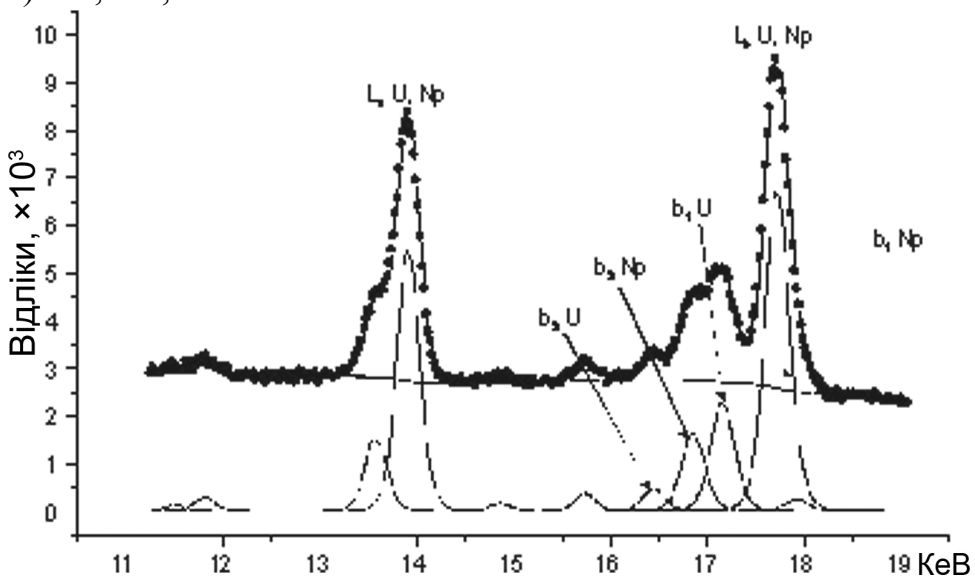

Рис.7. Компоненты фрагмента спектра образца грунта с «Рыжего леса», полученного с помощью детектора из сверхчистого германия объемом 1 см^3.

Из вышеприведенного следует, что точное определение интенсивности рентгеновского излучения урана и нептуния позволяет практически с такой же точностью определить содержание плутония и америция в образце.

Собственно в этом и есть суть предлагаемого метода. Для его развития в направлении уменьшения времени измерения одного образца можно воспользоваться следующими обстоятельствами.

Во-первых, с целью увеличения содержания активности в образце использовать "толстые" образцы. Возникающие при этом вопросы учета самопоглощения мягкого рентгеновского излучения в образце можно решить следующим путем. Чернобыльские образцы содержат, как правило, значительное количество ^{137}Cs. Распад ^{137}Cs, который всегда присутствует в чернобыльских образцах, приводит к возбуждению изомерного состояния 661 кэВ ^{137}Ba, что, в свою очередь, разряжается или излучением гамма-квантов с энергией 661 кэВ (85%), или конверсионных электронов (12%) с последующим излучением характеристического Kx-излучения бария с энергией 32–37 кэВ. Таким образом, при измерении интенсивности рентгеновского Kx-излучения ^{137}Ba и гамма-излучения с энергией 661 кэВ, самопоглощение для которого несущественно, получается коэффициент самопоглощения характеристического Kx-излучения ^{137}Ba, энергия которого близка к энергии Lx-излучения урана. Полученный таким путем коэффициент самопоглощения применяется для определения содержания изотопов плутония по результатам измерения интенсивности рентгеновского Lx-излучения урана.

Во-вторых, для увеличения эффективности регистрации рентгеновского и гамма-излучения необходимо использовать детекторы с большим объемом. На рис. 8 приведены фрагмент спектра того же образца грунта с «Рыжего леса», что и на рис. 7, но полученного с детектором из сверхчистого германия объемом 150 см^3 и выделенного в несколько большем энергетическом интервале.

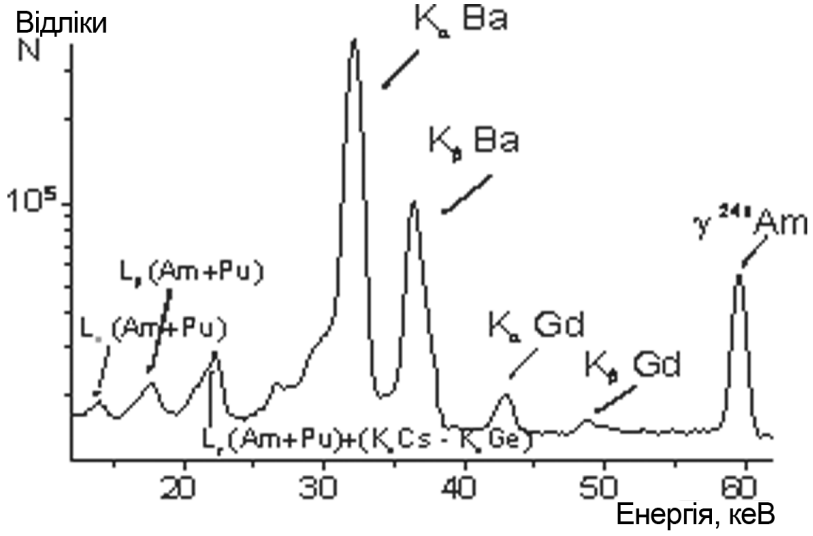

Рис. 8. Фрагмент спектра образца грунта с «Рыжего леса», полученного с детектором большого объема.

Большой объем детектора намного (в несколько раз) увеличил эффективность регистрации и, соответственно, уменьшило время, необходимое для измерения, но

заметно ухудшил энергетическое разрешение, что не позволяет разделить ни L_{β}-, ни L_{α}-группы сопровождающие распад изотопов плутония и америция. Важно, что соотношение интенсивности рентгеновского излучения нептуния, возникающий в результате распада ^{241}Am, и гамма-линии 59 кэВ ^{241}Am не зависит от характеристик детектора, а является характеристикой распада изотопа. Иначе говоря, в результате измерения этого соотношения один раз с хорошей точностью на детекторе с высоким разрешением (назовем такое соотношение калиброванным), можно использовать его для измерений на любом детекторе. Это позволяет легко вычислить вклад L_{β}-группы связанной с распадом америция I(Lβ)Am, в суммарный нераздельный пик рентгена америция и плутония (см. рис. 8). Соответствующее соотношение имеет вид: I(Lβ)Am = I(γ59)xI(Lβ)калибр/I(γ59) калибр, где I(Lβ)калибр/I(γ59) калибр - соотношение интенсивности Lβ-группы и гамма-линии 59 кэВ, полученное на калибровачном детекторе; I(γ59) - интенсивность гамма-линии 59 кэВ, получено на детекторе с большим объемом.

После вычитания из суммарного пика $I(L_{\beta})U$, вклада Lx-излучения, связанного с распадом америция, получаемый интенсивность $I(L_{\beta}))U$, связанная с распадом альфа-излучающих изотопов плутония. При использовании полученных нами и приведенных выше значений выхода $L_{\beta}U$, получаем суммарную активность $^{238\text{-}240}$Pu в опытном образце.

Проведено сравнение предложенного метода со стандартным радиохимическим. Суммарная альфа-активность $^{238\text{-}240}$Pu в 24 пробах почвы с полигона "Рыжий лес" определялась в независимых лабораториях (ГСНПП "Экоцентр" и МРЛ) обоими методами. Образцы были отобраны послойно, начиная с поверхности до глубины 30 см. Отметим, что активность образцов при этом менялась на пять порядков величин, а масса на один порядок. На рис. 9 представлено корреляцию результатов определения содержания $^{238\text{-}240}$Pu в образцах почвы с полигона "Рыжий лес", полученную обоими методами.

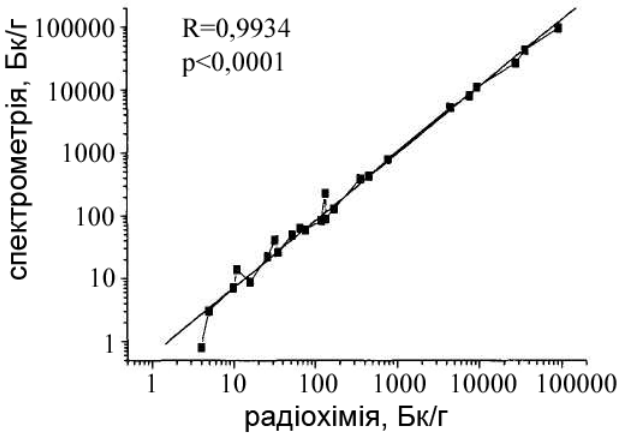

Рис. 9. Сравнение результатов определения активности $^{238\text{-}240}$Pu в образцах почвы методами спектрометрии и радиохимии.

Таблица 3

Сравнение основных параметров радиохимического и спектрометрического методов анализа

Метод регистрации	Параметры для одного образца			
	Нижний уровень регистрации, Бк/образец	Погрешность %	Средняя продолжительность измерения, ч	Стоимость измерения, грн.
Спектрометрия	3 - 4	10 - 20	1 - 2	52
Радиохимия	0,03 - 0,04	10 - 20	40 - 72	517

Выводы. Метод определения содержания альфа-излучающих изотопов плутония, основанный на спектроскопии рентгеновских и гамма-спектров (табл. 3), позволяет быстро, надежно и с достаточно высокой точностью проводить радиационные исследования без применения процедуры радиохимического выделения и очистки радионуклидов. Стоимость анализа одного образца и продолжительность процедуры при этом уменьшаются на порядок величины. Точность предложенного метода 10-15% для значений активности более 100 Бк и 20-30% для значений активности менее 100 Бк, что примерно совпадает со значениями при использовании процедуры радиохимического выделения и очистки радионуклидов, и вполне достаточна для таких исследований. Заметная потеря в чувствительности не является существенной для абсолютного большинства образцов грунта ЧЗО. К недостаткам метода следует отнести недостаточную чувствительность, что не позволяет работать со многими биологическими объектами.

Параграф 4 посвящен методу определения содержания 241Am с помощью сцинтилляционного детектора особого типа. Совместными усилиями сотрудников Института монокристаллов и ИЯИ НАН Украины удалось подобрать специальный сцинтиллятор - силикат гадолиния Gd2SiO5, у которого селективно повышена в несколько раз эффективность регистрации гамма-излучения 241Am. Это обусловлено его резонансным поглощением K-электронами гадолиния, а также достаточно высокой эффективностью регистрации альфа-излучения. Совокупность свойств этого оксидного монокристалла GSO позволила создать эффективный блок детектирования альфа-и «мягкого» гамма-излучения. Несмотря на меньший по сравнению с NaI (Tl) световой выход (C = 25%), совокупность характеристик этого блока детектирования в целом делает его уникальным инструментом для селективного измерения ^{241}Am. Его низкая гигроскопичность позволяет работать с открытой поверхностью, что в свою очередь позволяет регистрировать альфа-излучения с хорошей энер-гетичною разрешением. В табл. 4 приведены сравнительные характеристики вышеуказанного блока детектирования.

Таблица 4

Эффективность регистрации ε и энергетической разрешения R блоков детектирования на основе GSO и NaI (TI) для гамма-и альфа-излучения различных радионуклидов

Источник (радионуклид)	Энергия гамма-квантов или альфа-частиц, кэВ	Вид излучения	Эффективность регистрации, абс., ед.		Раздельная способность, %	
			GSO	NaI(TI)	GSO	NaI(TI)
^{241}Am	59,5	γ	0,270	0.069	26.5	33,2
^{57}Co	122	γ	0,016	0.117	19.0	22,5
^{137}Cs	662	γ	0,011	0.051	7.5	8,8
^{241}Am	5490	α	0,30	-	13.0	-
^{239}Pu	5155	α	0,31	-	13.0	-

Нами разработан альфа-гамма-радиометр РК-АГ-01 на базе указанного блока детектирования, а также с использованием оригинальных схемных решений многофункционального усилителя-формирователя, соответствующего программного обеспечения в сочетании с новым способом компенсации примесей от гамма-линии ^{137}Cs с энергией Eγ = 33 кэВ и от непрерывного гамма-фона от спектра гамма-излучателей, которые сопровождают 241Am в пробах радионуклидов. Это дает возможность оперативно контролировать ^{241}Am и другие трансурановые радионуклиды как в лабораторных, так и в экспедиционных условиях.

Прибор имеет следующие основные характеристики: объем измерительной кюветы 50 см^3, диапазон измерения от 2 до 10000 Бк / кг (по гамма-излучению ^{241}Am) и от 1 до 10000 Бк / образец (по альфа-излучению ТУЭ) при активности сопутствующих радионуклидов от 500 до 70000 Бк / кг и более; при определении удельной активности пробы 10 - 40 мин при статистике N = 10^4 импульсов, намного лучше аналогичного времени 2 - 12 ч для спектрометра ORTEC с HPGe детектором при N = 10^3 импульсов. Радиометр может работать в трех режимах: измерение удельной активности пробы с гамма-излучением ^{241}Am, измерения удельной активности по альфа-излучению, измерения плотности потоков гамма-излучения ^{241}Am и альфа-излучения. Исследовательский образец радиометра был испытан в условиях ЧЗО на ГП "Радек" НПО "Припять" в апреле 1996 г. В качестве контрольного эталонного прибора использовался спектрометр рентгеновского излучения LP-4900B зав. № 074116 (свидетельство об аттестации № 301669 от 16.11.1996р., нижний предел измерения 0,3 Бк/кг, погрешность измерения 5,1%).

В процессе испытаний были проведены измерения проб грунта чернобыльского происхождения (табл. 5), в которых содержание ^{137}Cs превышало содержание ^{241}Am на два порядка величин, при этом максимальное относительное отклонение измеряемой активности от эталонной не превышало 20%.

Таблица 5

Результаты измерения удельной активности ^{241}Am ($A_{изм.}$) в образцах грунта и сравнение их с эталонной активностью ^{241}Am ($A_{ет}$) в этих же образцах при сопутствующей активности ^{137}Cs(A_{Cs})

Номер пробы	Место пробо-отбора	Масса, г	$A_{Cs} \cdot 10^4$, Бк/кг	$A_{ет}$, Бк/кг	$A_{изм.}$, Бк/кг	ОТклонение $(A_{эт} - A_{изм})/A_{эт}$, %
П-1068	ПЗРВ "Буря-ковка"	68,5	2,812	209	218	4.3
П-1064	»	65,0	2,479	253	299	18,2
П-1071	»	65,0	2,442	265	263	0,8
П-1074	»	65,0	3,219	810	767	5,3
П-ИЯИ	Брянская обл.	60,0	0,623	172	182	5,8
-	Ст. Шепеличи	76,0	7,141	225	180	16,4

Корреляция наших данных с эталонными очень хорошая, коэффициент детерминации R^2 = 0,98. При этом скорость набора на GSO детекторе на два порядка больше, чем для спектрометра ORTEC, МДА 4,5 Бк / кг, удобство в эксплуатации, отсутствие необходимости в использовании жидкого азота, возможность портативного исполнения портативного образца, успешные полевые испытания, ряд других преимуществ для измерения 241Am - все подчеркивает перспективность прибора.

Глава третья посвящена изучению особенностей радиоактивного загрязнения экосистем, расположенных в непосредственной близости к ЧАЭС.

В первом параграфе рассматривается вертикальная миграция радионуклидов в почвах на топливных следам выпадений (полигоны "Рыжий лес" и "Озеро Глубокое") по состоянию на 2002-2004 гг Ландшафтные особенности ближней зоны ЧАЭС обусловливают преобладание инфильтрации над поверхностным стоком при миграции радионуклидов. Сочетание в ЧЗО механических, сорбционных и глеевых геохимических барьеров давало надежду, что растворение и миграция радиоактивных выпадений не будут быстрыми. Поэтому довольно неожиданным было обнаружение большого количества изотопов плутония (~n Бк⁄кг) в грунтовых водах в районах захороненного погибшего соснового леса (ПВЛРО "Рыжий лес") в конце 1990-х годов. Поскольку вертикальная миграция трансурановых радионуклидов изучалась не систематически, а миграция ^{90}Sr и ^{137}Cs изучалась на других участках (см. следующий пункт), представляло значительный интерес изучение вертикальной миграции радионуклидов на территориях именно вблизи этих участков.

В отобранных образцах спектрометрическим и нерадиохимическими методами были определены активности радионуклидов ^{60}Co, ^{90}Sr, ^{137}Cs, ^{154,155} Eu, ^{241}Am и суммарная активность изотопов $^{238\text{-}240}$Pu.

Пространственное распределение радиоактивных выпадений на территории опытного полигона "Рыжий лес" крайне неоднородно и характеризуется логнормальным законом распределения значений. Плотность загрязнения участков варьирует в значительных пределах (МБк/м^2): ^{90}Sr - 43,4–82,6, ^{137}Cs - 74,3–166, ^{241}Am -

1,0–2,5, ^{238,239,240}Pu - 1,4 - 2,8, причем на отдельных «пятнах» эти значения гораздо выше. След радиоактивных выпадений идет с северо-востока на юго-запад.

Анализ рассчитанных значений изотопных отношений ^{90}Sr/^{154}Eu, ^{239,240}Pu/^{154}Eu, ^{241}Am/^{154}Eu, ^{239,240}Pu/^{137}Cs, ^{241}Am/^{137}Cs и ^{137}Cs/^{90}Sr и сравнение их со значениями, полученными для выпадений топливной компоненты выбросов в ближний части ЧЗО, показал, что различные участки территории полигона характеризуются загрязнением или топливной или суперпозицией топливной и конденсационной компонент выпадений. Также отмечено определенную корреляцию между активностями радионуклидов.

Территория полигона «Озеро Глубокое» также является одним из наиболее загрязненных участков ЧЗО, но она отличается другими типами почв, поэтому там были проведены аналогичные исследования. Обнаружено, что плотность загрязнения территории ^{90}Sr достигает 26 - 33 МБк/м^2, ^{137}Cs - свыше 37 МБк/м^2. На удалении 0,5 - 1,0 км от полигона плотность выпадений снижается до 9 - 13 МБк/м^2. Содержание радионуклидов в донных отложениях озера в целом соответствует прилегающим территориям суши, хотя и здесь наблюдается мозаичная структура загрязнения. Кроме того, загрязнение полигона имеет свои особенности: наличие береговых «аномалий», узких полос (1-2 м) аномально высокой радиоактивности, главным образом на северном берегу. Удельная активность почв на этих участках в 10 - 20 раз превышает среднюю удельную активность почв прилегающих территорий и донных отложений. Эти особенности объясняются дрейфом выпадений на поверхности воды под действием ветра в первые дни аварии.

Анализ полученных значений изотопных отношений ^{90}Sr/^{154}Eu, ^{239,240}Pu/^{154}Eu, ^{241}Am/^{154}Eu, ^{239,240}Pu/^{137}Cs, ^{241}Am/^{137}Cs и ^{137}Cs/^{90}Sr для различных слоев почвы, как и в "Рыжем лесу", дает крайне полезную информацию о миграции различных радионуклидов.

Полученные данные подтверждают, что в настоящее время 90% активности находится на глубине 0 - 10 см. Как и ранее, мы отмечаем, что ^{241}Am наблюдается до глубины 30 см. До этой глубины надежно обнаруживаются и изотопы плутония. Данные по многим разрезам в пределах погрешности измерений показывают аналогию вертикального распределения плутония и америция. Наблюдаются некоторые различия в поведении радионуклидов в почвах двух полигонов. На полигоне "Озеро Глубокое" отмечено более высокую миграционную подвижность ^{90}Sr и ^{137}Cs сравнению с ^{154}Eu и ^{241}Am (см. рис. 11, а). Однако есть разрезы, где распределение всех изотопов подобное, как и в "Рыжем лесу".

В целом можно отметить более высокую миграционную подвижность всех радионуклидов (в том числе ^{241}Am и $^{238\text{-}240}$Pu) в почвах полигона "Озеро Глубокое" по сравнению с подвижностью радионуклидов в почвах полигона "Рыжий лес".

Еще одним методом анализа миграции изотопов, вместе с расчетом изотопных отношений, является расчет параметров вертикального переноса.

Значения параметров переноса радиоизотопов в профиле почвы рассчитывали с использованием конвективно-диффузионной модели переноса

$$C(x,t) = C_0 \cdot \left\{ \frac{1}{\sqrt{\pi \cdot D \cdot t}} \exp\left(-\frac{(x - V \cdot t)^2}{4D \cdot t} \right) - \frac{V \cdot x}{2D} \exp\left(-\frac{V \cdot x}{D} \right) \left[1 - \mathrm{erf}\left(\frac{x + V \cdot t}{2\sqrt{D \cdot t}} \right) \right] \right\} \quad (3)$$

де C_0, C (x, t) - содержание радионуклида в почвенном слое *x* в начальный момент времени и время *t*; D – коэффициент диффузии радионуклида, $см^2 \cdot год^{-1}$; V – скорость направленного переносу радионуклида с током влаги, $см \cdot год^{-1}$.

Таблица 6

Усредненные значения параметров вертикального переноса для различных участков исследовательских полигонов

Типы грунта	Параметр	^{90}Sr	^{137}Cs	^{154}Eu	^{241}Am	Pu
Заболоченные и сильно увлажненные участки полигона "Рыжий лес"	D	0,32	0,095	0,095	0,095	0,095
	V_k	0,13	0,16	0,13	0,13	0,031
Увлажненные участки полигона "Рыжий лес"	D	0,095	0,63	0,095	0,095	0,13
	V_k	<0,001	0,003	0,095	0,095	<0,003
Увлажненные участки полигона "Рыжий лес" на автоморфных почвах	D	0,25	0,16	0,063	0,095	0,094
	V_k	<0,001	<0,001	0,015	<0,006	<0,003
Заболоченные и сильно увлажненные почвы ближней полосы от берега оз. Глубокое	D	0,30	0,19	0,13	0,063	
	V_k	0,28	0,22	0,19	0,19	
Увлажненные автоморфные почвы полигона «Озеро Глубокое»	D	0,32	0,19	0,079	0,095	
	V_k	<0,001	0,13	0,19	0,16	
Автоморфные почвы полигона «Озеро Глубокое»	D	0,13 -1,3	0,32 - 0,63	0,063 - 0,32	0,063-0,32	
	V_k	<0,001-0,003	<0,001	0,003 - 0,19	<0,001-0,13	

Среднее квадратическое отклонение средних оценок параметров переноса для групп профилей, как правило, не превышает 30%.

При анализе усредненных значений необходимо отметить, что разброс величин D, как правило, достигает 1,5 - 2 раза, а величины V_k могут изменяться в пределах 1-2 порядков величин.

На основе полученных данных о конвективном и диффузном переносе (табл. 6) были рассчитаны экологические периоды полуочищения поверхностных слоев почвы от ^{90}Sr, ^{137}Cs, ^{154}Eu, ^{241}Am и изотопов плутония (табл. 7).

Полученные на основе экспериментальных результатов оценки вместе с опубликованными ранее , убедительно показывают, что на топливных следах выпадений в почвах ближней зоны миграционная подвижность радиологически значимых радионуклидов выброса ЧАЭС существенно ниже, чем в почвах, где загрязнение характеризуется преобладанием конденсационной компоненты в выпадениях, а топливная компонента представлена топливными частицами существенно меньшего размера. Наверное, указанный факт связан с тем, что деструкция и растворение более крупных топливных частиц на ближних следах выпадений происходят со значительно меньшей интенсивностью по сравнению с таковыми на следах, представленных частицами малого размера. Соответственно за годы, прошедшие после выброса, на ближних следах выпадений преобладает вертикальная миграция радионуклидов за счет механического переноса собственно топливных частиц и, частично, за счет

диффузионного переноса и конвекции радионуклидов, выщелоченных из матрицы топливных частиц. Такой вывод подтверждается, с нашей точки зрения, близкими значениями параметров переноса ^{90}Sr, ^{137}Cs, ^{241}Am и изотопов плутония, с одной стороны, и ^{154}Eu, который имеет существенно меньшую интенсивность вертикального переноса в почвах, при условии попадания радионуклидов в почву в исходной водорастворимой форме. На участках, где

Таблица 7

Экологические периоды полуочищения поверхностных слоев почвы, годы

Типы грунта	^{137}Cs	^{90}Sr	^{154}Eu	^{241}Am	Pu
Заболоченные и сильно увлажненные участки полигона "Рыжий лес"	28±14	21±15	26±11	25±10	100±45
Увлажненные участки полигона "Рыжий лес"	58±31	46±34	42±25	42±22	110±60
Увлажненные участки полигона "Рыжий лес" на автоморфных почвах	100±40	110±55	130±130	230±230	140±80
Заболоченные и сильно увлажненные почвы ближней полосы от берега оз. Глубокое	25±6	83±83	32±20	56±52	
Увлажненные автоморфных почв полигона «Озеро Глубокое»	65±19	82±82	120±120	72±58	
Автоморфные почвы полигона «Озеро Глубокое»	180±160	160±90	180±130	240±190	

загрязнение представлено топливной и конденсационной формами с различным соотношением, топливные частицы малого размера растворились в почве в течение нескольких первых лет аварии, затем вертикальная миграция в грунте выщелоченных радионуклидов осуществлялась за счет диффузионного переноса и конвективного переноса с током влаги. Указанный вывод подтверждается заключением об отсутствии различий в переносе изотопов различных химических элементов в течение 2-3 лет после выпадений и появления таких различий в дальнейшем.

Второй параграф третьей главы посвящен анализу многолетних данных по миграции радионуклидов в почвах на полигонах ЧЗО на протяжении ранней, промежуточной и поздней фаз аварии.

Радиоактивные выпадения на территории ЧЗО представлены двумя основными компонентами (топливной и конденсационной), а загрязнение территории представляет собой суперпозицию компонент, причем соотношение зависит от направления и расстояния от точки выброса. Это обусловливает и разную динамику трансформации радиоактивных выпадений и параметров миграции радионуклидов в почвах на разных участках.

Одной из важнейших задач радиоэкологического мониторинга на поздней фазе аварии является оценка динамики миграционной подвижности радионуклидов в

почве. Изменение или постоянство параметров переноса радионуклидов в почвах приводит адекватности прогнозных оценок миграционной подвижности и биологической доступности радионуклидов, проспективных оценок доз облучения населения при оценке возможности его возвращения на отчужденные территории после проведения реабилитационных мероприятий.

Анализ динамики параметров переноса ^{137}Cs показал, что за время после аварии практически для всех площадок с различными грунтами параметры переноса радионуклида в почве снижаются со временем (коэффициент диффузии - в 1,5 - 3 раза, скорость направленного переноса - от нескольких раз до нескольких порядков величин). Относительно данных, полученных в первые 6 - 9 лет после аварии, период полуочищения верхнего 5-см горизонта почв луговых экосистем составил для автоморфных минеральных почв легкого механического состава 60-150 лет, для гидроморфных органогенных - 11-20 лет, органогенных осушенных почв - 17 -80 лет (Иванов и др.., 1996). По данным, полученным на 21-й год после аварии, период полуочищения уже оценивается: для автоморфных минеральных почв легкого механического состава - 180-320 лет, для гидроморфных органогенных почв - 90-110 лет. Это свидетельствует о существенном замедлении процесса вертикальной миграции ^{137}Cs в почвах лугов на поздней фазе аварии. Абсолютные величины экологического периода полуочищения верхнего 5-см слоя почвы в 3-7 раз превышают величину периода физического полураспада радионуклида (30,17 лет), т.е. на поздней фазе аварии изменение мощности экспозиционной дозы излучения в основном определяется физическим распадом радионуклида.

Для большинства лугов, сформированных на автоморфных минеральных почвах легкого механического состава, интенсивность переноса ^{137}Cs на поздней фазе аварии в пределах погрешности значимо не отличается, что свидетельствует о существенном снижении роли физико-химических свойств почв на интенсивность вертикальной миграции радионуклида.

Результаты исследований свидетельствуют о более интенсивном вертикальном переносе ^{90}Sr по сравнению с ^{137}Cs и изотопами плутония.

Анализ параметров переноса ^{90}Sr показал, что практически для всех экспериментальных полигонов ЧЗО интенсивность его переноса в почве существенно превышает таковую для ^{137}Cs. В связи с тем, что ^{90}Sr в выпадениях, в основном, был депонирован в матрице топливных частиц, а скорость деструкции частиц и выщелачивания радионуклида в различных почвенно-химических условиях различались, менялись и формы его переноса и их соотношение в почве. Это подтверждают и оценки периода полуочищения верхнего 5-см горизонта почвы лугов от указанных радионуклидов. Значение $T_{экол}$ ^{90}Sr в 2 - 40 раз меньше таковых для ^{137}Cs.

В целом оценки периода полуочищения верхнего 5-см слоя почвы на лугах от ^{90}Sr для 21-го года после аварии варьируют в широких пределах - от 7,5 до 150 лет. Для лугов, сформированных на гидроморфных органогенных почвах,$T_{екол}$ ^{90}Sr составляет 11–18 лет, на автоморфных минеральных почвах легкого механического состава - 7,5-150 лет.

Полученные ранее оценки периода полуочищения верхнего 5-см горизонта почвы лугов от ^{90}Sr, по данным для первых 6 - 9 лет после аварии, составили: для автоморфных минеральных почв легкого механического состава - 11-19 лет, для

гидроморфных органогенных почв - 100-160 лет (Иванов и др., 1996). В этой работе для тех же экспериментальных полигонов получены оценки переноса и $T_{экол}$. Сравнение оценок в разные временные фазы после аварии указывает, что примерно для половины экспериментальных участков наблюдается снижение значений $T_{экол}$ ^{90}Sr, т.е. рост его миграционной подвижности. Интенсивность миграции радионуклидов зависит от скорости деструкции топливных частиц. Особенно сильно эта зависимость проявляется для ^{90}Sr, поскольку скорость сорбции этого радионуклида на несколько порядков величины меньше, чем ^{137}Cs и изотопов плутония. С учетом роста во времени пула мобильных форм ^{90}Sr в почве за счет деструкции топливных частиц указанная выше тенденция не является спорной.

В третьем параграфе представлены некоторые результаты применения разработанных методов при проведении радиоэкологического мониторинга на поздней фазе аварии. Оригинальная методика прижизненной оценки содержания ^{90}Sr и ^{137}Cs в мелких животных с использованием бета-гамма-спектрометрического комплекса нашла широкое применение в лабораторных и полевых радиоэкологических мониторинговых исследованиях мелких животных. На основе методики прижизненного измерения содержания радионуклидов впервые оценены особенности вывода ^{90}Sr и ^{137}Cs из организма мышевидных грызунов in vivo. Для данного эксперимента в 2001 г. было выловлено 15 особей рыжей полевки на одной из центральных участков ЧЗО (в 5 км юго-западнее от разрушенного 4-го энергоблока) с плотностью загрязнения: ^{90}Sr - 13,8 ± 0,5 МБк/м^2, ^{137}Cs - 30,0 ± ± 2,2 МБк/м^2.

Поскольку животные оставались живыми и пригодными для дальнейших измерений, то несмотря на их небольшое количество, было получено значительное количество данных. В частности, было оценено скорость выведения ^{90}Sr и ^{137}Cs из организма животных, установлено особенности выведения радионуклидов у самок и самцов, выявлены различия в выведении ^{90}Sr и 137Cs между самками, которые кормят и не кормят детенышей, а также оценена роль экскрементов и мочи в выведении радионуклидов из организма.

Очевидно, что подобный эксперимент с использованием радиохимических методов потребовал бы больших затрат времени, сил и материалов, не говоря уже о том, что это исключало бы индивидуальный анализ каждой особи. Кроме того, это позволило исследовать виды животных, находящихся под охраной.

В дальнейшем при использовании прижизненного метода измерений было исследовано особенности радиоэкологии птиц, мышевидных грызунов, землероек, рукокрылых и амфибий. Оценено дозовые нагрузки на эти группы животных и их соответствие 103 Рекомендации МКРЗ.

Глава 4 посвящена применению разработанных методов при радиоэкологическом мониторинге крупных техногенных объектов.

В первом параграфе изложены результаты радиоэкологического мониторинга урбанизированного ландшафта на примере г. Припять.

Радиоактивные выпадения в Припяти представлены широким спектром продуктов ядерного деления, наведенной активностью и трансурановыми элементами (ТУЭ), выпавшими в основном из числа частиц мелкодисперсного ядерного топлива и реакторных конструкционных материалов. В настоящее время на территории го-

рода легко регистрируют только ^{90}Sr, ^{137}Cs, ^{154}Eu, сумму $^{238,239,240}Pu$ й ^{241}Am. Остальные радионуклидов находят только в следовых количествах.

Характерной особенностью загрязнения является широкая вариация и пестрота пространственного распределения выпадений. Наиболее загрязненными выявлены восточные окраины (микрорайон № 1а до 24,1 МБк/м^2 по ^{137}Cs) и нежилые южные участки (до 7,4 МБк/м^2 по ^{137}Cs). Наимеенее загрязненные районы № 4 и № 4а на северо-западе города (0,74–1,85 МБк/м^2 по ^{137}Cs).

В многоэтажных застройках наиболее загрязненными оказались верхние этажи зданий. По нашим данным, даже в помещениях зданий с окнами, которые сохранились, мощность экспозиционной дозы на 5-9-х этажах в 1,2-1,6 раз выше, чем на первом этаже (рис. 10).

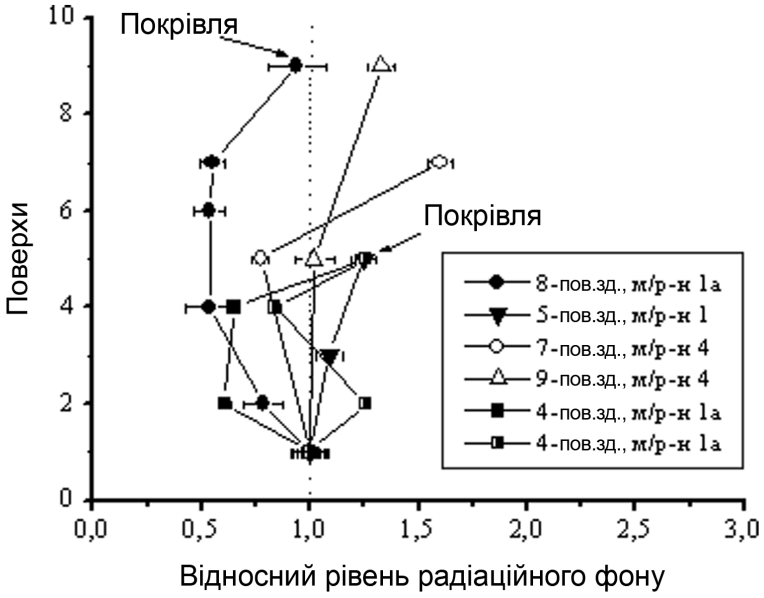

Рис. 10. Характер изменения гамма-фона по высоте здания относительно средних значений на уровне первого этажа (усл. ед.). Данные 2006 и 2009 гг.

Результаты измерений потоков бета-частиц показывают, что загрязнение внешней поверхности здания характеризуется значительной вариативностью и высокими абсолютными значениями (10^2 - 10^3 част. см^2·мин$^{-1}$). В большинстве случаев загрязнения горизонтальных поверхностей на несколько порядков выше, чем загрязнение прилегающих к ним вертикальных поверхностей. Как правило, наиболее загрязненными является почва возле здания (горизонтальные измерения). Обращенные к ЧАЭС наружные поверхности здания в целом загрязнены выше. В большинстве случаев загрязнения внешних, выходящих на ЧАЭС, поверхностей здания снижается в направлении от нижних этажей к верхним. Не обращенные к ЧАЭС стены зданий имели обратное деление: верхние этажи были загрязнены выше, чем нижние.

Специфические особенности радиоэкологии урбанизированного ландшафта. Спецификой городских условий является наличие большого количества многоэтажных зданий, формирующих техногенную шероховатость рельефа, разви-

той системы наземных и подземных коммуникаций, огромных площадей вертикальных и горизонтальных водонепроницаемых поверхностей.

Исследование 2004 - 2005 гг. показали, что обычные строительные материалы (кирпич и облицовочная плитка) является лишь условно непроницаемыми для радиоактивных выпадений. Удельная активность ^{90}Sr и ^{137}Cs в керне белого и красного кирпича оказалась почти такой, как удельная активность тех же радионуклидов на прилегающей территории, тогда как в облицовочных плитках (глазированные и неглазированные) она была на два порядка меньше. При этом в поверхностном 0-5-мм слое белого кирпича находится 82 - 99% ^{90}Sr, 77 - 99% ^{137}Cs, находящегося в кирпиче, тогда как в красном кирпиче лишь 42 - 86% ^{90}Sr и 27 - 54% ^{137}Cs (рис. 11). В облицовочных плитках активность радионуклидов распределена более или менее равномерно. Установлено также, что почти во всех случаях ^{90}Sr проник в строительные материалы глубже, чем ^{137}Cs. Одним из важных факторов, повлиявших на характер распределения радионуклидов, является плотность строительных материалов и ее распределение по глубине, а также химические свойства веществ, из которых они состоят.

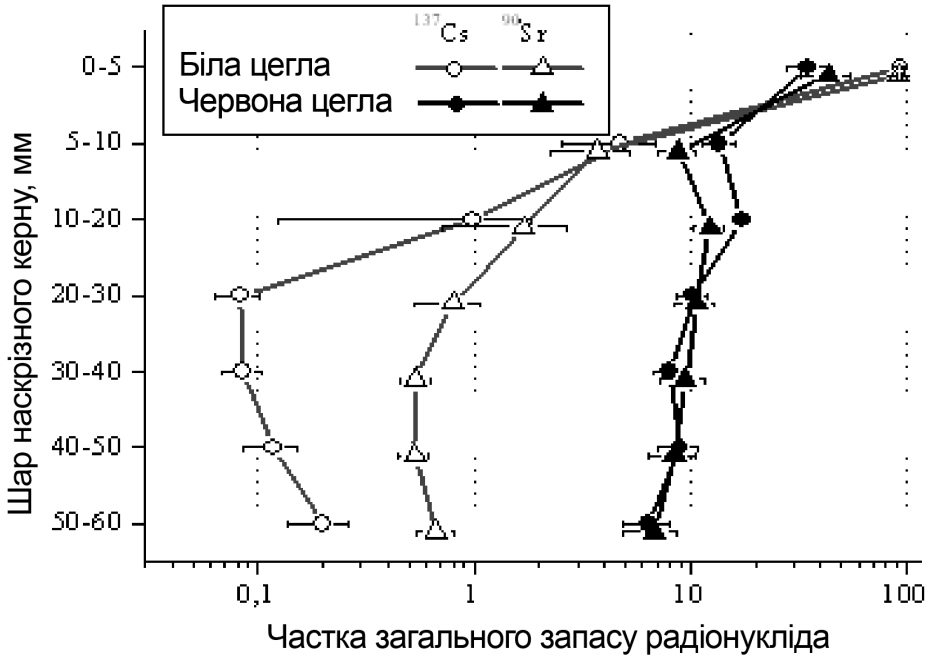

Рис. 11. Распределение общего запаса ^{90}Sr и ^{137}Cs вдоль керна, отобранного из строительных материалов в г. Припять в 2004 г.

Результаты радиоэкологического мониторинга, проведенного нами и другими исследователями в 1986 - 2009 гг. в г. Припять, со всей очевидностью показали, что формирование радиоактивного загрязнения урбанизированного ландшафта и дальнейшее его развитие имеют целый комплекс специфических черт, не свойственных естественным, полуприродных и аграрным ландшафтам: формирование зон аккумуляции и повышенные параметры миграции радионуклидов в почвах вдоль водонепроницаемым поверхностей (стен, дорог и т.п.), наличие эффекта «тени» и зон повышенной аккумуляции радиоактивных осадков вокруг зданий относительно главного направления движения воздушных масс; искусственные «пятна» с повышенным или пониженным загрязнением, возникшие в результате деятельности человека,

различные параметры вертикальной миграции и перераспределения радионуклидов в почвах, нехарактерные для естественных.

Знание этих особенностей и закономерностей как с теоретической, так и с практической точек зрения является исключительно важным в условиях постоянного роста урбанизации населения Земли и постоянного ухудшения экологических условий. Однако следует признать, что в связи с отсутствием комплексных исследований пока можно констатировать только сам факт существования специфики радиоэкологии урбанизированных экосистем. В этом отношении Припять, как естественная большая лаборатория, предоставляет большие возможности для решения многих научных проблем.

Второй параграф посвящен оценке доз облучения биоты сухопутных экосистем в прибрежной зоне водоема-охладителя ЧАЭС.

Как отмечалось в главе 1, радиоэкологический мониторинг является методом контроля для интегральной оценки состояния экосистемы и уровня защиты биоты. С целью разработки методологических подходов к организации радиоэкологического мониторинга и оценки соответствия некоторых компьютерных программ для оценки доз в условиях ЧЗО нами проведено исследование биоты прибрежных территорий вблизи водоема-охладителя ЧАЭС**.**

Исследованы уровни радиоактивного загрязнения сухопутного фаунистического комплекса прибрежного района водоема-охладителя, оценены коэффициенты концентрации радионуклидов в организме мелких птиц, мелких млекопитающих, амфибий, рептилий, характерных для данных территорий. На основе полученных результатов с помощью пакета ERICA Tool выполнен расчет дозовых нагрузок у представителей биоты. В ходе исследований проведена оценка выбора индикаторных видов (референтных) мониторинга, наиболее отвечающих прибрежным территориям, способов отбора объектов для анализа и наиболее подходящих подходов к выполнению измерений. На основе полученных результатов оценен объем необходимых предварительных исследований для создания системы радиоэкологического мониторинга водоема-охладителя ЧАЭС, даны предложения относительно мониторинга в процессе вывода водоема-охладителя из эксплуатации.

По нашим оценкам, дозовые нагрузки на биоту на участках бывшего дна водоема-охладителя могут достигать значений, превышающих рекомендуемые. При этом основной вклад в суммарную дозу (до 41 - 67% у животных, и до 93% у травянистых растений) будет вносить ^{90}Sr, инкорпорированный в организме. Присутствие ^{137}Cs в экосистеме определяет преимущественно внешнее облучение: у животных до 29 - 54% от общей дозы, у растений 6 - 7%. Вклад в суммарную дозу излучения трансурановых радионуклидов, находящихся в окружающей среде и инкорпорированных в организме животных, составит не более 2,1 - 5,7% у животных, и 0,2% у растений. Как следствие, коэффициенты риска намного превысят единицу, достигая 2,7 - 4,0 у амфибий и мелких млекопитающих (табл. 8).

Таблица 8

Консервативная оценка прогнозной суммарной мощности поглощенной дозы на биоту на осушенных участках дна водоема-охладителя ЧАЭС, мкГр/ч

Организм	Дозовые нагрузки, мкГр/час							Риск
	^{90}Sr	^{137}Cs	^{238}Pu	$^{239,240}Pu$	^{241}Pu	^{241}Am	общая	
Травы	477.0	34.3	0.24	0.41	0. 005	0.40	512.0	1.28
Амфибии	72.5	31.5	0.15	0.26	0. 003	3.24	108.0	2.69
Рептилии *	30.5	40.2	0.01	0.01	0. 000	3.24	73.9	1.85
Птицы (утка)*	35.9	37.5	0.03	0.05	0. 001	3.24	76.7	1.92
Млекопитыющие (крысы)*	74.4	86.7	0.15	0.25	0. 003	3.25	165.0	4.11
Мелкте воробьиные	28.4	25.7	0.03	0.05	0. 001	3.23	57.4	1.44
Дрозды	28.9	25.7	0.03	0.05	0. 001	3.23	57.9	1.45
Землеройки	65.1	67.0	0.15	0.25	0. 003	3.24	136.0	3.39
Мелкие грызуны	477.0	34.3	0.24	0.41	0. 005	0.40	142.0	3.54

Таким образом, при относительно благополучных оценках радиологических последствий осушения водоема-охладителя ЧАЭС для человека обнажение участков дна водоема-охладителя может привести к повышению рисков для биологических объектов, живущих на его побережье: частично за счет увеличения внешнего облучения и в значительной мере за счет включения в биологическую цепочку радионуклидов, находящихся в донных отложениях водоема-охладителя. Поскольку данные оценки выполнены с использованием только в настоящее время доступного материала, который не в полной мере описывает радиоактивное загрязнение прибрежной экосистемы, а также в связи с тем, что биодоступность радионуклидов, которые ныне находятся в донных отложениях, после осушения водоема-охладителя несомненно изменится, понятна необходимость дальнейших и более глубоких исследований.

Раздел 5 посвящен результатам мониторинговых исследований содержания радионуклидив в продуктах техногенной деятельности человека.

В первом параграфе приведены данные о радиоактивности, пористость и сорбционных характеристиках графита марки ГРП-2-125 реактора № 2 ЧАЭС.

Исследование радиационных и сорбционных характеристик графита ГРП-2-125 реактора № 2 является первым и важным шагом в цепи изучение содержания радионуклидов в графите ЧАЭС. Для разработки планов дальнейших работ по снятию энергоблоков с эксплуатации необходимо иметь оценки состава и величины активности радионуклидов, накопленных за время эксплуатации блока в конструкционных материалах и строительных конструкциях, и, прежде всего, должен быть рассмотрен основной источник радионуклидов - конструкции реактора, в частности графит.

В рамках этой работы исследованы графитовые элементы пяти технологических каналов, расположенных на плато активной зоны (А3) и имеющих энерговыроботку, близкую к средней для зоны плато (~ 7000 МВт·сут/канал).

Результаты исследований показали (табл. 9), что активность облученного графита ГРП-2-125 определяется, прежде всего, содержанием ^{14}C, а также содержанием радионуклидов примесного и технологического происхождения (^{3}H, ^{36}Cl, ^{55}Fe, ^{59}Ni,

^{60}Co, ^{63}Ni, ^{93m}Nb, ^{108m}Ag, ^{133}Ba) и продуктов деления топлива (^{90}Sr, ^{134}Cs, ^{137}Cs, ^{154}Eu, ^{155}Eu). Радионуклиды ^{14}C, ^{3}H і ^{36}Cl имеют однородное распределение по образцам, другие - неоднородное.

Пористость углеродных материалов неплохо изучена, есть также работы по исследованиях реакторных графитов. Однако поскольку исследуемые образцы в течение 11 лет находились в воде и соответственно содержание воды в порах трудно измерить или оценить, то прямые методы, основанные на измерении плотности исследуемых материалов можно уверенно применять только для контрольного необлученного образца.

Если известно объем и массу пористого тела, а также плотность компактного материала, то полная пористость материала P определяется по формуле

$$P = 1 - \rho / \rho_{к},$$

где $\rho_к$ - плотность кристаллического графита, равна 2,26 г/см^3; ρ - плотность пористого кольца.

Наши измерения для необлученного графита показывают ρ = 1,92 ± ±0,16 г/см^3, то есть P = 0,149 ± 0,012. Измерение плотности облученных образцов дают среднее по всем образцам плотность ρ = 1,89 ± 0,15 г/см3, тобто P = 0,164 ± 0,012. Так, пористость облученного и необлученного графита совпадает в пределах погрешностей.

Процессы десорбции радионуклидов из облученного графита при различной температуре представляют не только научный, но и практический интерес, поскольку при длительном хранении облученного графита возможны различные температурные режимы. Учитывая большой объем облученного графита и, соответственно, большое количество накопленной активности, вопросы надежности фиксации этой активности в графите имеет важное

Таблица 9

Усредненные значения содержания изотопов в двух соседних кольцах графита

Проба	Удельная активность, Бк/г															Общая активность, Бк/г
	^{3}H	^{14}C	^{36}Cl	^{55}Fe	^{59}Ni	^{63}Ni	^{60}Co	^{93m}Nb	^{90}Sr	^{108}Ag	^{133}Ba	^{134}Cs	^{137}Cs	^{154}Eu	^{155}Eu	
В 427 1062	490	8520	699	440	0,5	266	3712	2	189	8	10	2	20	14	5	14377
В 427 603	690	4080	990	32	1,7	123	2402	41	160	17	2	8	40	5	2	8594
В 427 962	1230	12100	938	2001	1,5	1162	24329	107	180	35	96	36	116	123	27	42483
В 427 1145	1050	28000	1126	460	0,2	81	5277	13	160	27	79	7	66	116	38	36500
Г 75 962	610	4000	1102	53	4,9	224	2483	26	314	6	17	5	231	1	0,4	9078
Г 75 1062	1740	13280	943	23	1,3	378	1806	57	156	14	7	5	96	2	0,4	18508
Г 75 1145	605	5600	1243	20	0,9	23	1667	7	134	17	0,7	2	55	3	1	9378
Г 75 603	620	10840	1084	221	0,3	246	3130	6	186	8	9	2	54	16	5	16428
Г 209 1062	820	14600	995	132	0,0	388	3349	14	161	15	37	1	23	6	3	20544
Г 209 962	520	7240	1093	161	2,8	120	4923	6	189	7	6	3	121	12	5	14408
Г 209 603	680	14400	1159	345	4,5	324	6077	11	120	9	16	12	10	13	4	23183
Г 209 1145	750	10720	1384	76	2,4	329	2207	6	139	14	2	6	36	6	2	15681
В 299 1145	980	9080	1478	50	4,7	71	1151	21	271	8	6	7	74	1,8	0,7	13204
В 299 1062	650	5360	1417	93	1,7	409	4922	14	138	6	2	4	37	5	1	13060
В 299 962	450	10600	1004	138	2,4	99	4518	2	135	8	9	15	15	4	2	17002
В 299 603	710	8520	990	96	6,2	484	1737	29	94	0	2	3	32	3	1	12705
В 358 1145	420	8960	1084	145	2,2	243	4441	3	145	11	2	5	30	4	2	15496
В 358 962	780	6320	929	207	0,1	136	4094	20	164	0	6	7	13	5	1	12683
В 358 1062	890	10400	1131	1464	5,3	1116	20744	154	70	31	104	50	273	35	12	36480
В 358 603	1290	18000	821	375	6,7	459	7291	63	194	21	52	52	22	37	10	28693
Средняя активность по изотопу	799	10531	1081	327	2,5	334	5513	30,1	165	13,1	23,2	11,6	68,2	20,6	6,1	18924
Процентное содержание изотопа	4,22	55,65	5,71	1,73	0,02	1,76	29,13	0,16	0,87	0,07	0,12	0,06	0,36	0,11	0,03	

значение. Результаты оценки десорбции радионуклидов из облученного графита при температуре 100, 200, 300, 400 и 500 °С не обнаружили изменений удельной активности исследованных нуклидов.

Понятно, что результаты выполненных исследований могут и должны быть использованы при разработке концепции и программы обращения с реакторным графитом блоков РБМК, которые выводятся из эксплуатации.

Второй параграф последней главы посвящен радиоактивности различных видов техногенных отходов, горячим частицам, топливосодержащим материалам (ТСМ). Основанием для проведения работ, представленных в данном параграфе, послужили в основном несколько следующих факторов.

Анализ результатов наших измерений горячих частиц из объекта «Укрытие» позволил уточнить феменологичные формулы оценки выгорания ядерного топлива В в реакторе РБМК, впервые предложены А. Боровым и Е. М. Пазухиным (2003 г.) (табл. 10) .

$$B\,(Cs) = 24{,}2\,[A(^{134}Cs)/A(^{137}Cs)] - 1{,}2$$
$$B\,(Eu) = 30{,}1\,[A(^{154}Eu)/A(^{155}Eu)] - 11{,}1 \qquad (4)$$
$$B\,(Pu) = -\,4{,}12\,[A(^{238}Pu)/A(^{238,240}Pu)]\,2 + 18{,}22\,[A(^{238}Pu)/A(^{238,240}Pu)] + 4{,}99.$$

Таблиця 10

Выгорания топлива В(МВт·сутки/кг (U)) рассчитанное по изотопному отношению Eu, Cs та Pu

№ проби	Eu	Cs	Pu
«г.ч.» 1	12,6(5)	10,3(2)	12,9(2)
«г.ч.» 2	13,6(5)	9,7(3)	13,3(2)

Кроме того, в данной работе проведено исследование гамма-излучения частиц (в области 100 кэВ), отобранных в 2001 - 2002 гг. в 5-км зоне ЧАЭС ("Рыжий лес"), с помощью Ge-спектрометра. В ряде проб обнаружено характеристическое K_α-излучение урана. Появление K_X-излучения может появиться при ионизации атомов урана. Очевидно, что для появления такого излучения уран должен находиться только в виде кусочков топлива значительных размеров Кроме рентгена урана впервые обнаружено K_x-излучение плутония, что позволяет сделать прямые оценки массы изотопов плутония. Изучено соотношение $^{154,155}Eu$ в топливных частицах. Получены изотопные отношения топливных частиц.

С учетом всего вышеизложенного и ранее полученных данных о распределении глобальных выпадений был сделан вывод о том, что при значениях удельной активности трансурановых радионуклидов в почвах на уровне (4-5) · 10^{-3} Бк / г необходимо учитывать вклад глобальных выпадений в суммарную активность. На основании сравнительного анализа изотопных отношений в топливных частицах с Семипалатинского полигона и данных о глобальных выпадение обусловленных испытаниями на Новой Земле, показано, что вклад глобальных выпадений ^{241}Am в ЧЗО может быть завышен в 4-5 раз по сравнению с опубликованными данными.

В заключительные положения отнесены заключения и выводы диссертационной работы.

ВЫВОДЫ

Приведены обобщение опыта и новое практическое решение научных задач по обеспечению системы радиоэкологического мониторинга ЧЗО и контроля РАО АЭС новыми разработанными методами.

1. Проведен анализ опыта организации системы и методов обеспечения радиоэкологического мониторинга ЧЗО. Обоснованы принципы организации и пути оптимизации обеспечения радиоэкологического мониторинга и критерии его ведения с учетом современных требований радиационной защиты окружающей среды и радиоэкологической ситуации на поздней фазе аварии.

2. Разработан новый комплекс методов обеспечения радиоэкологического мониторинга природных и урбанизированных экосистем ЧЗО на поздней фазе аварии, в том числе методы измерения ^{90}Sr, $^{238\text{-}240}$Pu и ^{241}Am, не требующие радиохимических процедур выделения и очистки радионуклидов, метод прижизненного измерения содержания ^{90}Sr в мелких животных.

3. Разработан и внедрен метод прижизненного определения содержания радионуклидов ^{90}Sr и ^{137}Cs в организме мелких животных в условиях как мобильной, так и стационарной лаборатории. Метод реализован в виде гамма-бета-спектрометрического комплекса, что позволяет проводить массовые измерения ^{90}Sr и ^{137}Cs, в том числе непосредственно на опытных полигонах.

4. Впервые проведены работы по измерениям содержания радионуклидов в РАО ЮУАЭС, что позволило разработать новые методы, необходимые для характеризации твердых и жидких РАО АЭС.

Измерения с использованием разработанных методов альфа-бета-гамма-активности около 6000 образцов почвы и биоты с ближней зоны ЧАЭС, отобранных в 2001 - 2009 гг., и их анализ позволили получить следующие выводы:

5. При исследовании пространственногои вертикального распределение радионуклидов в почвах наиболее загрязненной части ЧЗО впервые на систематической основе рассчитаны параметры вертикальной миграции изотопов ^{154}Eu, $^{238\text{-}240}$ Pu и ^{241}Am в почвах ближней зоны ЧАЭС. Оценены параметры многолетней динамики вертикальной миграции ^{90}Sr и ^{137}Cs в почвах в течение различных фаз аварии. Рассчитаны экологические и эффективные периоды полуочищения различных типов почв от вышеупомянутых радионуклидов. Это позволило существенно дополнить и расширить существующую картину развития радиоэкологической обстановки в ближней зоне ЧАЭС, находящейся на поздней фазе аварии.

6. Впервые проведены оценки дозовых нагрузок на биоту и выполнена радиоэкологическая характеризация исследовательских участков, необходимых при дальнейшем сопровождении работ в ЧЗО, в частности на водоеме-охладителе ЧАЭС. Даны рекомендации по организации и проведению радиоэкологического мониторинга при выводе водоема-охладителя из эксплуатации, выбраны контрольные участки, референтные объекты радиоэкологического мониторинга.

7. Изучены особенности радиоэкологии птиц, мышевидных грызунов и землероек, рукокрылых и амфибий. Оценены дозовые нагрузки на эти виды и их соответствие 103 Рекомендации МКРЗ. Оценены межвидовые различия в загрязнении ди-

ких мышевидных, насекомоядных, воробьиных птиц, амфибий. В частности, показано, что эти различия в первую очередь обусловлены пищевой специализацией и текущим поведением животных.

8. Исследованы особенности радиоэкологического загрязнения урбанизированного ландшафта на примере г. Припять. Впервые проведены измерения миграции радиоизотопов внутрь строительных материалов и изменения загрязнения конструкций по высоте зданий. Показано, что формирование радиоактивного загрязнения городской среды и дальнейшее его развитие имеют специфические черты, т.е. формирование зон аккумуляции и повышенные параметры миграции радионуклидов в почвах вдоль водонепроницаемым поверхностей (стен, дорог и т.п.), наличие эффекта «тени» и зон повышенной аккумуляции радиоактивных осадков вокруг зданий относительно главного направления движения воздушных масс; искусственные «пятна» с повышенным или пониженным загрязнением, возникшие в результате деятельности человека, параметры вертикальной миграции и перераспределения радионуклидов в почвах, нехарактерные для природных.

9. Впервые проведено исследование радиационных, сорбционных характеристик и пористости графита ГРП-2-125 реактора энергоблока № 2 ЧАЭС. Впервые показано, что активность облученного графита ГРП-2-125 определяется, прежде всего, содержанием ^{14}C, а также содержанием радионуклидов примесного и технологического происхождения (^{3}H, ^{36}Cl, ^{55}Fe, ^{59}Ni, ^{60}Co, ^{63}Ni, ^{93m}Nb, ^{108m}Ag, ^{133}Ba) и продуктов деления топлива (^{90}Sr, ^{134}Cs, ^{137}Cs, ^{154}Eu, ^{155}Eu). Сейчас ^{14}C, ^{3}H и ^{36}Cl имеют однородное распределение по образцам, другие - неоднородное. Показана неизменность удельной активности исследованных нуклидов в процессе нагрева до 500 ^{0}C. Полная пористость образца практически одинакова для облученного и необлученного графита и равна соответственно $P_{обл} = 0,145 \pm 0,029$ и $P_{необл} = = 0,153 \pm 0,018$. Результаты выполненных исследований позволяют разработать концепцию и программу обращения с реакторным графитом блоков РБМК, которые выводятся из эксплуатации.

10. На основании сравнительного анализа полученных результатов содержания радионуклидов в «горячих» частицах, отобранных в объекте "Укрытие", ближней зоны ЧАЭС и Семипалатинского полигона, показано, что при концентрации трансурановых радионуклидов в почвах ЧЗО на уровне $(4\text{-}5) \cdot 10^{-3}$ Бк/г необходимо учитывать вклад глобальных выпадений в суммарную активность. На основе проведенных измерений рассчитаны выгорания топлива с использованием изотопных отношений $^{134,137}Cs$, $^{154,155}Eu$ и $^{238,240}Pu$. Полученные результаты позволяют делать более точные оценки наработки трансурановых радионуклидов.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Бондарьков М. Д. Спектрометрический блок детектирования на основе силиката гадолиния для селективной регистрации ^{241}Am и альфа-излучения трансурановых радиону клидов / М. Д. Бондарьков, С. Ф. Бурачас, В. А. Желтоножский, Р. А. Говорова, А. Ф. Коваль Л. А. Пивень, Е. Н. Пирогов, В. Д. Рыжиков, Л. В. Садовников // Приборы и техника эксперимента.. – 1996. – № 5. – С. 57 – 61.

(Особистий внесок здобувача – дослідження характеристик блока, аналіз результатів та можливостей впровадження.)

2. Бондарьков М. Д. Альфа-гамма-радиометр РК-АГ-01 на основе сцинтиллятора GSO для оперативного контроля ^{241}Am и других трансурановых радионуклидов / М. Д. Бондарьков, В. А. Желтоножский, С. Ф. Бурачас, А. Ф. Коваль, Л. А. Пивень, Е. Н. Пирогов, В. Д. Рыжиков, Л. В. Садовников, Л. Я. Табачный, Ю. П. Соломатин, И. Р. Гринчук // Приборы и техника эксперимента. – 1997. – № 4. – С. 121–123. *(Особистий внесок здобувача – відпрацювання методик вимірювань, інтеркалибровка приладу.)*
3. Бондарьков М. Д. Исследование характеристического излучения «горячих частиц», образовавшихся после Чернобыльской аварии / М. Д. Бондарьков, В. А. Желтоножский, А. Г. Зелинский, Т. Н. Лашко, Л. В. Садовников, Е. Д. Стукин, Ю. М. Шевченко // Український фізичний журнал. – 1997. – Т. 42, № 6. – С. 648. (*Особистий внесок здобувача – планування експерименту, спектрометричні вимірювання, обробка, аналіз отриманих результатів.*)
4. Бондарьков М. Д. Дослідження Чорнобильських випадінь ^{137}Cs поблизу 30-км ЧЗВ ЧАЕС / М. Д. Бондарьков, В. О. Желтоножський, К. Мюк, А. В. Чупов // Український радіологічний журнал. – 2001. – №3. – С. 317 – 321. (*Особистий внесок здобувача – планування експерименту, спектрометричні вимірювання, обробка, аналіз отриманих результатів.*)
5. Bondarkov M. D. Classification of hot particles from the Chernobyl accident and nuclear weapons detonations by non–distructive methods / V. Zheltonozhsky, K. Mück, M. Bondarkov // Journal of Environmental Radioactivity. – 2001. – Vol. 57. – P. 151 – 166. (*Особистий внесок здобувача – планування експерименту, спектрометричні вимірювання, обробка, аналіз отриманих результатів.*)
6. Bondarkov M. D. Consequences of Polluted Environments on Population Structure: The Bank Vole (Clethrionomys glareolus) at Chornobyl / R. J. Baker, A. M. Bickham, M. Bondarkov, S. P. Gaschak, C. W. Matson, B. E. Rodgers, J. K. Wickliffe, R. K. Chesser // Ecotoxicology. – 2001. – Vol. 10. – P. 211– 216. (*Особистий внесок здобувача – планування експерименту, спектрометричні вимірювання, обробка, аналіз отриманих результатів.*)
7. Бондарьков М. Д. Метод измерения концентрации ^{90}Sr в биологических объектах и пробах грунта без радиохимии / М. Д. Бондарьков, Д. М. Бондарьков, В. А. Желтоножский, А. М. Максименко, Л. В. Садовников, Н. В. Стрильчук // Зб. наук. праць Ін-ту ядерних досл. НАН України. – 2002. – № 2 (8). – С. 162 – 167. (*Особистий внесок здобувача – планування експерименту, спектрометричні вимірювання, обробка, аналіз отриманих результатів.*)
8. Бондарьков М. Д. Исследование вертикальной миграции искусственных радионуклидов чернобыльского происхождения в почвах Полесья / М. Д. Бондарьков, М. В. Желтоножская, А. И. Липская, Л. В. Садовников, В. В. Токаревский // Збірник наукових праць Інституту ядерних досліджень. – 2003. – № 3 (11). – С. 106 – 113. *(Особистий внесок здобувача – планування експерименту, спектрометричні вимірювання, обробка, аналіз отриманих результатів.)*
9. Бондарьков М. Д. Сравнительный анализ экспериментальных и расчетных данных активности и нуклидного состава графитовых элементов каналов реактора 2-го энергоблока ЧАЭС / Д. Г. Бобро, М. Д. Бондарьков, А. В. Носовский, В. Н.

Павлович, В. В. Фомин, А. В. Шацман // Ядерная и радиационная безопасность. – 2003. – Т. 3. – С. 78 – 86. (*Особистий внесок здобувача – планування експерименту, спектрометричні вимірювання, обробка, аналіз отриманих результатів.*)

10. Бондарьков М. Д. Исследование «горячих» частиц из 5-км зоны ЧАЭС / М. Д. Бондарьков, В. А. Желтоножский, М. В. Желтоножская, Л. В. Садовников // Збірник наукових праць Інституту ядерних досліджень. – 2003. – № 3 (11). – С. 121 – 126. (*Особистий внесок здобувача – планування експерименту, спектрометричні вимірювання, обробка, аналіз отриманих результатів.*)
11. Bondarkov M. D. Reconstruction of radioactive plume characteristics along Chernobyl's Western Trace / R. K. Chesser, M. D. Bondarkov, R. J. Baker, J. K. Wickliffe, B. E. Rodgers // Journal of Environmental Radioactivity. – 2004. – Vol. 71 (2). – P. 147–157. (*Особистий внесок здобувача – планування експерименту, спектрометричні вимірювання, обробка, аналіз отриманих результатів.*)
12. Бондарьков М. Д. Исследование миграции радионуклидов в 30-км зоне ЧАЭС / М. Д. Бондарьков, С. П. Гащак, М. В. Желтоножская, А. И. Липская, Л. В. Садовников // Збірник наукових праць Інституту ядерних досліджень. – 2005. – № 3(16). – С. 90 – 95. (*Особистий внесок здобувача – планування експерименту, спектрометричні вимірювання, обробка, аналіз отриманих результатів.*)
13. Бондарьков М. Д. Определение содержания плутония в пробах 30-км зоны Чернобыльской АЭС / М. Д. Бондарьков, Ю. А. Иванов, В. А. Желтоножский, М. В. Желтоножская // Атомная энергия. – 2006. – Т. 100, № 2. – С. 146 – 150. (*Особистий внесок здобувача – планування експерименту, спектрометричні вимірювання, обробка, аналіз отриманих результатів.*)
14. Бондарьков М. Д. Изучение глобальных выпадений, связанных с атомными взрывами / М. Д. Бондарьков, М. В. Желтоножская // Проблеми безпеки атомних електростанцій і Чорнобиля. – 2006. – Вып. 5. – С. 157 - 160. (*Особистий внесок здобувача – планування експерименту, спектрометричні вимірювання, обробка, аналіз отриманих результатів.*)
15. Bondarkov M. D. Variation in mitochondrial DNA control region haplotypes in populations of the bank vole, Clethrionomys glareolus, living in the Chernobyl environment, Ukraine / J. K. Wickliffe, Y. V. Dunina-Barkovskaya, M. D. Bondarkov, S. P. Gaschak, B. E. Rodgers, R. K. Chesser, R. J. Baker // Environmental Toxicology and Chemistry. – 2006. – Vol. 25 (2). – P. 503 – 508. (*Особистий внесок здобувача – спектрометричні вимірювання, обробка, аналіз отриманих результатів.*)
16. Бондарьков М. Д. Нерешенные радиоэкологические проблемы зоны отчуждения ЧАЭС на поздней фазе аварии / Ю. А. Иванов, М. Д. Бондарьков // Радиационная биология. Радиоэкология. – 2009. – Т. 49, № 3. – С. 302–310. (*Особистий внесок здобувача – обговорення плану, уточнення висновків.*)
17. Бондарьков М. Д. Исследования радиоактивности в технологических отходах Южно-Украинской АЭС / М. Д. Бондарьков, А. М. Максименко, И. Н. Вишневский, В. А. Желтоножский, М. В. Желтоножская, Л. В. Садовников, С. В. Ильичев, В. В. Боярищев, В. Мюллер // Ядерная физика и энергетика. – 2006. – № 2 (18). – С. 88 – 92. (*Особистий внесок здобувача – планування експерименту, спектрометричні вимірювання, обробка, аналіз отриманих результатів.*)

18. Бондарьков М. Д. Величина и структура дозовых нагрузок у мелких млекопитающих Чернобыльской зоны через 19 лет после аварии / Ю. А. Маклюк, С. П. Гащак, А. М. Максименко, М. Д. Бондарьков, Н. Бересфорд // Ядерная физика и энергетика – 2007. – № 3 (21). – С. 81 – 91. (*Особистий внесок здобувача – планування експерименту, спектрометричні вимірювання, обробка, аналіз отриманих результатів.*)
19. Бондарьков М. Д. Определение содержания изотопов плутония в чернобыльских образцах по характеристическому L_x-излучению урана / М. Д. Бондарьков, М. В. Желтоножская, А. М. Максименко, Л. В. Садовников // Проблеми безпеки атомних електростанцій і Чорнобиля. – 2005. – Вип. 2. – С. 108 – 112. (*Особистий внесок здобувача – планування експерименту, спектрометричні вимірювання, обробка, аналіз отриманих результатів.*)
20. Бондарьков М. Д. Вертикальная миграция радионуклидов на исследовательских полигонах Чернобыльской зоны / М. Д. Бондарьков, М. В. Желтоножская, С. П. Гащак, Ю. А. Иванов, А. М. Максименко, В. И. Мартыненко, Б. Роджерс, Р. К. Чессер // Проблеми безпеки атомних електростанцій і Чорнобиля. – 2006. – Вип. 6. – С. 155–163. (*Особистий внесок здобувача – планування експерименту, спектрометричні вимірювання, обробка, аналіз отриманих результатів.*)
21. Бондарьков М. Д. Многолетняя динамика радиоактивного загрязнения (^{90}Sr, ^{137}Cs) мелких млекопитающих в Чернобыльской зоне / Ю. А. Маклюк, А. М. Максименко, С. П. Гащак, М. Д. Бондарьков, И. В. Чижевский // Экология – 2007. – Т. 38, № 3. – С. 198 – 206. (*Особистий внесок здобувача – планування експерименту, спектрометричні вимірювання, обробка, аналіз отриманих результатів.*)
22. Бондарьков М. Д. Оценка параметров выведения ^{90}Sr и ^{137}Cs из организма диких и лабораторных мелких млекопитающих in vivo после их естественного загрязнения в Чернобыльской зоне / Ю. А. Маклюк, С. П. Гащак, А. М. Максименко, М. Д. Бондарьков // Радиационная биология. Радиоэкология. – 2007. – Т. 47, № 5. – С. 530 – 542. (*Особистий внесок здобувача – планування експерименту, спектрометричні вимірювання, обробка, аналіз отриманих результатів.*)
23. Бондарьков М. Д. Особенности радиоактивного загрязнения мелких птиц в Чернобыльской зоне в 2003–2005 годах / С. П. Гащак, Ю. А. Маклюк, А. М. Максименко, М. Д. Бондарьков, В. И. Мартыненко, И. В. Чижевский, Т. А. Муссо // Радиационная биология. Радиоэкология. – 2008. – Т. 48, № 1. – С. 28 – 47. (*Особистий внесок здобувача – планування експерименту, спектрометричні вимірювання, обробка, аналіз отриманих результатів.*)
24. Бондарьков М. Д. Исследование содержания радиоактивности графита Чернобыльской АЭС / М. Д. Бондарьков, Д. М. Бондарьков, А. М. Максименко, В. А. Желтоножский, М. В. Желтоножская, В. В. Петров, А. И. Савин // Изв. РАН. Сер. физ. – 2009. – Т. 73, № 2. – С. 274 –278. (*Особистий внесок здобувача – планування експерименту, спектрометричні вимірювання, обробка, аналіз отриманих результатів.*)
25. Бондарьков М. Д. Радиоактивность в технологических отходах АЭС / М. Д. Бондарьков, А. М. Максименко, И. Н. Вишневский, В. А. Желтоножский, М. В. Желтоножская, Л. В. Садовников, С. В. Ильичев, В. В. Боярищев // Изв. РАН. – 2009. – Т. 73, № 2. – С. 279 – 282. (*Особистий внесок здобувача – планування експерименту, спектрометричні вимірювання, обробка, аналіз отриманих результатів.*)

26. Bondarkov M. D. Environmental problems associated with decommissioning the Chernobyl nuclear power plant cooling pond / B. Ya. Oskolkov, M. D. Bondarkov, S. P. Gashchak, A. M. Maksymenko, V. M. Maksymenko, V. I. Martynenko, E. B. Farfán, G. T. Jannik, J. C. Marra // Health Physics. – 2010. – Vol. 99, № 5. – P. 639 – 648. (*Особистий внесок здобувача – планування експерименту, спектрометричні вимірювання, обробка, аналіз отриманих результатів.*)
27. Bondarkov M. D. Assessment of beta particle flux from surface contamination as a relative indicator for radionuclide distribution on external surfaces of a multi-story building in Pripyat / E. B. Farfán, S. P. Gashchak, A. M. Maksymenko, G. T. Jannik, J. C. Marra, M. D. Bondarkov, E. H. Donnelly // Health Physics Journal. – 2011. – Vol. 100, № 2. – P. 221 – 227. *(Особистий внесок здобувача – планування експерименту, спектрометричні вимірювання, обробка, аналіз отриманих результатів.)*
28. Bondarkov M. D. Radiation Dose Assessment for the Biota of Terrestrial Ecosystems in the Shoreline Zone of the Chernobyl Nuclear Power Plant Cooling Pond / B. Ya. Oskolkov, M. D. Bondarkov, S. P. Gashchak, A. M. Maksymenko, T. G. Hinton, D. Coughlin, G. T. Jannik, E. B. Farfán // Health Physics. – 2011. – Vol. 101, № 4. – P. 349 - 361. (*Особистий внесок здобувача – планування експерименту, спектрометричні вимірювання, обробка, аналіз отриманих результатів.*)
29. Bondarkov M. D. Vertical Migration of Radionuclides in the Vicinity of the Chernobyl Confinement Shelter / M. D. Bondarkov, V. A. Zheltonozhsky, M. V. Zheltonozhskaya, N. V. Kulich, A. M. Maksimenko, E. B. Farfán, G. T. Jannik, J. C. Marra // Health Physics. – 2011. – Vol. 101, № 4. – P. 362 -367. (*Особистий внесок здобувача – планування експерименту, спектрометричні вимірювання, обробка, аналіз отриманих результатів.*)
30. Bondarkov M. D. Assessment of the Radionuclide Composition of “Hot Particles” Sampled in the Chernobyl Nuclear Power Plant Fourth Reactor Unit / M. D. Bondarkov, V. A. Zheltonozhsky, M. V. Zheltonozhskaya, N. V. Kulich, A. M. Maksimenko, E. B. Farfán, G. T. Jannik, J. C. Marra // Health Physics. – 2011. – Vol. 101, № 4. – P. 368 - 374. (*Особистий внесок здобувача – планування експерименту, спектрометричні вимірювання, обробка, аналіз отриманих результатів.*)
31. Bondarkov M. D. Method for Simultaneous ^{90}Sr and ^{137}Cs in-Vivo Measurements of Small Animals and Other Environmental Media Developed for the Conditions of the Chernobyl Exclusion Zone / M. D. Bondarkov, A. M. Maksimenko, S. P. Gaschak, V. A. Zheltonozhsky, G. T. Jannik, E. B. Farfán // Health Physics. – 2011. – Vol. 101, № 4. – P. 383 - 392. (*Особистий внесок здобувача – планування експерименту, спектрометричні вимірювання, обробка, аналіз отриманих результатів.*)
32. Bondarkov M. D. Radiation Ecology Issues Associated With Murine Rodents and Shrews in the Chernobyl Exclusion Zone / S. P. Gaschak, Y. A. Maklyuk, A. M. Maksimenko, M. D. Bondarkov, G. T. Jannik, E. B. Farfán // Health Physics. – 2011. – Vol. 101, № 4. – P. 416 - 430. (*Особистий внесок здобувача – планування експерименту, спектрометричні вимірювання, обробка, аналіз отриманих результатів.*)
33. Bondarkov M. D. Radioactive Waste Management in the Chernobyl Exclusion Zone: 25 Years Since the Chernobyl Nuclear Power Plant Accident / B. Y. Oskolkov, M. D. Bondarkov, L. I. Zinkevich, N. I. Proskura, E. B. Farfán, J. T. Jannik // Health

Physics. – 2011. – Vol. 101, № 4. – P. 431 - 441. (*Особистий внесок здобувача – підбір та аналіз матеріалу, розробка плану огляду., аналіз отриманих результатів.*)

34. Bondarkov M. D. Environmental Radiation Monitoring in the Chernobyl Exclusion Zone – History and Results 25 Years After / M. D. Bondarkov, B. Y. Oskolkov, S. P. Gaschak, S. I. Kireev, A. M. Maksimenko, N. I. Proskura, G. T. Jannik, E. B. Farfán // Health Physics. – 2011. – Vol. 101, № 4. – P. 442 - 485. (*Особистий внесок здобувача – підбір та аналіз матеріалу, розробка плану огляду., аналіз отриманих результатів.*)
35. Bondarkov M. D. Overview of the Cooperation Between the Chernobyl Center's International Radioecology Laboratory in Slavutych, Ukraine, and U.S. Research Centers Between 2000 and 2010 / M. D. Bondarkov, S. P. Gaschak, B. Y. Oskolkov, A. M. Maksimenko, E. B. Farfán, G. T. Jannik, E. D. LaBone // Health Physics. – 2011. – Vol. 101, № 4. – P. 338 - 348. (*Особистий внесок здобувача – підбір та аналіз матеріалу, розробка плану огляду., аналіз отриманих результатів*).
36. Бондарьков М. Д. Разработка и аттестация метода радиохимического анализа стронция-90 в жидких середовищах / А. М. Максименко, М. Д. Бондарьков, А. И. Заграй, М. И. Звеницкий, Н. П. Черникова // Проблемы Чернобыльской зоны отчуждения. – 2009. – № 9. – С. 141 – 146. (*Особистий внесок здобувача – підбір та аналіз матеріалу, розробка плану експерименту., аналіз отриманих результатів.*)
37. Бондарьков М. Д. Радиоэкология урбанизированного ландшафта на примере г. Припять / С. П. Гащак, М. Д. Бондарьков, Ю. А. Иванов, А. М. Максименко, В. И. Мартыненко, А. Н. Архипов // Проблемы Чернобыльской зоны отчуждения. – 2009. – № 9. – С. 40 – 56. (*Особистий внесок здобувача – планування експерименту, спектрометричні вимірювання, обробка, аналіз отриманих результатів.*)
38. Bondarkov M. D. Assessment of radionuclide export from Chernobyl zone via birds 18 years following the accident / S. Gaschak, M. Bondarkov, Ju. Makluk, A. Maksimenko, V. Martynenko, I. Chizhevsky, T. Mousseau // Radioprotection. – 2009. – Vol. 44 (5). – P. 849 – 852. – (Proc. of the Int. congr. “Radioecology and environment radioactivity: ECORAD-2008”. Bergen, Norway, 15–20 June, 2008). (*Особистий внесок здобувача – планування експерименту, спектрометричні вимірювання, обробка, аналіз отриманих результатів.*)
39. Бондарьков М. Д. Комплексная характеристика сухопутных экосистем на берегах водоема-охладителя ЧАЭС накануне его осушения / С. П. Гащак, Б. Я. Осколков, М. Д. Бондарьков, А. М. Максименко, В. М. Максименко, В. И. Мартыненко, Т. Г. Хинтон // Проблемы Чернобыльской зоны отчуждения. – 2009. – № 9. – С. 57 – 75. *(Особистий внесок здобувача – планування експерименту, спектрометричні вимірювання, обробка, аналіз отриманих результатів).*
40. Бондарьков М. Д. Запас ^{90}Sr и ^{137}Cs в биомассе птиц на территории Чернобыльской зоны и размер выноса радионуклидов с птицами за ее пределы / С. П. Гащак, М. Д. Бондарьков, Ю. А. Маклюк, А. М. Максименко, В. И. Мартыненко, И. В. Чижевский // Проблемы Чернобыльской зоны отчуждения. – 2009. – № 9. – С. 87–101. (*Особистий внесок здобувача – планування експерименту, спектрометричні вимірювання, обробка, аналіз отриманих результатів.*)
41. Бондарьков М. Д. Радиоэкология амфибий Чернобыльской зоны / С. П. Гащак, Ю. А. Маклюк, А. М. Максименко, М. Д. Бондарьков // Проблемы Чернобыль-

ской зоны отчуждения. – 2009. – № 9. – С. 76 - 86. (*Особистий внесок здобувача – планування експерименту, спектрометричні вимірювання, обробка, аналіз отриманих результатів.*)

42. Бондарьков М. Д. Подвижность радионуклидов выброса ЧАЭС в почвах отчужденных территорий / Ю. А. Иванов, С. Е. Левчук, С. И. Киреев, М. Д. Бондарьков, Ю. В. Хомутинин // Ядерная физика и энергетика. – 2011. – Т. 12, № 4. – С. 375- 385. (*Особистий внесок здобувача – планування експерименту, спектрометричні вимірювання, обробка, аналіз отриманих результатів.*)
43. Бондарьков М. Д. Поведение чернобыльских выпадений цезия в молоке регионов вблизи 30-км зоны ЧАЭС / М. Д. Бондарьков, В. А. Желтоножский, М. Ю. Гриджук, Н. П. Донец, К. Мюк, М. А. Ухин // 48 Совещание по ядерной спектроскопии и структуре ат. ядра. – М.: 1998. – С. 278. (*Особистий внесок здобувача – планування експерименту, спектрометричні вимірювання, обробка, аналіз отриманих результатів.*)
44. Бондарьков М. Д. Поведение Чернобыльских выпадений вблизи 30-км зоны ЧАЭС / М. Д. Бондарьков, Н. П. Донец, В. А. Желтоножский, А. В. Чупов // Труды международной конференции «Радиоактивность при ядерных взрывах и авариях». – М.: 2000. – С. 374 – 379. (*Особистий внесок здобувача – планування експерименту, спектрометричні вимірювання, обробка, аналіз отриманих результатів.*)
45. Бондарьков М. Д. Исследование вертикальной миграции ^{137}Cs и ^{125}Sb в почве / М. Д. Бондарьков, В. А. Желтоножский, Н. П. Донец, Е. Д. Стукин, А. В. Чупов // Атомная энергетика и промышленность Украины. – 1999. – № 2. – С. 32 – 34. (*Особистий внесок здобувача – планування експерименту, спектрометричні вимірювання, обробка, аналіз отриманих результатів.*).
46. Бондарьков М. Д. Особенности радиоактивного загрязнения амфибий Чернобыльской зоны / М. Д. Бондарьков, С. П. Гащак , Ю. А. Горяная, А. М. Максименко, А. А. Шульга, И. В. Чижевский, Т. Олексик // Наукові і технічні аспекти Чорнобиля: Зб. наук. ст. / За заг. ред. В. М. Глигала, А. В. Носовського. – К.: ІВЦ «Видавництво «Політехніка», 2002. – Вип. 4. – С. 508 – 517. (*Особистий внесок здобувача – планування експерименту, спектрометричні вимірювання, обробка, аналіз отриманих результатів.*)
47. Бондарьков М. Д. Некоторые характеристики метаболизма ^{90}Sr и ^{137}Cs у детенышей рыжей полевки / М. Д. Бондарьков, С. П. Гащак, Ю. А. Горяная, А. М. Максименко, А. Н. Рябушкин, О. В. Салий, А. А. Шульга, С. Аван // Наукові і технічні аспекти Чорнобиля: Зб. Наук. ст. / За заг. ред. В. М. Глигала, А. В. Носовського. – К.: ІВЦ «Видавництво «Політехніка», 2002. – Вип. 4. – С. 477 – 484. (*Особистий внесок здобувача – планування експерименту, спектрометричні вимірювання, обробка, аналіз отриманих результатів.*)
48. Bondarkov M. D. Half-lives of self-purification for various isotopes in soils of the Chernobyl exclusion zone / M. Bondarkov, Yu. Ivanov, D. Bondarkov, S. Gaschak, A. Maksimeko, R. Chesser, B. Rodgers, M. Zheltonozhskaya // Radioprotection. – 2009. – Vol. 44 (5). – P. 90 9– 911. – (Proc. of the Int. congr. “Radioecology and environment radioactivity: ECORAD-2008”. Bergen, Norway, 15–20 June, 2008). (*Особистий внесок здобувача – планування експерименту, спектрометричні вимірювання, обробка, аналіз отриманих результатів.*)
49. Bondarkov M. D. Radionuclides accumulation and dose burden in small mammals in Chornobyl zone / M. D. Bondarkov, S. P. Gaschak, Ju. A. Goryanaya, A. M. Maxi-

menko, R. K. Chesser, R. G. Baker // Protection of the Environment from the Effects of Ionizing Radiation : intern. conf., 6 - 10 oct. 2003: proc. conf. - Stockholm, Sweden, IAEA–CN–109/100, 2003. - P. 237 - 241. (*Особистий внесок здобувача – планування експерименту, спектрометричні вимірювання, обробка, аналіз отриманих результатів.*)

50. Bondarkov M. D. Parameters of radiation situation on the territory of the Red Forest site in the Chornobyl exclusion zone as impact factors for wild non-human species / M. D. Bondarkov, S. P. Gaschak, Yu. A. Ivanov, A. M. Maximenko, A. N. Ryabushkin, V. A. Zheltonozhsky, L. V. Sadovnikov, R. K. Chesser, R. G. Baker // Protection of the Environment from the Effects of Ionizing Radiation : intern. conf., 6 - 10 oct., 2003: proc. conf. - Stockholm, Sweden. – IAEA–CN–109/100, 2003. – P. 196 – 199. (*Особистий внесок здобувача – планування експерименту, спектрометричні вимірювання, обробка, аналіз отриманих результатів.*)
51. Bondarkov M. D. Penetration of radionuclides (^{90}Sr, ^{137}Cs) into construction materials in the Chornobyl zone / M. Bondarkov, S. Gaschak, A. Maksimenko, V. Martynenko, V. Maksimenko, A. Shulga, A. Arkhipov // Proc. of the 2nd Int. Conf. on Radioactivity in the Environment (Nice, France, 2–6 Oct. 2005). – Osteras: NRPA, 2005. – P. 483–486. (*Особистий внесок здобувача – планування експерименту, спектрометричні вимірювання, обробка, аналіз отриманих результатів.*)
52. Bondarkov M. D. Radioecology of small birds in the Chornobyl zone / S. Gaschak, M. Bondarkov, Ju. Goryanaya, A. Maksimenko, V. Maksimenko, V. Martynenko, I. Chizhevsky, R. Barchuk, A. Shulga, A. P. Møller, T. A. Mousseau // Proc. of the 2nd Int. Conf. on Radioactivity in the Environment (Nice, France, 2 – 6 Oct. 2005). – Osteras: NRPA, 2005. – P. 494 – 497. (*Особистий внесок здобувача – планування експерименту, спектрометричні вимірювання, обробка, аналіз отриманих результатів.*)
53. Bondarkov M. D. Radioactive contamination of terrestrial ecosystems around Chernobyl NPP's cooling pond prior to drawdown / S. Gaschak, B. Oskolkov, M. Bondarkov, A. Maksimenko, V. Maksimenko, V. Martynenko, T. Hinton // Proc. of the Int. Conf. on radioecology and environment radioactivity (Bergen, Norway, 15–20 June 2008): Posters. Part 2. – Osteras: NRPA, 2008. – P. 123–126. (*Особистий внесок здобувача – планування експерименту, спектрометричні вимірювання, обробка, аналіз отриманих результатів.*)

АНОТАЦІЯ

Бондарьков М. Д. Наукове обґрунтування й оптимізація методів забезпечення радіоекологічного моніторингу й контролю РАО АЕС. - Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 21.06.01 - екологічна безпека. - Інститут проблем безпеки АЕС НАН України. Київ, 2012.

Дисертація присвячена обґрунтуванню шляхів оптимізації методів забезпечення радіоекологічного моніторингу (РМ) в Україні. Для цього в роботі розглянуто особливості побудови РМ на різних рівнях, проведено аналіз сучасних вимог до РМ, розглянуто методи забезпечення РМ, запропоновано використання для приладового оснащення лабораторій нових спрощених методів, розроблених у даній роботі. У дисертаційній роботі запропоновано підсилити радіобіологічну складову моніторингу, проаналізовано переваги й недоліки запропонованих методів.

Проведено з використанням запропонованих методів дослідження просторового й вертикального розподілу радіонуклідів у ґрунтах найбільш забрудненої частини Чорнобильської зони. Розраховано параметри вертикальної міграції ізотопів ^{154}Eu, $^{238\text{-}240}$Pu і ^{241}Am у профілях ґрунтів ближньої ЧЗВ ЧАЕС. Уточнено параметри вертикальної міграції ^{90}Sr, ^{137}Cs. Проведено розрахунки екологічних і ефективних періодів напівочищення вищезгаданих ізотопів для різних типів ґрунтів, оцінки дозових навантажень на біоту й проведено радіоекологічну характеризацію дослідницьких ділянок водойми-охолоджувача. Вивчено особливості радіоекології птахів, мишоподібних гризунів, землерийок і амфібій. Оцінено дозові навантаження на ці види та їхню відповідність 103 Рекомедації МКРЗ. Оцінено міжвидові відмінності забруднення диких мишоподібних гризунів, комахоїдних, горобиних птахів, амфібій. Проведено дослідження особливостей радіоекологічного забруднення урбанізованого ландшафту на прикладі м. Прип'ять. Уперше показано, що активність опроміненого графіту ГРП-2-125 визначається насамперед вмістом ^{14}C, а також вмістом радіонуклідів домішкового й технологічного походження (^{3}H, ^{36}Cl, ^{55}Fe, ^{59}Ni, ^{60}Co, ^{63}Ni, ^{93m}Nb, ^{108m}Ag, ^{133}Ba) і продуктів поділу палива (^{90}Sr, ^{134}Cs, ^{137}Cs, ^{154}Eu, ^{155}Eu. Уперше проведено роботи з вимірювання вмісту радіонуклідів у РАВ ПУАЕС, що дало змогу розробити нові методи, необхідні для харатеризації твердих і рідких РАВ АЕС.

Практичне значення дисертаційної роботи полягає в тому, що розроблені методи нерадіохімічного визначення вмісту радіостронцію, альфа-випромінюючих ізотопів плутонію й америцію дозволяють істотно прискорити й полегшити оцінку концентрації відповідних нуклідів в об'єктах навколишнього середовища й істотно знизити економічні витрати. Метод прижиттєвого вимірювання вмісту ^{90}Sr у дрібних тварин відкриває принципово нові можливості для дослідників з радіоекології й радіобіології. Розроблені методи активно застосовуються як у наукових дослідженнях, так і в повсякденній роботі атомних станцій.

Ключові слова: радіоекологічний моніторинг, вимірювання радіонуклідів, універсальні прилади, гамма-бета-спектрометрія, стронцій-90, цезій-137, америцій-241, ізотопи плутонію, дозові навантаження, радіоактивні відходи, графіт.

АННОТАЦИЯ

Бондарьков М.Д. Научное обоснование и оптимизация методов обеспечения радиоэкологического мониторинга и контроля РАО АЭС. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 21.06.01 – экологическая безопасность. - Институт проблем безопасности АЭС НАН Украины. Киев, 2012.

Диссертация посвящена обоснованию путей оптимизации методов обеспечения радиоэкологического мониторинга (РМ) в Украине. Для этого в работе рассмотрены особенности построения РМ на разных уровнях, проведен анализ современных требований к РМ, рассмотрены методы обеспечения РМ, предложено использование для приборного оснащения лабораторий новых упрощенных методов, разработанных в данной работе. В диссертационной работе предложено усилить радиобиологическую составляющую мониторинга, проанализированы достоинства и недостатки предложенных методов.

Проведено с использованием предложенных методов исследование пространственного и вертикального распределения радионуклидов в почвах наиболее загрязненной части Чернобыльской зоны. Впервые рассчитан параметры вертикальной миграции изотопов ^{154}Eu, $^{238-240}$Pu и ^{241}Am в почвах ближней зоны ЧАЭС. Уточнены параметры вертикальной миграции ^{90}Sr, ^{137}Cs. Проведены расчеты экологических и эффективных периодов полуочищения вышеупомянутых изотопов для различных типов почв, оценки дозовых нагрузок на биоту и проведено радиоэкологическую характеризацию опытных участков пруда-охладителя. Изучены особенности радиоэкологии птиц, мышевидных грызунов, землероек и амфибий. Оценены дозовые нагрузки на эти виды и их соответствие 103 Рекомедации МКРЗ. Оценены межвидовые различия в загрязнении диких мышевидных грызунов, насекомоядных, воробьиных птиц, амфибий. Проведено исследование особенностей радиоэкологического загрязнения урбанизированного ландшафта на примере г. Припять. Впервые показано, что активность облученного графита ГРП-2-125 определяется прежде всего содержанием ^{14}C, а также содержанием радионуклидов примесного и технологического происхождения (^{3}H, ^{36}Cl, ^{55}Fe, ^{59}Ni, ^{60}Co, ^{63}Ni, ^{93m}Nb, ^{108m}Ag, ^{133}Ba) и продуктов деления топлива (^{90}Sr, ^{134}Cs, ^{137}Cs, ^{154}Eu, ^{155}Eu). Впервые проведены работы по измерению содержания радионуклидов в РАО ЮУАЭС, что позволило разработать новые методы, необходимые для харатеризации твердых и жидких РАО АЭС.

Практическое значение диссертационной работы состоит в том, что разработанные методы нерадиохимического определения содержания радиостронция, альфа-излучающих изотопов плутония и америция позволяют существенно ускорить и облегчить оценку концентрации соответствующих нуклидов в объектах окружающей среды и существенно снизить экономические затраты. Метод прижизненного измерения содержания ^{90}Sr в мелких животных открывает принципиально новые возможности для исследователей по радиоэкологии и радиобиологии. Разработанные методы активно применяются как в научных исследованиях, так и в повседневной работе атомных станций. В частности, методы характеризации РАО используются на АЭС Украины (ЮУАЭС и ЧАЭС).

Ключевые слова: радиоэкологический мониторинг, измерение радионуклидов, универсальные приборы, гамма-бета-спектрометрия, стронций-90, цезий-137, америций-241, изотопы плутония, дозовые нагрузки, радиоактивные отходы, графит.

SUMMARY

Bondarkov M. D. Scientific substantiation of ways of radiation monitoringoptimization in Ukraine. – Manuscript.
The dissertation for the scientific degree of Doctor of Technical Sciences, specialty 21.06.01 - ecological safety. - Institute for Safety Problem Nuclear Power Plants. Kiev, 2012.

The dissertation is devoted to the substantiation of the ways to optimize methods of providing radiecological monitoring (RM) in Ukraine. For this purpose the design features of RM at different levels, the analysis of modern requirements for the RM, the methods for RM ensuring were considered in the dissertation, the use for instrumentation supply of laboratories of new simplified methods, that were developed in this paper, was proposed.

This dissertation proposed to strengthen radiobiological component of monitoring, the advantages and disadvantages of the proposed methods were analyzed.

The research of the spatial and vertical distribution of radionuclides in soils of the most polluted part of the Chernobyl zone was conducted using the proposed methods. For the first time the parameters of vertical migration of the isotopes ^{154}Eu, $^{238-240}$Pu and ^{241}Am in soil profiles of ChNPP close zone were calculated. The parameters of vertical migration of ^{90}Sr, ^{137}Cs were refined. The calculations of effective environmental and semi-refined periods of above mentioned isotopes for different soil types were conducted, the estimation of dose rates to biota was done, and radioecological characterization of the test sites of the cooling pond was conducted. The features of radioecology of birds, rodents and shrews, bats and amphibians were studied. The dose rates for these species were assessed and their compliance with 103 ICRP Guiding. The species differences in the pollution of wild rodents, insectivores, passerine birds, amphibians and bats on a large amount of factual material were estimated. The investigation of the radiecological contamination of the features of the urbanized landscape was conducted on the example of Pripyat sity. For the first time, it was shown that the activity of irradiated graphite GRP-2-125 is determined primarily by the content of ^{14}C, as well as the radionuclide content of the impurity and technological origin (^{3}H, ^{36}Cl, ^{55}Fe, ^{59}Ni, ^{60}Co, ^{63}Ni, ^{93m}Nb, ^{108m}Ag, ^{133}Ba) and products fuel division (^{90}Sr, ^{134}Cs, ^{137}Cs, ^{154}Eu, ^{155}Eu). For the first time, works on measurements of radionuclides in RAW SUNPP were conducted, that allowed to develop new methods necessary for characterization of solid and liquid RAW NPP.

The practical significance of the dissertation is that the developed methods of nonradiochemical determination of radiostrontium activity, alpha emitting isotopes of plutonium, which can significantly hasten and facilitate the evaluation of the corresponding concentration radionuclides in the environment, and significantly reduce economic costs. The method of intravital measurement of ^{90}Sr in small animals opens up fundamentally new opportunities for researchers in radioecology and radiobiology. The developed methods are extensively used in researches and in the daily work of nuclear power plants. In particular, methods for the characterization of RAW are used at Ukrainian NPP (SUNPP and ChNPP).

Key words: radioecological monitoring, measurement of radionuclides, gamma-beta-spectrometry, stronium-90, cesium-137, ameritium-241, plutonium izotopes, dose load, radioactive waste, graphite.