

**ГОСУДАРСТВЕННАЯ КОРПОРАЦИЯ ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ «РОСАТОМ»
ФГУП «НПО “РАДИЕВЫЙ ИНСТИТУТ им. В. Г. ХЛОПИНА”»**

**ТРУДЫ
РАДИЕВОГО ИНСТИТУТА
им. В. Г. ХЛОПИНА**

ТОМ XIV



**Санкт-Петербург
2009**

УДК 621.039.58

В XIV том включены результаты работ сотрудников Радиевого института им. В. Г. Хлопина, принимавших участие в ликвидации последствий аварии на 4-м блоке ЧАЭС как в оперативном режиме в 1986 г., так и в 1987–1992 гг. в ходе систематических исследований радиационной обстановки на промплощадке ЧАЭС, над аварийным реактором, в 30-километровой зоне, в Киеве, в Северо-Западном регионе, в водных системах р. Припять–Киевское водохранилище–р. Днепр, на Балтике. Представлены свойства топливосодержащих новообразований, их распределение и поведение в окружающей среде. Описаны современные подходы и варианты преобразования объекта «Укрытие» в экологически безопасную систему. Приведены воспоминания участников работ по ликвидации последствий аварии.

«Труды Радиевого института им. В. Г. Хлопина» включены в Реферативный журнал и базы данных ВИНТИ, а также в базу данных INIS. Сведения о Трудах ежегодно публикуются в международной справочной системе по периодическим и продолжающимся изданиям “Ulrich’s Periodical Directory”.

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

В. Н. Романовский

РЕДКОЛЛЕГИЯ

В. Г. Богданов (ответственный секретарь), Б. Я. Зильберман,
Ю. Л. Каминский (зам. гл. редактора), Б. К. Куделин,
А. А. Римский-Корсаков, В. Г. Савоненков, Д. Н. Суглобов,
Л. Г. Царицына (зам. гл. редактора), В. П. Эйсмонт

ISSN 1996–7748

© ФГУП «НПО “Радиевый институт им. В. Г. Хлопина”», 2009

Предисловие

В XIV томе Трудов Радиевого института собраны материалы исследований, связанных с ликвидацией последствий аварии на Чернобыльской АЭС (1986–1992 гг.). Авария на ЧАЭС вошла в историю как глобальная радиационная катастрофа, создавшая серьезные проблемы, значительная часть которых еще не решена. Несмотря на ведущиеся более 20 лет исследования нет единого мнения по целому ряду вопросов, дискуссия по которым продолжается и в наше время.

Радиевый институт одним из первых научных учреждений Министерства среднего машиностроения (МСМ) подключился к работам по ликвидации последствий аварии, оперативно приступив к исследованиям на 4-м блоке ЧАЭС, в 30-километровой зоне, а также водных системах и территориях европейской части страны.

Руководство института провело большую работу по организации и оснащению экспедиционных бригад, подготовке и использованию возможностей лабораторий в Ленинграде и Гатчине. Сотрудники института создали радиометрическую и геохимическую лаборатории в Чернобыле. В Радиевом институте были открыты и профинансированы крупные исследовательские темы по проблемам аварии на ЧАЭС.

Наиболее сложным был начальный этап работ в мае–июле 1986 г. В экстремальной обстановке радиационной аварии требовалось получить необходимую информацию, на основе которой принимались оперативные решения. Сотрудники института с честью выдержали серьезные испытания.

Высокий научный уровень и богатый разносторонний опыт позволяли решать сложные задачи в различных направлениях исследований: ядерно-физических, радиохимических, геохимических и радиэкологических. Существенное значение имело регулярное проведение в Радиевом институте традиционных экспедиционно-полевых исследовательских работ.

Содержание статей сборника свидетельствует о широком охвате проблем последствий аварии, касающихся радиационной обстановки, состояния аварийного блока, характера и количественного распределения выброшенного из реактора облученного топлива и отдельных радионуклидов, прогноза развития последствий радиоактивного загрязнения, миграционных процессов и пр.

Исключительно важное значение в послеаварийный период имели профессиональные оценки сложившейся ситуации, обоснованные надежными количественными данными по уровням радиоактивного загрязнения территорий, акваторий и объектов окружающей среды.

До мая 1989 года существовали ограничения для открытой публикации результатов исследований, связанных с ликвидацией последствий аварии на ЧАЭС. До этого времени общедоступной была лишь информация, подготовленная для экспертов МАГАТЭ в августе 1986 г.

Начиная с 1989 года журнал «Радиохимия» опубликовал десятки статей сотрудников Радиевого института по изучению последствий аварии. Институт активно сотрудничает с зарубежными специалистами и организациями, участвует в международных и отечественных конференциях, посвященных проблемам Чернобыля.

Определенное значение для работающих в аварийной зоне ЧАЭС имел психологический фактор, влияющий на всех, кто видел последствия аварии на разрушенном энергоблоке станции, брошенные поселки и безлюдный город атомщиков – Припять. Восприятия этой стороны аварии отражены в личных воспоминаниях участников ликвидационных работ в 1986 году, которые включены в сборник.

Нельзя забывать, что еще одним негативным фактором, безусловно дающим дополнительную психологическую нагрузку, явился распад в конце 1991 года Советского Союза и последующее прекращение финансирования чернобыльской тематики.

Авария на ЧАЭС вызвала острую радиофобию населения многих стран, поставила под сомнение перспективу развития мировой атомной энергетики. Только тщательный и компетентный анализ происшедших событий, причин и последствий тяжелой аварии мог вернуть доверие к оценкам безопасности АЭС.

В первую очередь эта проблема наиболее актуальна в странах, территории которых непосредственно подверглись радиоактивному загрязнению – на Украине, в Белоруссии и Российской Федерации.

Несмотря на международную поддержку остается без существенных изменений ситуация на Украине, где необходимо в первую очередь решать проблему объекта «Укрытие».

Тяжелая обстановка сложилась после аварии на значительной части Белоруссии. Однако страна сумела не только пережить, но и подняться над чернобыльской трагедией. В настоящее время принято решение о строительстве на ее территории крупной АЭС.

В Российской Федерации после длительного периода застоя возобновилось строительство новых блоков АЭС с планами увеличения их вклада в энергетику страны.

Чернобыльская авария в различной степени повлияла на развитие ядерной энергетики во всем мире. Время показало, что ее негативное влияние можно преодолеть, гарантируя безопасность проектируемых блоков, основанную, в частности, на анализе последствий аварии на ЧАЭС.

Исследования Радиевого института, на наш взгляд, внесли весомый вклад в общее дело реабилитации отрасли. Комплексные работы по ликвидации последствий аварии являются примером максимальной концентрации усилий научного коллектива на решении предельно сложной проблемы. Период, охватывающий 1986–1992 гг., является специфическим этапом развития института, ставшим в настоящее время частью его истории.

I. Оперативные мероприятия

I.1. Хронология оперативных мероприятий, проведенных Радиевым институтом в 1986 г.

Приведен перечень основных мероприятий, проведенных с конца апреля 1986 г. сотрудниками Радиевого института на промплощадке ЧАЭС и в 30-километровой зоне, а также в Северо-Западном регионе СССР. Результаты радиометрических измерений и анализа отобранных проб воздуха, в том числе из шлейфа дымового выброса горящего реактора, воды, донных отложений, почв и т. д., позволили оценивать радиационную обстановку в реальном времени, эффективность дезактивационных работ, составить «карту» загрязненности промплощадки и 30-километровой зоны, а также прогнозировать ситуацию с водопользованием для населения.

Вечером 28 апреля 1986 г. ТАСС сообщило об аварии на 4-м блоке ЧАЭС. Утром 29.04.86 г. на Зеленогорской радиометрической станции, входящей в состав лаборатории № 51, по указанию директора института Л. Н. Лазарева была проведена внеочередная замена установленного 26.04.86 г. аэрозольного фильтра. Анализ показал наличие на фильтре 25 новых радионуклидов искусственного происхождения. В связи с этим график смены фильтров был изменен в сторону сокращения интервалов времени между их заменами. Фильтры в зависимости от ситуации меняли через промежуток времени от 1 до 24 ч.

Результаты измерений ежедневно передавались в Обком КПСС, Горисполком, а также созданным комиссиям по оценке ситуации в городе и области. Благодаря данным Радиевого института о радиационном фоне и дозовых нагрузках, о результатах оценки риска для населения и т. д. руководство города имело оперативную информацию о радиационной обстановке в реальном времени.

Далее в Радиевом институте были предприняты следующие действия:

29.04.	Директор института Лазарев Л. Н. обратился в НТУ Министерства с предложением направить на ЧАЭС созданную в институте для полевых исследований радиационной обстановки при ядерных испытаниях и ядерных взрывах в мирных целях радиометрическую автомобильную колонну (РАК). В Кохтла-Ярве выехала группа сотрудников из 30 отдела для отбора и анализа проб (Мельников Л. Б. и Карамнов А. В. из группы Попова Ю. С.).
30.04.	Вторая группа сотрудников выехала в Череповецкий район также для отбора проб.
02.05.	По селектору поступило распоряжение из Министерства об участии Радиевого института в ликвидации последствий аварии на ЧАЭС.
04.05.	Директором института издан приказ № 171 о формировании полевой комплексной научно-технической бригады № 9 (ПКНТБ-9) для работы на ЧАЭС. Подготовку РАК и ПКНТБ-9 к выезду возглавили заместители директора РИ Г. С. Синицына и С. С. Коваленко. В состав первой бригады вошли 34 человека – 26 из 30 отдела, 7 из 10 и 75 отделов и один из гаража. Начальником бригады был назначен Колесов О. А., научным руководителем – Петров Ю. Г. Общее научное и методическое руководство было поручено Кривохатскому А. С.
04.05.	Первая группа сотрудников РИ в составе Римского-Корсакова А. А. и Петрова Ю. Г. с водителем Пановым Г. Ф. выехала на ЧАЭС.

05.05.	К месту аварии выехала основная группа ПКНТБ-9 на трех автомашинах.
06.05.	Получено распоряжение зам. министра Рябева Л. Д. и командующего химическими войсками Пикалова В. К. – начальника штаба ГКАЭ – о срочном направлении на ЧАЭС большой машины-лаборатории «Тунец». «Тунец» был отправлен самолетом «Антей» 10.05. Подготовкой к отправке автомобильной (на базе автомобиля «Урал») лаборатории «Тунец» руководила оперативная группа в составе заместителя директора Сеницыной Г. С., заведующего 30 отделом Кривохатского А. С. и сотрудника этого отдела Окунева Н. С.
08.05.	К месту аварии прибыла основная часть бригады ПКНТБ-9 в составе 21 сотрудника.
09.05.	Бригада приступила к обследованию обстановки на ЧАЭС путем проведения гамма-спектрометрических измерений и отбора проб для анализа. Впервые была опробована отработанная специалистами РИ и МО СССР методика отбора проб воздуха с борта вертолета из шлейфа дымового выброса горящего реактора. Отбор проб с борта вертолета с последующим их измерением с целью контроля выброса из аварийного блока ЧАЭС проводили сотрудники РИ до начала августа 1986 г. (Римский-Корсаков А. А., Федотов П. И., Петров Ю. Г. и др.).
10.05.	В Финский залив, а затем и в Балтийское море вышло научно-исследовательское судно «Боян» для отбора проб воды и донных осадков. Получены первые данные о радиоактивном загрязнении акватории продуктами чернобыльского происхождения.
10.05	По заданию Чрезвычайной комиссии при Ленгорисполкоме сотрудники Радиевого института (отдел РБ и ТБ, лаб. 96 и 101) проводили, начиная с 10.05, дозиметрический контроль продуктов питания, одежды, транспорта, рынков, овощных баз, территорий города, жилых и общественных помещений, домов отдыха, пионерских лагерей, а также обследование детей, эвакуированных из районов Белоруссии и Украины, находящихся в клинике Педиатрического института и пионерских лагерях.
13.05.	В Радиевый институт поступили для анализа первые пробы из зоны аварии на 4 блоке ЧАЭС. Их привез Петров Ю. Г. на автомобиле с водителем Пановым Г. Ф.
14.05.	На основе вертолетных данных о составе выброса был сделан вывод о том, что температура в разрушенном реакторе находилась в диапазоне 400–600°C и можно приостановить строительство подземного «щита» под 4-м блоком.
18.05.	В лабораториях Радиевого института получены первые результаты анализа проб, привезенных с места аварии. До конца мая продолжался отбор проб на территории ЧАЭС с помощью бронетранспортеров химических войск и РАК Радиевого института.
20.05.	По маршруту Ленинград–Таллинн–Рига–Клайпеда–Вильнюс–Даугавпилс–Псков–Ленинград выехала сформированная в Радиевом институте экспедиция для отбора проб из рек и крупных озер Северо-Западного региона страны.
24.05.	По маршруту Ленинград–Кировск–Волховстрой–Лодейное поле–Сясьстрой–Ленинград выехала вторая экспедиция для отбора проб из рек и крупных озер восточной части Ленинградской области.

25–26.05.	С вертолета коллимированным гамма-спектрометром была получена «карта» распределения выброшенного топлива на крышах ЧАЭС и промплощадке (А. А. Римский-Корсаков и В. В. Карасев). В это же время первая «карта» загрязненности окрестностей промплощадки и 30-километровой зоны была составлена Ю. В. Дубасовым.
28.05.	По распоряжению Правительственной комиссии при отделе дозиметрического контроля Управления строительством 605 (ОДК УС-605) Радиевым институтом была создана Радиометрическая лаборатория со штатом сначала из 5, а затем из 7 человек. Лаборатория обслуживала 16 организаций, включая Правительственную комиссию и военные организации, проводя анализы проб почв, воздуха, воды, сточных вод, оценивая эффективность дезактивационных методик, пылеподавления и т. д. Всего до конца 1986 г. было проведено свыше 10000 анализов. Первым начальником лаборатории был Матвиенко В. И. (с 01.06 по 12.07), вторым – Пазухин Э. М. (с 07.07. по 12.08 и вторично с 25.09 по 06.11), затем Дмитриев В. Д. и далее Плескачевский Л. А. В лаборатории в разное время работали Петров Б. Ф., Кожевников А. А., Прусаков А. Г., Гойман Е. К., Васильев С. К., Елистратов М. С., Криницын А. П., Драпчинский Л. В., Бойков Г. С., Аксенов В. Н., Смирнов С. Н., Зайцев Е. А., Гунин Ю. И., Чуваев С. В., Юнусов И. М., Прокофьев С. И., Филатенков А. А.
29.05.	Установка «Тунец» передана персоналу ЧАЭС. (Бронетранспортеры регулярно обрывали на промплощадке провода датчиков установки, и вскоре ее данные перестали использовать, тем более, что обстановка почти не менялась).
Июнь–август 1986 г.	Были начаты исследования водной системы р. Припять–Киевское водохранилище–р. Днепр с целью контроля содержания и изотопного состава радионуклидов, выявления путей и скорости распространения и перераспределения радионуклидов от аварии на ЧАЭС, оценки и прогноза радиационной обстановки в связи с опасностью для населения при водопользовании.
21 июня	В штаб ГКАЭ (г. Чернобыль) выехал Гедеонов Л. И. для согласования дополнительной Программы и организации работ по изучению водной системы.
26 июня	К месту аварии выехали Степанов Ан. В. и Сенчилло В. Х. с оборудованием для отбора проб донных отложений в виде кернов и концентрирования радионуклидов, а также с радиометрической и дозиметрической аппаратурой. 27 июля эта экспедиционная группа приступила к работе.
8 июля	В г. Чернобыль выехал Тишков В. П. в качестве руководителя второй смены работ по изучению водной системы (09.07–29.07).
21 июля	Выехал Гуревич Д. М. с набором фильтров «Нуклеопора» производства ОИЯИ (Дубна), с оборудованием и реактивами для концентрирования плутония.
27 июля	Выехали Цветков О. С. в качестве руководителя работ третьей смены (27.07–25.08) и Кривоногов С. М. с ручным отборником проб донных отложений в виде кернов на мелководе и погружными дозиметрами-радиометрами для измерений мощности дозы в придонном слое воды, в донных отложениях в режиме <i>in situ</i> .

6 августа	<p>Дополнительно выехали Ильин Л. И. и Вишневецкий А. С. для усиления группы на завершающем этапе работ. Экспедиционные группы РИ работали в составе комплексной экспедиции Госкомгидромета СССР. Работы выполняли с бортов судов «ОМ-25» (УкрНИИ Госкомгидромета) и «Тайфун» (УкрУГКС), дооборудованных для проведения экспедиционных работ.</p> <p>В ходе выполнения работ были выполнены три серии измерений (15–19, 29–31 июля и 13–15 августа) мощности доз гамма-излучения в придонных слоях воды и на поверхности донных отложений. Одновременно в этих же пунктах отбирались пробы донных отложений в виде кернов, взвешенного вещества и воды.</p> <p>На основании результатов экспериментальных данных о мощности доз гамма-излучения, удельной активности радионуклидов и оцененных значений уровней поверхностного загрязнения донных отложений ($\text{Ки}/\text{км}^2$) была составлена карта-схема радиоактивного загрязнения донных отложений речной системы р. Припять–Киевское водохранилище–р. Днепр по состоянию на 22 августа 1986 г. (Цветков О. С).</p> <p>Результаты анализа межфазного распределения радионуклидов в пробах воды (в системе вода–взвесь–фильтрат) показали, что основная часть радиоактивных загрязнений (более 90 %) связана с взвешенным веществом и распространяется по речной системе р. Припять–Киевское водохранилище–р. Днепр с твердым стоком и взвешенным веществом.</p>
09–18 августа	<p>Экспедиционная группа РИ в составе комплексной экспедиции Госкомгидромета в рамках второй дополнительной программы участвовала в работах по отбору проб донных отложений речной системы Днепра (Каневское, Кременчугское, Днепродзержинское, Запорожское и Каховское водохранилища) разработанным и изготовленным в РИ пробоотборником.</p> <p>Итоги месячных работ групп РИ и ГКАЭ (июнь–июль–август) были оперативно обработаны и обобщены в виде Справок для Правительственной комиссии и доложены в штабе ГКАЭ, оперативной группе (ОГ) Госкомгидромета, Отдельной межведомственной группе по оценке радиационной обстановки (ОМГРО) на заседаниях Правительственной комиссии (Л. И. Геденов, В. П. Тишков, О. С. Цветков).</p>
Конец июня–начало июля	<p>По распоряжению руководства Министерства в Институт ядерных исследований АН УССР (г. Киев) направлены старший научный сотрудник Радиевого института С. М. Гращенко и инженер института В. Н. Струков для проведения анализа проб на содержание изотопов плутония в почвах г. Киева, а также для оказания помощи в использовании разработанной в Радиевом институте методики определения содержания плутония в объектах окружающей среды с использованием индикатора ^{236}Pu.</p> <p>Обработка оперативных данных и подготовка информации по материалам Радиевого института в доклад «Авария на Чернобыльской АЭС и ее последствия» для совещания экспертов МАГАТЭ, состоявшегося 25–29 августа 1986 г. в Вене. (Свою часть данных в доклад для МАГАТЭ представили Дубасов Ю. В. и Римский-Корсаков А. А.).</p>

15–19.09.	На научно-техническом совете Хелкома (г. Гдыня, ПНР) представлены первые рабочие материалы о радиоактивных выпадениях в районе Ленинграда в первой половине 1986 г. и о загрязнении водной системы Балтийского моря в результате аварии на ЧАЭС.
Октябрь 1986 г.	Для выбора ландшафтно-геохимических полигонов и начала работ на них в Чернобыль выехала экспедиционная группа (Синицына Г. С., Петров Ю. Г., Дубасов Ю. В., Савоненков В. Г., Шагин Б. О., Голубев В. А., Гунин Ю. И., Ильин Н. Н., Малахов П. Б., Москалев М. Н., Никифоров С. М., Панов Г. Ф., Сквородкин Н. В., Шпиллер С. М.). На контролируемых полигонах, расположенных в различных направлениях на расстояниях от 3 до 17,5 км от 4-го блока, систематические комплексные исследования проводились до 1992 г. Представлены рабочие материалы о радиационной обстановке на Балтике и в Ленинградской области на встрече с финскими специалистами в Ленинграде.
01–06.12. 1986 г.	Подготовка доклада и его представление на международной встрече специалистов СССР, ГДР и ПНР в Варшаве (Гедеонов Л. И.)

Chronology of operative measures realized by Radium Institute in 1986

Measures undertaken since the end of April 1986 by Radium Institute's employees at the industrial site of CNPP and within 30-km area, as well as in the North-West region of the USSR, are presented. The results of radiometric measurements and analysis of air samples, including those taken from the tail area of burning reactor smoke ejection, water, bottom sediments, soils, etc., made it possible to assess radiation conditions in real time and efficiency of decontamination efforts, to map the contamination of the industrial site and 30-km area, and to predict water use conditions for inhabitants.

1.2. Исследование выброса аварийного реактора 4-го блока Чернобыльской АЭС

А. А. Римский-Корсаков, П. И. Федотов, Ю. В. Дубасов, Е. И. Бирюков,
В. П. Майоров, В. В. Карасев

Приведены результаты работы по оперативному контролю за состоянием 4-го блока ЧАЭС и осуществлению мер по ликвидации радиоактивных выбросов из разрушенной зоны реактора в мае 1986 года. Контроль проводился путем отбора проб атмосферного аэрозоля над площадкой АЭС как из дымового шлейфа, идущего из разрушенной зоны, так и без привязки к конкретной дымовой струе. Исследовалась динамика изменения концентраций радиоактивных нуклидов в выбросе в течение мая–июня 1986 г. По выходам различных продуктов деления в выбросе были сделаны оценки температуры топлива в зоне и зависимости этой температуры от времени. Показана применимость такого метода в интервале температур от 400 до 1400°C. С помощью гамма-спектрометра с остроколлимированным спектрометрическим датчиком, установленного на вертолете, была снята картограмма распределения радиоактивного загрязнения на территории АЭС.

Введение

В статье изложена часть результатов работ, выполненных группой сотрудников Радиевого института им. В. Г. Хлопина в ходе ликвидации последствий аварии 4-го энергоблока Чернобыльской АЭС в период с 6 мая по 10 июня 1986 г. Целью работ являлся оперативный контроль за состоянием разрушенной зоны реактора, за эффективностью мер по ликвидации радиоактивных выбросов из зоны, за радиационной обстановкой на территории АЭС.

Задания на проведение измерений и оценок выдавал Оперативный штаб МСМ, которым руководили Рябев Л. Д. и (позже) Захаренков А. Д. Предварительные результаты в виде справок докладывали по мере их получения Правительственной комиссии и частично штабу Химвойск СССР. Постановку задач и интерпретацию результатов постоянно обсуждали с руководителями группы ИАЭ им. И. В. Курчатова Е. П. Рязанцевым, Е. П. Велиховым и Б. Г. Пологих.

В работе по отбору проб большое участие приняли специалисты штаба Химвойск СССР и экипажи вертолетов группы ВВС, работавшие при ликвидации аварии.

1. Аппаратура и методы исследования проб

Для отбора проб атмосферного аэрозоля над площадкой АЭС были применены два способа: в откачанные емкости и в воздухопровод вертолета.

Первый способ использовали для определения концентраций непосредственно в дымовом шлейфе, идущем из разрушенной зоны реактора (такой шлейф наблюдался периодически до 12 мая). Схема такого пробоотбора показана на рис. 1.

Пробоотборное устройство представляло собой три предварительно откачанные стальные емкости общим объемом 37,8 л, подвешенные на фале длиной 45 м под вертолетом МИ-8Т. Впуск воздуха в эти емкости производился при освобождении зажимов впускных резиновых трубок в заданный момент времени, когда емкости попадали в струю выброса (вертолет двигался вдоль струи, находясь на 10–20 м выше нее). Воздух засасывался сквозь фильтры ФПП (Фильтр Петрянова Полимерный) в течение 30 с после подачи из вертолета по проводу электрического импульса, воспламеняющего пиропатроны зажимов. За эти 30 с вертолет проходил вдоль шлейфа путь около 800 м, постепенно снижаясь по направлению на источник выброса, так,

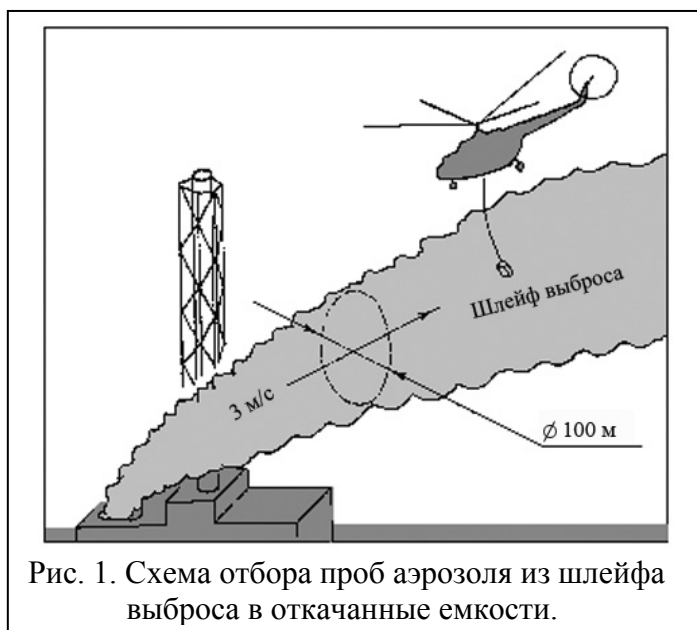


Рис. 1. Схема отбора проб аэрозоля из шлейфа выброса в откачанные емкости.

что емкости двигались вблизи оси дымового шлейфа, причем сам вертолет воздуха в шлейфе не возмущал. Полученные таким образом фильтры содержали аэрозоль из невозмущенной струи шлейфа объемом 37,8 л.

Второй способ использовали для определения концентраций без привязки к конкретной дымовой струе или шлейфу, начиная с 20 мая (поскольку видимого шлейфа выброса уже не наблюдалось). Возбуждение потока винтами вертолета было уже несущественно и необходимость в подвеске емкостей на фале уже отпала. Поэтому забор

воздуха вели в воздухопровод вертолета МИ-24Р, на входное отверстие которого в борту вертолета надевали фильтр из ткани ФПП (респиратор «Лепесток»). Прокачку воздуха через фильтр производили в течение 1–2 мин при полете на высоте 200 м по кругу над площадкой АЭС. По расходомеру вертолета прокачивали около 400 литров в минуту.

Материал фильтра без переработки устанавливали (в бьюксе с притертой пробкой) на датчик гамма-спектрометра через 1–10 ч после пробоотбора. В работе использовали три полупроводниковых гамма-спектрометра, данные о которых приведены в табл. 1.

Спектрометры 1 и 2 работали в лагере передвижной лаборатории в районе г. Иванкова, с 20 мая – в стационарной лаборатории в Чернобыле, а спектрометр 3 – в Ленинграде.

Таблица 1

Характеристики гамма-спектрометров, на которых анализировали состав проб аэрозоля

№ спектрометра	Тип датчика и марка	Объем германия, см ³	ПШПВ* при 1 МэВ, кэВ	Используемый анализатор и число каналов
1	Ge(Li) ДГД-5	50	3	Nokia LP 4840, 800 кан.
2	Ge(Li) ДГДК-63В	63	3	Nokia LP 4700, 1024 кан.
3	Сверхчистый EGPC-11P	121 с колодцем	1,8	ND-66, 4096 кан.

* ПШПВ – полная ширина на полувысоте пика в спектре.

При длительности измерений около часа чувствительность обнаружения гамма-излучающих продуктов деления (ПД) на спектрометрах 1 и 2 составляла порядка

1 Бк в пробе. Основным фактором, ограничивающим чувствительность, был фон. Систематические погрешности большинства измерений не превышали 15 %. Спектрометр 3 работал в условиях низкого фона и мощной защиты. Чувствительность обнаружения ПД составляла около 0,1 Бк в пробе.

Обработку данных измерений спектрометра 2 вели на программируемом калькуляторе HP 97S, спектрометра 1 – на микро-ЭВМ «Искра-226» по программе SHERAKV, спектрометра 3 – по программам SEARCH и GAMFIT на мини-ЭВМ ДБК-1.

Ниже мы будем приводить результаты анализов без указания конкретного спектрометра и деталей методики, поскольку все три методики по существу одинаковы.

В качестве иллюстрации вида типичного гамма-спектра на рис. 2 приведен участок спектра продуктов деления (ниже 1 МэВ), зарегистрированный от пробы аэрозоля из шлейфа выброса 9 мая на высоте 200 м над площадкой АЭС.

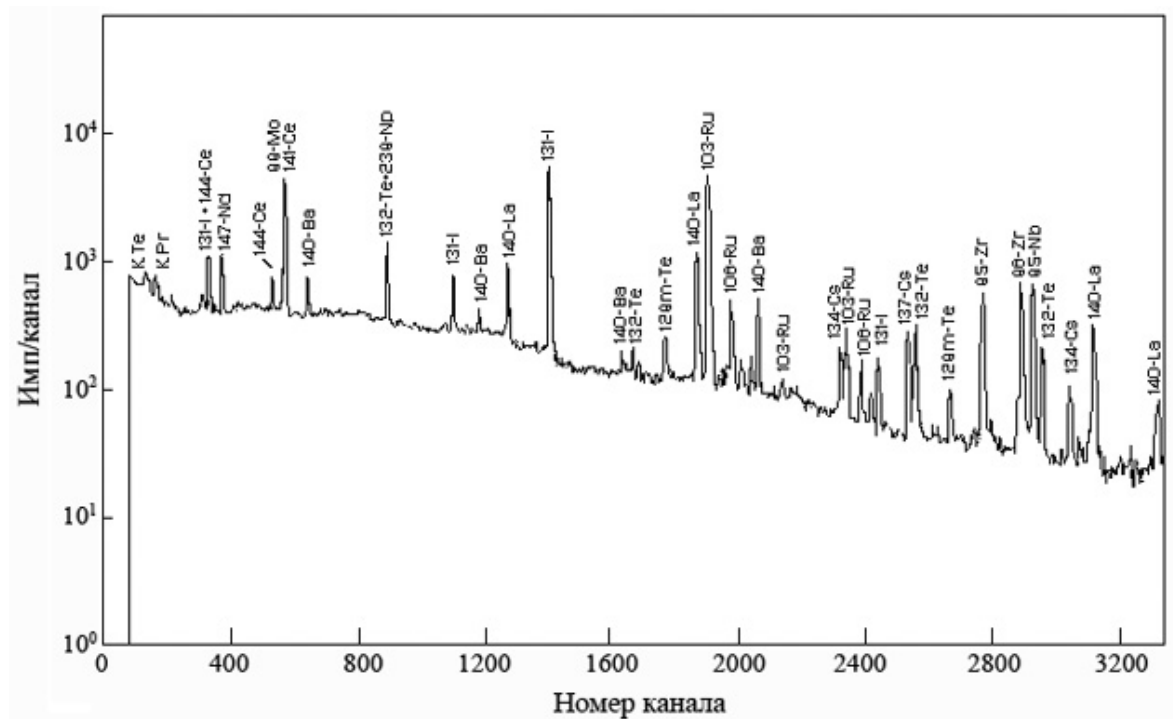


Рис. 2. Участок гамма-спектра пробы аэрозоля на высоте 200 м 9 мая 1986 г.

В качестве иллюстрации фоновой обстановки, при которой проводили спектрометрические измерения, можно привести значения МЭД, зарегистрированные нами 5–6 мая при движении по территории страны от Ленинграда до Чернобыля дозиметрами СРП и КРБГ (табл. 2):

Значения МЭД на промплощадке ЧАЭС сильно зависели от неоднородного загрязнения, поэтому здесь мы их не приводим, однако в воздухе непосредственно над разрушенным реактором (высота 200 м) дозиметр вертолета показывал величину МЭД около 240 Р/ч. Вертолет обычно проходил этот участок за 1–2 с, так что экипаж не получал более 100 мР за один проход над реактором.

Таблица 2
Мощность экспозиционной дозы на местности 5–6 мая 1986 г.

Район измерения	Дата	Время	МЭД, мкР/ч
Гатчина	05.05.86	10:00	70
Псков	05.05.86	14:50	150
Витебск	05.05.86	20:20	25
Гомель	06.05.86	02:50	200
Чернигов	06.05.86	04:50	250
Киев	06.05.86	06:30	510
Иванков	06.05.86	08:20	800
Чернобыль	06.05.86	10:00	2500

2. Соотношения нуклидов в выбросе

Гамма-спектрометрические измерения концентраций продуктов деления (ПД) в шлейфе выброса и над площадкой ЧАЭС проводили с 9 мая по 9 июня 1986 г. Результаты измерений представлены в табл. 3 и 4.

Таблица 3
Концентрация ПД над площадкой ЧАЭС с 9 мая по 9 июня 1986 г.

Нуклид	Концентрация радионуклидов в воздухе, пКи/л, на высоте 200 м									
	09.05	11.05	16.05	22.05	25.05	29.05	30.05	03.06	06.06	09.06
⁹⁵ Zr	240	270	–	9	100	0,3	10	2,2	1,4	0,5
⁹⁵ Nb	160	300	–	10	120	0,4	9	2	0,8	–
^{99m} Tc	440	200	–	–	–	–	–	–	–	–
¹⁰³ Ru	970	840	–	20	–	0,3	20	1,2	4,1	1,9
¹⁰⁶ Ru	–	–	–	–	–	–	70	0,4	1,6	1,6
¹³¹ I	1600	120	400	8	5	0,5	70	0,2	0,6	0,5
¹³² Te	630	230	–	–	–	–	–	–	–	–
¹³⁴ Cs	–	–	–	0,5	–	0,2	10	–	–	–
¹³⁷ Cs	–	50	–	0,8	–	–	10	0,4	0,2	1
¹⁴⁰ La	270	130	300	–	–	3	–	4,8	–	–
¹⁴⁰ Ba	330	150	320	–	–	3	–	0,5	–	–
¹⁴¹ Ce	160	230	–	4	50	2	10	0,6	3	0,8
¹⁴⁴ Ce	–	220	–	4	40	–	–	–	3	3,3

Таблица 4

Оценка мощности выброса и запаса активности в облаке аэрозоля
над площадкой ЧАЭС

Дата отбора	Мощность выброса, Ки/сут	Запас в облаке, Ки/км ³	Примечание
09.05	12600	–	Из шлейфа
11.05	8700	–	Из шлейфа
13.05	420	–	Вне шлейфа
16.05	1680	–	Из шлейфа
19.05	50	–	Из шлейфа
22.05	50	–	Из шлейфа
23.05	20	–	Из шлейфа
24.05	–	100	Вне шлейфа
25.05	–	300	Вне шлейфа
26.05	–	20	Вне шлейфа
27.05	–	20	Вне шлейфа
28.05	–	20	Вне шлейфа
29.05	–	10	Вне шлейфа
30.05	–	200	Пылевой подъем?
01.06	–	20	Вне шлейфа
02.06	–	25	Вне шлейфа
03.06	–	12	Вне шлейфа
04.06	–	8	Вне шлейфа
05.06	–	12	Вне шлейфа
06.06	–	100	После дождя
09.06	–	30	Вне шлейфа

**2.1. Сравнение первого и последующих выбросов с соотношениями нуклидов
в топливе РБМК-1000**

Ожидаемые соотношения активностей в топливе 4-го блока ЧАЭС к моменту аварии (26.04) были рассчитаны на основе данных работы [1]. Поскольку в работе [1] расчеты выполнены для кампании 1100 сут, была сделана интерполяция этих данных на фактическую кампанию реактора, что соответствовало выгоранию около 10 ГВт·сут/т U. Результаты расчета на момент аварии, а также через 10 и 30 сут приведены в табл. 5 (в относительных единицах по отношению к активности ¹⁴⁴Се, в графах 2–4).

В табл. 5 и 6 приведены относительные активности ПД в некоторых из исследованных нами пробах атмосферного аэрозоля, а так же в пробах выпадений на площадке АЭС и на местности в 3–60 км от места аварии. В графе 5 табл. 5 даны соотношения для пробы, отобранной 29.04 в Ленинграде, в графах 6–8 – соотношения для аэрозолей, отобранных 11.05, 22.05 и 03.06 на высоте 200 м над площадкой АЭС.

В табл. 6 в графах 2–4 приведены соотношения ПД в пробах почвы, взятых в 3, 30 и 60 км от места аварии. В двух последних графах – соотношения (12.05) вблизи 4-го блока (аварийного) и 1-го блока (в 700 м от аварийного). Чтобы не загромождать табл. 5 и 6, погрешности измерений не указаны. Для всех значений они лежат в пределах 5–30 %.

Таблица 5
Соотношение нуклидов в выбросе (по отношению к активности ^{144}Ce)

Нуклид	Расчет для топлива 4-го блока			Аэрозоль 29 апреля в Ленинграде	Аэрозоль на высоте 200 м над ЧАЭС		
	26 апреля	6 мая	26 мая		11 мая	22 мая	3 июня
^{95}Zr	1,48	1,36	1,15	1,48	1,23	2,25	2,9
^{95}Nb	1,51	1,50	1,42	1,92	1,36	2,5	2,7
^{99m}Tc	1,55	0,13	0,001	7,66	0,91	–	–
^{103}Ru	1,22	1,05	0,77	4,32	3,82	5,0	1,6
^{106}Ru	0,31	0,31	0,31	–	–	–	0,5
^{131}I	0,84	0,36	0,07	24,3	5,45	2,0	0,27
^{132}Te	1,19	0,14	0,002	9,16	1,05	–	–
^{134}Cs	0,038	0,039	0,04	1,43	–	0,12	–
^{136}Cs	0,016	0,01	0,03	0,54	–	–	–
^{137}Cs	0,062	0,064	0,067	4,15	0,23	0,20	0,5
^{140}La	1,51	0,9	0,32	2,43	0,59	–	0,6
^{140}Ba	1,50	1,03	0,37	–	0,68	–	0,7
^{141}Ce	1,43	1,18	0,88	1,43	1,05	1,0	0,8
^{144}Ce	1	1	1	1	1	1	1
^{90}Sr	0,033	0,034	0,035	–	–	–	–
^{239}Pu	0,0002	0,0002	0,0002	–	–	–	–
^{242}Cm	0,0028	0,0026	0,0024	–	–	–	–

Таблица 6
Соотношение нуклидов в пробах почвы и приземном воздухе
(по отношению к активности ^{144}Ce)

Нуклид	Соотношения в пробах почвы 8 мая на расстоянии:			Соотношения в приземном воздухе 12 мая	
	3 км	30 км	60 км	вблизи 4-го блока	вблизи 1-го блока
^{95}Zr	1,36	1,35	1,29	1,13	1,25
^{95}Nb	1,56	1,55	1,52	1,48	1,38
^{99m}Tc	–	–	–	1,68	–
^{103}Ru	0,86	1,1	10,6	10,1	0,9
^{106}Ru	0,21	0,31	4,9	–	–
^{131}I	0,52	1,44	34,4	15,2	2,0
^{132}Te	0,23	0,7	22,7	3,6	0,14
^{134}Cs	0,03	0,1	3,8	–	–
^{136}Cs	0,02	0,06	1,6	–	–
^{137}Cs	0,07	0,2	7,8	–	–
^{140}La	0,96	0,94	4,8	0,42	1,2
^{140}Ba	–	–	–	0,7	0,8
^{141}Ce	1,38	1,23	1,02	0,9	1,1
^{144}Ce	1	1	1	1	1
^{90}Sr	–	–	–	–	–
^{239}Pu	–	–	–	–	–
^{242}Cm	–	–	–	–	–

Из данных, приведенных в табл. 5 и 6, можно сделать следующие выводы:

1. В первоначальной и в последующих пробах из шлейфа в начале мая заметно сильное фракционирование в пользу летучих ПД (иод, рутений, теллур) по сравнению с «тугоплавкими» (церий, цирконий). Это фракционирование более заметно на удалении от АЭС, чем вблизи площадки.
2. Уменьшение мощности выброса в начале–середине мая привело к тому, что фракционированные продукты с преобладанием иода, рутения и теллура стали наблюдаться только вблизи 4-го блока. Начиная с 15 мая аэрозоль топлива наблюдался над площадкой АЭС и в ближней зоне, главным образом за счет ветрового подъема, а не за счет выброса из зоны. Поэтому в таких пробах (воздух и почва) фракционирование менее заметно.
3. Таким образом, основным источником аэрозольной компоненты в воздухе над площадкой ЧАЭС до 15 мая являлся выброс из зоны аварийного реактора, а после 15 мая – ветровой подъем пыли с почвы, выпавшей ранее.
4. Предполагая сходство в поведении урана и плутония с «тугоплавкими» ПД типа церия, можно пытаться оценивать содержание плутония и кюрия по отношению к ^{144}Ce , который хорошо виден в большинстве проб. Для ^{242}Sm нужно, конечно, учитывать также и его распад (период полураспада 162 сут). Что касается ^{90}Sr , то его более целесообразно сопоставлять с наличием в пробах ^{140}Ba (^{90}Sr по активности должно быть примерно в 50 раз меньше ^{140}Ba на момент аварии).

2.2. Оценка выгорания по отношению активностей $^{134}\text{Cs} / ^{137}\text{Cs}$

Фактическое выгорание топлива аварийного реактора 4-го блока определяли по измеренным значениям отношения активностей ^{134}Cs и ^{137}Cs в пробах. Использовалось следующее соотношение между выгоранием W и отношением активностей A_{134}/A_{137} :

$$W = K_w \frac{A_{134} F_{134}}{A_{137} F_{137}}, \quad (1)$$

где K_w – коэффициент пропорциональности, полученный нами ранее [2] из экспериментальных данных по выгоранию и изотопному составу образцов твэлов РБМК-1000 ($K_w = 16,2$); F_{134}/F_{137} – поправки, учитывающие убыль ^{134}Cs и ^{137}Cs соответственно за счет распада и захвата нейтронов за время облучения.

Подставив эти данные в (1), получаем среднее значение выгорания $W_{\text{ср}} = 9,3 \pm 1,1$ ГВт·сут/т U.

Фактические значения выгорания отдельных участков зоны, конечно, имеют значительные отклонения от среднего, что особенно заметно по анализам отдельных проб почвы с площадки АЭС.

3. Оценки температуры топлива в аварийном реакторе

По выходам различных продуктов деления, наблюдавшимся в выбросе из аварийного реактора, были проведены ориентировочные оценки температуры топлива в зоне и оценки зависимости этой температуры от времени. Такие оценки были основаны на зависимости констант скорости выхода k_r для различных ПД от температуры топлива [3, 4]. Величина k_r определяется выражением

$$k_r = \frac{1}{Q} \frac{dQ}{dt}, \quad (2)$$

где Q – количество данного ПД в топливе, находящемся в зоне; dQ/dt – скорость убыли ПД в топливе за счет их выхода из него.

Для оценки температуры мы использовали данные по выходу ^{132}Te , ^{140}Ba и ^{103}Ru в выбросе аэрозоля 11 мая (табл. 5) и рассчитали по ним соответствующие значения k_r . Переход от концентраций ПД в шлейфе выброса струи к мощности выброса (которая соответствует dQ/dt в формуле 2) был сделан на основе упрощенной модели струи выброса (рис. 1). Среднее сечение струи 11 мая по визуальным наблюдениям представляло круг диаметром около 100 м, скорость струи – около 3 м/с. Отсюда по данным табл. 3 были рассчитаны мощности выброса различных ПД: 0,31 Ки/мин для ^{132}Te , 0,18 Ки/мин для ^{140}Ba и 1,1 Ки/мин для ^{103}Ru . Не рискуя ошибиться, можно считать, что «запас» топлива в разогретой разрушенной зоне реактора составляет от 10 до 90 % исходного количества, что позволяет принять на 11 мая для ^{132}Te – 2,5–22 МКи, для ^{140}Ba – 0,5–4,5 МКи и для ^{103}Ru – 6–58 МКи. Поделив мощность выброса dQ/dt для каждого ПД на его «запас», получим оценку k_r для ПД (табл. 7).

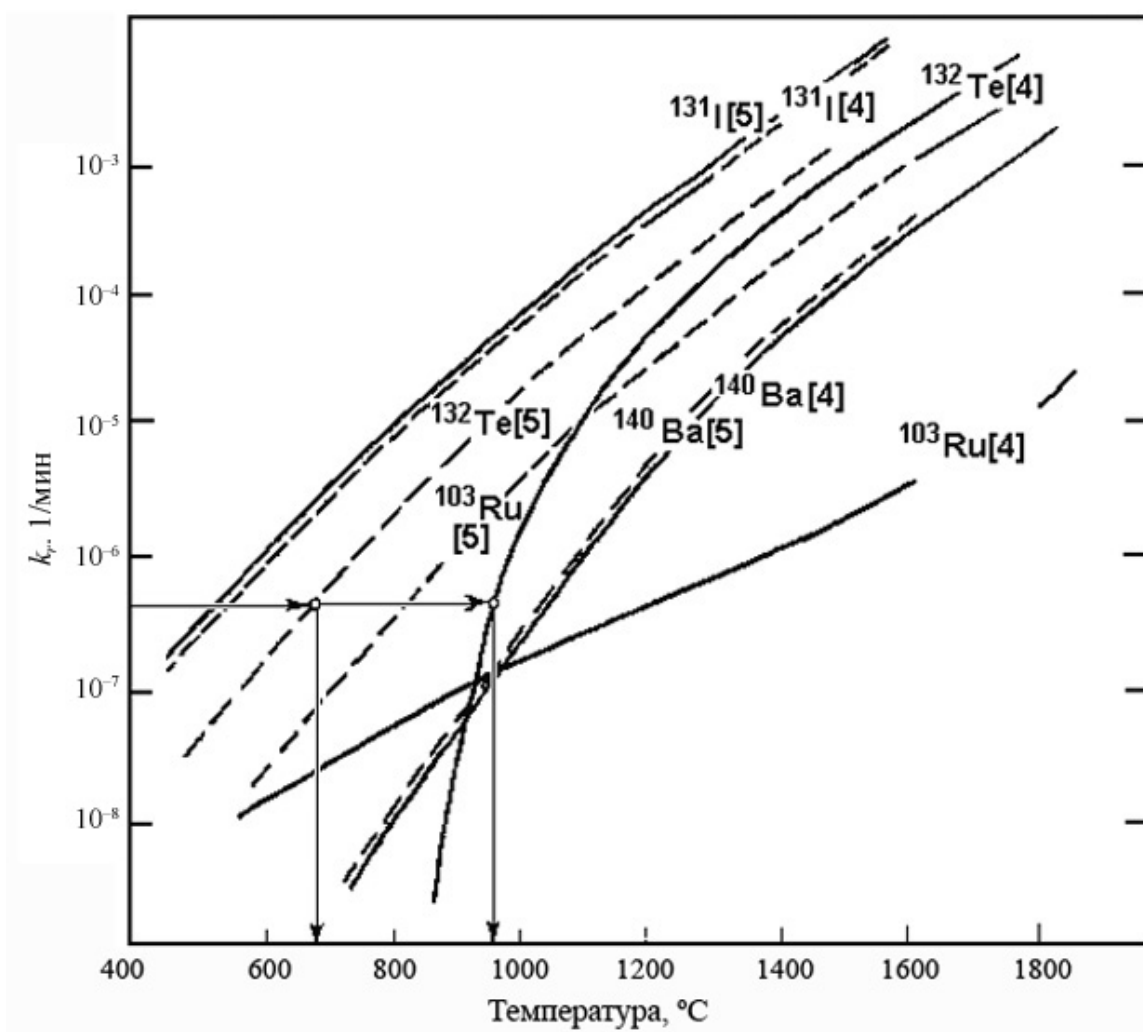


Рис. 3. Зависимость констант выхода различных продуктов деления из разогретого топлива от температуры.

Сплошные линии – данные [4], пунктирные линии – данные [5].

Графически в качестве примера показана оценка по ^{132}Te .

В работах [3, 4] приведена прямая функциональная зависимость k_r для этих ПД, которую мы воспроизводим на рис. 3 (сплошные линии). Таким образом, по значению k_r для этих ПД можно определить температуру разрушенной зоны (или нагре-

той ее части). Достоверность этой оценки зависит, конечно, от надежности исходных кривых $k_r(T^0)$. Из опыта работы с разогретыми материалами и породами, содержащими ПД и их «конденсаты» (например, [5]), можно ввести в кривые [4] некоторые коррективы. На рис. 3 такие исправленные нами кривые $k_r(T^0)$ изображены пунктиром. В табл. 7 мы приводим два варианта оценок температуры зоны на 11 мая – непосредственно по кривым [4] и по исправленным кривым (с привлечением данных [5]). На наш взгляд более правоподобны оценки на основании [5], хотя отличие в этих двух подходах не столь значительно. На 11 мая получаем: $(950 \pm 100)^\circ\text{C}$ по данным [3, 4], $(750 \pm 150)^\circ\text{C}$ по данным [5].

При попытках оценить температуру в более поздние моменты мы встречаемся с трудностями, поскольку ход кривых в области $400\text{--}600^\circ\text{C}$ известен плохо.

Таблица 7

Оценки температуры зоны реактора по измеренным 11 мая мощностям выброса

Нуклид	Мощность выброса, Ки/мин	«Запас», МКи	В единицах 10^{-7} /мин	Оценка T , $^\circ\text{C}$	
				по кривым [4]	по кривым [5]
^{132}Te	0,31	2,5–22	0,7–6,2	920–970	550–700
^{140}Ba	0,18	0,5–4,5	0,03–0,3	920–1080	720–880
^{103}Ru	1,1	6–58	0,11–1,1	1000	600–750

Для 25 мая можно считать, что мощность выброса упала в 30–100 раз. Это соответствует по рассматриваемым ПД падению температуры на $300\text{--}400^\circ\text{C}$. Можно предполагать, что на 25 мая температура в зоне снизилась до $300\text{--}500^\circ\text{C}$ и после этого мало менялась (см. табл. 3). Дальнейшие оценки температуры ввиду малости выброса затруднительны.

4. Оценка распределения продуктов выброса на площадке АЭС

Измерение мощности дозы на территории площадки АЭС не дает однозначных данных о фактическом распределении выброшенного топлива и ПД, поскольку даже на площадях, где топлива нет, могут быть значительные мощности дозы от соседних участков и сосредоточенных масс топлива.

Поэтому актуальными явились вопросы фактического распределения топлива:

- где находятся источники излучения – в зоне или в соседних помещениях;
- какая часть материала зоны выброшена за пределы разрушенного реактора;
- в каком виде находится выброшенное топливо – массивные обломки или тонкий слой выпадений;
- какого энерговыделения следует ожидать при захоронении загрязнений на территории АЭС.

Решить эти вопросы путем пробоотбора на территории АЭС трудно, особенно на участках, где мощности дозы велики (сотни бэр в час). Поэтому была предпринята съемка картограммы территории с воздуха остроколлимированным гамма-спектрометрическим датчиком, который «наблюдал» гамма-излучение из небольшого (диаметром 40 м) пятна, попадавшего в поле зрения коллиматора.

4.1. Методика измерения распределения топлива по площадке АЭС

Измерения проводили при полетах на высоте 300 м над территорией всей станции. В результате прямых полетов территория была покрыта «сеткой» с шагом около 50 м в районе 4-го блока ЧАЭС и с шагом 100 м на остальных участках.

Коллиматор из свинца имел канал диаметром 5 мм и длиной 90 мм. Толщина защиты кристалла во всех направлениях в нижнюю полусферу – 100 мм, в верхнюю – 40–60 мм. Детектор спектрометра – кристалл NaI диаметром 20 мм и длиной 20 мм с фотоумножителем ФЭУ-60. Спектры и «дорожки» интенсивности вводили в память микро-ЭВМ, входившей в состав спектрометра СПИН-1000 и одновременно в портативный самописец MINIGOR. Данные из микро-ЭВМ периодически выгружали на кассетный магнитофон для дальнейшей обработки.

Характеристика избирательности коллиматора показана на рис. 4. Видно, что основное поле зрения коллиматора имело диаметр около 40 м (порядка размеров разрушенной зоны). Кривая на рис. 4 – расчет без учета влияния рассеянного излучения. Фактически, по-видимому, боковые крылья характеристики несколько выше. Спектры регистрируемого излучения, измеренные на трех разных участках территории, приведены на рис. 5. Из этих спектров можно сделать определенные выводы о толщине слоя продуктов выброса, являющихся источниками излучения в районе машинного зала 3-го и 4-го блоков. Этот вопрос исследовали, поскольку предполагалось, что часть топлива могла образовать завал в машинном зале. Спектр 3 снят над асфальтированной дорожкой вдоль корпуса станции, где слой продуктов выброса заведомо бесконечно тонкий.

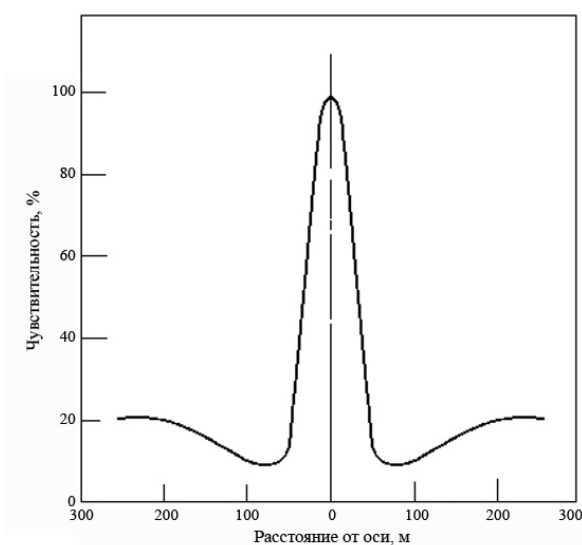


Рис. 4. Угловая характеристика чувствительности коллимированного датчика.

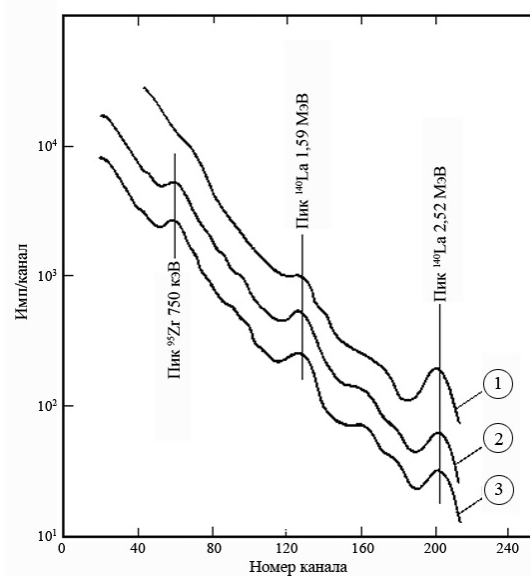


Рис. 5. Аппаратурные спектры гамма-излучения, измеренные коллимированным датчиком на высоте 200 м над территорией ЧАЭС:

- 1 – над зоной 4-го блока,
- 2 – над крышей машинного зала,
- 3 – над асфальтированным проездом.

Глядя на спектр 2 (над машинным залом), мы видим то же соотношение интенсивностей линий ^{95}Zr и ^{140}La , что и в спектре 3, и можем заключить, что самопоглощение (признак толстого слоя) в нем отсутствует. Значит, источником излучения в районе машинного зала является тонкий слой продуктов выброса, скорее всего на крыше зала. На спектре 1 (над зоной реактора) самопоглощение в источнике настолько сильное, что линия ^{95}Zr в районе 750 кэВ практически незаметна по сравнению с более жесткими линиями 1,59 и 2,52 МэВ ^{140}La . Таким образом, даже сравнение спектров, снятых с разных участков площадки, дает информацию о характере загрязнения. При регистрации интенсивностей над различными участками площадки привязка к абсолютным количествам топлива на земле делалась следующим образом. На расстоянии около 1,5 км от площадки АЭС был выбран открытый участок загрязненной местности и проведен отбор нескольких проб почвы. Путем прямых гамма-спектрометрических измерений было установлено, что на 1 м^2 этого участка присутствует 0,28 г топлива (по содержанию ^{141}Ce и ^{144}Ce). Этот участок был использован как база сравнения при вертолетной гамма-съемке. Над ним на высоте 300 м были откалиброваны показания гамма-датчика, и далее все интенсивности привязывались к этой величине. К сожалению, первоначальные данные по содержанию урана были завышены, поэтому первоначальная калибровка, проведенная 28 мая, давала завышенные содержания топлива на 1 м^2 .

После проведения радиохимического анализа проб с этого участка в июле в Ленинграде калибровка была пересмотрена в меньшую сторону. На рис. 6 приведены уточненные значения распределения топлива на территории площадки ЧАЭС. Для аэрогамма-съемки использовали регистрацию гамма-излучения в интервале от 1 до 3 МэВ.

4.2. Результаты аэрогамма-съемки

В результате полетов над территорией станции были получены 11 «разрезов» карты интенсивностей в виде сетки, охватывающей западную (загрязненную) часть территории станции до 2-го энергоблока. По этой сетке была проведена линейная интерполяция между соседними точками и получена картограмма, приведенная на рис. 6. Различными цифрами обозначены участки с различной плотностью топлива, от 0,5 до 18 г/м^2 . Черный «провал» (область 10) соответствует зоне 4-го блока, где интенсивность велика, но пересчитать ее в количество нельзя, поскольку неизвестно самопоглощение в зоне и в различных материалах, которыми ее засыпали.

Можно, пользуясь данными картограммы, оценить энерговыделение на различных участках территории. Для различных моментов времени в течение 1986 г. расчет дает следующие тепловые мощности топлива 4-го блока (кВт/т): 26 мая – 72; 25 июня – 43,5; 25 июля – 30,6; 24 августа – 22,5; 23 сентября – 22,5 и т. д.

Приблизительно половина этой мощности уносится гамма-излучением (и в тонком слое не остается), половина – бета-излучением (остается в тонком слое). Отсюда следует, что при фиксации или захоронении загрязнения, обозначенного на картограмме (рис. 6), тепловыделение (например, на сентябрь 1986 г.) составит (Вт/м^2): область 9 – 0,22; область 8 – 0,15; область 7 – 0,10 и т. д. до 0,006 (область 1).

Эти данные можно использовать для выбора методов и средств дезактивации зданий (крыш) и участков территории станции.

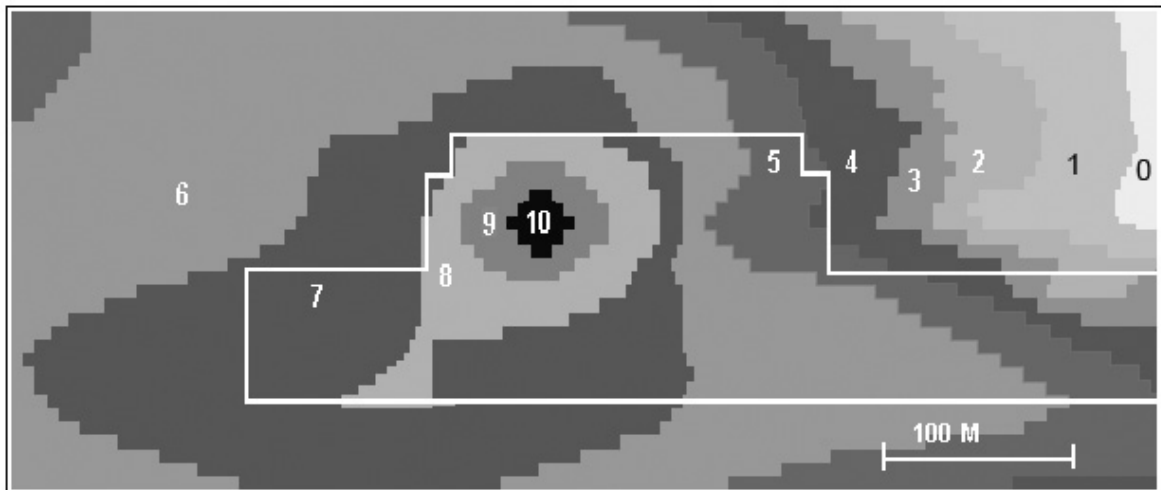


Рис.6. Картограмма интенсивностей гамма-излучения по данным вертолетной аэрогамма-съемки над территорией ЧАЭС.

Цифры означают оценки плотностей загрязнения (в пересчете на массу топлива), г/м^2 : 0 – менее 0,5; 1 – 0,5; 2 – 0,8; 3 – 1,2; 4 – 1,8; 5 – 3; 6 – 5; 7 – 8; 8 – 12; 9 – 18; 10 – оценить не удается.

Наиболее правоподобная оценка абсолютных значений загрязнений показывает, что всего на участке территории станции, обозначенном на картограмме, находится (без учета разрушенной зоны реактора) около 0,8 т топлива (0,74 т по урану).

Заключение

1. Использована методика отбора и анализа атмосферного аэрозоля из шлейфа выброса аварийного реактора, проанализирована динамика изменения выброса и его изотопного состава.
2. За период с 9 мая по 15–20 мая мощность выброса упала с 13000 Ки/сут до десятков Ки/сут и далее мало изменялась. После 20 мая источником радиоактивного аэрозоля над площадкой АЭС являлся подъем пыли с площадки.
3. По мощности выброса ряда радионуклидов удалось оценить температуру топлива в зоне реактора. С 11 мая по 25 мая она уменьшилась от 700–950 до 300–500°C.
4. Создан образец аппаратуры для коллимированной аэрогамма-съемки распределения выброшенного топлива на площадке АЭС. Получена картограмма этого распределения. Вблизи 4-го блока АЭС плотность загрязнения составляет около 20 г/м^2 , а вблизи 1-го и 2-го блоков спадает до $0,5 \text{ г/м}^2$. Всего на обследованной территории АЭС вне зоны реактора (на земле и крышах зданий) находится около 0,8 т топлива.

В работе принимали участие Ю. Г. Петров, Ю. А. Бабенко, В. Н. Аксенов, В. И. Васильев, В. Н. Селифонов, С. С. Гаврилин, Н. Н. Рыжов, М. Н. Москалев, Ю. С. Савченков, В. И. Чернышов, Г. Ф. Панов.

Авторы выражают искреннюю благодарность за обсуждение результатов и советы Л. Д. Рябеvu, Е. П. Велихову, Е. П. Рязанцеву, Б. Г. Пологих.

Следует отдельно отметить постоянную и безотказную помощь командующего группой ВВС В. В. Грибштока, вертолетчиков в/ч 93257 Прикаспийского ВО Н. А. Волкозуба, П. П. Григорука, И. Игнатьева и других, активное участие на разных

этапах работы специалистов штаба химвойск В. С. Кавунова, А. Н. Кушнина, А. Г. Арутюнова, С. Г. Алексеева, Е. Рыжикова.

Список литературы

1. Колобашкин В. М., Рубцов П. М., Ружанский П. А. и др. Радиационные характеристики облученного ядерного топлива. М.: Энергоиздат. 1983.
2. Федотов П. И., Бибичев Б. А., Майоров В. П. и др. Определение выгорания и содержания изотопов урана и плутония в отработавших ТВС ВВЭР-440 и РБМК-1000: Отчет Радиового института им. В. Г. Хлопина. 1983. Инв. № 610-И.
3. Kelley J. L. Temperature Dependence of Fission Product Release Rates // Nucl. Sci. Eng. 1984. V. 88, N 2. P. 180–184.
4. Report of the American Physical Society on Radionuclide Release Rates from Severe Accidents at Nuclear Power Plants, NUREQ N 6-04-83 011, February, 1985.
5. Дубасов Ю. В. Частное сообщение.

Study of Radionuclide Release from Chernobyl Unit IV Reactor Accident

A. A. Rimsky-Korsakov, P. I. Fedotov, Yu. V. Dubasov, E. I. Biryukov,
V. P. Maiorov, V. V. Karasev

Results of operative control of destroyed Chernobyl Unit IV reactor and efficiency of measures to prevent radioactive release from reactor core debris in May 1986 are presented. Atmospheric aerosol sampling from smoke plume over the site was done by helicopters. Dynamics of radionuclide composition and concentration variations were studied. Fuel temperatures in the core debris were estimated based on radionuclide ratios and their time dependence. Applicability of such method was shown for 400–1400°C temperature interval. Collimated gamma-spectrometer was used to obtain radionuclide contamination distribution chart for nuclear power station site.

1.3. Комплекс работ лаборатории радиометрии Радиевского института в Чернобыле: июнь–ноябрь 1986 г.

С. К. Васильев*, Б. Ф. Петров*, Л. А. Плескачевский

* ныне – Аварийно-технический центр ГК «Росатом», С.-Петербург

Представлены результаты комплексных исследований лаборатории радиометрии Радиевского института, входившей в качестве штатной в состав отдела дозиметрического контроля Управления строительства-605. Деятельность лаборатории включала как удовлетворение производственных потребностей УС-605 – обеспечение оперативного контроля радиоактивной загрязненности приземного слоя воздуха, так и работы в рамках различных программ. Осуществлен контроль над газоаэрозольным выбросом из 4-го блока ЧАЭС, что стало продолжением исследований специалистов Радиевского института, проведенных в мае–начале июня 1986 г. Изучены спектральные и угловые характеристики интенсивных гамма-полей в ходе сооружения объекта «Укрытие». Описана деятельность спектрометрического центра, организованного на базе лаборатории, обеспечивавшего оперативной количественной информацией практически все организации, работавшие в Чернобыле.

Введение

В конце мая 1986 г. Министерством среднего машиностроения СССР (далее МСМ) Радиевому институту было поручено создание лаборатории радиометрии отдела дозиметрического контроля Управления строительства-605¹ (далее – УС-605). УС-605 являлось вновь созданной организацией МСМ, призванной в предельно сжатые сроки решить проблему консервации аварийного 4-го блока ЧАЭС, – соорудить над его развалом то, что до конца сентября 1986 г. именовалось «Саркофагом» (а позже – «Укрытием»).

Следует отметить, что в ходе работ по ликвидации последствий аварии на ЧАЭС решение комплекса проблем, связанных непосредственно с аварийным 4-м блоком, являлось основной зоной ответственности МСМ, и именно здесь был сосредоточен основной научный, проектный, инженерно-технический и строительный потенциал отрасли.

Руководителями лаборатории радиометрии являлись, сменяя друг друга, В. И. Матвиенко (июнь 1986 г.), Э. М. Пазухин (дважды – июль и октябрь 1986 г.), В. Д. Дмитриев (дважды – начало августа и ноябрь 1986 г.), А. П. Криницын (середина августа 1986 г.) и Л. А. Плескачевский (конец августа – начало октября 1986 г.). Помимо авторов в работах лаборатории в Чернобыле в разное время принимали деятельное участие В. Н. Аксенов, Г. С. Бойков, Л. В. Драпчинский, Е. А. Зайцев, А. А. Кожевников, С. И. Прокофьев, А. Г. Прусаков, С. Н. Смирнов, А. А. Филатенков, С. В. Чуваев. Водителями-дозиметристами лаборатории являлись, также в разное время, Ю. И. Гунин, М. С. Елистратов, И. М. Юнусов. Немаловажным обстоятельством явилась преемственность работавших в лаборатории сменных групп, что позволяло осуществлять долговременные комплексные исследования.

Программа деятельности лаборатории радиометрии учитывала прежде всего производственные потребности УС-605: оперативный контроль состояния радиоактивной загрязненности приземного слоя воздуха на промплощадке вокруг аварийного блока и в зоне проведения строительно-монтажных работ на самом блоке (точнее – в районе сооружения разделительной стены между 3-м и 4-м блоками), территории

¹ Указание А. Г. Мешкова № 1476 от 28.05.86.

всей ЧАЭС, в других местах работы персонала УС-605 и местах его базирования, а также определение концентраций наиболее токсичных радионуклидов в питьевой воде, грунте, продуктах питания и т. д. В ходе работ у лаборатории радиометрии сложились чрезвычайно продуктивные деловые и вместе с тем товарищеские отношения с руководством отдела дозиметрического контроля УС-605, сформированным из сотрудников ВНИИЭФ (Л. Ф. Беловодский, В. К. Гаевой и др.), с руководством УС-605, а также с руководством Оперативного штаба отрасли в Чернобыле.

Лаборатория располагалась в здании Чернобыльской районной типографии (Советская ул., д. 9) и поначалу занимала ее подвальное помещение с относительно низким уровнем фона, который в дальнейшем поддерживался и даже был существенно уменьшен регулярными мероприятиями по дезактивации. Это помещение было чрезвычайно удачно обнаружено и освоено экспедиционной группой Радиевого института (А. А. Римским-Корсаковым) еще в середине мая 1986 г. В конце августа 1986 г. при определяющем содействии режимных органов УС-605 и Оперативной группы КГБ СССР при Правительственной комиссии СССР лаборатория сумела расконсервировать, дезактивировать и освоить все здание типографии.

В июне–июле 1986 г. лаборатория располагала одним γ -спектрометром на основе Ge-Li-детектора и многоканального анализатора Nokia-LP 4900. В конце августа 1986 г. в лаборатории был запущен второй спектрометр на основе анализатора Nokia-LP 4900В. Два анализатора были объединены в единый спектрометрический комплекс, автоматизированный силами сотрудников лаборатории и работавший круглосуточно. Лаборатория располагала также и другим радиометрическим и дозиметрическим оборудованием: приборами КРК-1, КРА-1, α -спектрометром СЭА-1 и др.

Наличие в составе лаборатории радиометрии как высококвалифицированных специалистов в области ядерной спектроскопии и физики ионизирующих излучений, так и самого современного (на тот момент) оборудования позволило ей решать широкий круг задач, далеко выходящих за рамки ее штатных обязанностей. Специфика ситуации, сложившейся в 30-километровой зоне, заключалась, в частности, в том, что практически все организации, принимавшие участие в работах по ликвидации последствий аварии на ЧАЭС, испытывали острую потребность как в оперативной количественной информации о концентрациях и изотопном составе γ -излучающих радионуклидов, которую можно было бы получать непосредственно в Чернобыле, так и в помощи по осмыслению этой информации.

Уже в июле 1986 г. лаборатория стала основным измерительным центром Чернобыля: значительная часть оперативной количественной информации по программам организаций МСМ, Министерства обороны (Оперативной группы Управления начальника химвойск – далее ОГ УНХВ и др.), Госкомгидромета, Минздрава, АН УССР и т. д. по концентрациям и изотопному составу радионуклидов была получена именно в спектрометрическом центре Радиевого института. Наличие в Чернобыле спектрометрического центра Радиевого института позволило оперативно решать вопросы по эффективности дезактивации зданий, территории, военной и строительной техники, вод малых рек, стекающих в р. Припять, сточных вод пунктов специальной обработки автотранспорта (ПуСО), по радиоэкологической обстановке в 30-километровой зоне, УССР, БССР и др. За время существования лаборатории (шесть месяцев) проведено около 10000 анализов изотопного состава и суммарных концентраций γ -излучающих радионуклидов в образцах различного происхождения. Полученная в лаборатории количественная информация зачастую предопределяла выработку ответственных управленческих решений.

Лаборатория приняла активное участие в работах по контролю за возможным газоаэрозольным выбросом из развала 4-го блока ЧАЭС. Начатые в мае–начале июня 1986 г. экспедиционной группой Радиевого института исследования с отбором проб воздуха с борта вертолета (см. статью А. А. Римского-Корсакова, П. И. Федотова, Ю. В. Дубасова и др. «Исследование выброса аварийного реактора 4-го блока Чернобыльской АЭС» в настоящем сборнике) были продолжены в июне–июле 1986 г. силами сотрудников лаборатории. Дополнительно с использованием модифицированной методики «вертолетного» пробоотбора, предложенной Ю. В. Дубасовым, в июне 1986 г. были проведены работы, направленные на оценку размеров и локализацию источников радиоактивных аэрозолей в районе аварийного блока.

Дальнейшим развитием работ по контролю газоаэрозольного выброса стали проведенные по решениям Правительственной комиссии измерения с использованием аппаратуры, установленной на тресе, протянутом над развалом 4-го блока. Эти исследования, в которых кроме лаборатории радиометрии Радиевого института приняли участие ОГ УНХВ, НИФХИ им. Л. Я. Карпова, ВНИИНМ и ИАЭ, были осуществлены в конце августа–сентябре 1986 г. и позволили получить первые прямые данные по концентрациям и изотопному составу радиоактивных аэрозолей непосредственно над развалом 4-го блока. Измерения концентраций радионуклидов в воздухе были проведены сотрудниками лаборатории в начале октября 1986 г. непосредственно в центральном зале 4-го блока сразу же после его перекрытия трубным настилом.

Таким образом, Радиевый институт принял определяющее участие во всем комплексе исследований по контролю над газоаэрозольным выбросом из развала 4-го блока ЧАЭС – от начала работ по ликвидации последствий аварии и до перекрытия центрального зала 4-го блока.

В середине сентября–начале октября 1986 г. специалистами лаборатории радиометрии совместно с теоретико-расчетной группой Филиала ИАЭ (ФИАЭ), возглавляемой А. М. Дыхне, была разработана и реализована программа измерения характеристик интенсивных гамма-полей над 4-м блоком, что было обусловлено практическими потребностями, возникавшими в ходе сооружения (тогда еще) «Саркофага». Так, спектральный состав γ -излучения над развалом 4-го блока напрямую определял параметры биологической защиты, которую предполагалось разместить над его перекрытием, а величина мощности экспозиционной дозы (МЭД) γ -излучения над трубным настилом, уложенным к концу сентября над центральным залом и являющимся источником рассеянного γ -излучения, в значительной мере определяла радиационную обстановку вокруг блока. В ходе реализации программы в конце сентября–начале октября 1986 г. были проведены измерения «жесткости» спектра γ -излучения непосредственно над развалом 4-го блока и несколько позднее над его перекрытием и оценена форма этого спектра, проведены первые прямые измерения МЭД γ -излучения над трубным настилом, северным и южным сепараторными помещениями, измерен вклад, внесенный в мощность дозы над перекрытием блока излучением, перерассеянным в воздухе и приходящим от топлива, попавшего в район вентиляционной трубы блока «В», и, наконец, снята довольно подробная «карта» МЭД над перекрытием 4-го блока. Полученные данные являлись уникальными.

На основе этих результатов в начале октября 1986 г. по поручению Правительственной комиссии специалистами лаборатории радиометрии Радиевого института, ИАЭ и ВНИИАЭС были осуществлены расчеты радиационной обстановки на территории ЧАЭС за счет излучения, выходящего из 4-го блока. Результаты измере-

ний и данные расчетов послужили одним из весомых научных аргументов при принятии принципиального решения – отказе от размещения биологической защиты над трубным настилом перекрытия 4-го блока (что в свою очередь привело к существенному смягчению терминов: ко многому обязывающий «Саркофаг 4-го блока ЧАЭС» был удачно заменен – кажется, А. А. Абагяном – на нейтральное «Укрытие 4-го блока ЧАЭС»).

Накопленный в этих измерениях опыт позволил специалистам лаборатории радиометрии выполнить в октябре 1986 г. комплекс работ по исследованию эффективности разделительной стены между помещениями машинных залов 3-го и 4-го блоков и показать, что основным источником повышенного фона в машинном зале 3-го блока является ядерное топливо, локализованное в районе крыши машинного зала.

Собственные результаты работ лаборатории радиометрии регулярно (примерно раз в месяц, начиная с июля 1986 г.) докладывались на заседаниях Правительственной комиссии.

Таким образом, комплекс работ лаборатории радиометрии Радиевого института в Чернобыле можно подразделить на:

- 1) штатную деятельность в рамках ОДК УС-605 – оперативный контроль приземного слоя воздуха, включающий ежедневный пробоотбор в контрольных точках, экспрессный анализ проб и выдачу в случае необходимости рекомендаций по регламенту проведения строительно-монтажных работ, пылеподавлению, влажной уборке помещений и т. д.;
- 2) деятельность по заданиям и поручениям Оперативного штаба отрасли при Правительственной комиссии;
- 3) совместные работы с другими организациями в рамках соответствующих постановлений Правительственной комиссии.

В силу того, что объем полученного фактического материала существенно превышает рамки одной статьи (достаточно отметить, что заключительный отчет лаборатории [1] превышает 400 страниц), ее авторы сосредоточили основное внимание на собственных исследованиях лаборатории и на тех наиболее значимых совместных работах, в которых лаборатория выступила в роли ведущего участника, формирующего идеологическую часть работы.

Отдельные фрагменты настоящей работы докладывались авторами на Всесоюзном семинаре «Научные проблемы ликвидации последствий аварии на ЧАЭС», Звенигород, 1990 г. [2, 3] и на Всероссийской конференции «Радиологические, медицинские и социально-экономические последствия аварии на Чернобыльской АЭС. Реабилитация территорий и населения», НМЦ «Голицыно», Москва, 1995 г. [4, 5]. Однако относительно полная картина исследований лаборатории радиометрии в Чернобыле в настоящей работе представлена впервые.

И, наконец, последнее. При подготовке ряда разделов настоящей работы ее авторы сознательно не вносили корректив, которые бы сглаживали и модернизировали представления о механизме протекания аварии на 4-м блоке ЧАЭС и начальных мерах по ликвидации ее последствий, бытовавшие в 1986 г. и нашедшие отражение в известном докладе В. А. Легасова [6]. Весь фактический материал, а также его интерпретация полностью соответствуют реальным документам, оформленным непосредственно в Чернобыле в 1986 г. и ныне включенным в состав отчета [1].

1. Экспериментальные методики

1.1. Организация гамма-спектрометрического анализа образцов

В первой декаде июня 1986 г. в лаборатории был запущен γ -спектрометр на базе полупроводникового германий-литиевого детектора ДГДК-63 и многоканального амплитудного анализатора Nokia LP-4900 (разрешение 3,5 кэВ для ^{137}Cs) с последующей обработкой данных на программируемом калькуляторе HP-97. Следующим шагом явился запуск в конце августа 1986 г. второго γ -спектрометра на базе детектора ДГДК-40 и многоканального программируемого анализатора Nokia LP-4900В, имеющего в своем составе встроенную микро-ЭВМ, матричную печать, дисковую операционную систему, включающую языки BASIC и ASSEMBLER, а также программы обработки файлов. Для обмена данными между анализатором LP-4900 и программируемым анализатором LP-4900В использовались кассетные накопители, входящие в комплект каждого анализатора. Таким образом, оба спектрометра были объединены в один комплекс. Типичный вид графической распечатки γ -спектра исследуемого образца с выдачей количественных данных о его удельной активности представлен на рис. 1.

Khlopin Radium Institute
For VENT BAIPAS

16. 11. 1986	F1						
T = 500 sec	Volume 24600						
H = .2 sm	R = 2.4 sm						
Nucl.	E. kev	T 1/2		A. Ku/Unit	SA. %	%	DKa. Ku/L
Cs-134	795.8	2.066	Y	= 5.28 E-14	37	.3	1.3 E-11
Nb-95	765.8	34.98	D	= 7.28 E-14	22	.4	10 E-11
Zr-95	724.2	60.03	D	<= 9.88 E-15	101	.1	3.2 E-11
Cs-137	661.7	30.17	Y	= 1.52 E-13	18	.8	1.4 E-11
Ru-106	622.1	367.0	D	= 1.54 E-11	16	84.4	5.6 E-12
Ru-103	497.1	39.36	D	= 2.46 E-12	16	13.4	5.2 E-11
Ce-141	145.4	32.50	D	<= 6.47 E-15	101	0	1.6 E-10
Ce-144	133.5	284.4	D	= 1 E-13	65	.5	6.4 E-12
		Sum.		<= 1.83 E-11	15		

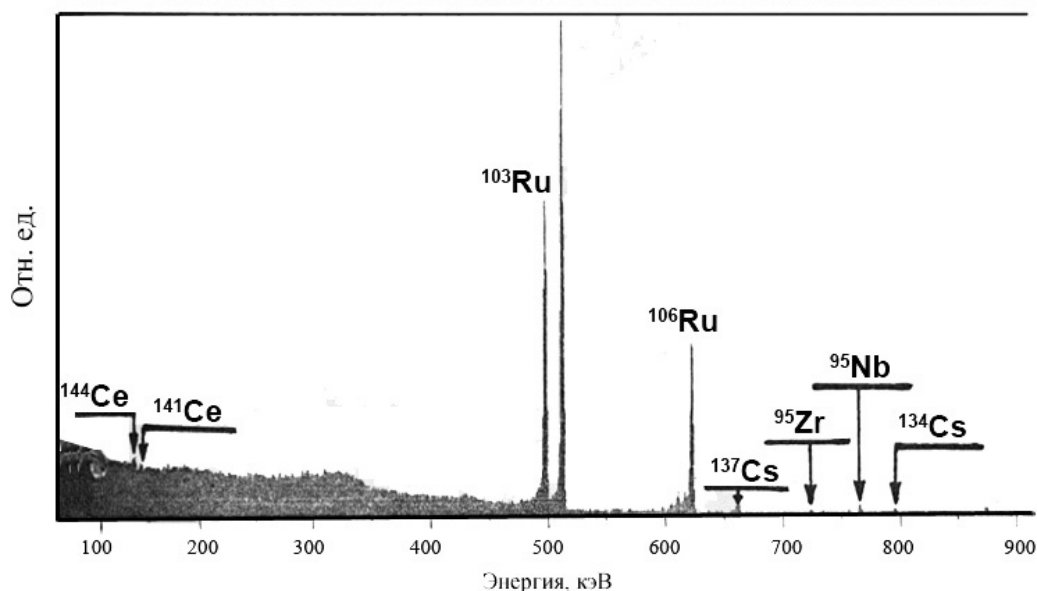


Рис. 1. Вид распечатки γ -спектра (воздух из системы контроля газо-аэрозольного выброса 4-го блока в момент ее запуска, ноябрь 1986 г.) и графическое представление этого спектра.

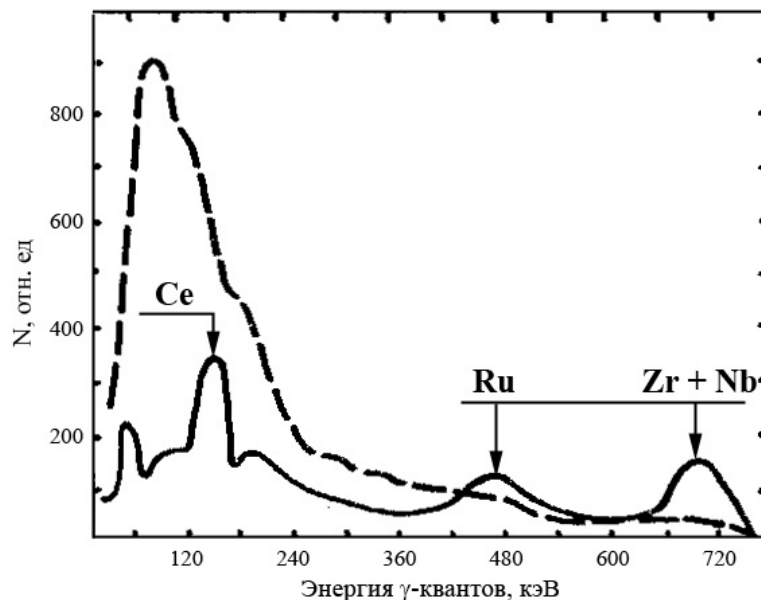
К началу сентября были подготовлены и запущены усовершенствованные программы обработки γ -спектров, отличительной особенностью которых являлся учет геометрии измеряемого образца. Необходимость внесения «геометрического» блока определялась сложностью подготовки образцов стандартной геометрии и большим числом разнохарактерных проб. Эффективность регистрации γ -излучения объемных образцов определяли расчетным путем на основе выведенного для образца цилиндрической формы аналитического выражения. Для учета процессов самопоглощения в образцах с различной плотностью в октябре программа была модифицирована.

Фон спектрометров измеряли два раза в неделю и его новые значения каждый раз вносили в программу обработки. Тщательная регулярная дезактивация помещения и выбор места размещения детекторов позволили снизить фон по сравнению с первоначальным в пять раз (до 40–45 мкР/ч).

Спектрометр на основе анализатора LP-4900 прошел метрологическую аттестацию с участием ВНИИФТРИ в июне 1986 г., а весь спектрометрический комплекс – в сентябре.

1.2. Измерения спектра реального гамма-поля в Чернобыле

Для определения возможных причин расхождения дозиметров разных типов в июле 1986 г. лабораторией было проведено сравнение спектра реального гамма-поля в Чернобыле с невозмущенным спектром γ -лучей отработавшего топлива (проба грунта с промплощадки с типичным изотопным составом). Для проведения измерений использовали спектрометр на основе сцинтилляционного детектора NaI(Tl) (40 × 40 мм), а сами измерения проводили в условиях, минимизирующих влияние рассеяния от окружающих предметов. Результаты измерений (без введения поправок на функцию отклика детектора) приведены на рис. 2, который демонстрирует, что реальный спектр гамма-поля в значительной степени определяется процессами переноса, рассеяния и поглощения исходных γ -лучей.



- «невозмущенный» спектр
- - - спектр реального поля на высоте 1 м

Рис. 2. Гамма-спектр реального поля в Чернобыле и «невозмущенный» спектр отработавшего топлива (данные приведены на 10.07.86).

Из полученных результатов следует вывод о резком отличии реального спектра распределенного источника большого размера ($d \geq 100$ м, где d сравнимо с длиной свободного пробега γ -лучей в воздухе) от исходного спектра отработавшего топлива, что с необходимостью должно учитываться при измерениях мощности дозы дозиметрами с большим ходом жесткости (например, КРБГ) и малых энергиях γ -лучей.

Не менее важен учет этого факта при измерениях в интенсивных гамма-полях, когда при мощностях доз, превышающих верхний предел используемого прибора, датчик помещается в защитный экран. Так, при толщине экрана из свинца 8 мм ослабление мощности дозы прямого излучения топлива $K_1 \approx 2$. В то же время для реального спектра, характерного для Чернобыля (распределенный источник бесконечно больших размеров), это ослабление $K_2 \approx 7-9$.

1.3. Методика отбора воздушных проб. Изучение дисперсного состава радиоактивных аэрозолей

С июня по ноябрь 1986 г. лабораторией радиометрии на территории промплощадки и в местах размещения персонала УС-605 проводили систематический пробоотбор воздуха. В июне отбор проб воздуха на промплощадке осуществляли с помощью бортовой системы бронетранспортера, объезжавшего станцию по периметру, в 4–6 точках. Фильтры с удержанными на них радиоактивными аэрозолями измеряли совместно, и, таким образом, полученные значения активностей представляли усредненную по территории станции концентрацию радиоактивных аэрозолей в приземном слое воздуха. С июля по конец ноября отбор проб воздуха осуществляли в контрольных точках и в помещениях ЧАЭС с помощью переносных приборов ППА-2 и ППА-3 с использованием спектрометрических фильтров АФА-РСП. В июне–августе проводили также контроль загрязненности приземного слоя воздуха в месте базирования ОДК УС-605 (в июне – пос. Залесье, 3 км южнее Чернобыля) и в самом Чернобыле с использованием фильтровентиляционной установки большой производительности, разработанной в РИ.

Концентрации α - и β -радиоактивных аэрозолей, удержанных фильтрами, определяли с помощью прибора КРК-1. Концентрации и изотопный состав γ -излучающих радионуклидов измеряли на γ -спектрометре, описанном в разделе 1.1.

В процессе работ совместно с НИФХИ и ИФ АН УССР был изучен дисперсный состав радиоактивных аэрозолей в приземном слое атмосферы в окрестностях 4-го блока ЧАЭС (июль) и непосредственно над развалом 4-го блока (сентябрь). Основные результаты этих исследований сводятся к следующему.

1. На расстоянии 1–3 км от 4-го блока ЧАЭС в первой половине июля γ -излучающие радионуклиды концентрировались на аэрозольных частицах с размерами 0,7–1 мкм.
2. В помещениях ЧАЭС в июле 1986 г. радионуклиды были сконцентрированы на частицах с размерами 0,5–0,7 мкм, что, по-видимому, связано с отсутствием заметного пылеподъема и с осаждением более крупных фракций при влажной уборке помещений.
3. Исследования дисперсного состава радиоактивных аэрозолей с помощью набора трековых мембран (так называемых «ядерных» фильтров, предоставленных лаборатории академиком Г. Н. Флеровым), проведенные в середине сентября непо-

средственно над развалом 4-го блока, показали, что основная часть активности (85–95 %) связана с частицами размером порядка 1 мкм. При оценке представительности этого результата следует, однако, иметь в виду, что в июне–августе 1986 г. развал 4-го блока подвергался регулярному массивованному пылеподавлению с использованием разнообразных полимерных покрытий.

2. Оперативный радиометрический контроль и исследование состояния воздушной среды

Как уже отмечалось во Введении, основной задачей лаборатории радиометрии в рамках ОДК УС-605 являлся оперативный контроль содержания и изотопного состава радиоактивных аэрозолей в воздухе в местах проведения работ и базирования персонала УС-605. Методика пробоотбора и приборное оснащение лаборатории, описанные в предыдущей главе, позволяли получать полную информацию о концентрациях γ -излучающих радионуклидов, а также дополнительно α - и β -излучателей в приземном слое воздуха.

Поскольку объем получаемой ежедневной информации оказался достаточно большим, возникла необходимость создания соответствующего банка данных, который был реализован на базе дисковой операционной системы анализатора LP-4900B. Это позволило осуществлять быстрый доступ к накопленной информации, которая в виде соответствующих распечаток и рекомендаций на их основе регулярно передавалась в ОДК УС-605, а также в Оперативный штаб отрасли для принятия решений по регламенту работ, пылеподавлению и др. Информация по радиоактивной загрязненности приземного слоя воздуха, а также другие оперативные данные, полученные в лаборатории, регулярно передавались и в теоретико-расчетную группу ФИАЭ, организовавшую при Правительственной комиссии банк данных по радиационной обстановке в ближней и дальней зонах. В дальнейшем (сентябрь 1986 г.) эти функции взял на себя Главинформ при СМ СССР. В 1990–1992 гг. совокупность информации по радиоактивной загрязненности приземного слоя воздуха, полученная в спектрометрическом центре Радиового института, была включена в общую базу данных Радиового института по проблемам ликвидации последствий аварии на ЧАЭС.

Ежедневно в течение всего периода с июля по ноябрь 1986 г. оперативный радиометрический контроль осуществлялся в четырех точках:

- улица у АБК-1 (административно-бытового корпуса № 1 ЧАЭС),
- улица у АБК-2,
- транспортный коридор 3-го блока,
- блок «В», отметка +12,5 (район сооружения разделительной стены между 3-м и 4-м блоками ЧАЭС).

Кроме того, для обеспечения оперативного дозиметрического контроля работ, проводимых в различных районах промплощадки и за ее пределами, вводились дополнительные контрольные точки. Число этих дополнительных точек к концу августа 1986 г. достигло 10.

Из совокупности оперативных данных по концентрациям и изотопному составу γ -излучающих радионуклидов в приземном слое воздуха, полученных в период с июня по ноябрь 1986 г., были сделаны следующие основные выводы.

1. Существовали значительные колебания (в десять раз и более) суммарной активности в течение 1–2 сут, которые были обусловлены как масштабом и характером проводимых на промплощадке работ, так и конкретными метеоусловиями.

Следует упомянуть, что в случаях существенного превышения $ДК_A^2$, что, например, имело место в ходе работ по дезактивации кровли блока «В», а также в ходе интенсивных строительно-монтажных работ по установке балки «Мамонт», лаборатория радиометрии по согласованию с ОДК обращалась непосредственно к руководству Оперативного штаба отрасли с предложениями о проведении массированного пылеподавления территории, прилегающей к 4-му блоку, на основании чего принимались соответствующие оперативные меры, включая использование вертолетов и пожарных машин.

2. Сопоставление относительного содержания γ -излучателей в воздухе на промплощадке и в сравнительном удалении (15–20 км) от ЧАЭС показывает, что механизмы формирования радиоактивной загрязненности в этих случаях различны. В то время как в первом случае относительное содержание γ -излучающих радионуклидов в воздухе близко, как правило, к топливному, во втором систематически наблюдалось повышенное (до 95 % от общей активности) содержание изотопов рутения.

Из этих данных можно сделать вывод о том, что механизм загрязнения приземного слоя воздуха радионуклидами на территории ЧАЭС определялся в основном пылеобразованием в ходе интенсивных строительно-монтажных работ. В то же время аналогичный механизм для отдаленных от промплощадки точек был связан прежде всего с миграцией радионуклидов, определяемой их физико-химическими свойствами, в частности, высокой летучестью окисных форм рутения. При этом относительное содержание γ -излучателей в грунте на промплощадке и в районе Чернобыля различалось незначительно.

3. Анализ среднемесячных значений суммарной концентрации γ -излучающих радионуклидов показал, что:

- в контрольных точках, удаленных от районов наиболее интенсивных строительно-монтажных работ, наблюдалось постоянное снижение активности аэрозолей от июля к ноябрю;
- в контрольных точках, расположенных в непосредственной близости к аварийному блоку, явного уменьшения активности в период с июня по октябрь не было; более того, в сентябре среднемесячные значения концентраций в ряде контрольных точек существенно превышали аналогичные величины для июля–августа и соответствующие $ДК_A$;
- как правило, концентрации радионуклидов в воздухе помещений промплощадки превышали аналогичные величины для открытой территории;
- в ноябре отмечено общее снижение концентраций радиоактивных аэрозолей по всем контрольным точкам с выходом на уровень ниже $ДК_A$, что связано с резким сокращением объема строительно-монтажных работ и изменившимися метеоусловиями.

² В соответствии с НРБ-76, действовавшими на момент аварии, $ДК_A$ – предельно-допустимая концентрация данного нуклида (или группы нуклидов) в воздухе для группы А (профессионалов) в единицах Ки/л.

3. Работы по заданиям Правительственной комиссии и Оперативного штаба отрасли

3.1. Контроль газоаэрозольного выброса из 4-го блока ЧАЭС

3.1.1. Вертолетная программа

С начала июня после отъезда экспедиционной группы Радиевого института работы по контролю за газоаэрозольным выбросом из 4-го блока были возложены на лабораторию радиометрии (совместно с МО СССР).

Существенное уменьшение концентрации радионуклидов в (возможном) газоаэрозольном выбросе 4-го блока потребовало повышения чувствительности измерений. Модификация методики пробоотбора, предложенная лабораторией и основанная на многократном пролете вертолета в предполагаемой струе выброса по отрезку длиной примерно 5 км (вместо прямого прохождения над развалом), позволила довести объем прокачанного через фильтр воздуха до 4 м³. Вместе с тем была заметно снижена радиационная нагрузка на экипаж вертолета и на научный персонал.

Оценки величины возможного газоаэрозольного выброса из развала 4-го блока, учитывающие измеренные концентрации радионуклидов, скорость ветра и предполагаемую форму струи выброса, приведены в табл. 1. Проведенные измерения свидетельствовали о значительных колебаниях как суммарной активности, так и относительного содержания радионуклидов, в особенности, обладающих высокой летучестью (йод, рутений).

Таблица 1

Оценка мощности выброса и запаса активности в «облаке» аэрозоля
над 4-м блоком ЧАЭС

Дата	Мощность, Ки/сут	Примечания
9 мая	13000*	
16 мая	1700*	
19 мая	50*	
23 мая	20*	Дана оценка концентрации радионуклидов в пересчете на 1 км ³ воздуха
29 мая	10*	
6 июня	100*	
9 июня	30	
21 июня	<2	Дана оценка общей активности в шлейфе выноса на высоте 200 м над 4-м блоком
26 июня	13	
3 июля	<2	
12 июля	<2	
17 июля	<2	

* Данные экспедиционной группы Радиевого института из работы А. А. Римского-Корсакова и др. в настоящем сборнике приведены для сопоставления.

Можно было предположить, что из-за значительного снижения (прекращения?) выброса радионуклидов непосредственно из развала 4-го блока наблюдаемые колебания в условиях сухой и жаркой погоды определяются вкладом, обусловленным ветровым подъемом радиоактивных веществ с загрязненной территории. В силу этого в рамках вертолетной программы были проведены измерения, направленные на оценку размеров и локализацию источников радиоактивных аэрозолей в районе аварийного блока. С этой целью в одинаковых метеоусловиях 15 и 20 июня были проведены отборы проб воздуха двумя способами. В первом случае воздухозабор осуществлялся при радиальном движении вертолета вдоль оси предполагаемого выброса. Во втором – отбор производился при движении вертолета по кругу с центром в месте расположения 4-го блока; радиусы кругов составляли 5 и 0,5 км. Результаты измерений приведены в табл. 2. Данные измерений проб, отобранных при круговом полете, помещены в столбец К, при радиальном – Р.

Таблица 2

Результаты измерений при отборе проб воздуха в случаях радиального и кругового движения вертолета

Изотоп	Активность, Ки/л·10 ¹⁴					
	радиус круга 5 км			радиус круга 0,5 км		
	Р	К	Р/К	Р	К	Р/К
¹⁴⁴ Ce	68	8,7	7,8	48	42	1,1
¹³¹ I	62	0,6	103	12	6	2
¹⁰³ Ru	790	31	25	156	80	1,75
¹³⁷ Cs	6	0,07	86	11	4	2,7
⁹⁵ Zr	77	5	15	64	70	0,9
¹³⁴ Cs	10	0,15	67	7	3	2,3

Оценка локализации и размеров источников радиоактивных аэрозолей была проведена на основании следующих допущений:

- отбор проб при радиальном движении вертолета дает информацию о средних концентрациях радионуклидов в струе предполагаемого газоаэрозольного выброса;
- отбор проб при круговом полете дает информацию о концентрациях радиоактивных аэрозолей над поверхностью круга, находящегося внутри траектории облета.

В рамках этих предположений отношение концентраций Р и К можно отождествить с отношением длины круга облета и длины дуги, образуемой пересечением этой окружности со струей от некоторого источника.

Из табл. 2 видно, что для круга с радиусом 0,5 км в случае цезия и циркония отношение Р/К близко к единице, то есть их источником является объект с линейными размерами более 1 км. Для иода и рутения отношение Р/К составляет примерно 2, что в свою очередь свидетельствует о том, что их источник локализован в районе с размерами 0,3–0,5 км.

Результаты измерения проб, отобранных при облете 4-го блока по кругу с радиусом 5 км, показывают, что в этом случае отношение Р/К значительно больше единицы. Таким образом, источники радиоактивных аэрозолей находятся внутри данного круга, причем могут быть выделены два типа источников, имеющих различные геометрические размеры. Назовем их условно «рутениевый» и «циркониевый». «Рутениевый» является источником легколетучих аэрозолей и имеет размер не более 1 км, «циркониевый» – около 3 км. «Рутениевый» источник можно отождествить с самим аварийным блоком, в то время как «циркониевым» источником является загрязнение поверхности в районе 4-го блока. Справедливость этих выводов позже, в 1989 г., была подтверждена при исследовании топливосодержащих масс (ТСМ) и переплавленного металла, отобранных внутри аварийного блока (см, например, [7, 8]): в подреакторных помещениях были обнаружены большие количества переплавленного металла, значительно обогащенного рутением, а сами ТСМ оказались существенно им обеднены. Таким образом, существовал эффективный механизм удержания рутения в пределах здания 4-го блока, в силу которого лишь незначительная доля этого изотопа, наработанного в реакторе, вылетела в виде летучей фракции.

3.1.2. Измерения с помощью аппаратуры, установленной на тросе, протянутом над развалом 4-го блока. Концентрации радионуклидов в воздухе центрального зала 4-го блока после его перекрытия

Из табл. 2 видно, что уже к середине июля вертолетная программа фактически исчерпала себя: из-за существенного уменьшения концентрации радионуклидов в воздухе над 4-м блоком можно было определять лишь верхнюю границу мощности возможного выброса аварийного блока.

Продолжением работ по изучению газоаэрозольного выброса стали проведенные в соответствии с решениями Правительственной комиссии измерения с использованием аппаратуры, установленной на тросе, протянутом над развалом 4-го блока. В этой многоцелевой программе, в которой кроме лаборатории радиометрии РИ приняли участие ОГ УНХВ, НИФХИ, ВНИИНМ и ИАЭ, получению экспериментальных данных для оценки параметров выброса радиоактивных нуклидов из зоны 4-го блока было уделено первоочередное внимание.

С помощью троса, переброшенного через центральный зал 4-го блока из помещения 7001 корпуса «В» на западную стену 4-го блока, и укрепленного на этом тросе тросохода конструкции ПРП «Белоярскомэнергоремонт» с воздухозаборными устройствами, оснащенными пакетами фильтрующих материалов, импактором для определения дисперсности аэрозолей и др., в конце августа–середине сентября осуществлялся регулярный отбор проб воздуха над развалом 4-го блока с последующим измерением изотопного состава и концентраций γ -излучающих радионуклидов.

В качестве примера в табл. 3 приведен радионуклидный состав аэрозолей над развалом, измерение 09.09.86 г. Из таблицы видно, что суммарная концентрация γ -излучающих радионуклидов на эту дату лишь в 4 раза превышала ДК_А для смеси нуклидов, которая, согласно НРБ-76, определяется по формуле:

$$ДК_A = \frac{\sum_i n_i}{\sum_i \frac{n_i}{ДК_A^i}}$$

где n_i – доля (процентное содержание) по активности для i -го нуклида смеси,
 $ДК_A^i$ – допустимая концентрация для i -го нуклида.

Таблица 3

Радионуклидный состав и относительное содержание γ -излучающих радионуклидов над развалом 4-го блока (измерение 09.09.86)

Нуклид	Период полураспада	Активность, Ки/л	Относительное содержание, %	ДКА, Ки/л
^{144}Ce	284,4 сут	$15,1 \cdot 10^{-12}$	31,5	$6,4 \cdot 10^{-12}$
^{141}Ce	62,5 сут	$1,72 \cdot 10^{-12}$	3,6	$1,6 \cdot 10^{-10}$
^{103}Ru	39,4 сут	$3,03 \cdot 10^{-12}$	6,3	$5,2 \cdot 10^{-11}$
^{106}Ru	367,0 сут	$5,95 \cdot 10^{-12}$	12,4	$5,6 \cdot 10^{-12}$
^{137}Cs	30,17 лет	$1,98 \cdot 10^{-12}$	4,1	$1,4 \cdot 10^{-11}$
^{95}Zr	60,0 сут	$6,63 \cdot 10^{-12}$	13,8	$3,2 \cdot 10^{-11}$
^{95}Nb	35,0 сут	$12,6 \cdot 10^{-12}$	26,3	$1,0 \cdot 10^{-10}$
^{134}Cs	2,07 года	$8,40 \cdot 10^{-13}$	1,7	$1,3 \cdot 10^{-11}$
Сумма		$4,8 \cdot 10^{-11}$		$1,2 \cdot 10^{-11}$

В табл. 4 приведены суммарные концентрации γ -излучающих радионуклидов над развалом 4-го блока в период с 29 августа по 11 сентября. Таблица демонстрирует, что значения суммарных концентраций в воздухе над развалом на высоте 20–30 м составляли $3,4 \cdot 10^{-12}$ – $6,5 \cdot 10^{-11}$ Ки/л. Сравнение этих результатов с данными по суммарным концентрациям γ -излучающих радионуклидов на площадке в тот же период показывает, что полученные величины близки между собой. Это в свою очередь означало, что к концу августа–началу сентября 1986 г. 4-й блок перестал являться источником загрязнения приземного слоя воздуха радионуклидами.

Таблица 4

Суммарные концентрации γ -излучающих радионуклидов над развалом 4-го блока ЧАЭС

Дата	Суммарная концентрация, Ки/л	Примечания
Радиевый институт + ВНИИНМ + МО СССР		
29.08	$4,1 \cdot 10^{-11}$	
03.09	$3,1 \cdot 10^{-11}$	
Радиевый институт + НИФХИ + МО СССР		
03.09	$3,4 \cdot 10^{-12}$	Измерения проведены в разное время суток
03.09	$6,5 \cdot 10^{-11}$	
03.09	$3,3 \cdot 10^{-11}$	
09.09	$4,8 \cdot 10^{-11}$	
10.09	$3,9 \cdot 10^{-12}$	
11.09	$2,5 \cdot 10^{-11}$	
11.09	$1,0 \cdot 10^{-11}$	Измерения проведены с помощью ядерных фильтров для определения размера радиоактивных аэрозолей
Радиевый институт. Центральный зал 4-го блока после перекрытия		
02.10	$1,4 \cdot 10^{-11}$	Измерения проведены при двух положениях воздухозаборника для оценки восходящего потока
02.10	$8,5 \cdot 10^{-11}$	

В предположении, что площадь истечения радиоактивных аэрозолей равна горизонтальному сечению блока «Б» (примерно 4000 м^2), с использованием показаний термоанемометров ИАЭ, размещенных на буюх вдоль трассы троса на поверхности развала, что позволяло измерять вертикальные составляющие скоростей воздушных потоков, была проведена оценка максимально возможного суммарного выброса развала 4-го блока. Результаты оценки приведены в табл. 5.

Полученные оценки являются верхними, поскольку при их проведении предполагалось, что равномерно «газит» вся поверхность блока «Б».

Как уже отмечалось в разделе 1.3, в опытах над развалом 4-го блока с помощью импактора с набором трековых мембран было проведено измерение дисперсного состава радиоактивных аэрозолей и установлено, что в 20–30 м над поверхностью развала преобладают радиоактивные аэрозоли с диаметром частиц порядка 1 мкм.

Таблица 5

Оценка максимального суммарного выброса γ -излучающих радионуклидов развалом 4-го блока

Дата	Средняя суммарная концентрация радионуклидов, Ки/м ³	Средние скорости потоков, м/с, с буюв №				Максимальный суммарный выброс, Ки/сут
		1	2	4	6	
29.08.86	$3,3 \cdot 10^{-8}$	0,5	2,0	2,2	0,4	15
03.09.86	$4,3 \cdot 10^{-8}$	0,2	0,2	0,1	0,2	3
09.09.86	$4,8 \cdot 10^{-8}$	0,4	0,4	0,25	0,2	5

Неожиданно стабильно малые величины удельных концентраций γ -излучающих радионуклидов над развалом 4-го блока, полученные в ходе вышеизложенных работ, побудили лабораторию радиометрии совместно с представителями ВНИИНМ и НИФХИ обратиться в Правительственную комиссию с предложением об изменении проекта «Саркофага» 4-го блока ЧАЭС, который предполагал организацию обязательной принудительной вентиляции после полного перекрытия развала. Предложение рекомендовало использовать только естественную конвекцию, оставив принудительную вентиляцию в качестве резервной ([1], с. 189). Как известно, это предложение в конечном счете было реализовано.

По поручению руководителя Оперативного штаба отрасли зам. министра МСМ А. Н. Усанова лаборатория радиометрии Радиового института взяла на себя выяснение вопроса о величине концентрации радионуклидов в воздухе центрального зала непосредственно после его перекрытия ([1], с. 190). При этом был использован «проран», образованный взрывом, который был произведен для установки коробов вентиляционной системы на отметке +43,00 корпуса «В», и были отобраны две пробы воздуха: в первой пробе положение фильтра, на который осаждались аэрозоли, было параллельным вертикальной стене здания, во второй – перпендикулярным, что позволило учесть восходящие потоки. Основным результатом измерений явился вывод о том, что суммарные концентрации γ -излучающих радионуклидов в воздухе центрального зала 4-го блока после его перекрытия составляют соответственно $1,4 \cdot 10^{-11}$ и $8,5 \cdot 10^{-11}$ Ки/л и близки, таким образом, к концентрациям радионуклидов в воздухе на промплощадке.

3.2. Измерения мощностей экспозиционных доз и спектра гамма-поля над 4-м блоком ЧАЭС

Работы, краткое описание которых приведено в этом разделе, проводились лабораторией радиометрии совместно с теоретико-расчетной группой ФИАЭ (Р. В. Арутюнян, А. М. Дыхне, Е. В. Ткаля и др.).

К решающему моменту работ по сооружению «Саркофага» – перекрытию центрального зала 4-го блока – у проектировщиков, строителей, Оперативного штаба отрасли и у Правительственной комиссии не было никакой уверенности в надежности строительных конструкций, которые должны были нести на себе всю массу перекрытия и размещаемой на нем биологической защиты, несмотря на огромные усилия по укреплению несущих элементов заливаемым бетоном.

Поэтому на начальном этапе интерес к проведению измерений в интенсивных гамма-полях был стимулирован предложением в Правительственную комиссию руководителя теоретико-расчетной группы ФИАЭ А. М. Дыхне по выбору варианта биологической защиты укрытия 4-го блока – замене проектируемой бетонной защиты на свинцовую с целью существенного облегчения массы защиты. В обоих случаях толщина защиты в значительной мере определялась формой энергетического спектра γ -квантов, испускаемых развалом 4-го блока, которая до этого не была изучена.

Накопленный лабораторией радиометрии опыт по оценке формы спектра реального гамма-поля в Чернобыле (см. раздел 1.2) и сложившееся к тому времени плодотворное сотрудничество групп РИ и ФИАЭ позволили провести не только совместные спектральные и угловые измерения, но и первые измерения мощностей экспозиционных доз (МЭД) γ -излучения над центральным перекрытием 4-го блока.

Нижеописанные исследования осуществлялись при постоянных контактах с проектировщиками (В. А. Курносковым и др.) и А. Н. Усановым (формально, по его письменным указаниям, что, в частности, позволяло беспрепятственно выделять «окна» в графике работ подъемного крана «Демаг», с помощью которого аппаратура поднималась и размещалась над 4-м блоком) ([1], сс. 193–218).

В начале октября с использованием термомюминесцентных дозиметров ДПГ-03 и ИКС-А, помещенных в фильтры из свинца, железа, песка и графита различных толщин и геометрий, были проведены измерения МЭД над трубным настилом, уложенным над центральным залом 4-го блока. Пакеты фильтров размещались на металлической раме, прикрепленной к стреле крана «Демаг», и экспонировались в течение 30 мин на высоте 1,5 м над геометрическим центром перекрытия центрального зала. Обработка полученных данных, проведенная непосредственно в Чернобыле с использованием методов решения обратных задач, позволила оценить вклад излучения с разной энергией в мощность дозы (спектр доз) над трубным настилом перекрытия 4-го блока. Эти результаты приведены на рис. 3. Из рис. 3 видно, что примерно 80 % вклада в суммарную мощность дозы дает γ -излучение с энергией менее 400 кэВ. В то же время основной вклад в мощность дозы невозмущенного спектра (около 80 %) обусловлен γ -излучением ^{95}Zr и ^{95}Nb со средними энергиями 742 и 766 кэВ, соответственно.

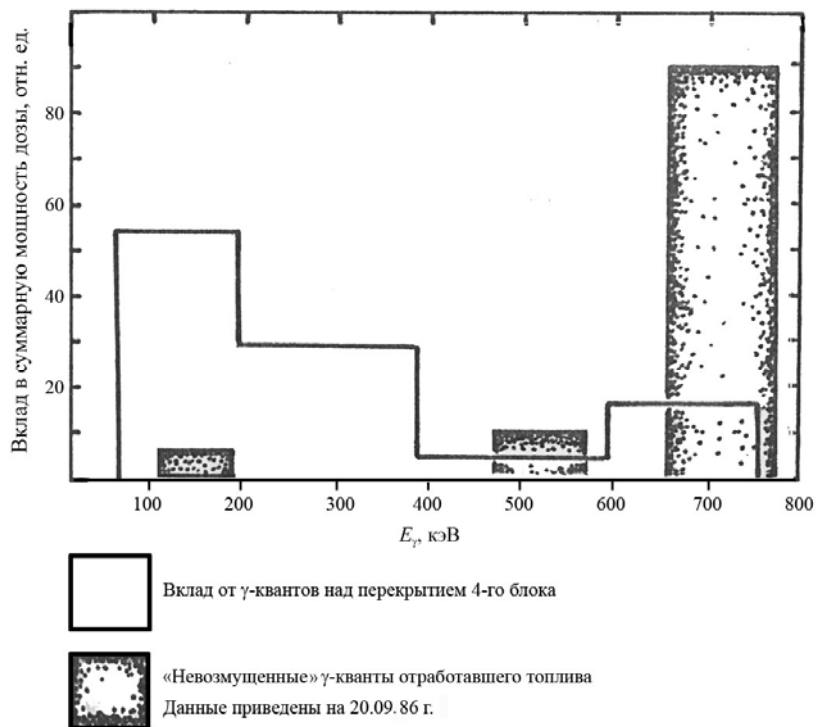


Рис. 3. Вклад в суммарную МЭД γ -излучения над перекрытием 4-го блока ЧАЭС от квантов различных энергетических интервалов.

Результатом проведенных работ стали представленные в Оперативный штаб отрасли и в Правительственную комиссию совместные предложения Радиового института и ФИАЭ по облегчению биологической защиты крыши «Саркофага», теперь уже основанные на результатах измерений спектра доз γ -излучения ([1], с. 198).

Одновременно в период с 1 по 11 октября, были проведены первые измерения МЭД над перекрытием. Работа проводилась в несколько этапов:

1. Проведены измерения МЭД на высоте 1,5 м над геометрическим центром перекрытия центрального зала. Получены следующие результаты:

Накопители без защиты	Накопители с защитой (свинец, 8 мм)	Накопители с защитой (свинец, 16 мм)
(72±10) Р/ч	(11,8±1,2) Р/ч	(4,2±0,6) Р/ч

2. Были измерены МЭД над северным и южным сепараторными помещениями (до их перекрытия) и на высоте 1,5 м над геометрическим центром перекрытия центрального зала. Получены следующие результаты:

Северное сепараторное помещение	Перекрытие	Южное сепараторное помещение
(63±20) Р/ч	(76±12) Р/ч	(134±20) Р/ч

В этих же опытах с помощью коллимированных детекторов были проведены измерения углового распределения МЭД над центральным перекрытием и установлено, что МЭД от γ -лучей, приходящих сверху (за счет рассеяния первичного излучения в воздухе или же за счет излучения топлива, выброшенного на основании вен-

тиляционной трубы), составляет $(13,0 \pm 1,3)$ Р/ч, или 17 % от полной МЭД над данной точкой перекрытия.

3. Были проведены детальные измерения распределений МЭД γ -излучения над центральным перекрытием 4-го блока с его северной и южной сторон: посредством стрелы крана «Деаг» трос с прикрепленными к нему термолюминесцентными дозиметрами растягивался вдоль трубного настила. Результаты измерений проведены на рис. 4. Средние значения МЭД составили (53 ± 12) и (100 ± 20) Р/ч для северной и южной сторон перекрытия соответственно.

Из проведенных измерений были сделаны следующие выводы.

1. Измерения МЭД над центральным перекрытием, проведенные 1 и 4 октября, хорошо согласуются.

2. МЭД над южным сепараторным помещением значительно выше, чем над северным сепараторным помещением и центральным перекрытием, что указывает на значительную загрязненность южного сепараторного помещения.

3. Вклад в МЭД над центральным перекрытием от излучения, приходящего сверху, составляет около 20 %.

4. МЭД на южной стороне центрального перекрытия существенно больше, чем на северной стороне. При этом наблюдается значительный разброс величин МЭД, что обусловлено зазорами между трубами и другими особенностями конструкции перекрытия.

5. На южной и северной сторонах центрального перекрытия имеются максимумы в распределении значений МЭД, что, по-видимому, связано с пространственной ориентацией верхней биологической защиты реактора (схемы «Е»).

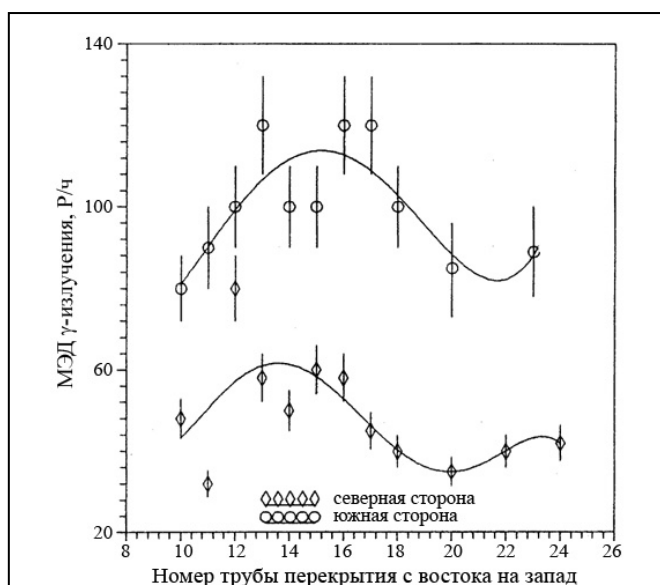


Рис. 4. Распределение МЭД γ -излучения над трубным настилом центрального зала 4-го блока ЧАЭС, октябрь 1986 г.

Таким образом, была разработана простая методика измерений МЭД, а также спектральных и угловых характеристик γ -излучения в зоне с высокими мощностями экспозиционных доз, не требующая длительного присутствия человека в этой зоне и основанная на использовании стандартных детекторов, защищенных фильтрами из различных материалов разной толщины и геометрии и на последующем восстановлении реального спектра. Несмотря на свою простоту, в напряженных условиях завершения строительно-монтажных работ эта методика оказалась единственно приемлемой: она позволила провести оперативные измерения различных характеристик гамма-поля над перекрытием 4-го блока, результаты которых длительное время оставались уникальными, служа основой для оценки радиационной обстановки у 4-го блока, выработки регламента строительно-монтажных работ, расчетов защитных кабин и др.

На основании результатов проведенной работы по поручению Правительственной комиссии 7–8 октября группой ИАЭ (А. А. Боровой, А. М. Дыхне, Н. Е. Ку-

харкин), РИ и ВНИИАЭС (А. А. Абагян и др.) были проведены расчеты радиационной обстановки, создаваемой 4-м блоком ЧАЭС за счет выходящего из него излучения ([1], с. 219) (с использованием метода «эквивалентного источника», а также методом Монте-Карло, в последнем случае расчеты были оперативно проведены сотрудниками А. М. Дыхне в Москве). Величины мощности дозы гамма-поля в различных точках площадки АЭС оказались следующими (Р/ч):

- на высоте 1 м от земли:
 - * у основания «Саркофага» – 0,3–1,
 - * на расстоянии 100 м – 0,2,
 - * на расстоянии 200 м – 0,1,
- на крыше 3-го блока в 100 м от перекрытия 4-го блока – 2.

Полученные цифры в совокупности с вышеприведенными результатами измерения мощности дозы γ -излучения на внешней поверхности трубного настила послужили одним из существенных («радиологических») аргументов при принятии решения об отказе от размещения биологической защиты и легли в основу «Требований, предъявляемых к состоянию укрытия 4-го блока Чернобыльской АЭС...», представленных В. А. Легасовым и одобренных председателем Правительственной комиссии Б. Е. Щербиной (решение Правительственной комиссии № 255 от 21 октября 1986 г.).

Следует отметить, что успех в проведении цикла исследований, представленных в настоящем разделе, в значительной степени был обусловлен всесторонней помощью, оказанной руководством ОДК УС-605 (нач. отдела Гаевой В. К., зам. нач. отдела Бородин В. Н.): оперативным выделением необходимого (и зачастую большого) числа детекторов, незамедлительной выдачей результатов после экспонирования этих детекторов, активным участием в обсуждении полученных результатов.

3.3. Другие работы по заданиям Правительственной комиссии и Оперативного штаба отрасли

В середине июня 1986 г. в Правительственную комиссию от Госкомгидромета поступили сведения об обнаружении методом аэрогамма-съемки обширных районов с плотностью выпадения цезия, заметно превышающей нормы для проживания населения, причем районы «цезиевой аномалии» располагались в дальней зоне – на расстоянии 200–300 км от ЧАЭС. Провести экспрессную проверку того, действительно ли существуют районы «цезиевой аномалии», Правительственная комиссия поручила лаборатории радиометрии (совместно с МО СССР).

Вертолетными рейсами, в ходе которых проводились измерения МЭД γ -излучения, плотности β -излучения и отбирались пробы для дальнейшего γ -спектрометрического анализа, были обследованы 40 населенных пунктов в Гомельской и Брянской областях. В большинстве обследованных населенных пунктов – в 31 из 40 – величина МЭД γ -излучения была меньше 0,1 мР/ч, а плотность β -частиц – меньше 100 1/(см²·мин). В остальных девяти пунктах величины были выше и лежали в пределах: для МЭД γ -излучения – от 0,1 до 0,9 мР/ч, для плотности β -частиц – от 100 до 2000 1/(см²·мин).

Анализ отобранных проб проводили путем относительных измерений в условиях одинаковой геометрии: сравнивали изучаемые пробы и пробы грунта с промплощадки, имеющие нуклидный состав, близкий к топливному. При этом определяли «коэффициент цезиевого смещения» – отклонение относительного содержания ¹³⁷Cs

в исследуемой пробе от аналогичного для ближней зоны. Этот коэффициент для всех девяти пунктов был выше 19.

Полученные данные подтверждали существование районов «цезиевой аномалии». Вместе с тем они продемонстрировали, что участки территории с повышенной плотностью выпадения цезия образуют «пятнистую» структуру.

Проведенная работа показала, что для детального оконтуривания «цезиевых пятен» необходимо проведение дополнительных исследований. Отобранные пробы грунта были переданы в ИАЭ и Госкомгидромет для комплексного изучения.

Для полноты описания оперативной деятельности лаборатории ниже кратко перечислены некоторые другие работы, которые довелось выполнять лаборатории в рамках конкретных поручений Оперативного штаба отрасли и Правительственной комиссии.

1. **Исследование характера радиоактивной загрязненности «рыжего» леса, июль 1986 г.** В ходе исследований сотрудниками лаборатории были отобраны пробы из массива «рыжего» леса (хвоя, почки, верхний слой коры, лесная подстилка и др.), подвергнутые затем γ -спектрометрическому анализу; с использованием корреляционных соотношений между содержанием ^{144}Ce и суммарной α -активностью, выведенных в Радиевом институте, проведена оценка количества ядерного топлива, выброшенного в «рыжий» лес (от 57 до 118 кг/км² по UO_2); подготовлены предложения по стратегии обращения с массивом «рыжего» леса, которые сводились к тому, чтобы оставить лесной массив в неприкосновенности до весны–лета 1987 г. с одновременным проведением комплекса мероприятий по закреплению активности и пылеподавлению.
2. **Исследование характера радиоактивной загрязненности донных отложений пруда-охладителя, конец августа 1986 г.** С использованием пробоотборника, разработанного в Радиевом институте, в нескольких точках на расстоянии 20–70 м от берега пруда-охладителя был проведен отбор донных отложений, каждый из отобранных кернов был разделен на слои толщиной 1 см; было установлено, что на тот момент времени основная масса радионуклидов сконцентрирована в верхнем слое толщиной около 5 см, при этом удельная активность илов составляла порядка 10^{-3} Ки/кг.

4. Совместные работы с другими организациями

Представление о масштабах совместных работ лаборатории дает табл. 6, в которой приведены перечень организаций, осуществлявших совместные работы с лабораторией, и тематика программ исследований, которые обеспечивались оперативной спектрометрической информацией, получаемой в лаборатории.

В настоящей главе приведен краткий обзор некоторых основных направлений и результатов совместных исследований. Значительный объем остался за рамками настоящей работы, не будучи документированным (точнее, эти документы сохранились лишь фрагментарно). Это, в частности, относится к совместным работам с ЧАЭС по выдаче рекомендаций и запуску вентиляционных систем 1-го и 2-го блоков, с КГБ СССР, с Минздравом СССР, с ВАХЗ МО СССР, с НИКИМТ и др.

Вместе с тем следует иметь в виду, что имеющаяся ныне в РИ база данных, включающая результаты около 6000 анализов, проведенных за период с начала июня по конец ноября 1986 года, является, возможно, одной из наиболее полных по проблеме ликвидации последствий аварии на ЧАЭС: она скомпонована как из собственных результатов лаборатории, так и из данных большинства совместных работ.

Таблица 6

Обеспечение программ исследований организаций, проводивших работы по ликвидации последствий аварии на ЧАЭС, оперативными данными по концентрациям и изотопному составу γ -излучающих радионуклидов

Название организации	Количество проб	Тематика совместных работ
УС-605	1600	Загрязненность приземного слоя воздуха на промплощадке ЧАЭС и в ближней зоне
Министерство обороны СССР	359	Дезактивация 1-го, 2-го и 3-го блоков. Загрязненность пищевых продуктов
ОНИС (х/к "Маяк")	1302	Радиоэкологическая обстановка в 30-километровой зоне, в УССР и БССР
ИАЭ им. Курчатова	302	Радиационная обстановка на промплощадке и в 30-километровой зоне. Эффективность цеолитсодержащих плотин. Анализ проб, отобранных в 4-м блоке
Госкомгидромет	683	Пылеветроперенос радионуклидов. Общая оценка радиационной обстановки в 30-километровой зоне. Исследование районов «цезиевых аномалий»
Минздрав СССР	174	Санитарно-гигиеническая обстановка в местах размещения персонала, работающего в 30-километровой зоне
Институт физики АН УССР	369	Загрязнение воздушной среды, пылеветроперенос
Институт нефтехимии АН УССР	313	Эффективность пылеподавления. Эффективность методов очистки сточных вод PuSO
НИФХИ им. Л. Я. Карпова	191	Изучение дисперсного состава аэрозолей. Эффективность аэрозольных фильтров
ВНИИНМ им. А. А. Бочвара	643	Дезактивация военной техники. Эффективность пылеподавления. Запуск вентиляционной системы 3-го блока
ВНИПИЭТ	250	Эффективность дезактивации г. Припять и строительной техники
НИКИМТ	131	Эффективность сухой дезактивации крыш 1–3-го блоков
ЧАЭС	156	Запуск вентиляционных систем 1-го и 2-го блоков. Оценка радиационной обстановки внутри 1–3-го блоков

4.1. Изучение радиоэкологической обстановки в 30-километровой зоне, УССР и БССР

Одним из важнейших направлений деятельности лаборатории радиометрии в работах по ликвидации последствий аварии на ЧАЭС явилось ее участие в изучении радиоэкологической обстановки в 30-километровой зоне и за ее пределами. Помимо обеспечения потребностей экспедиционных групп Радиевого института в оперативной γ -спектрометрической информации, возникавших в ходе таких исследований, значительное внимание лаборатория уделяла вопросам, связанным с оценкой радиоактивной загрязненности сельхозугодий, оконтуриванием районов возможной рекультивации земель, изучением накопления радионуклидов в организмах животных и др. Планирование работ в этом направлении и отбор проб осуществлялись группой

Опытной научно-исследовательской станции (ОНИС) химкомбината «Маяк». Следует отметить, что данные, получаемые в ходе таких исследований, регулярно представлялись в Правительственную комиссию и служили основой для принятия целого ряда ответственных решений.

В ходе совместных с ОНИС работ по изучению накопления радионуклидов в органах животных, находившихся в зоне воздействия радиоактивного выброса, было обнаружено явление избирательного концентрирования изотопа ^{110m}Ag печенью животных ([1], с. 269–283).

К работам по изучению радиоэкологической обстановки и созданию соответствующего банка данных по радиационной обстановке в 30-километровой зоне относятся результаты сотрудничества лаборатории радиометрии с Отдельной межведомственной группой по оценке радиационной обстановки (ОМГРО) и Госкомгидрометом, включавшего как передачу результатов лаборатории в банк данных Главинформа СМ СССР, так и участие в комплексной программе по оценке пылеветрового переноса радиоактивности в 30-километровой зоне.

4.2. Работы по изучению эффективности мероприятий по дезактивации.

Значительные объемы работ лаборатории радиометрии были связаны с изучением эффективности мероприятий по пылеподавлению и дезактивации, включая дезактивацию рабочих помещений ЧАЭС, 4-го микрорайона г. Припять и прилегающих к нему лесных массивов.

К этому же разделу относится большой комплекс работ по оценке эффективности дезактивации военной техники с использованием растворов различных рецептур и полимерных покрытий.

Большая роль принадлежит лаборатории в разработке, создании и испытании технологии очистки сточных вод PuSO от радиоактивных взвесей и загрязнений ([1], с. 355–395).

Заключение

Заинтересованный читатель, возможно, заметил, что основные усилия лаборатории радиометрии Радиевого института в Чернобыле в течение всего периода ее существования были направлены прежде всего на скорейшее и эффективное решение **оперативных** задач, возникавших в ходе работ по ликвидации последствий аварии на ЧАЭС. Однако поддерживать достаточно напряженный темп работ, который к тому же возрастал по мере приближения к завершению сооружения «Укрытия», совмещать выполнение штатных обязанностей с участием в разноплановых совместных исследованиях было бы невозможным без той творческой и профессиональной атмосферы, которая бытовала в коллективе лаборатории. Поэтому авторы выражают свое искреннюю признательность всем руководителям и сотрудникам лаборатории, которые, как указал в своем письме от 10.10.86 г. на имя директора Радиевого института зам. министра МСМ А. Н. Усанов, характеризуя деятельность лаборатории, «высокопрофессионально, мужественно и целеустремленно» ([1], с. 405) трудились в ее составе, и фамилии которых представлены во Введении.

Специфика работы лаборатории была такова, что ее сотрудники постоянно контактировали, обсуждали результаты, готовили совместные документы со мно-

жеством специалистов из различных организаций МСМ и других ведомств. Особую благодарность авторы выражают Л. Ф. Беловодскому (ВНИИЭФ), В. К. Гаевому (ВНИИЭФ), В. Ю. Баранову (ФИАЭ), А. Ю. Гагаринскому (ИАЭ), А. А. Тутнову (ИАЭ), В. А. Счастливому (ЛАЭС), А. А. Строганову (МИФИ), А. В. Степанову (ОГ УНХВ), Б. И. Огородникову (НИФХИ), Л. И. Руденко (АН УССР), а также руководителям Оперативного штаба отрасли – ныне здравствующим и уже ушедшим: А. Н. Усанову, И. А. Беляеву, А. К. Круглову, Ю. Ф. Юрченко, А. С. Штаню, В. С. Шмидту.

Выражаем особую признательность нашим коллегам и друзьям из ФИАЭ (ныне – ИБРАЭ РАН): Р. В. Арутюняну, Л. А. Большову, В. П. Киселеву, Е. В. Ткаля.

Авторы хотели бы отдать дань благодарной памяти академику Г. Н. Флерову, который по своем приезде в Чернобыль в начале октября 1986 г. со свойственной ему энергией чрезвычайно активно вошел в круг проблем, связанных с «Укрытием», и выдвинул ряд оригинальных предложений по уменьшению массы биологической защиты «Укрытия».

Наконец, считаем своим долгом особо отметить руководителя теоретико-расчетной группы ФИАЭ, профессора (позднее – академика РАН) А. М. Дыхне, – выдающегося физика-теоретика, не только подвигнувшего нас на проведение исследований интенсивных гамма-полей над 4-м блоком, но и непосредственно участвовавшего в проведении совместных измерений. Его светлой памяти авторы и хотели бы посвятить настоящую работу.

Список литературы

1. Дмитриев В. Д., Драпчинский Л. В., Пазухин Э. М., Петров Б. Ф., Плескачевский Л. А. Комплекс работ лаборатории радиометрии ОДК УС-605 (Радиевый институт им. В. Г. Хлопина), выполненных при ликвидации последствий аварии на ЧАЭС. Июнь–ноябрь 1986 г. Май 1987 г.: Отчет Радиевого института им. В. Г. Хлопина. 1988. Инв. № 2870-И.
2. Дмитриев В. Д., Петров Б. Ф., Пазухин Э. М., Плескачевский Л. А. Опыт организации оперативного гамма-спектрометрического центра в Чернобыле и изучение радиоактивной загрязненности приземного слоя воздуха в процессе сооружения объекта «Укрытие». // Тез. докл. Всес. семинара «Научные проблемы ликвидации последствий аварии на ЧАЭС» (Звенигород, 1990 г.). М.: Изд-во Ядерного общества СССР. 1990. С. 48.
3. Арутюнян Р. В., Дыхне А. М., Петров Б. Ф., Плескачевский Л. А. Исследование спектральных и угловых характеристик интенсивных гамма-полей в районе 4-го блока ЧАЭС: август 1986 г. – май 1987 г. / Тез. докл. Всес. семинара «Научные проблемы ликвидации последствий аварии на ЧАЭС» (Звенигород, 1990 г.). М.: Из-во Ядерного общества СССР. 1990. С. 62.
4. Васильев С. К., Петров Б. Ф., Плескачевский Л. А., Римский-Корсаков А. А. Изучение газоаэрозольного выброса из аварийного 4-го блока ЧАЭС и загрязненности приземного слоя воздуха в процессе ликвидации последствий аварии на ЧАЭС // Тез. докл. Всерос. конф. «Радиоэкологические, медицинские и социально-экономические последствия аварии на Чернобыльской АЭС. Реабилитация территорий и населения». НМЦ «Голицыно» (Москва), 1995 г. С. 4.

5. Арутюнян Р. В., Петров Б. Ф., Плескачевский Л. А., Римский-Корсаков А. А. Оценка количества топлива вокруг аварийного 4-го блока ЧАЭС и изучение радиационной обстановки в ходе сооружения объекта «Укрытие» / Тез. докл. Всерос. конф. «Радиоэкологические, медицинские и социально-экономические последствия аварии на Чернобыльской АЭС. Реабилитация территорий и населения». НМЦ «Голицыно» (Москва), 1995 г. С. 5.
6. Информация об аварии на Чернобыльской АЭС и ее последствиях, подготовленная для МАГАТЭ // Атом. энергия. 1986. Т. 61, вып. 5. С. 301.
7. Арутюнян Р. В., Петров Б. Ф., Плескачевский Л. А. и др. Бассейн-барботер 4-го блока ЧАЭС: комплекс послеаварийных исследований // Матер. Междунар. конф. «Деление ядер – 50 лет». (Л., 16–20 октября 1989 г.). СПб, 1992. Т. 2. С. 469.
8. Арутюнян Р. В., Большов Л. А., Петров Б. Ф., Плескачевский Л. А. и др. Послеаварийное обследование бассейна-барботера 4-го блока ЧАЭС // Матер. Первой междунар. рабочей группы по тяжелым авариям и их последствиям. Дагомыс, Сочи (30 окт. – 3 ноября 1989 г.). М.: Наука, 1990. С. 101.

Activities Performed by the Radium Institute Laboratory for Radiometry in Chernobyl: June–November 1986

S. K. Vasiliev*, B. F. Petrov*, L. A. Pleskachevsky

* now Emergency Response Center of Rosatom State Corporation, St. Petersburg

This paper presents the studies of the Radium Institute Laboratory for Radiometry in Chernobyl, a facility of Construction Authority N 605 (CA-605), Department for Dosimetry Monitoring. The Laboratory was involved both in manufacturing activities of CA-605 (field monitoring of radioactive contamination of surface air layer) and in research programs. The paper presents the data on radioactive release from the destroyed 4th Unit reactor which were obtained as a followup of studies conducted by the Radium Institute in May–early June 1986. Data are presented on spectral and angular profiles of intensive gamma-fields studied during Shelter construction. Also, this paper describes the activity of spectrometric center established within the Laboratory. This center provided field data to almost all the organizations working in Chernobyl.

1.4. Радиоактивное загрязнение речной системы Припять–Киевское водохранилище–Днепр в 1986 году как следствие аварии на Чернобыльской АЭС

В. П. Тишков, А. В. Степанов, О. С. Цветков

Представлены результаты исследований радиоактивного загрязнения речной системы Припять–Киевское водохранилище–Днепр, проведенных в июне–августе 1986 г. Изучено межфазовое распределение радионуклидов в системе донные отложения–вода–взвешенное вещество–фильтрат. Показано, что основная часть радиоактивных загрязнений (90–96 % ^{95}Zr , ^{95}Nb , ^{103}Ru , ^{106}Ru и 96–99 % $^{239,240}\text{Pu}$) распространяется по речной системе с мелкодисперсным взвешенным веществом и твердым стоком. В среднем около 70 % $^{134,137}\text{Cs}$ и более 80 % ^{90}Sr находятся в растворимой форме. Оценены уровни поверхностного загрязнения донных отложений (Ки/км²). Наиболее загрязненными являются р. Припять, ее устьевая зона и мелководная правобережная часть Киевского водохранилища, находящаяся под влиянием р. Припять. Суммарный запас радионуклидов ^{95}Zr , ^{95}Nb , ^{103}Ru , ^{106}Ru , ^{141}Ce , ^{144}Ce , ^{134}Cs , ^{137}Cs в верхнем 6-сантиметровом слое донных отложений достигал 1670 Ки/км² (устьевая зона р. Припять). Запас ^{137}Cs при этом составлял 47 Ки/км². Левобережные мелководья, находящиеся под влиянием р. Днепр, загрязнены в меньшей степени. Объемная активность $^{239,240}\text{Pu}$ (Бк/м³) в воде р. Припять находилась в пределах (0,6–28), в устьевой зоне р. Припять – 3,3, в Киевском водохранилище в поверхностных водах – 0,3, а в придонных слоях воды до 27; в воде Днепра в черте Киева – 0,2. Отношение активности $^{238}\text{Pu}/^{239,240}\text{Pu}$ в выделенном из воды мелкодисперсном веществе р. Припять находится в пределах 0,35–0,55, при среднем значении $0,45 \pm 0,05$, что соответствует выгоранию по урану топлива, выброшенного из РБМК-1000, 11 кг/т. Объемная активность радионуклидов ^{95}Zr , ^{95}Nb , ^{103}Ru , ^{106}Ru , ^{141}Ce , ^{144}Ce , $^{134,137}\text{Cs}$, ^{90}Sr в воде речной системы находилась в пределах (0,04–7) Бк/л, для $^{239,240}\text{Pu}$ – в пределах (0,0002–0,048) Бк/л и не превышала допустимые уровни объемной активности радионуклидов, установленные НРБ-76 для питьевой воды. Полученные данные легли в основу прогнозной оценки условий водопользования исследуемого региона.

Введение

В результате аварии на Чернобыльской АЭС радиоактивному загрязнению подверглись значительные по площади территории, а также акватории рек Днепр, Припять, Тетерев, Киевского и Каневского водохранилищ, других открытых водоемов. Потребовались оперативные данные для радиэкологической оценки послеаварийной ситуации в крупной системе рек и водохранилищ на данный момент и прогноз ее изменения в будущем.

Постоянное использование поверхностных водных систем для питьевого водоснабжения крупных регионов ставило радиэкологические исследования водных сред загрязненных территорий в число важнейших и первоочередных.

В научной тематике Радиевого института в течение многих лет большое внимание уделялось изучению поведения радиоактивных изотопов в природных водах и донных отложениях. Их началом являются работы 1920–1930 гг., посвященные вопросам геохимии и гидрогеологии радиоактивных природных изотопов. Позднее, в 1950–1960 гг., весь комплекс проблем по изучению распределения естественных и искусственных радионуклидов в различных природных средах составил новое самостоятельное направление – радиохимию окружающей среды. При этом наряду с изу-

чением распределения радионуклидов, особое внимание уделялось разработкам аналитических методов, практическому использованию полученных данных [1–6]. К моменту аварии на Чернобыльской АЭС институт имел богатый опыт проведения экспериментальных, в том числе экспедиционных работ, проверенную методологию комплексных исследований и обладал обширными знаниями по вопросам загрязнения гидросферы искусственными радионуклидами [7–10].

На основе приказа № 0145 от 30.06.86, изданного во исполнение Постановления ЦК КПСС и СМ СССР № 634-188 от 29.05.86, и приказа № 12э от 21.06.86 по Радиевому институту сотрудники отдела № 50 были привлечены к экспедиционным работам по изучению последствий аварии на Чернобыльской АЭС в ближней и дальней зонах.

Радиевому институту им. В. Г. Хлопина совместно с Госкомгидрометом СССР в дополнение к развернутой Программе была поставлена задача – обеспечить контроль за изменением радионуклидного состава в донных отложениях, взвешенном веществе и воде речной системы Припять–Днепр, Киевского и Каневского водохранилищ с целью оценки состояния и прогноза радиационной обстановки в связи с водопользованием в системе Днепровского каскада водохранилищ [11].

Работы выполнялись Комплексной экспедицией № 10 Госкомгидромета СССР с привлечением ряда научных институтов и специализированных организаций. План работ координировала Оперативная межведомственная группа оценки радиационной обстановки (ОМГРО) при Правительственной комиссии.

Задачи, поставленные Радиевому институту, выполнялись силами трех групп специалистов института посменно в период с 21 июня по 25 августа 1986 г. Руководителями экспедиционных групп являлись Л. И. Геденов, В. П. Тишков и О. С. Цветков. В составе экспедиционных групп работали А. В. Степанов, В. Х. Сенчилло, Д. М. Гуревич, Л. И. Ильин и С. М. Кривоногов. Работы выполнялись с бортов теплоходов «ОМ-25» (УкрНИГМИ) и «Тайфун» (УкрУГКС), речного судна «Академик Вернадский» и моторных лодок.

Основной приток воды в Киевское водохранилище формируется в бассейнах рек Днепр, Сож (приток Днепра в районе г. Гомель) и Припять, суммарная площадь водосбора которых составляет более 80 % от общей площади водосбора Киевского водохранилища. Река Припять занимает 40 % площади водосбора Киевского водохранилища и дает в среднем треть его полного притока воды (и в паводок, и в межень это соотношение сохраняется). Таким образом, влияние Припяти на формирование гидрологического и гидрохимического режимов Киевского водохранилища весьма велико. Следует учесть, что Киевское водохранилище является головным в Днепровском каскаде.

Поступление радионуклидов в изучаемые водные системы могло осуществляться следующими путями:

- в результате непосредственного выпадения на поверхность водоемов радиоактивных частиц – продуктов аварии 4-го блока ЧАЭС;
- смыва с загрязненных территорий водосборов;
- десорбции (выщелачивания) отдельных радионуклидов с поверхности радиоактивных частиц выпадений.

Основным содержанием работ, проводимых Радиевым институтом, являлись:

- дозиметрические и радиометрические измерения в придонных горизонтах воды, донных отложениях (в режиме *in situ*) и на пойменных почвах;

- отбор проб воды, взвешенного вещества и кернов донных отложений с последующим определением распределения радионуклидов по глубине осадков и оценка их запасов;
- определение радионуклидного состава и объемной/удельной активности в воде, концентратах, донных отложениях и взвешенном веществе;
- изучение форм нахождения радионуклидов в системе донные отложения–вода–взвесь–фильтрат как основного фактора для обоснования решений по предотвращению поступления радионуклидов в водозаборные устройства питьевой воды населенных пунктов, включая водозаборы Киева;
- определение путей распространения и перераспределения радионуклидов в исследуемой речной системе;
- составление карт-схем радиоактивного загрязнения донных отложений и прилегающих пойменных участков речной системы р. Припять–Киевское водохранилище–р. Днепр.

Методическое обеспечение

Группы специалистов Радиевого института имели в своем распоряжении следующее оборудование и материалы:

- батометры для отбора проб воды на различных горизонтах;
- комплекты дозиметров и радиометров: ДП-5 и РУП с набором детекторов для наземных измерений и погружной вариант для оценки мощности дозы донных отложений и в придонном слое воды, а также два радиометра СРП-68 для наземных и погружных измерений;
- наборы фильтров на лавсановой основе – фильтры «нуклеопора» с заданными диаметрами пор (1,0, 0,5, и 0,3 мкм), бумажные фильтры типа «синяя лента» и амилацетатные биофильтры со средним диаметром пор 0,3 мкм для выделения и концентрирования взвешенного вещества из воды.
- штатный дночерпатель ДЧ-0,025, рекомендованный Госкомгидрометом СССР в качестве стандартного, и разработанная в Радиевом институте пробоотборная система ЭПС-2, состоящая из двух цилиндрических пробоотборников: ручного (штангового) для отбора проб на мелководье (диаметр керна 32 мм, высота до 50 см, размер штанг до 5 м) и второго (диаметр керна 86 мм, высота до 50 см) для отбора проб на глубоководных участках с борта судна при помощи лебедки [12, 13].

Отбор проб является важным этапом, оказывающим существенное влияние на представительность результатов. При отборе проб донных отложений дночерпателем ДЧ-0,025 могут возникнуть ошибки оценки запасов радионуклидов в донных отложениях, связанные с потерями поверхностного подвижного донного слоя, в котором сконцентрирована основная часть радионуклидов. Кроме того, при этом происходит частичное перемешивание слоев донных отложений. Особенно явно этот эффект проявлялся в первые месяцы после аварии на ЧАЭС, когда слой загрязненных илов был еще весьма мал. Тем не менее, применение данного пробоотборника оказалось оправданным на плотных песчаных грунтах.

Для изучения распределения радионуклидов по глубине донных отложений и расчета их запаса применялась методика послойного разделения керна (с шагом 3 см) с последующим гамма-спектрометрическим и радиохимическим определением состава и содержания радионуклидов [12].

Пробы поверхностной воды отбирали погружным вибронасосом, придонной воды – батометром. Объем проб воды составлял 1 и 20 л. Концентрирование плутония из водных проб производили методом соосаждения с гидроксидом железа, а гамма-излучающих радионуклидов и ^{90}Sr – методом ферроцианидно-карбонатного осаждения. Непосредственно после отбора в пробу объемом 1 л воды добавляли в качестве изотопной метки ^{236}Pu с известной удельной активностью. В пробы воды (20 л), предназначенные для получения концентратов искусственных радионуклидов, добавляли растворы цезия, стронция, церия с известным титром. Осаждение проводили как из фильтрованных, так и из нефилтрованных проб воды. Выделение взвешенного материала в первом случае выполняли с использованием фильтров типа «синяя лента» и «нуклеопора». Для изучения фракционного состава взвесей применялись фильтры «нуклеопора» с заданными диаметрами пор.

Пробы донных отложений и выделенного взвешенного вещества анализировались гамма-спектрометрическим методом в лаборатории Радиевого института при штабе ГКАЭ (г. Чернобыль), группой Радиационно-дозиметрического контроля воды Минэнерго СССР (РДКВ) (г. Чернобыль) и в лаборатории Института ядерных исследований АН УССР (г. Киев).

Выборочно ряд проб донных отложений, воды и концентратов радионуклидов из водных проб направлялись в Радиевый институт для радиохимического определения объемной/удельной активности ^{90}Sr [5], $^{239,240}\text{Pu}$ [9, 10], ^3H [14] и уточнения радионуклидного состава в пробах в сочетании с альфа-спектрометрией и прецизионной гамма-спектрометрией [15].

Обсуждение результатов

В ходе выполнения работ были проведены несколько серий измерений (28–30 июня, 6–7, 15–19 и 29–31 июля и 13–19 августа) мощности дозы гамма-излучения в придонных слоях воды и от поверхности донных отложений [11, 16].

Измерения были выполнены на различных участках в руслах, проливах и заливах Днепра, в том числе в Киеве, устье Десны, в Припяти и ее устьевой зоне, устье р. Тетерев, а также на ряде продольных (по судовому ходу) пунктах и 11 гидрологических разрезах рек: Припять, Днепр, Тетерев (устье), Брагинка (устье) и в створах Киевского водохранилища: Страхолесье, Сухолучье, Толокунь, Яснобородка, Глебровка, Лютеж, Вышгород.

Одновременно с проведением гамма-съемки в тех же пунктах в июне–августе отобраны пробы донных отложений: 235 проб – с помощью дночерпателя ДЧ-0,025 и более 130 проб пробоотборниками ЭПС-2; 175 проб придонной воды, 35 проб взвешенных веществ, выделенных из воды фильтрующей установкой «Мидия» [17], и 63 пробы взвешенного вещества, выделенного из воды с помощью фильтров «синяя лента» и «нуклеопора».

Гамма-съемка и отбор проб велись с учетом реального профиля дна исследуемых водных объектов, который определяли стандартным эхолотом ПЭЛ-4.

Результаты измерений мощности дозы гамма-излучения от донных отложений в июне–июле 1986 г. представлены в табл. 1.

Анализ полученных данных показал, что из всех обследованных водных объектов наиболее высокое радиоактивное загрязнение характерно для р. Припять, где уровни гамма-излучения на дне превышали 8 мР/ч. При этом наибольшие уровни наблюдались в слабопроточных прибрежных зонах, на ямах и в устье р. Брагинка. Менее загрязненными были близкие к устьям части рек Днепр, Тетерев, где уровни

гамма-излучения дна не превышали 0,7 мР/ч. Незначительная загрязненность наблюдалась на р. Десна – не более 0,1 мР/ч.

Для всех перечисленных рек характерно уменьшение гамма-поля дна на фарватере, в местах с быстрым течением и с песчаным дном, и резко повышенные уровни в глубоких и слабопроточных проливах, непроточных заливах.

Таблица 1

Результаты измерений мощности дозы гамма-излучения
от донных отложений [11, 16]

Место и дата отбора проб, 1986 год	Мощность дозы, мР/ч		
	право-бережье	середина	лево-бережье
Р. Припять, поперечный разрез, выше пристани г. Чернобыль, 15 июля	> 3	> 3	> 3
Р. Припять, поперечный разрез выше пристани г. Чернобыль, 15 августа	2–8	0,8–1,8	3–6
Р. Припять, устье р. Брагинка, поперечный разрез, 15 августа	3–5	1–3	0,5–1,5
Р. Припять, устье р. Брагинка, поперечный разрез, 30 июля	0,5–2	3	3
Р. Припять, устье р. Брагинка, поперечный разрез, 13 августа	0,4–>3	>3–1,5	0,3–0,7
Устьевая зона р. Припять, поперечный разрез, 14 августа	2–8	0,3–0,1	0,05–0,01
Зона слияния р. Припять и р. Днепр, поперечный разрез, буй № 73, 14 августа	0,5–2,5	0,3–1,0	0,02–0,03
Устьевая зона р. Тетерев, поперечный разрез, 15 июля	0,5–1,5	0,2–0,5	0,2
Сухолучье, поперечный разрез, 15 июля	0,2–0,5	0,2–0,4	–
Сухолучье, поперечный разрез, 30 июля	0,5–1,0	0,5–0,6	0,1–0,3
Сухолучье, поперечный разрез, 15 августа	0,4–1,1	0,5–0,9	0,1–0,5
Глебовка, поперечный разрез, 15 июля	0,4–0,6	0,5–1,2	0,1–0,2
Глебовка, поперечный разрез, 30 июля	0,5–1,1	0,3–1,2	0,1–0,3
Лютеж, поперечный разрез, 15 июля	0,2–0,15	0,1–0,4	0,13–0,6
Верхний бьеф ГЭС, 15 июля	0,3	–	0,2
Верхний бьеф ГЭС, 15 августа	0,3–0,2	0,07–0,14	0,3–0,12
Р. Десна, устьевая зона	0,01–0,05	0,01–0,03	0,01–0,04
Р. Днепр, г. Киев, Матвеевский залив	0,02–0,4		
Р. Днепр, г. Киев, Собачье гирло	0,01–0,03		
Р. Десна, устьевая зона	0,01–0,05	0,01–0,03	0,01–0,04
Каневское водохранилище, г. Триполье	0,2–1,0	–	0,02–0,04
Каневское водохранилище, г. Ржищев	0,1–0,9	–	0,02–0,04

Характер радиоактивного загрязнения донных отложений Киевского водохранилища неоднороден. В пределах его акватории выделяются следующие основные зоны:

- наиболее загрязненная в месте слияния вод р. Припять и р. Днепр, где уровни гамма-поля более 2 мР/ч;
- сравнительно чистая устьевая зона р. Днепр – с мощностью доз менее 0,4 мР/ч – зона ниже полуострова Домантовского, для которой наблюдается постепенное уменьшение средних уровней мощности доз с 0,6–1,0 мР/ч в створе Страхолесье до 0,2–0,6 мР/ч в створе Вышгород.

Для Киевского водохранилища характерно также неоднородное, пятнистое распределение мощности доз донных отложений, определяемое скоростями течения, диапазонами глубин и характером подстилающих грунтов. Как правило, наибольшие уровни гамма-излучения наблюдаются на глубоких илистых участках со слабым течением, наименьшие – на мелких местах с песчаным дном и на крутых склонах дна. При вертикальном зондировании в Киевском водохранилище повышенные уровни мощности доз гамма-излучения наблюдаются лишь в придонном горизонте воды, на расстоянии 70–100 см от дна.

Общим для всех исследованных водных объектов является связь зон с повышенными уровнями мощности доз с гидроморфологическими особенностями дна. Чаще всего такие зоны располагаются:

- на застойных участках у входа в бухты, заливы и слабопроточные проливы;
- в нижних по течению частях островов, полуостровов и песчаных кос;
- в местах резкого расширения русла и уменьшения скорости течения;
- во всех углублениях дна, на глубоких ямах, затопленных старых руслах [11, 16].

Следует отметить, что достаточно высокие уровни радиоактивного загрязнения дна в отдельных случаях наблюдаются ниже плотины Киевской ГЭС: в заливах Собачье Гирло (0,06–0,25 мР/ч), Оболонь (0,1–0,28 мР/ч), Матвеевский (0,1–0,42 мР/ч), Берковщина (до 0,6 мР/ч). Эти уровни обусловлены выносом взвешенного мелкодисперсного вещества и непосредственными выпадениями на поверхность водоемов [11, 16]. Радиоактивное загрязнение донных отложений до 1,0 мР/ч выявлено в отдельных пунктах северной части Каневского водохранилища, в частности, в районе городов Триполье и Ржищев [11].

Активность радионуклидов в донных отложениях по состоянию на июнь–июль 1986 г. приведена в табл. 2 и 3.

В донных отложениях на момент отбора проб основная часть ^{95}Zr , ^{95}Nb , ^{103}Ru , ^{106}Ru , ^{141}Ce , ^{144}Ce содержалась в верхнем слое керна (0–6 см). Изотопы цезия проникли несколько глубже. Усредненные результаты анализа послойного распределения изотопов цезия: 0–3 см – 56 %; 4–6 см – 27 %; 7–9 см – 9 %; 10–12 см – 8 %. Содержание ^{95}Zr , ^{95}Nb , ^{103}Ru , ^{106}Ru , ^{141}Ce , ^{144}Ce в верхнем слое (0–6 см) составляет 94, 91, 90, 91, 93 и 90 %, соответственно.

Суммарное содержание (запас) радионуклидов в донных отложениях достигало 1,67 мКи/м² в устьевой зоне р. Припять (в районе буя № 219 на 30 июля). Содержание ^{137}Cs при этом составляло 0,047 мКи/м². Следует отметить, что запас радионуклидов в прибрежных и пойменных почвах левого берега р. Припять значительно (в некоторых случаях в десятки раз) больше, чем в донных отложениях. Минимальные количества радионуклидов наблюдались в донных отложениях р. Десна.

Таблица 2

Активность донных отложений на июнь–июль 1986 г.

Место и дата отбора проб	Активность, мкКи/м ²							
	⁹⁵ Zr	⁹⁵ Nb	¹⁰³ Ru	¹⁰⁶ Ru	¹⁴⁴ Ce	¹⁴¹ Ce	¹³⁴ Cs	¹³⁷ Cs
Р. Припять, выше пристани г. Чернобыль, 16 июля	398	597	143	159	398	96	19,3	48,0
Устьевая зона р. Припять, район буй № 219, 30 июля	349	580	115	87	390	78	23	47
Киевское водохранилище, устье р. Тетерев, 31 июля	24	49	11	10	15	10	3,2	9,2
Сухолучье, центральная зона, 19 июля	4,3	3,0	1,3	–	2,4	3,1	1,0	1,9
Сухолучье, правобережье, 30 июля	10,2	15,4	3,9	–	10,5	2,0	3,3	1,7
Глебовка, 30 июля	7,0	13	5	5,3	8,9	2,3	0,8	1,7
Устье р. Десна, 6 июня	–	–	0,13	0,19	–	–	0,06	0,15
Р. Днепр, г. Киев, Матвеевский залив, 01 июля	13	10	10	62	12	5,5	1,2	2,8
Р. Днепр, г. Киев, залив Собачье гирло, 28 июня	0,85	0,60	0,42	0,37	0,56	0,23	0,18	0,35
Р. Днепр, г. Киев, залив Собачье гирло, 29 июля	0,07	0,15	0,01	–	0,1	0,02	0,02	0,04
Каневское водохранилище, Триполье, правый берег, 28 июня	6,2	11	3,9	3,1	7,0	3,1	0,46	0,84
Триполье, левый берег, 29 июня	2,7	–	2,7	1,6	1,2	2,7	0,22	0,42

Удельная активность донных отложений русла р. Припять на участке от Чернобыля до устья реки, обусловленная отдельными радионуклидами, представлена в табл. 3, июнь–июль, 1986 г. [16].

Таблица 3

Удельная активность донных отложений русла р. Припять

Радионуклид	Удельная активность, Бк/кг, ·10 ⁻⁴				
	2 км выше Чернобыля	Чернобыль, причал	ниже Чернобыля, буй 251	ниже впадения р. Уж, буй 249	устьевая зона, буй 224
⁹⁵ Zr	15±2	4,1±0,4	16±2	32±4	72±7
⁹⁵ Nb	140±13	11,1±1,1	150±15	290±30	600±60
¹⁰³ Ru	15±2	1,3±0,1	6,3±0,7	11±1	40±4
¹⁰⁶ Ru	11±1	1,1±0,1	5,6±0,6	7,5±0,8	22±2
¹⁴⁴ Ce	20±2	5,5±0,7	20±2	40±4	83±9
¹⁴¹ Ce	4±1	2,1±0,2	–	10±1	20±2
¹³⁴ Cs	0,55±0,06	0,15±0,02	0,84±0,99	1,0±0,1	3,8±0,4
¹³⁷ Cs	1,2±0,1	0,31±0,03	1,9±0,2	2,4±0,3	7,9±0,8

Следует отметить (табл. 2, 3), что в период с 29 июня по 15 августа существенно изменилось отношение активностей изотопной пары $^{95}\text{Nb}/^{95}\text{Zr}$ (в среднем с 1,5 до 9,1), обусловленное накоплением активности дочернего ^{95}Nb ($T_{1/2} = 35,1$ сут), образующегося при бета-распаде ^{95}Zr ($T_{1/2} = 64$ сут).

Результаты измерений удельной активности ^{90}Sr в донных отложениях представлены в табл. 4 [16].

Таблица 4

Удельная активность ^{90}Sr в донных отложениях

Дата отбора, 1986 г.	Место отбора проб	Удельная активность ^{90}Sr , Бк/кг
Р. Припять:		
15.07	2 км выше г. Чернобыль	2150
11.07	Г. Чернобыль	160
30.07	Буй 224	2210
30.07	Буй 249	4660
13.08	Устьевая зона, впадение р. Брагинка	8190
13.08	Устьевая зона, правобережье	15000
Киевское водохранилище:		
18.07	Зона слияния вод р. Припять и р. Днепр, буй 64	670
31.07	Р. Тетерев, устье	1330
19.07	Сухолучье	640
31.07	Глебовка	125
15.07	Приплотинная зона	30
Р. Днепр:		
18.07	Выше Киевского водохранилища, Жары	5
29.07	р. Днепр, г. Киев:	180
28.06	Залив Матвеевский	460
29.06	Залив Собачье гирло	43
11.07	Русановский пролив	90
23.07	Р. Десна, устьевая зона	5
30.06	Каневское водохранилище, Триполье	70

Картина распределения активности ^{90}Sr в донных отложениях (табл. 4) практически не отличается от распределения других радионуклидов. Максимальные уровни активности ^{90}Sr , достигающие 15 кБк/кг, выявлены на р. Припять, особенно в устьевой зоне. В Киеве содержание ^{90}Sr в донных отложениях находится в пределах 40–460; в р. Десна – 5 Бк/кг.

Объемная активность радионуклидов в воде исследованной системы рек и водохранилищ представлена в табл. 5, 6 [11, 16].

Таблица 5

Объемная активность радионуклидов в воде

Место и дата отбора	Объемная активность, Бк/м ³							
	⁹⁵ Zr	⁹⁵ Nb	¹⁰³ Ru	¹⁰⁶ Ru	¹⁴⁴ Ce	¹⁴¹ Ce	¹³⁴ Cs	¹³⁷ Cs
Устьевая зона р. Припять, 15.07.86	2900	23000	2400	2200	4600	–	2000	4100
Устье р. Тетерев, 31.07.86	70	270	130	150	90	–	590	1250
Вышгород	40	210	250	170	60	–	100	210

Таблица 6

Объемная активность ¹³⁷Cs в воде

Дата отбора, 1986 г.	Место отбора проб	Объемная активность воды по ¹³⁷ Cs, Бк/м ³
Р. Припять		
15.07	Г. Чернобыль	4100
30.07	Устьевая зона	4100
15.08	Устьевая зона	3800
15.08	2 км выше г. Чернобыль	3400
Киевское водохранилище		
18.07	Зона слияния вод р. Припять и р. Днепр, буй 64	1750
31.07	Р. Тетерев, устье	1250
19.07	Сухолучье	1170
22.07	Глебовка	980
15.07	Приплотинная зона	300
Р. Днепр		
18.07	Выше Киевского водохранилища	520
29.07	Р. Днепр, г. Киев	
29.06	Залив Собачье гирло	140
29.07	Залив Собачье гирло	210
11.07	Русановский пролив	170
Р. Десна		
23.07	Устьевая зона	120
Каневское водохранилище		
29.06	Триполье	160
12.07	Правобережье выше Ржищева	150
12.07	Правобережье выше Ржищева	180
12.07	Ржищев	80
12.07	Правобережье ниже Ржищева	120
12.07	Левобережье ниже Ржищева	200

Оценка объемной активности воды (табл. 4 и 5) выявила тенденцию к уменьшению содержания радионуклидов при движении вниз по Киевскому водохранилищу. Обращает на себя внимание резкое уменьшение на этом пути активности в воде таких радионуклидов, как ^{95}Zr , ^{95}Nb , ^{103}Ru , ^{106}Ru , ^{144}Ce . Снижение объемной активности ^{137}Cs и ^{134}Cs происходит более низкими темпами. Это обусловлено тем, что такие легко гидролизующиеся элементы, как цирконий, ниобий, рутений и цезий, легко входят в состав взвешенного вещества и переходят в донные отложения. При этом цезий находится преимущественно в растворимой (ионной) форме.

Формы нахождения радионуклидов определяют их дальность переноса. Естественно, наиболее значительна она для изотопов цезия, которому придавалось особое значение при радиологических оценках источников водоснабжения (табл. 6). Объемная активность ^{137}Cs и ^{134}Cs в р. Припять практически не менялась на всем протяжении от Чернобыля до устья реки и составляла в июле–августе 1986 г. около 4000 Бк/м^3 . В водах Днепра в районе Киева и Киевского водохранилища (нижняя часть) объемная активность воды по ^{137}Cs составляла $160\text{--}200 \text{ Бк/м}^3$ (до аварии эта величина составляла 5 Бк/м^3) [16].

Необходимо отметить, что самые высокие уровни загрязнения вод р. Припять (4 Бк/л) были значительно ниже допустимых концентраций ^{137}Cs (ДКБ) в воде по требованиям НРБ-76 – 550 Бк/л [18]. После аварии на ЧАЭС величины допустимых уровней для отдельных радионуклидов были пересмотрены в сторону их значительного снижения. Согласно НРБ-99 уровень вмешательства для ^{137}Cs составляет 11 Бк/л [19]. Но и это допустимое значение почти в три раза выше концентрации этого радионуклида в реке Припять летом 1986 г.

Тритий распределен во всей обследованной водной массе речной системы довольно равномерно. Его содержание в воде находится в пределах $20\text{--}40 \text{ кБк/м}^3$ [14, 16].

Поступившие в систему поверхностных водоемов различные формы радиоактивных выпадений (топливосодержащие частицы различного состава, конденсационные частицы с фракционированным составом радионуклидов, аэрозоли и пр.) и выделившиеся из них отдельные радионуклиды вовлекаются в сложные гидрохимические, биохимические и геохимические циклы. Процессы миграции и перераспределения проходят с одновременной задержкой радионуклидов на природных барьерах. Для выявления процессов, управляющих миграцией в природных системах, было необходимо изучить распределение радионуклидов между водной фазой, взвесьями и донными отложениями. Эта информация является базовой для оценки последствий радионуклидного загрязнения и разработки прогноза развития радиоэкологической обстановки.

Результаты определений объемной/удельной активности радионуклидов в донных отложениях (A_d), в нефльтрованной воде (придонный горизонт $0\text{--}40 \text{ см}$) и в фильтрованной воде с того же горизонта р. Припять (устье, буй 219, дата отбора 13.08.1986) представлены в табл. 7 [16].

Изменения доли активности радионуклидов ^{95}Zr , ^{95}Nb , ^{103}Ru , ^{106}Ru на взвешенном веществе незначительны ($0,90\text{--}0,96$); для ^{141}Ce , ^{144}Ce доля активности в составе твердой фазы варьирует в пределах $0,7\text{--}0,8$.

Таблица 7

Объемная/удельная активность радионуклидов в донных отложениях,
в нефильтрованной и в фильтрованной воде р. Припять

Нуклид	Донные отложения, A_T , Бк/кг	Вода нефильтрованная, Бк/л	Вода фильтрованная, $A_{ж}$, Бк/л	$(A_T/A_{ж})^*$	Активность вещества твердой фазы, %
^{95}Zr	$2,5 \cdot 10^5$	2,4	0,21	$1,2 \cdot 10^6$	91
^{95}Nb	$11,6 \cdot 10^5$	9,3	0,96	$1,2 \cdot 10^6$	90
^{103}Ru	$1,2 \cdot 10^5$	1,1	0,07	$1,6 \cdot 10^6$	93
^{106}Ru	$0,9 \cdot 10^5$	1,2	0,05	$1,8 \cdot 10^6$	96
^{144}Ce	$2,9 \cdot 10^5$	4,4	1,1	$2,7 \cdot 10^5$	76
^{134}Cs	$0,9 \cdot 10^4$	3,43	3,1	$2,9 \cdot 10^3$	30*
^{137}Cs	$1,9 \cdot 10^4$	7,2	6,6	$2,8 \cdot 10^3$	30*

* Примечания:

A_T – объемная/удельная активность вещества, находящегося в нерастворимой (твердой) фазе;
 $A_{ж}$ – объемная/удельная активность вещества, находящегося в растворимой (жидкой) фазе;
отношение $(A_T/A_{ж})$ характеризует распределение активности радионуклидов между твердой и жидкой фазами;

доля активности $^{134,137}\text{Cs}$, связанная с мелкодисперсным взвешенным веществом, варьирует в пределах от 0,1 до 0,5 в зависимости от состава донных отложений; в табл. 7 приведено усредненное значение $A_T = 0,3$.

Результаты анализа межфазного распределения радионуклидов в пробах воды (в системе донные отложения–вода–взвесь–фильтрат) показали, что подавляющая часть объемной/удельной активности радионуклидов (0,90–0,96) связана с взвешенным веществом, за исключением $^{134,137}\text{Cs}$ и ^{90}Sr , и сосредоточена в илистых мелкодисперсных донных отложениях. Об этом свидетельствуют высокие значения отношений активности $(A_T/A_{ж})$ радионуклидов между взвешенным веществом и водой (фильтратом), донными отложениями и водой (нефильтрованной). В частности, для ^{95}Zr , ^{95}Nb , ^{103}Ru , ^{106}Ru , ^{144}Ce в системе вода–донные отложения отношение $(A_T/A_{ж})$ заключено в пределах 10^5 – 10^6 , что свидетельствует об интенсивном переходе этих радионуклидов в донные отложения. Более низкие значения $A_T/A_{ж} \sim 10^3$ – 10^4 для цезия свидетельствуют о том, что $^{137,134}\text{Cs}$ находится преимущественно в подвижной ионной форме и может распространяться на большие территории.

Существенное значение для оценки суммарного загрязнения воды, взвесей и осадков, а также составления долгосрочного прогноза радиоэкологической обстановки имели исследования содержания и распределения изотопов плутония (табл. 8–10) [16, 20].

Таблица 8

Результаты определения удельной активности $^{239,240}\text{Pu}$
в донных отложениях

Дата отбора, 1986 г.	Место отбора проб	Удельная активность $^{239,240}\text{Pu}$, Бк/кг
07.08	Водоем–охладитель ЧАЭС	62±4
Р. Припять		
11.07	Г. Чернобыль	7,9±0,8
16.07	Ниже понтонного моста	43±4
16.07	Старица	4500±450
16.07	Буй 224	890±90
16.07	Буй 249	200±30
16.07	Буй 251	42±4
07.08	Устье	140±14
Киевское водохранилище		
18.07	Буй 64, место слияния с р. Припять	230±40
19.07	Буй 30	200±20
31.07	Р. Тетерев, устье	54±8
19.07	Сухолучье	20±2
22.07	Лютеж	23±4
23.07	Створ ГЭС	47±5
15.07	Приплотинная зона	340±40
Р. Днепр		
	Выше Киевского водохранилища	9±3
Р. Днепр, г. Киев		
29.06	Залив Собачье гирло	1,1±0,2
29.06	Оболонский залив	1,7±0,3
11.07	Русановский пролив	32±0,3
11.07	Венецианский пролив	20±2
Р. Десна		
23.07	Устье	1,5±0,3

В исследованном регионе достаточно четко прослеживаются три области донных отложений, различающиеся уровнями удельной активности $^{239,240}\text{Pu}$. Это зона реки Припять, где уровни активности плутония могут достигать нескольких кБк/кг, затем зона собственно Киевского водохранилища, где уровни активности могут достигать нескольких сотен Бк/кг, и зона Киева, где активность плутония находится на более низком уровне – (1,1–32) Бк/кг. В этом снижении общей активности плутония большую роль играет возрастание водной массы этого водохранилища (с учетом притока вод Днепра при его впадении в Киевское водохранилище), притока вод р. Тетерев и т.п. Все это способствует разбавлению тех вод, которые приходят с водами Припяти. Однако, по-видимому, разбавление – далеко не единственный и, возможно, даже не определяющий фактор. Если сравнивать расход воды в устье Припяти (400 м³/с) и Днепра в районе Киева (1370 м³/с), то очевидно, что имеет место увеличение водной массы в 3,5 раза. При этом можно было бы ожидать, что объемная активность $^{239,240}\text{Pu}$, поступающая с водами Припяти, уменьшится за счет разбавления в такой же пропорции, то есть примерно в 3,5 раза. Вместе с тем, если принять объемную среднюю активность $^{239,240}\text{Pu}$ в водах устья Припяти равной 3,3 Бк/м³, т.е. не учитывать наиболее высокое значение – 48 Бк/м³, то уменьшение этой величины

до $0,2 \text{ Бк/м}^3$ и менее в водах Днепра в районе Киева соответствует кратности 15 и более. Отсюда следует, что в снижении объемной активности плутония наряду с разбавлением играют роль другие факторы, в числе которых сорбция на взвесах и переход с ними в донные осадки, имеют, по всей вероятности, для плутония существенное значение [20].

Таблица 9

Результаты определения объемной активности $^{239,240}\text{Pu}$ в водных пробах рек Припять, Днепр и Киевского водохранилища [16, 20]

Дата отбора	Место отбора	Горизонт отбора	$^{239,240}\text{Pu}$, Бк/м^3
Р. Припять			
16.07.86	Выше Чернобыля	Поверхность	$0,6 \pm 0,2$
17.07.86	У причала г. Чернобыля	Придонный.	48 ± 4
17.07.86	Ниже Чернобыля, буй 234	Поверхность	48 ± 4
17.07.86	Ниже Чернобыля, буй 240	Поверхность	$1,2 \pm 0,3$
16.07.86	Устье	Поверхность	$5,1 \pm 0,5$
13.08.86	Устье, буй № 219	Поверхность.	$1,4 \pm 0,3$
Киевское водохранилище			
16.07.86	Устье р. Тетерев	Поверхность.	$0,3 \pm 0,2$
19.07.86	Сухолучье	Поверхность.	$0,3 \pm 0,2$
19.07.86	Сухолучье	Придонный.	27 ± 3
Р. Днепр			
08.07.86	Г. Киев	Поверхность	$0,2$

Отношение активности $^{238}\text{Pu}/^{239,240}\text{Pu}$ в выделенном из воды мелкодисперсном веществе р. Припять находится в пределах $0,35-0,55$ при среднем значении $0,45 \pm 0,05$, что соответствует выгоранию по урану топлива, выброшенного из РБМК-1000, 11 кг/т .

Таблица 10

Распределение $^{239,240}\text{Pu}$ в системе взвесь–фильтрат

Дата отбора 1986 г.	Место отбора пробы воды	Вид фильтра	Объемная активность $^{239,240}\text{Pu}$		Распределение $^{239,240}\text{Pu}$ в системе взвесь/фильтрат, %.	
			взвесь	фильтрат	взвесь	фильтрат
30.07	Р. Припять, устье, буй № 219	Бумажный «синяя лента»	39 ± 4	$0,4 \pm 0,2$	99	1
13.08	Р. Припять, устье, буй № 219	Бумажный «синяя лента»	36 ± 4	$1,5 \pm 0,3$	96	4

Значения объемной активности $^{239,240}\text{Pu}$ в воде на участке р. Припять от г. Чернобыль до устья составляли от 1,2 до 48 Бк/м³, в устьевой зоне р. Припять – (1,4–5,1) Бк/м³. В Киевском водохранилище в поверхностных водах эти значения составляли 0,3 Бк/м³, в придонных слоях воды до 27 Бк/м³, а в воде р. Днепр в черте Киева – 0,2 Бк/м³.

По нормативам НРБ-76 [18] допустимые концентрации $^{239,240}\text{Pu}$ в воде составляют $2,2 \cdot 10^{-9}$ Ки/л, или $8,1 \cdot 10^3$ Бк/м³. Позднее, по НРБ-96 – ДУА_{нас} составляет 5 Бк/л. По НРБ-99 уровень вмешательства для ^{239}Pu и ^{240}Pu в воде составляет 0,6 Бк/кг [19]. Максимальные значения $^{239,240}\text{Pu}$, наблюдаемые в придонных горизонтах воды р. Припять, составляли 0,048 Бк/кг [16, 20].

По результатам изучения межфазового распределения плутония в системе взвесь–фильтрат в Киевском водохранилище было показано, что большая часть этого радионуклида (более 96 %) связана с взвешенным материалом. Повышенные содержания плутония в донных отложениях водохранилища (до 340 Бк/кг) характерны для застойных зон с большим количеством илистого материала.

В черте Киева удельные активности $^{239,240}\text{Pu}$ в пробах воды составляли 0,2 Бк/л.

Проведенные исследования показали, что в анализируемых водных пробах плутоний практически полностью находится во взвесьях и легко отделяется от водной фазы даже при фильтровании через обычный бумажный фильтр. Распространение этого нуклида по течению рек в значительной степени будет определяться перемещением взвесей. Оседание взвесей на дно будет приводить к постепенному обогащению плутонием донных отложений. Следует учесть, что плутоний, связанный с наиболее тонкодисперсной и устойчивой в водной фазе частью взвешенного вещества речных вод, способен мигрировать на весьма значительные расстояния. Этот факт необходимо принимать во внимание при организации водоснабжения с использованием речных вод Днепровского каскада [16, 20, 21].

Таблица 11

Результаты анализа отдельных навесок
из одной пробы донных отложений р. Припять

№ навески	$^{239,240}\text{Pu}$, Бк/кг
1	42±4
2	590±60
3	2520±250
4	41±4
5	43±4

Содержание плутония в большинстве случаев определяли по нескольким параллельным навескам из одной тщательно перемешанной пробы. Результаты проведенных анализов показали, что в дальней зоне, например, в Киевском водохранилище, расхождение результатов параллельных определений не превышало 30 %. Совершенно иная картина наблюдалась в ближней зоне, в донных отложениях реки Припять. В табл. 11 приведены результаты анализа нескольких отдельных проб, взятых из одной крупной (1,5 кг) пробы реки Припять (буй 251). Распределение плутония в донных отложениях ближней зоны выпадений оказалось крайне неравномер-

ным, что было связано с присутствием высокорadioактивных топливосодержащих микрочастиц.

Позднее аналогичный крайне неравномерный характер распределения радионуклидов, в том числе и плутония, был выявлен при радиогеохимических исследованиях выпадений специалистами Радиевого института в 30-километровой зоне. Присутствие в пробах сравнительно крупных топливосодержащих частиц (0,05–1,0 мм) с содержанием $^{239,240}\text{Pu}$ до $1 \cdot 10^7$ Бк/г [22] потребовало, как и в случае исследований донных отложений, специальной подготовки анализируемого материала.

Итоги работ экспедиционных групп Радиевого института за июнь, июль и август 1986 г. были оперативно обработаны и обобщены в виде трех справок для Правительственной комиссии по ликвидации последствий аварии на ЧАЭС. Справки № 1 и № 2 были доложены в штабе ГКАЭ, в ОМГРО и представлены в Правительственную комиссию. Справка № 3 (заключительная) была доложена и рассмотрена в штабе ГКАЭ, в ОМГРО и 24 августа доложена и обсуждена на заседании Правительственной комиссии.

Заключение

В июне–августе 1986 г. специалистами Радиевого института проведены полномасштабные радиоэкологические исследования радиоактивного загрязнения акваторий системы р. Припять–Киевское водохранилище–р. Днепр. Дополнительно были исследованы донные отложения Каневского, Кременчугского, Днепродзержинского, Запорожского и Каховского водохранилищ. Полученные результаты вместе с другими материалами Радиевого института по ликвидации аварии на ЧАЭС были переданы для подготовки доклада советских специалистов на международном совещании, организованном МАГАТЭ в конце августа 1986 г.

Комплексное изучение водоемов включало определение содержания радионуклидов в вертикальных и горизонтальных профилях вод, распределения радионуклидов между водой, взвесями и донными осадками [8].

Максимальные уровни радиоактивного загрязнения по таким радионуклидам, как ^{90}Sr , $^{134,137}\text{Cs}$, $^{239,240}\text{Pu}$, которые были зарегистрированы в водах р. Припять, не превышали предельно допустимые концентрации существовавших в 1986 г. норм и современные уровни вмешательства.

Установлено, что в системе вода – взвесь – донный осадок основная часть ^{90}Sr и более 70 % $^{134,137}\text{Cs}$ присутствует в водной фазе.

Основная часть радиоактивных загрязнений (90–96 % ^{95}Zr , ^{95}Nb , $^{103,106}\text{Ru}$ и 96–99 % $^{239,240}\text{Pu}$) содержится в основном в твердой фазе водоемов – во взвешях и донных осадках и распространяется по речной системе с мелкодисперсным взвешенным веществом и твердым стоком.

Удельная активность $^{239,240}\text{Pu}$ в донных отложениях реки Припять характеризовалась резко выраженной неоднородностью и варьировала в пределах от 8 до 4510 Бк/кг.

Отношение активности $^{238}\text{Pu}/^{239,240}\text{Pu}$ в выделенном из воды мелкодисперсном веществе р. Припять находится в пределах 0,35–0,55 при среднем значении $0,45 \pm 0,05$, что соответствует выгоранию по урану топлива, выброшенного из РБМК-1000, 11 кг/т.

Значения объемной активности $^{239,240}\text{Pu}$ в воде на участке р. Припять от г. Чернобыль до устья составляли от 1,2 до 48 Бк/м³, в устьевой зоне р. Припять – 1,4–5,1 Бк/м³. В Киевском водохранилище в поверхностных водах эти значения со-

ставляли $0,3 \text{ Бк/м}^3$, в придонных слоях воды – до 27 Бк/м^3 , в воде р. Днепр в черте г. Киев – $0,2 \text{ Бк/м}^3$.

Экспериментальные исследования селективного выщелачивания донных осадков показали, что гидролизующиеся радионуклиды прочно связаны со структурой твердой фазы. Переход их со временем в водную фазу маловероятен.

Наибольшую опасность для водопользования представляет взвешенная фаза Киевского водохранилища. Следует учесть, что значительная часть плутония, связанная с наиболее тонкодисперсной и устойчивой в водной фазе фракцией взвешенного вещества речных вод, способна мигрировать на весьма значительные расстояния. Поэтому при организации водоснабжения с использованием речных вод Днепровского каскада водохранилищ основное внимание должно быть обращено на интенсификацию процессов коагуляции для очистки воды от взвешенного вещества [16, 20].

По результатам исследований составлена карта-схема радиоактивного загрязнения донных отложений речной системы р. Припять–Киевское водохранилище – р. Днепр по состоянию на 22 августа 1986 г. [16].

Полученные специалистами Радиевого института оперативные данные были подтверждены дальнейшими исследованиями различных институтов и организаций по определению радиоактивного загрязнения системы рек и водохранилищ Украины и прилегающих к ним территорий. Кумулятивные выпадения цезия на поверхность земли в меридиональной полосе Чернобыль–Киев уменьшались от $\geq 40 \text{ Ки/км}^2$ до $\leq 0,3 \text{ Ки/км}^2$ [23–25]. По данным Радиевого института (см. табл. 2), в этой же полосе в донных отложениях р. Припять (г. Чернобыль) и р. Днепр (г. Киев) активности изотопов цезия варьировали от 67 до $0,06 \text{ Ки/км}^2$ [11, 16]. Поскольку основная часть радионуклидов донных отложений была прочно связана с частицами топливосодержащих выпадений, имеющих высокую плотность, вынос радиоактивных осадков в Киевское водохранилище должен быть незначительным. Весенние паводки 1988 г. и 1989 г. подтвердили сделанный прогноз. По данным Госкомгидромета [24, 25] во время весеннего половодья 1989 г. содержания ^{90}Sr и ^{137}Cs в р. Припять (г. Чернобыль) составляли $2,2 \cdot 10^{-11}$ и $1,1 \cdot 10^{-11} \text{ Ки/л}$, в р. Днепр (г. Киев) – $0,5 \cdot 10^{-11}$ и $1,0 \cdot 10^{-11} \text{ Ки/л}$. Эти значения были значительно ниже допустимых уровней, принятых НРБ-76/87 ($4,0 \cdot 10^{-10}$ и $1,5 \cdot 10^{-8} \text{ Ки/л}$ соответственно) [18].

Авторы благодарят всех участников экспедиций Радиевого института им. В. Г. Хлопина и коллег по экспедиционным работам в составе Комплексной экспедиции № 10 Госкомгидромета СССР и в особенности С. М. Вакуловского, М. М. Ворончука, Н. В. Смирнова в связи с успешным выполнением задания.

Список литературы

1. Старик И. Е., Кузнецов Ю. В., Николаев Д. С. и др. Распределение радиоэлементов в осадках Черного моря // ДАН СССР. 1959. Т. 129. № 5. С. 1142.
2. Шведов В. П., Макарова Т. П., Иванова Л. М. и др. Определение радиоактивного стронция в водных пробах // Радиохимия. 1959. Т. 1, вып. 5. С. 11.
3. Иванова Л. М., Шведов В. П. Выделение радиоактивного цезия в виде соединений с ферроцианидами щелочноземельных элементов // Радиохимия. 1963. Т. 5, вып. 2. С. 185.
4. Иванова Л. М. Метод одновременного определения ^{90}Sr , ^{137}Cs и ^{144}Ce в морской воде // Радиохимия. 1967. Т. 9, вып. 5. С. 622.

5. Иванова Л. М., Гедеонов Л. И., Маркелов В. Н. и др. Содержание ^{90}Sr и ^{137}Cs в водах Балтийского моря в 1970 г. // Атом. энергия. 1972, Т. 33, вып. 4. С. 835–838.
6. Кузнецов Ю. В., Щебетковский В. Н., Трусов А. Г. Основы очистки воды от радиоактивных загрязнений. М.: Атомиздат, 1974.
7. Гедеонов Л. И., Иванова Л. М., Блинов В. А. Исследование миграции радиоактивных веществ в поверхностных водах суши, морях и океанах с целью изучения изменения радиационной обстановки в пресных и морских водах в связи с деятельностью АЭС и предприятий атомной промышленности // Исследования в области обезвреживания твердых и газообразных отходов и дезактивации загрязненных поверхностей. М.: Атомиздат, 1978.
8. Гедеонов Л. И., Виноградова В. К., Гритченко З. Г. и др. Радиоактивное загрязнение речной системы Теча–Исеть–Тобол–Иртыш–Обь: Препринт РИ 251 Радиевого института им. В. Г. Хлопина (по материалам 1970, 1977–1978 гг.), СПб., 1998.
9. Иванова Л. М., Гаврилов В. М., Тишкова Н. А. и др. Разработка методики концентрирования плутония из природных вод и анализа концентрата: Отчет Радиевого института им. В. Г. Хлопина. 1984. Инв. № 713-И.
10. Кузнецов Ю. В., Легин В. К., Поспелов Ю. Н. и др. Разработка методики определения содержания плутония в объектах окружающей среды: Отчет Радиевого института им. В. Г. Хлопина. 1985. Инв. № 791-И.
11. Гедеонов Л. И., Степанов А. В., Сенчилло В. Х. Проникновение радионуклидов от аварии ЧАЭС в донные отложения р. Днепр: Отчет Радиевого института им. В. Г. Хлопина, 1986. Инв. № 1384-И.
12. Кузнецов Ю. В., Гедеонов Л. И., Степанов А. В. Методическое обеспечение работ, проводимых Радиевым институтом им. В. Г. Хлопина по изучению радиационной обстановки водной системы Днепр–Припять: Отчет Радиевого института им. В. Г. Хлопина. 1987. Инв. № 1382-И.
13. Костандов К. А. Грунтоотборник. Всесоюзный институт отраслевой информации (ВИМИ). Информационный листок № 87-0714. 1987.
14. Гедеонов Л. И., Блинов В. А., Тишков В. П. и др. Комплекс аппаратуры для измерения трития в объектах окружающей среды // Атом. энергия. 1977. Т. 42, вып. 5.
15. Гедеонов Л. И., Гритченко З. Г., Гаврилов В. М. и др. Радиоактивные выпадения: результаты наблюдений в районе Ленинграда в 1986 г.: Отчет Радиевого института им. В. Г. Хлопина. 1987. Инв. № 982-И.
16. Кузнецов Ю. В., Гедеонов Л. И., Цветков О. С. и др. Радиоактивное загрязнение речной системы Припять–Днепр как следствие аварии на Чернобыльской АЭС: Отчет Радиевого института. 1987. Инв. № 1381-И.
17. Тертышник Э. Г., Никитин А. И., Кабанов А. И. и др. Комплекс приборов для отделения взвесей из проб воды // Тр. ИЭМ. 1980. Вып. 5 (94) С. 65.
18. Нормы радиационной безопасности НРБ-76. М.: Атомиздат, 1979.
19. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99): Гигиенические нормативы СП 2.6.1.758-99. М.: Минздрав России, 2000.
20. Кузнецов Ю. В., Легин В. К., Гедеонов Л. И. и др. Определение объемной и удельной активностей $^{239,240}\text{Pu}$ в пробах воды и донных отложений рек Припять, Днепр и Киевского водохранилища: Отчет Радиевого института им. В. Г. Хлопина. 1987. Инв. № 1383-И.

21. Кузнецов Ю. В., Легин В. К., Алой А. С. и др. Радиохимия окружающей среды. Обращение с радиоактивными отходами // Радиевый институт им. В. Г. Хлопина. К 75-летию со дня основания. СПб., 1997. С. 81–95.
22. Krivokhatsky A. S., Dubasov Yu. V., Smirnova E. A. et al. Actinides in the Near Release from the Chernobyl NPP Accident // J. Radioanal. Nucl. Chem., Articles. 1991. Vol. 147, N 1. P. 141–151.
23. Атлас выпадений цезия на поверхность земли в Европе после чернобыльской аварии: EUR Report 16733. Luxembourg: EC Office of Publication, 1996.
24. Чернобыль. Радиоактивное загрязнение природных сред. / Под редакцией Ю. А. Израэля. Л.: Гидрометеиздат, 1990, 296 с.
25. Израэль Ю. А. Радиоактивные выпадения после ядерных взрывов и аварий. СПб.: Прогресс-Погода, 1996.

Radioactive Contamination of River System Pripyat River–Kiev Basin–Dnieper River in 1986 as a Consequence of the Chernobyl NPP Accident

V. P. Tishkov, A. V. Stepanov, O. S. Tsvetkov

The radionuclide composition and volumetric/specific activity in water, bottom sediments, and suspended matter of the river system Pripyat River–Kiev Basin–Dnieper River–Kanev Basin were determined with the aim to assess and forecast the radiation conditions in connection with water use. Distribution of radionuclides in the system bottom sediments–water–suspended matter–filtrate is studied. The basic part of radioactive contaminations (90–96 % of ^{95}Zr , ^{95}Nb , ^{103}Ru , ^{106}Ru and 96–99 % of $^{239,240}\text{Pu}$) is spreaded on the river system with finely dispersed suspended matter and sediment runoff. On the average, about 70 % of $^{134,137}\text{Cs}$ and more than 80 % of ^{90}Sr are in the soluble form. Inventories of radionuclides in bottom sediments (Ci/km^2) are estimated. The most contaminated are the Pripyat River, its mouth reach, and the shallow right-bank part of the Kiev Basin which are under the influence of the Pripyat River. The total inventory of radionuclides ^{95}Zr , ^{95}Nb , ^{103}Ru , ^{106}Ru , ^{141}Ce , ^{144}Ce , ^{134}Cs , and ^{137}Cs in the upper 6-cm layer of bottom sediments reaches $1670 \text{ Ci}/\text{km}^2$ (mouth reach of the Pripyat River). The inventory of ^{137}Cs is $47 \text{ Ci}/\text{km}^2$. The left-bank shallow waters which are under the influence of the Dnieper River are polluted to a lesser extent. The volumetric activity of $^{239,240}\text{Pu}$ in water of Pripyat River was in the range $(0.6\text{--}28) \text{ Bq}/\text{m}^3$; in the mouth reach of the Pripyat River, $3.3 \text{ Bq}/\text{m}^3$; in the Kiev Basin in surface waters, $0.3 \text{ Bq}/\text{m}^3$, and in the near-bottom water, up to $27 \text{ Bq}/\text{m}^3$; in water of the Dnieper River within the precincts of Kiev, $0.2 \text{ Bq}/\text{m}^3$. The $^{238}\text{Pu}/^{239,240}\text{Pu}$ activity ratio in Pripyat River is within 0.35 ± 0.55 , average 0.45 ± 0.05 , which corresponds to the burn-up of uranium fuel ejected from RBMK-1000 of 11 kg/t. The volumetric/specific activity of radionuclides ^{95}Zr , ^{95}Nb , ^{103}Ru , ^{106}Ru , ^{141}Ce , ^{144}Ce , ^{134}Cs , ^{137}Cs , ^{90}Sr in water of river system was within $(0.002\text{--}7) \text{ Bq}/\text{l}$; for $^{239,240}\text{Pu}$, $(0.002\text{--}0.048) \text{ Bq}/\text{l}$. It did not exceed the permissible levels of radioactivity prescribed by NRB-76 regulations for drinking water.

1.5. Обследование чернобыльских объектов трековыми методами

В. А. Николаев

Трековый метод, основанный на нитратцеллюлозных детекторах и искровом счете треков, применялся для измерений флюенсов альфа-частиц на поверхностях объектов Чернобыльской АЭС и в 30-километровой зоне. В сентябре–октябре 1986 г. трековые детекторы применялись в обследованиях чернобыльских объектов в тех случаях, когда использование альфа-радиометров было затруднено или невозможно из-за: высокого фона бета–гамма-излучения, влияющего на показания приборов; больших размеров радиометров, которые не позволяли их использовать в труднодоступных местах; необходимости измерений распределений флюенсов одновременно по многим точкам; необходимости получения радиографической информации. В 1990 г. применение трековых детекторов было обусловлено главным образом их высокой чувствительностью, обеспечивающей возможность измерений на уровне $0,01–0,1 \text{ а}\cdot\text{см}^{-2}\cdot\text{мин}^{-1}$, а также высокой производительностью искровых счетчиков треков, позволяющих производить измерения по большому числу точек реперной сети. Трековые детекторы позволили также определить объемную активность водных препаратов из скважин в районе «рыжего» леса на уровне 0,01 Бк/л.

Наборы пороговых трековых детекторов «Днестр» на основе ^{235}U в кадмиевых и борных фильтрах, ^{237}Np , ^{238}U , ^{232}Th применялись в 1988 году для измерений пространственных и спектральных характеристик нейтронных полей в двух скважинах под аварийным реактором 4-го блока ЧАЭС. Экспериментальные данные использованы для восстановления дифференциальных нейтронных спектров. Полученные результаты показали, что измеренные спектры близки по форме к реакторным. Плотность потока нейтронов зависит от точки измерения, но не превышает $\sim 200 \text{ см}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$.

Трековые методы позволяют изучать пространственные характеристики излучателей, проводить идентификацию ядерных частиц, определять их зарядовые и энергетические характеристики. Применительно к чернобыльским объектам в РИ использовались как фотографические методы (см. статью В. Г. Савоненкова в настоящем сборнике), так и методы твердотельных трековых детекторов (ТТД), описанные в данной статье. ТТД применялись в 1986–1987 гг. и 1990 г. для измерений флюенсов альфа-частиц и радиографии почвы, воды, поверхностей различных объектов на ЧАЭС и в 30-километровой зоне [1–3], а также для измерения пространственных и энергетических характеристик нейтронов под развалом 4-го блока ЧАЭС в 1988 г. [2–4].

Измерения флюенсов альфа-частиц и радиография чернобыльских объектов

Значительный вклад в радиоактивное загрязнение чернобыльских объектов внешней среды, зданий, оборудования внесли альфа-излучающие нуклиды, главным образом изотопы плутония, а со временем и ^{241}Am .

В сентябре–октябре 1986 г. нитратцеллюлозные трековые детекторы в сочетании с искровыми счетчиками треков [5] применялись по заданиям оперативного штаба по ликвидации последствий аварии при обследовании альфа-загрязнений различных объектов там, где использование традиционных альфа-радиометров было невозможно или затруднено из-за:

- высокого бета–гамма-фона (единицы–десятки Р/ч) вблизи 4-го блока, влияющего на показания приборов;

- больших габаритов радиометров, не позволяющих производить измерения в труднодоступных местах зданий и оборудования (например, в помещениях 1-го и 3-го блоков, планируемых к запуску в эксплуатацию), а также в случаях измерений пространственного распределения флюенсов альфа-частиц одновременно по многим точкам (например, по глубине грунта);
- необходимости получения радиографического изображения объекта, в том числе для определения наличия и характеристик «горячих» частиц;

Аппаратура и методики. В измерениях применялись нитратцеллюлозные пленки типа LR-115-II (фирма Kodak, Франция) и ДНЦ (Переславский филиал Химфотопроекта), отобранные по массово-молекулярным параметрам для получения достаточной эффективности регистрации альфа-частиц в геометрии 2π (25–30 %) при собственном фоне $10\text{--}20\text{ см}^{-2}$ [6]. Для автоматического подсчета треков применяли искровые счетчики треков АИСТ [7] и ИСТРА [8], показанные на рис. 1.

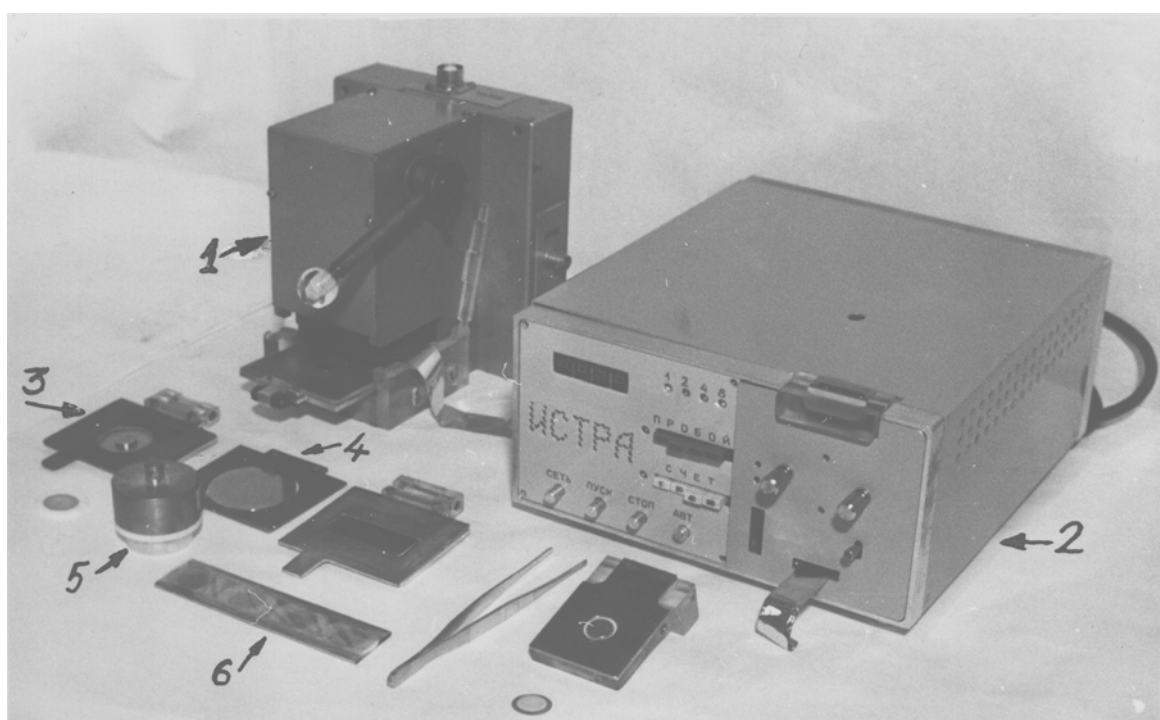


Рис. 1. Искровые счетчики треков: 1 – АИСТ; 2 – ИСТРА. 3, 4 – кассеты для счета треков на детекторах разных размеров. 5 – камера для определения объемной активности радона в воздухе. 6 – кассета для измерений флюенса альфа-частиц.

Для измерений флюенса альфа-частиц от объектов (оборудования, стен, грунта) были изготовлены специальные кассеты (рис. 1, поз. 6; рис. 2,а), закрытые с одной стороны защитной лавсановой пленкой толщиной 12 мкм. Нитратцеллюлозный детектор с размерами $2,5 \times 12\text{ см}^2$ помещали внутрь кассеты. После экспозиции нитратцеллюлозную пленку отделяли от подложки, проводили ее химическую обработку [5] и подавали на искровой счетчик. Сначала искровая обработка пленки происходила с электродом большой площади (круг диаметром 5 см или прямоугольник $2 \times 6\text{ см}^2$, показанные на рис. 1, поз. 4). После первого искрового пробоя проверяли алюминиевую реплику и определяли наличие «горячих» частиц, проявляющихся в виде пятен, и их

местоположение. Затем на участках детектора, свободных от «горячих» частиц, с помощью электрода площадью 1 см^2 (рис. 1, поз. 3) определяли плотность треков от распределенного по поверхности объекта альфа-излучения. Если плотность треков на отдельных участках детектора была слишком высокой для искрового метода счета треков (выше 8000 см^{-2}), то применяли один из следующих приемов:

- 1) подсчет треков под микроскопом, при этом диаметр трека 2–3 мкм обеспечивал регистрируемую плотность треков до $10^5 - 10^6 \text{ см}^{-2}$;
- 2) повторная менее длительная экспозиция;
- 3) повторная экспозиция без тормозящей пленки на удалении 1,5–2 см от поверхности объекта, при этом даже «горячие» частицы давали измеряемую плотность треков.

Для выбора оптимальной площади детектора и определения коэффициента перехода от плотности треков к плотности потока альфа-частиц проводили калибровочные измерения [1]. Переходные коэффициенты для разного рода поверхностей определяли путем последовательных измерений одного и того же участка поверхности (табл. 1) аттестованным радиометром и трековым детектором. Для объектов, в которых толщина активного слоя была заведомо больше пробега альфа-частиц (грунт, грубые поверхности), переходный коэффициент составил $5,7 \pm 1,5$ частиц/трек, в то время как для тонких слоев (пластиковый пол, полированные поверхности) он составил $2,5 \pm 0,4$ частиц/трек. Таким образом, измеренное среднеквадратичное отклонение коэффициента равнялось 15–25 %, что является удовлетворительным для такого рода измерений [1]. Площадь детектора, как показали результаты измерений, представленные на рис. 2, б, должна составлять не менее 10 см^2 из-за высокой неоднородности распределения альфа-активности по поверхности объектов.

Результаты измерений альфа-активности различных поверхностей в 1986 г. Общая площадь измерений составила в 1986 г. $\sim 1000 \text{ см}^2$, что определялось количеством качественной детекторной пленки. Результаты измерений, фрагмент которых представлен в табл. 1, использовали как для калибровок трекового радиометра на поверхностях разного рода, так и для получения информации об уровнях альфа-загрязнений различных объектов на разных удалениях от ЧАЭС, в том числе в труднодоступных местах и после дезактивации. Измерения, проведенные в 1986 году как в помещениях 1-го и 3-го блока, так и в 30-километровой зоне (всего ~ 100 замеров, на основании которых составлено 5 справок-отчетов), показали [1], что значения флюенсов альфа-частиц на измеренных поверхностях разного рода (стены, пол, мебель, оборудование, грунт разного рода) находились в диапазоне $1 - 10000 \text{ см}^{-2} \text{ мин}^{-1}$.

На 3-м и 1-м блоках измерения проводили с целью подготовки этих блоков к запуску, для чего были необходимы работы по определению уровней загрязненности поверхностей помещений и контролю эффективности дезактивации. На рис. 2, в в качестве примера показаны результаты измерений в одном из коридоров 3-го блока до дезактивации. Гамма-фон в коридоре составлял 2–3 Р/ч, причем его природа была не вполне понятна. Фон мог быть вызван либо гамма-излучением из аварийного реактора, либо высоким уровнем загрязнения помещения радионуклидами, поступившими из лифтовой шахты. Было не ясно, что следует делать для радикального снижения фона: строить защитную стену от излучения реактора или дезактивировать помещение. Определить наличие загрязнений с помощью бета-радиометров не удалось из-за слишком высокого уровня радиации в помещении. В целях установления наличия и оконтуривания пятен загрязнений на стене и полу коридора на протяжении 18 м на общей нити было размещено 18 детекторных кассет на 10 с. Показанные

на рис. 2, в результаты свидетельствовали, что высокий радиационный фон помещения обусловлен прямым и отраженным потоками радионуклидов, поступившими из лифтовой шахты. В соответствии с полученными результатами была проведена дезактивация помещения.

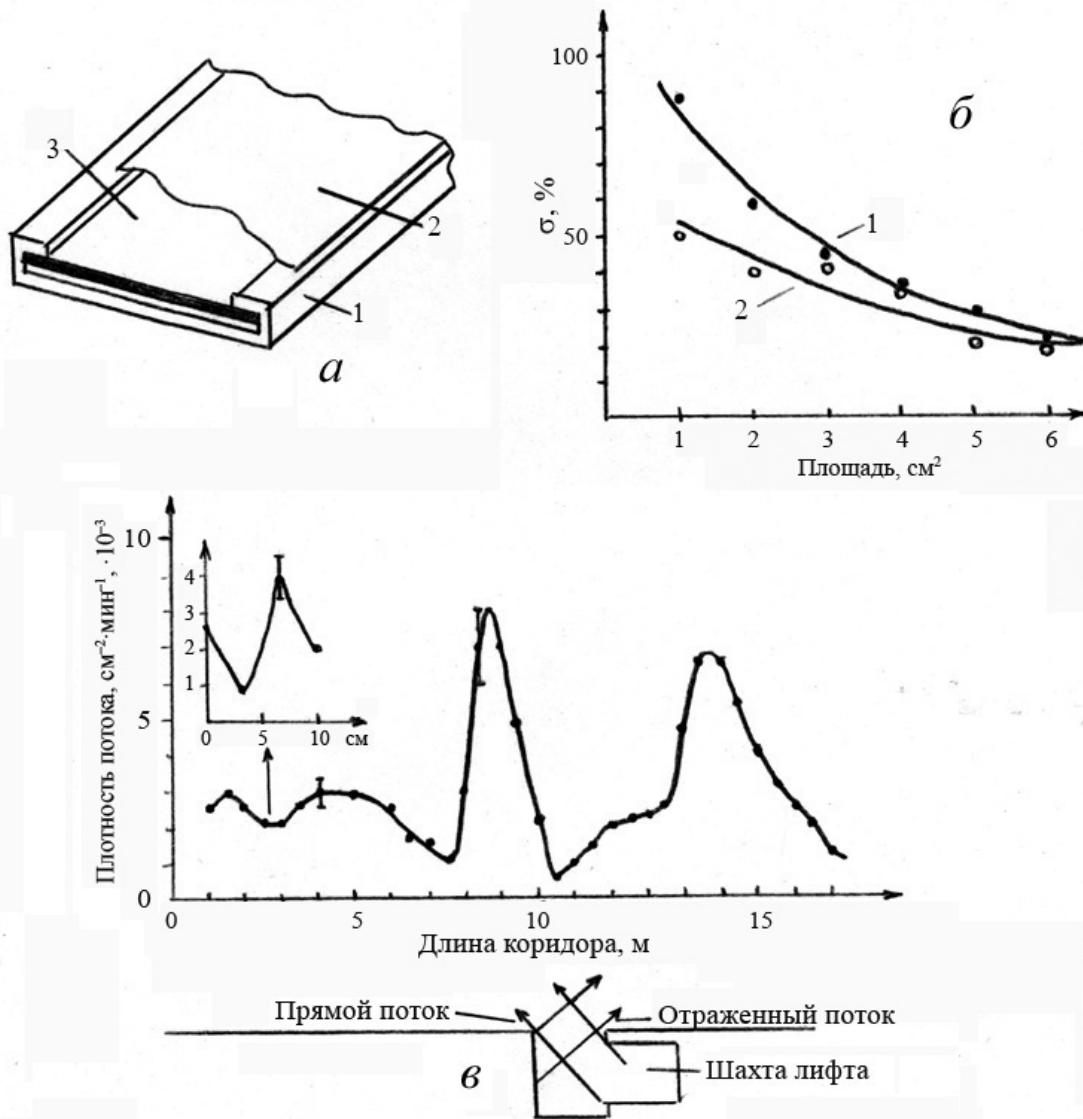


Рис. 2. а – конструкция трекового альфа-радиометра: 1 – кассета; 2 – защитная тормозящая пленка; 3 – трековый детектор.
 б – среднеквадратичное отклонение показаний детектора в зависимости от его площади для двух частных выборок.
 в – распределение альфа-активности по стене коридора 3-го блока ЧАЭС (на врезке – распределение активности в пределах одной кассеты).

Таблица 1

Плотность потока альфа-частиц
от чернобыльских объектов в сентябре–октябре 1986 г.

Место измерений	Характер поверхности	$\alpha/(\text{см}^2 \cdot \text{мин})$
ЧАЭС, 3-й блок до дезактивации		
Коридор	Оштукатуренная стена	150–10000
Пол	Пластик	300–400
ЧАЭС, 1-й блок после дезактивации		
Плинтус	Строганное дерево	2–6
Пол	Линолеум	6–9
Панель щита	Металл	1–2
Стенка щита	Металл	2–4
Стенка шкафа	Металл	1–9
Пол под пультом	Линолеум	25–45
Г. Чернобыль		
Скамейка	Строганное дерево	20–30
Крыльцо	Бетон	10–20
Садоводство		
Грунт	Глина	20–40
Грунт	Песок	2–4
Дорожка	Песок	1–2
Стена	Кирпич силикатный	15–30
Г. Припять		
Стена	Кирпич белый	10–20
Стена	Кирпич белый	1–2
Стена	Бетон	10–20
Стена	Бетон	5–10

Альфа-радиографические исследования с помощью ТТД в 1986–1987 гг. Нитратцеллюлозные трековые детекторы позволяют не только определять флюенсы альфа-частиц, но и получать радиографическое изображение источника радиации. Радиография альфа-излучателя может быть проведена на высоком фоне бета–гамма-излучения (до 100 кГр), который затрудняет или делает невозможным применение для этих целей фотоэмульсий, что особенно актуально для чернобыльских объектов, которые всегда обладают значительным вкладом бета–гамма-излучения. Анализ радиографического изображения может проводиться как с помощью микроскопа с пространственным разрешением 1–2 мкм, так и с применением искрового пробоя пленочных детекторов. В последнем случае разрешение составляет 30–50 мкм, но имеется возможность получить видимое невооруженным глазом изображение всего объекта размером до 6 см как на пробитом детекторе, так и на алюминиевой реплике.

При получении информации об альфа-загрязнениях объектов окружающей среды, зданий, оборудования в зоне ЧАЭС альфа-радиография при микроскопном и искровом методах анализа использовалась в целях:

- получения пространственного распределения альфа-излучателей на различных поверхностях объектов в диапазоне размеров от микрон до сантиметров;

- одновременного определения потоков альфа-частиц и осколков спонтанного деления на одном и том же образце;
- определения плотности «горячих» частиц и их характеристик (активности, размеров) на поверхности различных объектов.

На рис. 3, *а* приведено увеличенное изображение алюминиевой реплики после искрового пробоя, полученное от детектора на грунте вблизи 4-го блока. Мелкие отверстия размером 30–50 мкм на реплике соответствуют отдельным альфа-частицам, более крупные до ~ 1 мм соответствуют локальным скоплениям альфа-излучателей, в том числе «горячим» частицам. При анализе радиографических изображений получено, что на соседних участках площадью ~ 1 см² плотность треков от рассеянного альфа-излучения на грунте вблизи 4-го блока отличалась до 100 раз, на внутренней стене третьего блока – до 5 раз (см. врезку на рис. 2, *в*), на оконных стеклах 3-го блока, обращенных к развалу 4-го блока, – до 10⁴ раз (рис. 3, *б*).

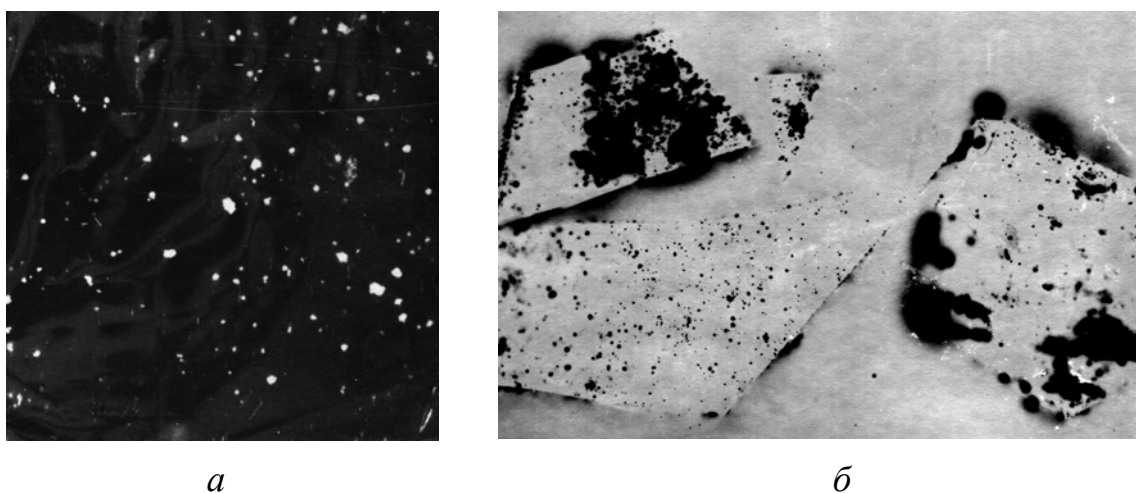


Рис. 3. *а* – Изображение алюминиевой реплики при искровом пробое детектора, экспонированного на грунте около 4-го блока ЧАЭС.
б – Изображение протравленного нитратцеллюлозного детектора, экспонированного на оконных стеклах, обращенных к 4-му блоку ЧАЭС.

Осколки оконных стекол, обращенных во время взрыва к 4-му блоку, исследовались в январе 1987 г. по инициативе С. С. Коваленко на предмет обнаружения на них треков осколков деления. Треки могли образоваться от спонтанного деления нуклидов ²³⁸Pu и ²⁴²Cm, входивших в состав облученного топлива, которое попало во время взрыва реактора на поверхность стекол. В принципе треки могли образоваться также за счет вынужденного деления попавшего на стекла ²³⁵U запаздывающими нейтронами, если во время аварии имела место цепная реакция. Действительно, на протравленных стеклах имелись треки от осколков деления, плотность которых на некоторых участках стекол доходила до десятков треков на см². Радиографическое обследование непротравленных стекол с помощью нитратцеллюлозных детекторов после нескольких экспозиций разной длительности показало, что на детекторе имеют место треки как от альфа-частиц, так и от осколков деления, причем соотношение плотностей треков двух типов может объясняться облучением детектора от спонтанно делящихся нуклидов. Если треки от осколков вынужденного деления и имеют место, то их невозможно идентифицировать на фоне треков от осколков спонтанного деления.

Радиографическому обследованию подвергали также в 1986 г. аэрозольные фильтры, через которые прокачивали воздух из помещений 3-го блока. После искрового пробоа детектора, который облучали в течение суток в контакте с фильтром, на реплике кроме мелких пятен от отдельных альфа-частиц были хорошо видны и крупные пятна от «горячих» частиц, находившихся в прокачанном воздухе. Сопоставление числа этих пятен на реплике с объемом прокачанного воздуха позволило определить концентрацию «горячих» частиц в воздухе обследуемого помещения, а также среднюю концентрацию альфа-излучающих нуклидов в воздухе – величины, необходимые для оценки дозовой нагрузки на легкие.

Развитые в РИ методы и результаты исследования характеристик отдельных «горячих» частиц из радиоактивных образований 4-го блока приведены в работе [9] и статье В. Г. Савоненкова в настоящем сборнике.

Результаты измерений альфа-активности грунта и воды в 1990 г. Исследования альфа-загрязнений грунта в 30-километровой зоне были продолжены в 1990 г. совместно с сотрудниками ИЯИ АН УССР [1]. Применение трековых детекторов было обусловлено главным образом их высокой чувствительностью, обеспечивающей возможность измерений на уровне $0,01-0,1 \alpha \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{мин}^{-1}$, а также высокой производительностью искровых счетчиков треков, позволяющих производить измерения по большому числу точек реперной сети. Можно было ожидать, что спустя три года после аварии поверхностное альфа-загрязнение грунта будет значительно более низким и равномерным, чем в 1986 г. В этом случае было бы допустимо применять детекторы меньшей площади, чем $10-20 \text{ см}^2$, как это было в 1986 г., что существенно облегчило бы работы при планируемых измерениях по большому количеству пунктов реперной сети. Для выбора оптимальной площади трекового детектора, оценок затрат и потребности в детекторной пленке, а также погрешности измерений в ноябре 1990 г. были проведены измерения в трех реперных пунктах 30-километровой зоны, где, по данным радиохимического анализа, загрязненность изотопами плутония в пятисантиметровом слое почвы составляла $\sim 0,01$, $\sim 0,1$ и $\sim 8 \text{ Ки/км}^2$. В каждом пункте было установлено до 10 кассет, позволивших выявить неравномерность альфа-загрязнений почвы в диапазоне расстояний от сантиметров до десятков метров. Для измерений распределения альфа-активности по глубине грунта были установлены также кассеты в грунте перпендикулярно поверхности и под углом 45° . Для оценки вклада почвенного радона в счетность детектора вблизи кассет были установлены трековые радонотометры [10]. Помимо измерений непосредственно на грунте были также обследованы пробы, доставленные в лабораторию. Экспозиции составляли от 2 до 7 сут. Результаты измерений представлены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты измерений плотности потока альфа-частиц на поверхности грунта в трех пунктах реперной сети в 30-километровой зоне в 1990 г.

№ пункта	Уровень загрязнения по Pu , Ки/км^2	Плотность потока, $\alpha/(\text{см}^2 \cdot \text{мин})$	Среднеквадратичное отклонение потока на удалениях, %			
			1–10 см	10 см–1 м	1–10 м	10–100 м
1	8	$0,24 \pm 0,1$	42	49	52	54
2	0,1	$0,04 \pm 0,02$	39	–	–	–
3	0,01	$0,025 \pm 0,006$	34	31	–	27

Все приведенные в табл. 2 значения плотности потока альфа-частиц превышают возможные значения собственного фона метода и обусловлены альфа-излучающими нуклидами. Данные параллельных радоновых измерений на грунте показали, что вклад радона в плотность потока не более $0,003 \alpha/(\text{см}^2 \cdot \text{мин})$. Приведенные в табл. 2 значения плотности потока альфа-частиц коррелируют с результатами радиохимического анализа проб, отобранных в этих пунктах в 1988 г., хотя отличие поверхностной активности от точки к точке много меньше, чем было получено для объемных активностей. По-видимому, это связано с уходом активности с поверхности грунта на некоторую глубину, что зафиксировано помещенными в грунт детекторами. Распределение плотностей потоков альфа-частиц по глубине на всех трех детекторах, показанное на рис. 4, имеет максимум на глубине 4–7 см.

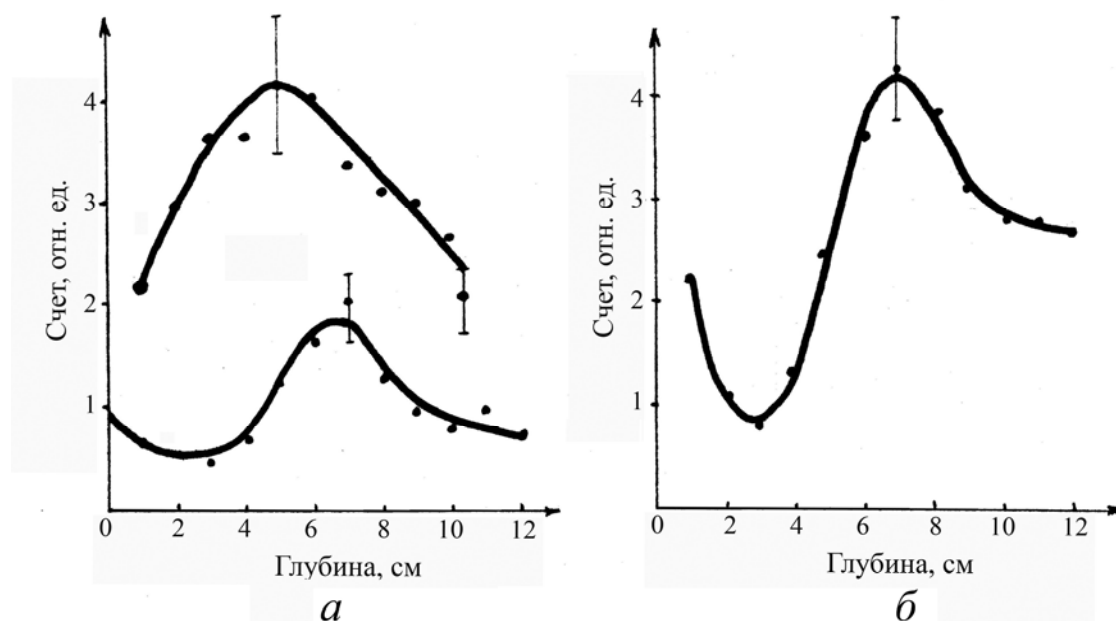


Рис. 4. Распределение плотностей потоков альфа-частиц по глубине грунта при установке кассет перпендикулярно (*а*) и под углом 45° к поверхности (*б*).

Среднеквадратичные отклонения плотностей потоков альфа-частиц, приведенные в табл. 2, лежат в пределах 30–50 % в диапазоне расстояний между детекторами от нескольких сантиметров до десятков метров. Это свидетельствует о довольно равномерном распределении поверхностной альфа-активности грунта в обследованных реперных пунктах в 1990 г., позволяющем при дальнейшем мониторинге использовать детекторы площадью $\sim 1 \text{ см}^2$.

Нитратцеллюлозные трековые детекторы в сочетании с искровым счетчиком треков применяли осенью 1990 г. также для измерений удельной активности водных проб, отобранных из скважин в 30-километровой зоне в районе «рыжего» леса [1]. Пробы воды были отобраны из 15 скважин, две из которых использовались для забора питьевой воды (созданы до аварии), а остальные были сделаны после аварии в исследовательских целях. Отбор проб производили как с поверхности воды, так и с разных глубин до 6 м. Все пробы объемом 30 мл были по известным методикам нанесены на металлические мишени, после чего на них на 7 сут были установлены трековые детекторы. Чувствительность метода составила при этом $\sim 0,01 \text{ Бк/л}$, что существенно выше используемого вначале метода погружного детектора ($\sim 50 \text{ Бк/л}$ при экспозиции 10 сут [11]). Измеренные значения удельной активности составили от 0,04 до 1 Бк/л.

Измерения пространственных и энергетических характеристик нейтронного поля под развалом 4-го блока ЧАЭС в 1988 г.

После сооружения объекта «Укрытие» над аварийным реактором 4-го блока ЧАЭС усилиями многих специалистов проводился большой комплекс диагностических исследований, в том числе в целях оценки ядерной и радиационной безопасности объекта. Для этой оценки была существенна информация о нейтронах, исходивших из разрушенного реактора. Однако данные об абсолютной величине потоков нейтронов различных энергетических групп отсутствовали. В связи с этим в июле 1988 г. сотрудниками РИ и ИЯИ УССР были проведены измерения пространственно-энергетических характеристик нейтронного поля аварийного реактора, результаты которых были доложены на рабочих совещаниях и позднее опубликованы [4]. Измерения проводились в двух горизонтальных скважинах, пробуренных в шахту реактора, подапаратное помещение и парораспределительный коридор. Для измерений использовали 30 наборов пороговых детекторов «Днестр» [12], основанных на делящихся нуклидах ^{235}U в кадмиевых и борных фильтрах, ^{237}Np , ^{238}U , ^{232}Th , лавсановых трековых детекторах и искровых счетчиках треков АИСТ. Время экспозиции составило 168 ч. Минимальная измеряемая плотность нейтронов для этой экспозиции составляла: для тепловых нейтронов – $10^{-3} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$, промежуточных нейтронов – $0,05\text{--}0,2 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$, быстрых нейтронов – $1\text{--}6 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$. В табл. 3 приведены данные о расстановке сборок и первичные результаты измерений.

Таблица 3

Число делений на 1 мг нуклида на разных удалениях от конца скважины

	Скважина № 1					Скважина № 2		
	0 см	30 см	60 см	90 см	120 см	0 см	50 см	150 см
^{235}U	5100	5700	9750	>11000	14500	14000	13000	70
$^{235}\text{U}+\text{Cd}$	3700	>3600	5680	10500	10500	>9000	1900	9
$^{235}\text{U}+^{10}\text{B}$	950	1900	–	–	–	1600	–	–
^{237}Np	105	90	250	340	260	420	125	Фон
^{238}U	Фон	5	16	50	30	87	20	Фон
^{232}Th	Фон	Фон	Фон	16	12	16	7	Фон

Во время экспозиции в первую скважину попала горячая вода, что привело к нарушению условий эксплуатации некоторых детекторов и возможному искажению информации. Для таких детекторов определяли лишь нижнюю границу плотности треков.

Данные, полученные по 1-й скважине, показывают незначительные вариации нейтронного поля вдоль скважины. В противоположность этому данные по 2-й скважине показывают, что условия формирования нейтронного поля в развале реактора могут отличаться очень сильно. При смещении на 1 м показания датчиков тепловых и надтепловых нейтронов изменялись на 2–3 порядка, по-видимому, из-за наличия близко расположенных массивных материалов, эффективно поглощающих медленные нейтроны.

На основании данных табл. 3 были рассчитаны дифференциальные спектры нейтронов по методу минимизации направленного расхождения [4]. Восстановление спектров проводили с помощью программы RESTOR. В качестве нулевого приближения использовали представление для реакторного спектра и константы ENDF/B-V. Число итераций при вычислении составило 2–4, что свидетельствовало об удачном нулевом приближении спектра. По-видимому, основным источником нейтронов яв-

лялись спонтанно делящиеся нуклиды. В табл. 4 приведены данные расчета плотности потока нейтронов разных энергетических групп для внутренних концов обеих скважин. Их абсолютные значения невелики ($<200 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$) и согласуются с оценками и выводами [13] о подкритичном состоянии реактора. На рис. 5 приведены вычисленные дифференциальные спектры нейтронов.

Таблица 4

Плотности потоков нейтронов разных энергетических групп для внутренних концов скважин

Энергия нейтронов, МэВ	Плотность потока нейтронов, $\text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$	
	скважина № 1	скважина № 2
$0-10^{-6}$	4	14
$10^{-6}-10^{-4}$	23	59
$10^{-4}-10^{-2}$	100	177
$10^{-2}-10^{-1}$	65	83
0,1-0,5	69	82
0,5-1,0	30	40
1,0-2,0	11	56
2,0-4,0	1,5	52
4,0-6,0	0,25	14
6,0-8,0	0,056	3

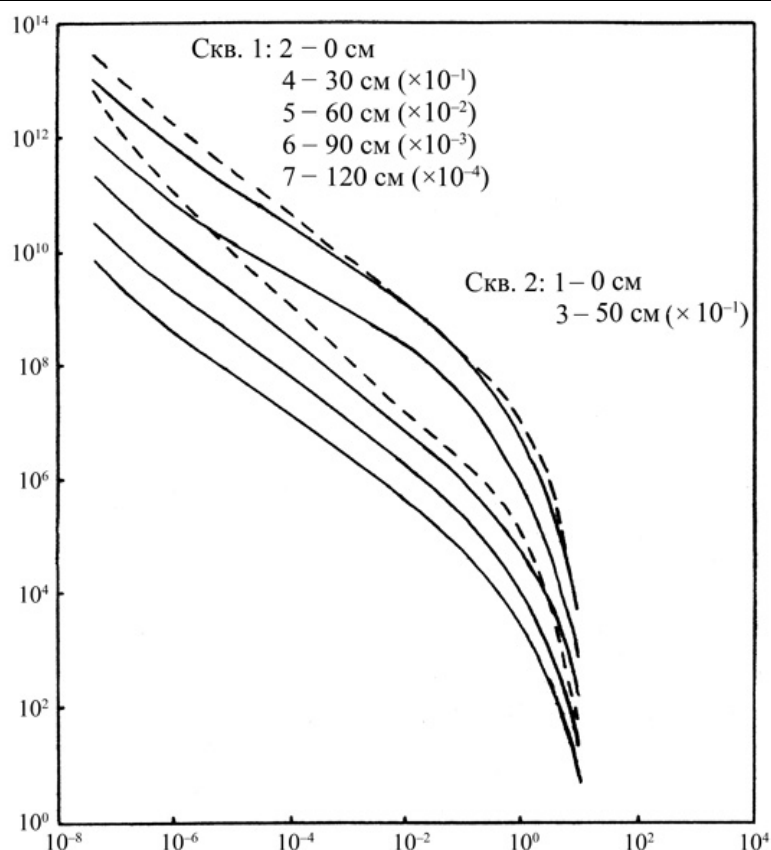


Рис. 5. Дифференциальные спектры нейтронов в скважинах под 4-м блоком ЧАЭС.

Список литературы

1. Gromov A. V., Kopchenov V. E., Krivokhatskiy A. S. et al. Application of Track Detectors for Alpha-Activity Measurement of Soil, Water, and Surfaces of Objects in the 30-km Zone of the Chernobyl NPP // Nucl. Tracks Radiat. Meas. 1993. Vol. 21. N 3. P. 377–382.
2. Nikolaev V. A. Application of SSNTDs to Investigations of Radiation Accident After-effects // Radiat. Meas. 1995. Vol. 25, N 1–4. P. 337–354.
3. Nikolaev V. A. Track Methods of Measurement in the Environment Developed in the Khlopin Radium Institute // Radionuclides and Heavy Metals in Environment / Ed. M. V. Frontasyeva. Kluwer Acad. Publ., 2001. P. 349–360.
4. Gromov A. V., Kozunov A. V., Krivokhatskiy A. S. et al. Assessment of Neutron Spectral Characteristics of the Chernobyl NPP Failed Reactor // Nucl. Tracks Radiat. Meas. 1993. Vol. 21, N 3. P. 383–386.
5. Евдокимов А. В., Копченков В. Е., Кривоухатский А. С. и др. Радиометрия осколков деления и альфа-частиц с помощью пластиковых пленок и искрового счетчика треков АИСТ // Радиохимия. 1986. Т. 28, вып. 6. С. 816–819.
6. Воробьев И. Б., Громов А. В., Николаев В. А. и др. Влияние молекулярно-массовых параметров на регистрационные характеристики нитратцеллюлозного детектора // Радиохимия. 1988. Т. 30, вып. 5. С. 678–681.
7. Николаев В. А., Александров Б. М., Веденев В. С. и др. Автоматический искровой счетчик // ПТЭ. 1976. № 4. С. 57–59.
8. Nikolaev V. A., Kopchenov V. E., Kozunov A. V. et al. Spark Counters Developed at the V.G. Khlopin Radium Institute // Nucl. Tracks Radiat. Meas. 1993. Vol. 21, N 3. P. 429–432.
9. Савоненков В. Г., Кривоухатский А. С., Дубасов Ю. А. и др. Радиоактивные образования из 4-го блока аварийного реактора ЧАЭС // Радиохимия. 1991. Т. 33, вып. 4. С. 140–149.
10. Nikolaev V. A., Buzynniy M. G., Vorobiev I. V. et al. Application of the Track Method for Radon Measurement in Ukraine // Nucl. Tracks Radiat. Meas. 1993. Vol. 21, N 3. P. 433–436.
11. Николаев В. А., Потапова Т. С. Применение нитратцеллюлозных трековых детекторов для измерения альфа-активности в водных средах // Радиохимия. 1990. Т. 32, вып. 3. С. 145–150.
12. Воробьев И. Б., Козунов А. В., Копченков В. Е. и др. Применение метода искрового счета треков в нейтронных исследованиях // Атом. энергия. 1986. Т. 61, № 1. с. 35–40.
13. Абалин С. С., Беляев С. Т., Боровой А. А. и др. Диагностические исследования аварийного реактора Чернобыльской АЭС // Атом. энергия. 1990. Т. 68. С. 355–359.

Investigation of Chernobyl Objects by Track Methods

V.A. Nikolaev

The track method based on cellulose nitrate detectors and spark-counting of tracks was applied to measurements of alpha-particle fluences on surfaces of Chernobyl NPP objects and in the 30-km zone. Between September and October 1986, track detectors were applied to investigation of Chernobyl objects when the use of alpha radiometers was hampered or impossible because of: high background of beta-gamma radiation which influenced the readings; large dimensions of radiometers which did

not allow measurements in places difficult to access; necessity for measurements of fluence spatial distributions at many points simultaneously; necessity for gaining radiographic information. In 1990, the application of track detectors was due mainly to their high sensitivity on the level of $0,01-0,1 \alpha/(\text{cm}^2 \cdot \text{min})$, as well as to high efficiency of spark counters providing the possibility of measurements at many benchmark points. Track detectors also allowed determination of the volumetric activity of water on the level of $0,01 \text{ Bq/l}$ in boreholes in the "Rusty Forest" region. Sets of Dnestr threshold detectors based on fissile nuclides ^{235}U in Cd and ^{10}B filters, ^{237}Np , ^{238}U , and ^{232}Th were used in 1988 for measurements of spatial and energy characteristics of neutron fields in two boreholes under Chernobyl NPP failed reactor. The experimental data were used to calculate the differential neutron spectra. The results obtained showed that shape of the neutron energy spectra was similar to that of the reactor. Neutron flux densities depend on the measurement point but do not exceed $\sim 200 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$.

I.6. Определение загрязненности почв Киева изотопами плутония в июне–июле 1986 года

С. М. Гращенко, В. Н. Струков

Радиационная обстановка, сложившаяся после аварии на ЧАЭС, потребовала оперативного определения содержаний плутония в почвах и грунтах Киева. Для выполнения этой работы были направлены сотрудники Радиевого института, владеющие разработанным методом определения содержаний плутония в объектах окружающей среды с использованием индикатора ^{236}Pu . Проведенные анализы показали, что концентрации изотопов плутония в почвах Киева находятся на уровне глобальных выпадений, характерных для широтной зоны района исследований.

В конце июня 1986 года заместитель директора Радиевого института Г. С. Синицына получила распоряжение руководства министерства срочно направить сотрудников Радиевого института в Киев в Институт ядерных исследований (ИЯИ) АН УССР для проведения анализа образцов почв и грунтов на содержание изотопов плутония и оценки плотности их выпадения в черте Киева. Кроме того, была просьба передать в ИЯИ АН УССР разработанную Радиевым институтом методику определения содержания плутония в объектах окружающей среды с использованием индикатора – ^{236}Pu – и оказать помощь в ее применении.

Радиационная обстановка, сложившаяся после аварии на 4-м блоке ЧАЭС, была в это время крайне сложной. Вследствие загрязнения была проведена эвакуация населения городов Припять и Чернобыль, жителей поселков ближней 30-километровой зоны.

Проведенные в Киеве оперативные измерения на поверхности почв показали достаточно высокую плотность потока альфа-частиц, но прямые определения плутония не проводились. Существующая неопределенность, выяснение которой решало вопрос об эвакуации более двух миллионов жителей столицы Украины, серьезно беспокоила и крайне болезненно воспринималась Оперативной группой Политбюро, руководством республики и Правительственной комиссией по ликвидации аварии. Естественно, что принятие каких-либо серьезных решений должно было быть основано результатами, полученными достоверными аналитическими методами и иметь научное доказательство.

В то время в Советском Союзе надежная и отработанная методика определения изотопов плутония в почвах и грунтах имела только в Радиевом институте. В течение ряда лет в отделе Ю. В. Кузнецова велись работы по изучению распределения и поведения изотопов плутония в объектах окружающей среды. Выполнение исследований в этой области радиоэкологии стало возможным благодаря разработке и совершенствованию методического обеспечения реализации аналитических работ. В результате выполнения многолетних исследований по методическому обеспечению изучения форм нахождения и поведения радионуклидов в различных объектах окружающей среды был разработан комплекс радиохимических методов анализа, включающий методику определения плутония в пробах почв и грунтах с использованием индикатора ^{236}Pu [1].

Подготовка стандарта предприятия «Плутоний-239–240. Радиохимическая методика определения в пробах почв и донных отложений водоемов» [2] выполнялась сотрудником отдела Ю. Н. Поспеловым. Для количественной оценки химического выхода плутония был синтезирован совместно с ОИЯИ (академик Ю. Ц. Ога-

несян) изотоп плутония – ^{236}Pu , использование которого соответствовало требованиям определения изотопов плутония на глобальном уровне [3].

Поскольку Ю. Н. Пospelов был в отпуске, Г. С. Синицына поручила авторам статьи подготовить все, что необходимо для определения изотопов плутония в пробах почв, и срочно вылететь в Киев. У нас был опыт работы по нормированию допустимого содержания примесей естественных радионуклидов в фосфорных удобрениях [4], включающий альфа-спектрометрические определения изотопов урана, тория и полония в образцах почв и растений, что, естественно, облегчало выполнение поставленной задачи.

Получить билеты и вылететь в Киев в то время было очень сложно, а с перевозкой в самолете нашего экспедиционно-лабораторного имущества – сложнее во много раз. Но каким-то чудом нам это удалось.

Наша работа проводилась в Институте ядерных исследований АН УССР (директор института – академик АН УССР Вишнеvский Иван Николаевич) в отделе физики реакторов, которым руководил В. П. Вертебный. Нам помогали и перенимали опыт работы начальник службы реактора к. х. н. В. А. Близнюкова и другие сотрудники института. По договоренности с руководством института и АН УССР образцы почв отбирали специалисты – сотрудники специализированных институтов АН УССР – почвоведы и ботаники.

Больших затруднений с альфа-спектрометрическими измерениями в Институте ядерных исследований АН УССР не было, так как физики этого института умели изготавливать полупроводниковые детекторы большого диаметра и альфа-спектрометрические измерения у них были хорошо отработаны.

Труднее было без предварительной оценки концентрации изотопов плутония в анализируемых почвах и при крайнем дефиците времени на раздумья выбрать количество индикатора – ^{236}Pu , необходимое для анализа. После разбавления исходного индикаторного раствора плутония и определения титра полученного раствора был проведен холостой опыт. Только после этого можно было начинать анализ двух предоставленных нам проб. Было понятно нетерпение, с каким ожидали результаты анализов не только сотрудники ИЯИ, но и Правительственная комиссия. Однако для получения достоверных данных приходилось забыть о спешке и педантично и тщательно выполнять все этапы аналитической работы.

На радость всем анализ первых двух проб почв показал, что концентрации изотопов плутония в почвах и плотность их выпадения в тех местах, откуда были взяты пробы, находятся на уровне глобальных выпадений, характерных для этих широт.

По результатам работы в командировке был подготовлен протокол технического совещания при заведующем отделом физики реакторов В. П. Вертебном. В этом протоколе обсуждались вопросы оказания помощи Радиевым институтом Институту ядерных исследований АН УССР в использовании методики определения содержания изотопов плутония в объектах окружающей среды с применением радиоактивного индикатора – ^{236}Pu . Для продолжения определений содержания плутония в почвах и грунтах ИЯИ АН УССР передавались индикаторные количества ^{236}Pu . В протоколе отмечалось, что была проведена проверка чистоты используемых препаратов на содержание плутония, приготовлена аликвота индикаторного раствора с требуемой концентрацией и определен титр индикаторного раствора. Предполагалось выполнить параллельные определения содержания плутония еще в трех пробах почв и провести сопоставление результатов анализа, выполненных в двух инсти-

тудах. К сожалению, сотрудничество в этом направлении не имело продолжения. Не был подготовлен и запланированный совместный отчет. По результатам исследования в командировке была подготовлена лишь Справка о результатах определения содержания изотопов плутония в почвах Киева.

Очевидно, что после полученных первых результатов анализа проблема, для решения которой привлекался Радиевый институт, потеряла свою остроту. Содержащие плутоний выпадения из реактора 4-го блока ЧАЭС не были обнаружены в заметных количествах в почвах Киева, что соответственно снимало то напряжение, которое сопровождало эту работу.

Наша работа была закончена. Не заканчивалась только большая человеческая тревога за судьбы людей, вовлеченных в события на 4-м блоке ЧАЭС, которые позднее назовут крупнейшей радиационной катастрофой в мире.

Список литературы

1. Кузнецов Ю. В., Легин В. К., Симоняк З. Н. и др. Определение $^{239,240}\text{Pu}$ в донных отложениях Балтийского моря // Радиохимия. 1988. Т. 30, вып. 2. С. 262–267.
2. Стандарт предприятия п.я. Р-6710. Плутоний-239,240. Радиохимическая методика определения в пробах почв и донных отложений. Утверждено Приказом № 84 от 31.03.88 г. СТП 17.24–88.
3. Оганесян Ю. Ц., Кузнецов Ю. В., Легин В. К. и др. Разработка методики синтеза и выделения ^{236}Pu : Отчет о НИР предприятия п.я. Р-6710. 1984. Инв. № 666-И. 21 с.
4. Шамов В. П., Гращенко С. М., Дричко В. Ф., Лисаченко Э. П. Нормирование содержания природных радионуклидов в фосфорных удобрениях // Радиационная гигиена: Сб. научных трудов. СПб.: ФГУН НИИРГ им. проф. П. В. Рамзаева, 2006. С. 273–280.

Determination of Kiev Soil Contamination with Plutonium Isotopes in June–July 1986

S. M. Grashchenko, V. N. Strukov

Radiation conditions formed after the CNPP accident called for prompt evaluation of the plutonium content in Kiev soils. Radium Institute's employees provided with the developed method of plutonium determination in environmental objects, using ^{236}Pu tracer, were sent to implement the associated work. The conducted analyses showed that the plutonium isotope concentrations in Kiev soils were on the level of global fallout typical for latitudinal area of the region studied.

1.7. Оценка величины мгновенного энерговыделения при аварии реактора на ЧАЭС

С. А. Пахомов, Ю. В. Дубасов

Отношение активностей изомеров $^{133}\text{Xe}/^{133m}\text{Xe}$ при стационарной работе реактора близко к 35, а при мгновенном делении (взрыве) – к 11, что позволило оценить ядерную составляющую величины мгновенного (взрывного) энерговыделения при аварии на ЧАЭС. Для этого на траектории переноса аварийных продуктов (в районе г. Череповец) были отобраны пробы атмосферного ксенона, которые измеряли на γ -спектрометре и определяли отношение $^{133}\text{Xe}/^{133m}\text{Xe}$, средняя величина которого составила 22,4. Для проведения количественных оценок была разработана математическая модель, учитывающая величину мгновенного энерговыделения, график изменения мощности реактора до момента аварии и различные условия фракционирования в изобарной цепочке. Сравнение результатов расчетов с экспериментальными данными показало, что величина мгновенного удельного энерговыделения при аварии на ЧАЭС составила $2 \cdot 10^5$ – $2 \cdot 10^6$ Дж/Вт, или $6 \cdot 10^{14}$ – $6 \cdot 10^{15}$ Дж (100–1000 кт), если относить этот результат ко всей тепловой мощности реактора 3200 МВт. Однако такая оценка несоизмерима с фактическим масштабом взрыва, оцениваемого в 10 т ТНТ. Это доказывает локальный характер мгновенного ядерного энерговыделения и позволяет оценить массу топлива, вовлеченного в этот взрывной процесс, величиной от 0,01 до 0,1 % от общего количества.

Относительно физической природы аварии на Чернобыльской АЭС до сих пор не существует единого представления. По основной версии это был взрыв химической природы – взрыв водорода, который образовался в реакторе при высокой температуре в результате реакции воды с цирконием и рядом других элементов.

Альтернативная версия основана на допущении ядерного механизма большого мгновенного энерговыделения. Убедительные свидетельства в пользу этой версии впервые были получены специалистами Радиевого института на основе анализа радионуклидного состава проб атмосферного ксенона, отобранных в районе г. Череповец, и анализа величины отношения активностей изомеров $^{133}\text{Xe}/^{133m}\text{Xe}$.

Успешному выполнению этой работы способствовало то обстоятельство, что отношение активностей $^{133}\text{Xe}/^{133m}\text{Xe}$ чувствительно к динамике реактора. Так при длительной работе реактора на постоянной мощности это отношение близко к 35. В другом крайнем случае – при мгновенном делении ядерного топлива (взрыве) – это отношение в пересчете на нулевой момент времени близко к 11. Достаточно большие периоды полураспада этих радионуклидов (2,19 сут для ^{133m}Xe и 5,24 сут для ^{133}Xe) позволяют проводить их регистрацию на значительном удалении от источника поступления в атмосферу, как, например, в г. Череповец, расположенном на расстоянии 1000 км от Чернобыля.

В результате взрыва 4-го энергоблока, произошедшего на Чернобыльской АЭС в ночь на 26 апреля 1986 г., в атмосферу поступил почти весь запас изотопов ксенона и криптона, а также значительная часть других продуктов, накопленных в реакторе к моменту его разрушения. Под воздействием атмосферных процессов продукты аварийного выброса ЧАЭС были распределены на значительной части Европы. Ранняя фаза переноса показана на рис. 1.

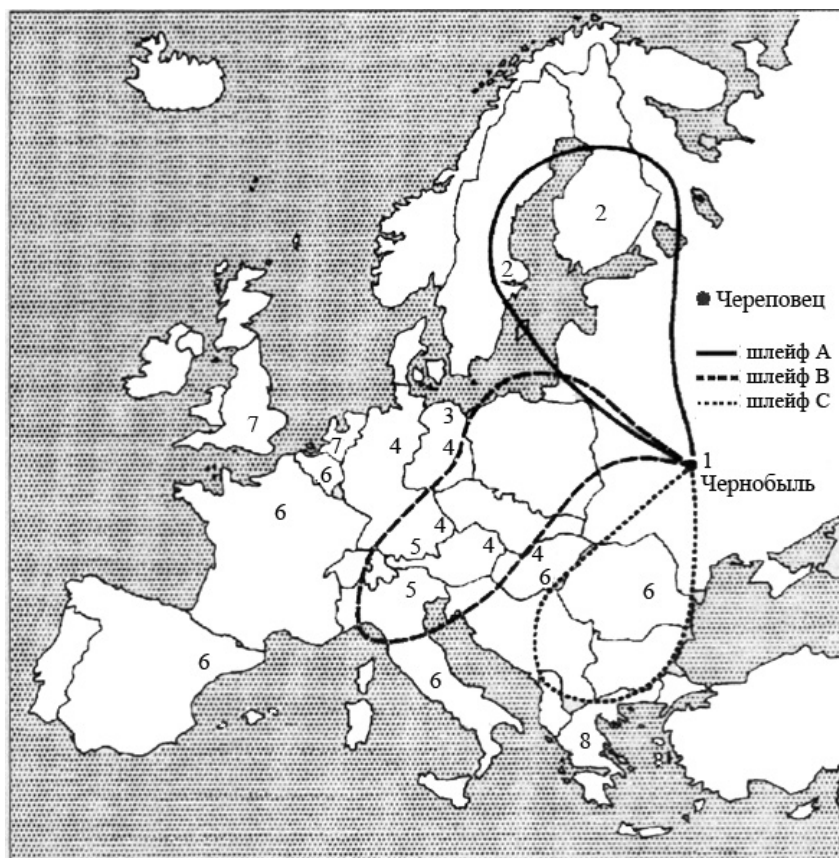


Рис.1. Траектории переноса продуктов аварийного выброса ЧАЭС и дни (после аварии) начала их прихода ([1], с. 314).

А, В, С соответствуют траекториям переноса от 26, 27–28 и 29–30 апреля соответственно. Числа 1–8 указывают день появления продуктов аварийного выброса в атмосфере: 1 – 26 апреля, 2 – 27 апреля, 3 – 28 апреля, 4 – 29 апреля, 5 – 30 апреля, 6 – 1 мая, 7 – 2 мая, 8 – 3 мая.

Сразу же после аварии в СССР начался широкомасштабный мониторинг радиоактивного загрязнения атмосферного воздуха. Программа мониторинга включала измерение радиоактивности атмосферных благородных газов (РБГ) – изотопов криптона и ксенона, и определение их радионуклидного состава.

Образцы этих газов, подлежащие измерениям, готовили из промышленной криптон-ксеноновой смеси (ККС) – побочного продукта, вырабатываемого на крупных воздухоразделительных заводах (ВРЗ), производящих кислород для металлургической промышленности. Очищенные от радона образцы атмосферных РБГ измеряли на γ -спектрометре с Ge(Li) детектором.

Заполнение баллонов на воздухоразделительных заводах в среднем происходит на протяжении 2–3 сут, причем каждый день на заполнение устанавливается новый пустой баллон, а заполненный баллон снимается. Заполненные баллоны выдерживают некоторое время на товарном складе и лишь после этого отправляют потребителю. Таким образом, использование воздухоразделительных заводов для целей отбора проб атмосферных РБГ обеспечило уникальную возможность получить как фоновые (отобранные до аварии) пробы, так и последующие пробы, несущие информацию о динамике радиоактивного загрязнения атмосферы.

Наиболее важная информация была получена при анализе проб криптон-ксеноновой смеси, произведенной в г. Череповец в период с 22 апреля по 6 мая 1986 г.

Полученные в результате анализа этих проб значения объемной активности радионуклидов ^{133}Xe и ^{133m}Xe в атмосферном воздухе г. Череповец, приведены в табл. 1 (за условную дату пробоотбора принималась середина периода заполнения баллонов ККС). В табл. 1 также представлены значения отношений активности этих изомеров как на дату пробоотбора, так и на дату аварии.

Таблица 1
Значения объемной активности изомеров ^{133}Xe и ^{133m}Xe в атмосферном воздухе города Череповец и их отношения

Период заполнения баллона	^{133}Xe , Бк/м ³ (на дату пробоотбора)	^{133m}Xe , Бк/м ³ (на дату пробоотбора)	$^{133}\text{Xe}/^{133m}\text{Xe}$ (на дату пробоотбора)	$^{133}\text{Xe}/^{133m}\text{Xe}$ (на дату аварии)
22.04–25.04	$(7,4\pm 1,0)\cdot 10^{-3}$	Менее предела обнаружения	–	–
27.04–29.04	$(7,41\pm 0,74)\cdot 10^{-1}$	$(2,5\pm 0,6)\cdot 10^{-2}$	29,6±8,9	20,5±6,2
27.04–30.04	$(1,62\pm 0,13)\cdot 10^0$	$(4,1\pm 1,0)\cdot 10^{-2}$	39,5±11,9	22,9±6,9
29.04–02.05	$(1,54\pm 0,13)\cdot 10^0$	$(3,1\pm 0,8)\cdot 10^{-2}$	49,7±14,9	23,9±7,2
30.04–03.05	$(2,71\pm 0,29)\cdot 10^{-1}$	$(4,1\pm 1,0)\cdot 10^{-3}$	66,1±19,8	22,2±6,7
02.05–06.05	$(8,0\pm 1,1)\cdot 10^{-3}$	Менее предела обнаружения	–	–

Как видно из таблицы, приход воздушных масс, загрязненных аварийным выбросом ЧАЭС, в район Череповца наблюдался в период с 28 апреля по 2 мая. Полученные значения отношений активностей ^{133}Xe и ^{133m}Xe достаточно однородны, что, по-видимому, обусловлено особенностями переноса их из района аварии в район Череповца, обеспечившими поступление лишь «свежих» продуктов и не допустивших прихода сюда продуктов более позднего выброса. На рис. 2 показаны приведенные на дату аварии значения отношения активностей $^{133}\text{Xe}/^{133m}\text{Xe}$, оцененное среднее, а также, «реакторные» и «взрывные» значения этого отношения.

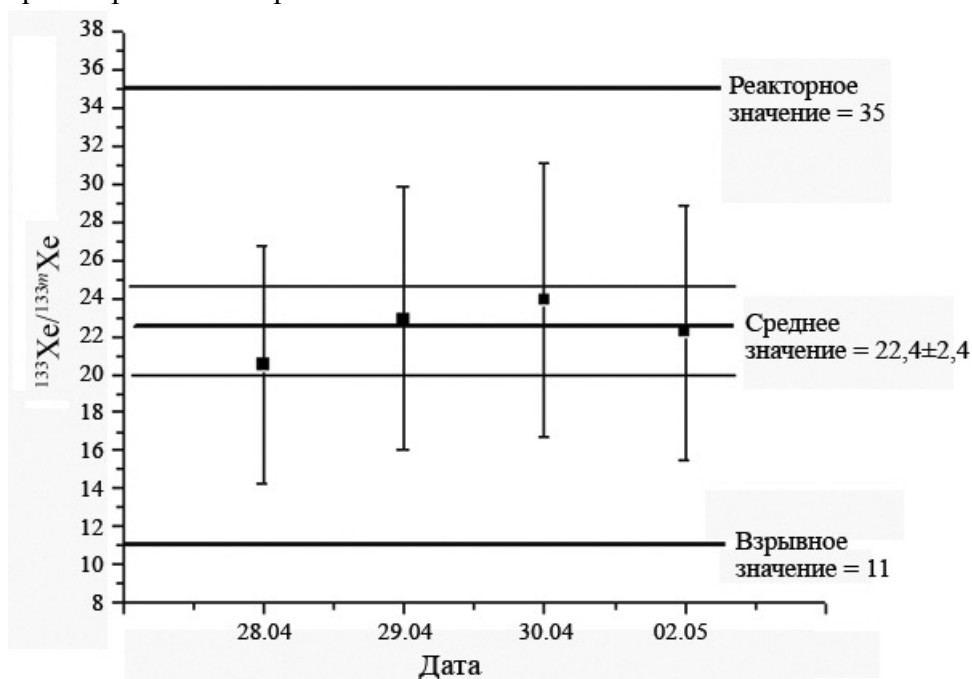


Рис. 2. Значения отношений активностей $^{133}\text{Xe}/^{133m}\text{Xe}$, приведенные на дату аварии, и оценка их среднего значения.

Как видно из рис. 2, полученные значения отношений активностей $^{133}\text{Xe}/^{133m}\text{Xe}$ и их среднее ($22,4 \pm 3,4$) существенно (в полтора раза) отличаются от «реакторного» значения (35), что позволяет признать справедливость гипотезы ядерного механизма большого мгновенного энерговыделения при аварии на ЧАЭС.

Для количественной оценки удельного (нормированного на мощность реактора до аварии) мгновенного энерговыделения была составлена специальная компьютерная программа, моделирующая отношение $^{133}\text{Xe}/^{133m}\text{Xe}$ как суперпозицию «реакторного» и «взрывного» значений с учетом различных вкладов мгновенного энерговыделения и с учетом изменений мощности реактора перед аварией.

Для проведения модельных расчетов величины отношения $^{133}\text{Xe}/^{133m}\text{Xe}$ необходимы:

- 1) схема радиоактивных превращений радионуклидов в цепочке изобаров с массой 133 и значения периодов полураспада;
- 2) значения выходов радионуклидов при делении;
- 3) данные о составе топлива;
- 4) оценки величины возможного фракционирования ^{133}Xe и ^{133m}Xe и их предшественников;
- 5) график изменения мощности реактора перед аварией.

На рис. 3 показана схема радиоактивных превращений в цепочке изобаров с массой 133, заимствованная из отчета [2]. В табл. 2 приведено содержание делящихся компонентов в топливе реактора 4-го энергоблока на момент аварии, сечения деления тепловыми нейтронами и вклад в полное энерговыделение ([1], с. 312; [3]). В табл. 3 приведены периоды полураспада и независимые выходы радионуклидов в цепочке изобаров с массой 133 при делении тепловыми нейтронами ^{235}U , ^{239}Pu , ^{241}Pu и их композиций [4].

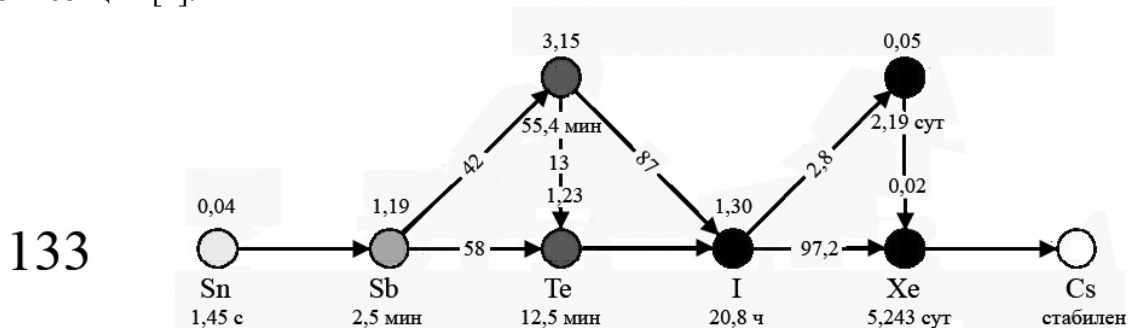


Рис. 3. Схема радиоактивных превращений в цепочке изобаров с массой 133.

Таблица 2

Содержание делящихся компонентов в топливе реактора на момент аварии, сечения деления тепловыми нейтронами и вклад в полное энерговыделение

Делящийся компонент	Содержание, кг/т ([1], с. 312)	Сечение деления тепловыми нейтронами, барн [3]	Вклад в энерговыделение, %
^{235}U	4,5	584	51,7
^{236}U	2,4	0,06	–
^{239}Pu	2,6	748	38,3
^{240}Pu	1,8	0,06	–
^{241}Pu	0,5	1012	10,0

Таблица 3

Периоды полураспада и независимые выходы радионуклидов
в цепочке изобаров с массой 133 при делении тепловыми нейтронами
 ^{235}U , ^{239}Pu , ^{241}Pu и их композиции

Нуклид	Период полураспада	^{235}U	^{239}Pu	^{241}Pu	Топливо
^{133}In	0,18 с	0,000171	$3,81 \cdot 10^{-5}$	0,000335	0,000123
^{133}Sn	1,44 с	0,137730	0,034296	0,159381	0,10028
^{133}Sb	2,5 мин	2,256714	1,173643	2,506718	1,866898
^{133m}Te	55,4 мин	2,986257	2,891422	2,859248	2,937234
^{133}Te	12,4 мин	1,148216	1,765602	1,167859	1,386639
^{133}I	20,8 ч	0,165036	1,107495	0,031506	0,512645
^{133m}Xe	2,19 сут	0,001886	0,033799	0,000614	0,013981
^{133}Xe	5,243 сут	0,000666	0,009448	0,000251	0,003988

Для того чтобы оценить величину возможного фракционирования ^{133}Xe и ^{133m}Xe от их непосредственного предшественника в цепочке превращений ^{133}I , можно воспользоваться данными работы [5], в которой авторы исследовали химические формы нахождения ^{131}I в продуктах аварийного выброса ЧАЭС, отобранных на территории Германии. Как было установлено, выход ^{131}I в атмосферу составил 20 %. В аэрозольной форме находилось 40 % иода, в элементарной газообразной – 35 % и в органически связанной форме – 25 %. Аэрозольная форма иода подвержена гравитационному осаждению и вымыванию осадками. Газообразная форма иода также подвержена вымыванию. И только органически связанная форма иода сравнительно устойчива и способна сопровождать радиоизотопы ксенона при переносе на дальние расстояния без заметного фракционирования. Таким образом, полагая идентичность форм нахождения ^{131}I и ^{133}I в продуктах аварийного выброса, долю ^{133}I , сохранившего генетическую связь с дочерними ^{133}Xe и ^{133m}Xe , можно оценить величиной, находящейся в диапазоне от 5 (дальний перенос, вымывание) до 20 % (ближний перенос без осадков).

График изменения тепловой мощности реактора 4-го энергоблока в предаварийный период, по данным доклада [6], изображен на рис. 4.

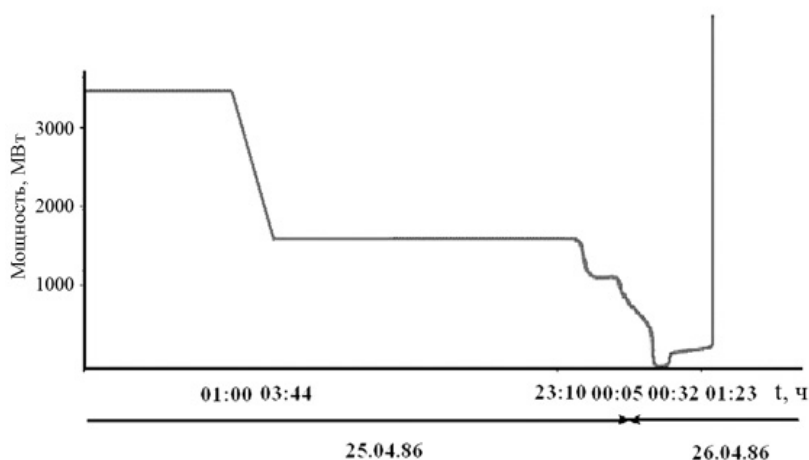


Рис. 4. График изменения тепловой мощности реактора 4-го энергоблока в предаварийный период.

Чтобы рассчитать значения активностей радионуклидов в изолированной изобарной цепочке, необходимо решить систему линейных дифференциальных уравнений (1а) с начальными условиями (1б):

$$\begin{cases} \frac{\partial N_j}{\partial t} = -\lambda_j N_j + \sum_{k=1}^{j-1} \lambda_k N_k B_{kj} \\ N_j(0) = Y_j \end{cases} \quad (1а)$$

$$\begin{cases} N_j(0) = Y_j \end{cases} \quad (1б)$$

Решение системы (1) можно представить в виде ряда (2).

$$N_j(t) = \sum_{k=1}^j C_{kj} e^{-\lambda_j t} \quad (2)$$

Коэффициенты разложения (2) могут быть определены с использованием рекуррентных соотношений (3а, 3б, 3в).

$$\begin{cases} C_{11} = Y_1 \end{cases} \quad (3а)$$

$$\begin{cases} C_{jk} = \sum_{i=j}^{k-1} \frac{C_{ji} \lambda_i B_{jk}}{\lambda_k - \lambda_j} \end{cases} \quad (3б)$$

$$\begin{cases} C_{jj} = Y_j - \sum_{k=1}^{j-1} C_{kj} \end{cases} \quad (3в),$$

где N_j – число ядер j -го радионуклида,

λ_j – постоянная распада j -го радионуклида,

C_{kj} – коэффициенты разложения,

Y_j – независимый выход ядер j -го радионуклида при делении,

B_{jk} – коэффициент ветвления.

Расчет накопления продуктов деления в реакторе также можно проводить с использованием соотношений (3). Для этого в изобарную цепочку достаточно ввести добавочный «виртуальный» радионуклид, моделирующий непрерывную подпитку изобарной цепочки продуктами, образующимися при работе реактора.

Результаты расчетов приведены на рис. 5 в виде семейства кривых, отражающих зависимость отношения $^{133}\text{Xe}/^{133m}\text{Xe}$ от величины удельного (нормированного на значение мощности реактора до аварии) мгновенного энерговыделения. Каждая из кривых этого семейства соответствует определенному значению доли ^{133}I , сохранившего связь с дочерними радионуклидами ^{133}Xe и ^{133m}Xe (этот параметр учитывает эффекты фракционирования при дальнем атмосферном переносе). Сравнение этих кривых со средним значением экспериментально определенного отношения $^{133}\text{Xe}/^{133m}\text{Xe}$ также показано на этом рисунке.

Сравнение расчетных кривых с экспериментально найденным значением отношения $^{133}\text{Xe}/^{133m}\text{Xe}$ приводит к оценке величины мгновенного удельного энерговыделения при аварии на ЧАЭС $2 \cdot 10^5 - 2 \cdot 10^6$ Дж/Вт. Если формально отнести этот результат к номинальной тепловой мощности реактора 3200 МВт, это приведет к оценке абсолютного значения выделившейся при взрыве энергии величиной порядка $6 \cdot 10^{14} - 6 \cdot 10^{15}$ Дж (100–1000 кт). Такая оценка несоизмерима с истинным масштабом разрушения реактора и сейсмическими оценками [7], дающими значение энергии взрыва около 10 т ТНТ. Все вместе это указывает на локальный характер мгновенного ядерного энерговыделения, обусловленный крайне неоднородным распределением нейтронного потока в активной зоне реактора в момент аварии. Массу топлива,

вовлеченного в этот взрывной процесс, можно оценить величиной от 0,01 до 0,1 % от общего количества.

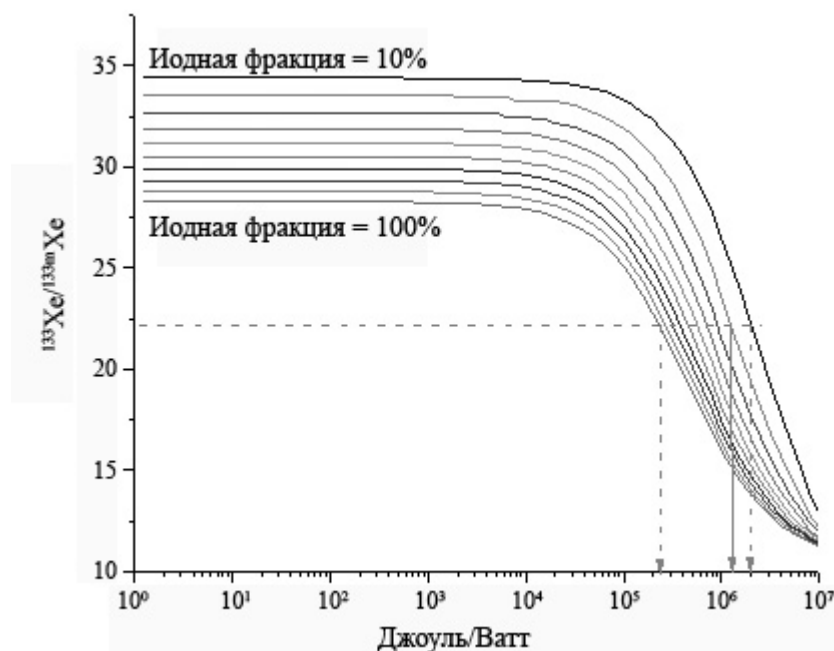


Рис. 5. Расчетные значения отношения $^{133}\text{Xe}/^{133\text{m}}\text{Xe}$, приведенные на момент аварии в зависимости от удельной величины мгновенного энерговыделения для разных условий фракционирования.

Подводя итог приведенным оценкам, следует признать, что гипотеза ядерного механизма большого мгновенного энерговыделения при чернобыльской аварии выглядит весьма убедительно, так как она подкреплена экспериментальными данными, которые находятся в хорошем согласии с результатами расчетов.

Список литературы

1. UNSCEAR. 1988. Annex D: Exposures from the Chernobyl Accident.
2. De Geer L. E. The Xenon NCC Method. FOI-R-2350-SE. October 2007.
3. JEF 3.1. Библиотека ядерных данных.
4. England T. R., Rider B. F. LA-UR-94-3106 (ENDF-349). October 1994.
5. Winkelmann I. et al. Radioactivity Measurements in the Federal Republic of Germany after the Chernobyl Accident: ISH-116. 1987.
6. Abagyan A. A., Adamov E. O., Burlakov E. V. et. al. // IAEA-J4-TC972. Vienna, April 1–3, 1996. P. 46–65.
7. Страхов В. И., Старостенко В. И., Харитонов О. М. и др. Сейсмические явления в районе Чернобыльской АЭС // Геофиз. журн. 1997. Т. 19, № 3.

Estimation of Explosion Energy Yield at Chernobyl NPP Accident

S. A. Pakhomov, Y. V. Dubasov

In steady-state reactor operation, the activity ratio of ^{133}Xe and $^{133\text{m}}\text{Xe}$ isomers is close to 35, and at instant (explosive) fission, this ratio decreases to 11. This fact allowed estimation of the explosive energy yield at Chernobyl NPP accident. For this purpose, atmospheric xenon samples were taken near the trajectory of transport of

the released products (at Cherepovets), which were measured with a γ -ray spectrometer, and the $^{133}\text{Xe}/^{133m}\text{Xe}$ ratios were determined. Their average value was 22.4. For numerical estimations, the mathematical model considering the explosive energy yield, the reactor dynamics before the accident, and various separation conditions in the 133 mass chain has been developed. Estimation of the explosive energy yield gives the value of about 10^5 – 10^6 J/Wt. Multiplication of this result by the nominal power of the reactor (before its reductions) leads to the value of the absolute explosive energy yield of about $3 \cdot 10^{14}$ – $3 \cdot 10^{15}$ J (70–700 kt), which is incommensurable with the actual scale of NPP destruction. This result suggests extremely inhomogeneous distribution of the neutron flux in the active core at the moment of the explosion and allows the fraction of fuel involved in the explosive process to be estimated at 0.01–0.1 % of the total fuel.

II. Этап систематических научно-исследовательских работ (1987–1992 гг.)

II.1. Радиогеохимическое исследование топливосодержащих новообразований, возникших в результате аварии на Чернобыльской АЭС

В. Г. Савоненков, Е. Б. Андерсон, Е. А. Смирнова, С. И. Шабалев

Представлены результаты радиохимического исследования топливосодержащих частиц выпадений и стекломасс, образовавшихся в результате аварии на 4-м блоке ЧАЭС. Пробы отбирали с территории специально выделенных в 30-километровой зоне ландшафтно-геохимических полигонов и одновременно проводили шлиховое опробование. Установлены генетические разновидности топливосодержащих новообразований, даны их минералого-петрографические характеристики, химический и радиохимический составы, особенности условий образования. Рассмотрены происходившие в результате техногенного метаморфизма изменения облученного топлива – от взрывного диспергирования до полной ассимиляции в силикатных расплавах.

Введение

Радиогеохимическое направление научно-исследовательских работ Радиевого института на ЧАЭС было ориентировано на изучение топливосодержащих твердых продуктов, образовавшихся на различных стадиях развития аварийного процесса. При взрыве реактора возник неконтролируемый высокотемпературный источник поступлений во внешнюю среду значительных количеств радионуклидов – около 10^{19} Бк (~ 270 МКи), представленных преимущественно радиоизотопами ^{131}I и $^{134,137}\text{Cs}$. Воздушные потоки вынесли за пределы аварийного энергоблока топливосодержащие частицы, наиболее крупные из которых образовали ближний след выпадений, а субмикронные аэрозоли распространились на расстояние нескольких тысяч километров. В биосферу вместе с продуктами деления были инъецированы долгоживущие актиноидные элементы.

Активную фазу аварии завершило образование в нижней части разрушенного энергоблока топливосодержащего силикатного расплава, который распространился в подреакторных помещениях и консолидировался в форме лавообразных стекломасс. На момент аварии в реакторе находилось 192 т диоксида урана, обогащенного до 2,5 % по ^{235}U . Преобладающая часть компонентов облученного топлива в настоящее время локализована в новообразованных техногенных стекломассах.

Облученное топливо в результате аварии прошло несколько этапов прогрессивного и регрессивного термохимического метаморфизма: испарения, плавления (полного или частичного), диспергирования, смешивания и ассимиляции. Кроме того, топливосодержащие новообразования подверглись вторичным изменениям под влиянием различных факторов выветривания.

Радиогеохимические методы исследований позволили по конечным продуктам сложных многоэтапных процессов разработать генетическую систематизацию техногенных новообразований, условия их происхождения и тенденции изменений в будущем.

В Радиевом институте им. В. Г. Хлопина радиогеохимическое направление – это многолетний опыт изучения природных радиоактивных элементов, изотопной геохронологии и металлогении урана. В 60-х годах был создан новый раздел направления – геохимия подземных ядерных взрывов. К середине 80-х годов расширились

комплексные исследования, связанные с проблемой изоляции радиоактивных отходов в геологические формации [1–3].

Для проведения работ в 30-километровой зоне ЧАЭС в институте была организована полевая комплексная научно-техническая бригада (ПКНТБ), выехавшая в Чернобыль в начале мая 1986 г. В ее состав была включена большая группа сотрудников 30-го отдела, ранее участвовавших в проведении подземных ядерных взрывов. Научным руководителем ПКНТБ был назначен начальник 30-го отдела А. С. Кривохатский. Экспедиционные группы Радиевого института работали в 30-километровой зоне и на 4-м блоке ЧАЭС в течение шести лет. В Чернобыле были обустроены лабораторные помещения для первичной обработки проб и проведения предварительных минералогических и радиометрических исследований.

Работы радиогеохимического направления были сосредоточены в двух геохимических лабораториях института – в лаборатории В. Г. Савоненкова, ранее проводившей исследования продуктов ядерных взрывов и процессов миграции техногенных радионуклидов, и в лаборатории Е. Б. Андерсона, в которой прогрессивные методы анализа позволяли успешно развивать фундаментальные исследования в области изотопной геохронологии, геохимии и минералогии радиоактивных элементов.

Фактически в полевых и лабораторных исследованиях, связанных с ликвидацией аварии, приняло участие абсолютное большинство лабораторий и подразделений института. Специфика исследуемого объекта потребовала использования всего имеющегося научно-практического опыта и приспособления известных методов полевых работ к условиям 30-километровой зоны и 4-го блока ЧАЭС.

Топливосодержащие новообразования, возникшие в результате взрыва реактора на 4-м блоке ЧАЭС, разделяются на два основных вида, отличающиеся происхождением, характером распространения, структурно-морфологическими особенностями, а также статусом объекта, определяющего специфику радиоактивного загрязнения внешней среды:

- топливосодержащие частицы выпадений в пределах 30-километровой зоны;
- топливосодержащие стекломассы подреакторных помещений.

Имеющиеся различия определили специфические методы опробования и дальнейшее проведение аналитических операций для каждого из этих двух типов новообразований. Несмотря на то, что после аварии на ЧАЭС прошло более 20 лет, топливосодержащие материалы остаются до настоящего времени объектами детальных исследований [4, 5].

1. Топливосодержащие частицы выпадений

Этот вид радиоактивных новообразований распространился далеко за пределы аварийного блока. Выброшенное из реактора диспергированное топливо в форме микрочастиц и аэрозолей привело к образованию пятен радиоактивного загрязнения на значительных территориях и вызвало многочисленные проблемы при ликвидации последствий аварии. «Горячие» частицы были обнаружены в Финляндии, Польше, Болгарии, Германии, Австрии, Греции и других странах, а их исследованиям посвящены многочисленные отечественные и зарубежные публикации [4, 5].

Разносторонние данные, характеризующие частицы выпадений, были необходимы для принятия решений по реабилитации территорий, составления прогнозов миграции радионуклидов и оценки вероятности их попадания в биологические циклы. Эти же данные дают возможность вскрыть последовательность процессов, происшедших при взрыве реактора, и могут быть использованы для моделирования аварии на 4-м блоке ЧАЭС.

Первые пробы для изучения частиц выпадений были взяты участниками ПКНТБ в начале мая 1986 г. Грунт отбирали на участке начала западного следа выпадений в 1,5–1,7 км от 4-го блока. Для выделения частиц выпадений использовали общеизвестные методы фракционно-минералогического анализа с разделением первичного материала пробы на классы по размерам и на фракции по плотности минералов. В пробах были обнаружены тяжелые ($D > 3,3 \text{ г/см}^3$) высокоактивные частицы облученного топлива размером до 0,75 мм и легкие частицы загрязненного радионуклидами графита, агрегаты битума и мелкодисперсного топлива. Результаты исследований были переданы для подготавливаемого советскими специалистами доклада на совещании экспертов МАГАТЭ в августе 1986 г.

Полученные данные о составе радиоактивных частиц помогли разрешить серьезную проблему, связанную с дезактивацией загрязнения на ЧАЭС. С первых дней после аварии, используя стандартные операции и реактивы, не удавалось дезактивировать технику и спецодежду. После информации, полученной из отчетов Радиового института, выяснилось, что причиной «несмываемого» загрязнения являются радиоактивные битумные частицы, буквально приклеивающиеся в жаркие летние дни к любой разогретой поверхности. Проблема решалась изменением условий дезактивации – подогревом дезактивирующих растворов.

В июле–августе 1986 г. по результатам информации, полученной ПКНТБ, и экспериментального изучения проб грунта в ближней зоне выпадений были разработаны программы и методы дальнейших полевых и лабораторных исследований. Район предстоящих работ охватывал 30-километровую зону отселения (2800 км²). На всей территории имеется хорошо развитая дорожная сеть и большое количество населенных пунктов: города Чернобыль и Припять, поселки, садоводства и пр. Район равнинный с отдельными возвышенностями и широкими речными долинами. Максимальные абсолютные отметки надпойменных террас +114–115 м, перепад высот 11–12 м. Пойма р. Припять периодически затопляется паводковыми водами. Широко развиты песчаные, хорошо фильтрующие грунты. В понижениях и поймах рек дерново-подзолистые и торфяно-болотистые почвы. Годовая сумма атмосферных осадков около 600 мм, значительная часть которых (120 мм) выпадает в декабре–феврале. Зимой часто наблюдаются оттепели, вплоть до полного исчезновения снега.

Верхняя часть геологического разреза, на которую выпали радиоактивные частицы, представлена в основном песками с линзами супесей, суглинков, а местами торфяно-песчано-глинистыми породами. В составе песков преобладают зерна кварца (до 99 %) с примесями полевых шпатов и слюд. Средний коэффициент фильтрации кварцевых песков 0,4–1,6 м/сут. Уровень грунтовых вод зависит от присутствия и расположения прослоев и линз глинистых пород. В начале западного следа выпадений – в «рыжем» лесу – он меняется от 0,5 до 2,8 м (наблюдения 1991 г.).

Четвертичные отложения залегают на мергелях киевского яруса эоцена. Благодаря своей малой водопроницаемости (0,03–0,06 м/сут) мергели являются стратиграфическим водупором района.

Проведенные непосредственно после аварии измерения показали, что плотность радиоактивных выпадений в 30-километровой зоне крайне неравномерная, «пятнистая». Наиболее контрастно выражен западный след, образовавшийся, по видимому, в начальные моменты аварии. Радиоактивное загрязнение поверхности было разнообразным по типам выпадений и их радионуклидному составу («рутениевые» и «цезиевые» аномалии).

Полученная начальная информация определила основные методы проведения полевых экспедиционных работ осенью 1986 г.:

- выделение и обустройство контролируемых полигонов;
- применение промывки песчаных проб грунта для выделения тяжелых топливных частиц (шлиховое опробование).

1.1. Методы изучения топливосодержащих частиц выпадений на ландшафтно-геохимических полигонах

1.1.1. Выбор полигонов и отбор проб

Для проведения полевых геоморфологических, биогеохимических, геоботанических и других исследований обширных территорий практикуется выделение локальных исследовательских площадок – полигонов. Аналогичные контролируемые участки предлагалось выделить в 30-километровой зоне. Систематические комплексные исследования на обустроенных площадках могли в какой-то степени компенсировать макро- и микронеоднородность чернобыльских выпадений и обеспечить отбор представительных проб.

Ландшафтно-геохимические полигоны (ЛГП) Радиевый институт создавал для изучения взаимодействия радиоактивных выпадений с природной средой, прогнозирования результатов этого взаимодействия и возможности регулирования происходящих процессов. Участок, выбираемый для полигона, должен быть характерным для зоны или ее крупной территориальной части, иметь топографическую привязку на местности, постоянную сеть для представительного опробования, сравнительно легкую транспортную (автомобильную) доступность. Специфика аварийной обстановки требовала размещения полигонов на различных расстояниях и по различным направлениям от аварийного блока с отличающимися значениями экспозиционных радиационных доз гамма-излучения. Кроме того, учитывая, что радиоактивное загрязнение обусловлено выпадениями частиц, на полигонах должны присутствовать открытые, не защищенные растительностью участки почвы или грунта.

В октябре 1986 г. ПКНТБ Радиевского института выбрала и обустроила пять полигонов. Шестой полигон в пойме р. Припять был выбран в 1990 г. В случае близости населенного пункта ЛГП получал кроме номера дополнительное название (табл. 1).

Фракционно-минералогический анализ характерных для 30-километровой зоны песчаных грунтов показал, что в них присутствует устойчивая ассоциация тяжелых акцессорных минералов ($D \geq 3,3 \text{ г/см}^3$) – ильменит, лейкоксен, алюможелезистый гранат альмандин, рутил, сфен, циркон, апатит, монацит. Наряду с постоянством состава наблюдается и постоянство их содержания в пределах 0,13–0,29 мас%. Песчаные грунты с аналогичной по количествам и составу ассоциацией акцессорных минералов присутствуют на всех полигонах, что позволило сравнивать условия нахождения, перемещения и изменения топливосодержащих частиц в преобладающих по распространению песчаных четвертичных отложениях всего региона.

В процессе исследований на ЛГП выделялись отдельные ландшафтные зоны. Вертикальная: приповерхностные горные породы–зона выветривания (грунты)–почвы–растительность. Горизонтальная: возвышения–склоны–равнинные участки–впадины (болота, русла рек, сухие котловины и пр.). Перемещение рыхлых грунтов по неровностям рельефа могло быть приостановлено растительностью.

Таблица 1

Основные характеристики ландшафтно-геохимических полигонов
Радиевого института

Характеристики	Номера и названия полигонов					
	ЛГП-I Корогод	ЛГП-II Белая Сорока	ЛГП-III Зимови- ще	ЛГП-IV Буряков- ка	ЛГП-V Садоводст- во	ЛГП-VI Пойма
Площадь, км ²	0,88	0,45	0,50	0,30	0,38	0,35
Расстояние от 4-го блока, км	15,0	17,5	5,3	13,5	5,0	3,0
Азимут от 4-го блока	ЮЗ 194	СЗ 304	СВ 40	ЮЗ 259	ЮЗ 248	СВ 25
Средняя мощность экспозиционной дозы на октябрь 1986 г., мР/ч	1–2	5–7	30	70	100	Выбран в 1990 г.
Площадь открытого пространства (без ле- са, кустарников), %	99	50	85	65	70	100
Содержание фракции D ≥ 3,3 г/см ³ в песча- ном грунте, %	0,29–0,31	0,12–0,26	0,16–0,35	0,15–0,30	0,21–0,22	0,18–0,28

Взаимодействие компонентов ландшафта и миграционные процессы происходят в основном в водной среде. Пленочные, капиллярные, свободные (гравитационные) воды соединяют вертикальные и горизонтальные зоны, образуя единую связующую среду. Вся совокупность составных частей ландшафта (твердых, жидких, газообразных, минеральных, органических) создает определенную геохимическую обстановку, параметры которой определяют характер большинства происходящих процессов: выветривание коренных пород, почвообразование, минералообразование, миграцию и накопление элементов, развитие растительности и пр. Определяющую роль здесь имеют климатические факторы.

Климатические, гидрохимические и геохимические условия конкретного полигона будут определять миграцию или фиксацию радионуклидов, перенос их водными системами или задержку на различных барьерах, заглубление в почву и грунт, переход в растительность.

Проведение систематического пробоотбора на ЛГП и анализ проб позволили выявить основные виды частиц, их накопление в благоприятных формах рельефа.

Радиоактивное загрязнение грунта и почвы обусловлено присутствием нескольких видов выпадений:

- частиц облученного топлива (диоксида урана);
- новообразованных частиц смешанного уран-циркониевого состава;
- бесструктурных «горячих» микрочастиц, которые участвуют в ветровом переносе или могут быть включены в минеральную или органическую матрицу;
- конденсационных микрочастиц с фракционированным составом радионуклидов.

Многообразие форм радиоактивных выпадений и их неоднородное распределение по поверхности потребовали соблюдения известных правил отбора представительных проб [6, 7].

Для проводимых минералого-радиогеохимических исследований были установлены следующие правила пробоотбора:

- средняя масса проб грунта (пески, супеси) должен составлять не менее 1 кг;
- отбираются однотипные грунты и почвы с минимальным количеством растительного слоя и поверхностного хвойно-листового опада;
- на площадках пробоотбора должна быть учтена возможность искажения количества выпадений растительностью (кусты, деревья);
- все операции пробоотбора должны сопровождаться радиометрическими измерениями, позволяющими оценивать однородность площадок, степень заглубления радиоактивных частиц в рыхлом грунте, ориентироваться относительно осевой части следа и пр.;
- в информационном ряду исходный грунт (почва)–проба–расходуемая на анализ масса пробы–метод анализа–результат анализа должны сохраняться требования представительности (исключение резко выпадающих проб, обоснование количества индивидуальных зерен для проведения анализа и пр.).

В ближней зоне выпадений (0,5–2,0 км от 4-го блока) характер радиоактивного загрязнения песчаных грунтов оказался крайне неравномерным. В небольших по массе пробах (8–10 г) около 60 % радионуклидов могли быть связаны с присутствием 2–3 топливосодержащих частиц размером 0,20–0,25 мм.

Присутствие в облученном топливе радиоактивных изотопов таких различных по физико-химическим свойствам элементов, как церий, рутений, цезий, плутоний, позволяет по их соотношениям устанавливать особенности образования отдельных частиц. Для возможности сравнения и единообразия радионуклидных характеристик использовали коэффициент фракционирования i -го радионуклида по отношению к тугоплавкому (нелетучему) ^{144}Ce . Термины и определения коэффициента были предложены в 1964 г. для изучения частиц выпадений ядерных взрывов [8]. Применительно к радиоактивным выпадениям, вызванным аварией на ЧАЭС, использовали экспериментальные и расчетные отношения активностей радионуклидов на 26.04.1986 г. [9]. На момент аварии средняя удельная активность ^{144}Ce в диоксиде урана составляла $2,2 \cdot 10^{10}$ Бк/г, отношения активностей к этому изотопу тугоплавкого элемента составляли: для ^{106}Ru – 0,30; для ^{137}Cs – 0,073; для $^{239,240}\text{Pu}$ – $6,4 \cdot 10^{-4}$. Отношение активностей $^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$ принималось равным 0,5.

Наряду с полигонами исследования выпадений проводили по хорошо выраженному западному следу выпадений от базы «Гидроэлектромонтаж» (500 м от 4-го блока) до села и станции Толстый Лес (20 км от 4-го блока). По этому направлению расположены два полигона: ЛПП-V Садоводство и ЛПП-IV Буряковка. След хорошо прослеживается радиометрическими измерениями по резкому возрастанию радиационных уровней и фиксируется визуально по бурой окраске облученных сосен («рыжий» лес). Это участок украинского Полесья с большими площадками открытых, сравнительно однородных песчаных грунтов. По западному следу тяжелые топливные частицы являются основным источником радиоактивного загрязнения поверхности, о чем свидетельствует близость значений коэффициентов фракционирования (табл. 2).

По мере удаления от 4-го блока размеры частиц уменьшаются от 1 мм до 10–20 мкм. Функция распределения размерного максимума приближается к логарифмической.

Отбор проб по западному следу, как и на полигонах, продолжался в течение пяти лет. В течение этого же времени отбирали отдельные пробы по северному

следу выпадений, вблизи отдельных населенных пунктов и в городах Припять и Чернобыль.

Таблица 2
Коэффициенты фракционирования ^{106}Ru и ^{137}Cs относительно ^{144}Ce ($f_{106/144}$, $f_{137/144}$ соответственно) из частиц в пробах грунта и почв по оси западного следа выпадений

№№ проб	Расстояние от 4-го блока, км	Характер пробы	$f_{106/144}$	$f_{137/144}$
1010/86	1,0	Почва	1,0	0,82
		Частицы	1,0	0,87
854/86	2,0	Почва	0,92	1,1
		Частицы	1,1	0,84
5/87	2,0	Почва	0,93	0,96
		Частицы	1,1	0,75
12/88	5,5	Грунт	0,93	0,96
		Частицы	1,0	0,82
20/87	9,0	Грунт	0,93	0,96
		Частицы	1,0	0,66
19/87	13,5	Грунт	0,80	0,96
		Частицы	0,97	0,60

1.1.2. Выделение тяжелых топливосодержащих частиц шлиховым методом

Отмывка шлихов, в которых концентрируются тяжелые устойчивые в поверхностных условиях минералы, широко применялась в Радиовом институте как полевой метод обнаружения и выделения радиоактивных минералов для геохронологических исследований [10]. Чувствительность метода, определяемая коэффициентом извлечения, крайне высока. При средней массе зерна тяжелого минерала (частицы) 0,1 мг для начальной пробы массой 10 кг эта величина составляет $1 \cdot 10^{-6} \%$ [11]. При крайне неравномерном распределении сравнительно крупных частиц выпадений на поверхности грунтов и почвы шлиховой метод являлся наиболее представительным для изучения диспергированного топлива, поскольку исходная масса материала для промывки составляла 10–25 кг, и он мог быть собран с большой площади.

Кроме стандартного сбора поверхностной части грунта отбирали пробы, предварительно обогащенные тяжелыми минералами в естественных условиях (естественные шлихи): смывы с крыш, зоны накопления тяжелых минералов в руслах водных потоков и пр.

Шлиховой пробоотбор охватывал часть территории 30-километровой зоны с площадью около 400 км². Ежегодно в течение пяти лет отбирали пробы для отмывки шлихов на контрольных участках полигонов. Отдельные пробы были отобраны по северному берегу пруда-охладителя, в городах Припять (ул. Ленина, 4) и Чернобыль (ул. Кирова и ул. Речников).

Наиболее детально проведены исследования по западному следу выпадений – от территории базы Гидроэлектромонтаж и до села и станции Толстый Лес (табл. 3).

Изучали и анализировали все образующиеся при отмывке шлихов классы (по размерам) и фракции (по плотности):

- исходная проба,
- класс $\leq 0,1$ мм, выделяемый при отмывании исходной пробы,
- основная по массе часть пробы класса $\geq 0,1$ мм (кварц-полевошпатового состава),

- фракция тяжелых минералов (шлих), выделенная промывкой из класса $\geq 0,1$ мм.

Таблица 3

Места отбора проб по западному следу выпадений для выделения тяжелых топливных частиц шлиховым методом

№№ проб	Год отбора	Расстояние от блока, км	Характеристика участка пробоотбора, пробы
42	1987	0,5	Площадка базы Гидроэлектромонтаж, русло дождевых потоков между металлическими конструкциями
9	1988	0,5	Там же, после рекультивации участка
10	1988	0,5	Пленки засохшего масла на горизонтальных площадках мотовоза
1010	1986	1,0	Начало «рыжего» леса за границей базы
1020	1986	1,2	«Рыжий» лес в 150 м на ЮВ от автобазы
855	1986	1,2	В 200 м на ЮВ от пробы 1020
33	1986	1,7	Поворот шоссе Чернобыль–Припять, западнее стелы
854	1986	2,0	«Рыжий» лес по оси следа – ЮЗ 250° от 4-го блока
5	1987	2,0	Там же, в 50 м западнее пробы 854
12	1987	2,3	Садовый участок, осадок из металлической емкости
1	1990	2,7	«Рыжий» лес вблизи траншей захоронения РАО
12	1990	2,7	В 100 м севернее пробы 1/90
12	1991	2,7	Там же
63	1991	2,7	Там же, контрольная проба
13	1987	2,9	«Рыжий» лес по оси западного следа
14	1988	2,9	Там же, где отбирали пробу 13/87
6	1989	2,9	Вблизи места отбора проб 13/87 и 14/88
13	1990	2,9	Вблизи места отбора пробы 12/90
14	1987	4,0	«Рыжий» лес по оси западного следа
8	1990	4,0	Вблизи места отбора пробы 14/87
39	1991	4,0	Там же
36	1987	5,0	Окончание западного участка «рыжего» леса по оси следа
37	1987	5,0	В 400 м южнее места отбора пробы 36/87
9	1987	7,0	Вблизи с. Чистоголовка
20	1987	9,0	Автобусная остановка «Лесничество» на дороге Припять–Буряковка, на оси следа
7	1989	9,0	Вблизи места отбора пробы 20/87
8	1989	12,0	У дороги Припять–Буряковка по оси западного следа
61	1991	12,0	Там же
18	1987	13,5	Село Буряковка
19	1987	13,5	Там же
4	1988	20,0	Село Толстый Лес
68	1991	20,0	Там же

В лабораторных условиях все шлихи «чистили» в тяжелых жидкостях ($d = 2,89$ или $2,96$ г/см³), проводили дополнительную магнитную сепарацию. В отдельных пробах из класса $\leq 0,1$ мм дополнительно выделяли тяжелую фракцию.

Эффективность метода для различных участков 30-километровой зоны можно оценить по содержанию ¹⁴⁴Се в исходном материале и выделенном из этого материала шлихе (табл. 4). В семи пробах по размерам преобладают крупные топливные частицы (≥ 50 мкм), которые при отмывке концентрируются в шлихе. На полигонах

Белая Сорока и Зимовище присутствуют в основном мелкие частицы, которые при отмучивании переходят в класс $\leq 0,1$ мм.

Таблица 4

Оценка эффективности шлихового метода

Место отбора проб	Расстояние от 4-го блока, км	Активность ^{144}Ce , Бк/г*		Оценка доли ^{144}Ce в шлихе, %	Коэффициент обогащения по ^{144}Ce
		Исходный грунт	Шлих		
«Рыжий» лес	2,0	$4,6 \cdot 10^5$	$1,8 \cdot 10^8$	80	390
«Рыжий» лес	3,0	$6,1 \cdot 10^5$	$1,4 \cdot 10^8$	50	230
«Рыжий» лес	5,0	$2,2 \cdot 10^5$	$7,6 \cdot 10^8$	80	340
Садоводство	5,5	$2,2 \cdot 10^4$	$7,8 \cdot 10^6$	80	350
Лесничество	9,0	$8,8 \cdot 10^3$	$4,5 \cdot 10^6$	100	510
С. Буряковка	13,5	$5,5 \cdot 10^3$	$2,4 \cdot 10^6$	90	440
С. Толстый Лес	20,0	$5,1 \cdot 10^2$	$2,3 \cdot 10^5$	90	450
С. Белая Сорока	17,5	$9,8 \cdot 10^2$	$3,9 \cdot 10^4$	10	40
С. Зимовище	5,3	$2,5 \cdot 10^3$	$9,5 \cdot 10^4$	10	40

* Здесь и далее значение активности приведено на 26.04.1986 г.

В табл. 5 приведены концентрации ^{144}Ce и коэффициенты фракционирования ^{106}Ru и ^{137}Cs для тяжелых фракций шлихов и в классе $\leq 0,1$ мм в двух сериях проб песчаного грунта, отобранных в 1987 и 1991 гг. на ЛГП по западному и северному следу выпадений. Отбор 1991 г. проводили по возможности на тех же площадках, где были взяты пробы 1987 г.

Таблица 5

Сравнение концентраций ^{144}Ce и коэффициентов фракционирования в тяжелых фракциях шлихов и классе $\leq 0,1$ мм

№№ проб	Тяжелая фракция шлихов			Класс $\leq 0,1$ мм		
	^{144}Ce , Бк/г	$f_{106/144}$	$f_{137/144}$	^{144}Ce , Бк/г	$f_{106/144}$	$f_{137/144}$
5/87	$1,8 \cdot 10^8$	1,1	0,75	$1,9 \cdot 10^6$	1,0	1,0
14/87	$7,6 \cdot 10^7$	1,1	0,63	$2,5 \cdot 10^5$	1,1	1,4
20/87	$4,5 \cdot 10^6$	1,4	0,83	$2,2 \cdot 10^5$	1,1	1,3
18/87	$2,4 \cdot 10^6$	0,97	0,53	$4,1 \cdot 10^4$	1,1	1,3
34/87	$1,4 \cdot 10^6$	0,80	0,59	$3,5 \cdot 10^5$	1,0	0,86
4/87	$9,5 \cdot 10^4$	0,57	0,36	$2,6 \cdot 10^3$	0,93	0,98
30/87	$8,8 \cdot 10^4$	0,63	0,44	$2,9 \cdot 10^3$	1,3	1,1
6/87	$3,9 \cdot 10^4$	1,1	0,87	$9,5 \cdot 10^3$	1,0	1,4
15/87	$3,4 \cdot 10^4$	1,3	0,50	$5,9 \cdot 10^4$	1,4	2,7
12/91	$3,2 \cdot 10^8$	0,83	0,41	$8,2 \cdot 10^5$	1,1	1,3
11/91	$7,6 \cdot 10^7$	1,1	0,48	$2,6 \cdot 10^5$	0,84	1,3
13/91	$2,8 \cdot 10^7$	0,87	0,47	$1,0 \cdot 10^5$	0,93	1,6
68/91	$1,6 \cdot 10^7$	1,0	0,61	$3,7 \cdot 10^5$	0,97	1,0
64/91	$3,4 \cdot 10^6$	1,0	0,50	$8,3 \cdot 10^4$	0,87	1,1
37/91	$2,6 \cdot 10^6$	0,83	0,66	$5,9 \cdot 10^5$	0,80	0,53
62/91	$1,6 \cdot 10^6$	0,83	0,66	$2,3 \cdot 10^5$	0,78	0,54
66/91	$7,5 \cdot 10^5$	1,0	0,47	$1,1 \cdot 10^4$	1,0	1,5
61/91	$6,2 \cdot 10^5$	0,73	0,44	$1,7 \cdot 10^4$	1,0	1,6
36/91	$2,3 \cdot 10^4$	0,77	0,67	$1,7 \cdot 10^4$	1,1	0,88
67/91	$1,9 \cdot 10^4$	0,97	1,0	$2,4 \cdot 10^3$	1,2	2,0

Массовая доля тяжелой фракции составляет в среднем 0,21 %, а класса с размерами частиц 0,1 мм – 5–7 %. Содержания ^{144}Ce в шлихах и классе 0,1 мм различаются на один–два порядка и зависят от размеров частиц выпадений. Коэффициенты фракционирования ^{106}Ru совпадают, а для ^{137}Cs отличаются: в классе $\leq 0,1$ мм постоянно выше, чем в шлихах. Наблюдаемое различие может быть связано с «начальной» потерей летучего цезия облученным топливом в момент аварии с последующим «наложением» на след выпадений топливосодержащих частиц дополнительных количеств микродисперсных частиц преимущественно цезиевого состава. В пользу различного состава выпадений свидетельствуют анализы проб растительности, отобранные в июле 1986 г. на участке «рыжего» леса в 2–3 км западнее 4-го блока. Для подавляющего числа проб хвои, коры, мха коэффициент фракционирования $f_{137/144}$ лежит в интервале 1,2–2,4. Для травяного покрова он составляет 7,8.

Близкие значения коэффициентов фракционирования для одновременно взятых проб (с интервалом в 4 года) свидетельствуют об отсутствии выщелачивания в заметных количествах $^{134,137}\text{Cs}$ из топливосодержащих частиц с последующим захватом радионуклидов глинистыми минералами класса $\leq 0,1$ мм. Условия нахождения частиц выпадений в песчаных грунтах в течение прошедших 4 лет можно оценивать как стабильные.

По результатам наблюдений 1986–1991 гг. для тяжелых фракций шлихов ближней зоны средние значения коэффициентов фракционирования составляют:

- $f_{106/144} = 1,0 \pm 0,14$;
- $f_{137/144} = 0,61 \pm 0,21$.

Средние отношения активностей $^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs} = 0,51 \pm 0,06$.

В ряде проб тяжелых фракций шлихов определены активности альфа-излучающих радионуклидов, что позволило провести сравнение с аналогичными данными, полученными для топливных частиц, отобранных в ближней зоне в 1986 и 1987 гг. [12].

Основной вклад в суммарную альфа-активность на момент аварии вносил ^{242}Cm ($T_{1/2} = 162,9$ сут), активность которого более, чем в 10 раз превышала активность изотопов плутония. Треки альфа-частиц ^{242}Cm хорошо регистрировались в пробах выпадений, отобранных в мае 1986 г. В дальнейшем основная доля альфа-активности облученного топлива будет принадлежать ^{241}Am ($T_{1/2} = 432,2$ года), образующемуся за счет распада ^{241}Pu ($T_{1/2} = 12,9$ года).

В табл. 6 приведены определения активностей альфа-излучающих радионуклидов в тяжелых фракциях шлихов, исходный материал для которых был отобран по западному следу выпадений на расстояниях от 0,5 до 9 км от 4-го блока.

Состав и отношения альфа-излучающих радионуклидов подтверждают «топливный» характер выпадений западного следа.

Таблица 6

Активность альфа-излучающих радионуклидов в тяжелых фракциях шлихов западного следа выпадений (приведено на 26.04.1986 г.)

№№ проб	$^{239,240}\text{Pu}$, Бк/г	$\frac{^{239,240}\text{Pu}}{^{144}\text{Ce}}$	Отношение активностей к $^{239,240}\text{Pu}$			
			^{238}Pu	^{241}Am	^{242}Cm	^{244}Cm
9/88	$3,1 \cdot 10^5$	$7,8 \cdot 10^{-4}$	0,43	0,39	15	0,077
10/88	$9,8 \cdot 10^4$	$9,2 \cdot 10^{-4}$	0,34	0,39	20	0,088
12/87	$7,0 \cdot 10^5$	$8,8 \cdot 10^{-4}$	0,42	0,40	14	0,078
14/87	$3,6 \cdot 10^4$	$7,6 \cdot 10^{-4}$	0,40	0,37	15	0,083
20/87	$4,4 \cdot 10^3$	$9,4 \cdot 10^{-4}$	0,44	0,34	13	0,068

1.2. Разновидности топливосодержащих частиц выпадений

Первые данные о характере радиоактивных выпадений ближней зоны были получены в Радиовом институте в мае–июне 1986 г. [13, 14]. В дальнейшем эти исследования были продолжены и расширены [15–21].

Топливосодержащие («горячие») частицы выпадений являются основным фактором радиоактивного загрязнения обширных территорий, что, безусловно, привлекло к их изучению многих отечественных и зарубежных специалистов. В 90-х годах появляются публикации работ, проведенных в различных научно-исследовательских институтах и специализированных организациях [22–30].

Наши исследования 1986–1987 гг. показали, что на обширной территории ближней зоны выпадений присутствуют сравнительно крупные топливосодержащие частицы, что позволяет визуально их выделять и проводить дальнейший анализ на количественном уровне.

Для надежного измерения удельной активности гамма-излучающих радионуклидов отбирали частицы с размерами не менее 100–150 мкм и массой 10–20 мкг. Более крупные частицы с массами 300–500 мкг проходили последовательную информационно-аналитическую цепочку:

- оптический структурно-морфологический анализ;
- растровую электронную микроскопию;
- микронзондовый элементный анализ;
- гамма-спектрометрический анализ;
- альфа-спектрометрический анализ.

Оптико-микроскопические исследования давали общие минералогические характеристики частиц (форма, окраска, блеск и др.) Определяли их плотность и твердость. Кроме того, определяли одну из важнейших характерных особенностей минеральных объектов – их структуру.

Из тяжелых фракций шлихов отбирали 50–100 частиц характерного вида с общей массой 15–30 мг, которые в дальнейшем использовали для изучения выщелачивания радионуклидов [13, 14].

Для изучения частиц размером менее 10 мкм их (вместе с минералами класса 0,1 мм) вводили в ядерные мелкозернистые эмульсии ПР-2, изготовленные в Радиовом институте [31]. После экспозиции и проявления фотоэмульсии автордиографический препарат изучали под минералогическим микроскопом. Выделяли зерна, имеющие треки альфа-частиц и ореолы бета-активных нуклидов, по длине треков идентифицировали отдельные радионуклиды (длина треков ^{239}Pu 22,1±0,3 мкм), определяли оптические характеристики отдельных радиоактивных частиц. Автордиографическими исследованиями было установлено присутствие плутония и америция на поверхности мелких железистых оолитов, отобранных на болотистых участках ближней зоны западного следа выпадений. Тем самым был зафиксирован геохимический барьер для мигрирующих актинидов.

Для детальных исследований радиоактивных микрочастиц со временем были разработаны различные сочетания трековой радиографии и локального микроанализа [32].

Разогрев и разрушение неоднородной по составу рабочей зоны реактора РБМК-1000, подъем, перемешивание и ассимиляция мелкодисперсных частиц в газозавозо-аэрозольном транспортном канале привели к образованию топливосодержащих агрегатов различной структуры и состава [20]. Эта неоднородность стала основани-

ем для разработки различными авторами классификаций, выделения специфических типов или групп частиц [12, 15–17, 20, 21, 24]. Например, по глубине выгорания выделялись 17 классов частиц [26].

В Радиевом институте было принято деление топливосодержащих частиц выпадения на две основные группы:

- диспергированное облученное топливо, сохранившее свой состав и структуру;
- новообразованные агрегаты облученного топлива и конструкционных материалов, в первую очередь циркониевых оболочек ТВЭЛОВ.

Первоначально в отдельную группу выделяли макрочастицы загрязненного радионуклидами графита [14]. Однако графит оказался «эфмером». В зоне выветривания он легко разрушается, дополнительно измельчается на частицы микронных размеров и переносится поверхностными водами вместе с глинистыми минералами.

При выделении отдельных групп топливосодержащих частиц учитывали:

- состав и структура матрицы;
- удельную активность ^{144}Ce ;
- коэффициенты фракционирования ^{106}Ru и ^{137}Cs по отношению ^{144}Ce ;
- отношение активности изотопов плутония $^{239,240}\text{Pu}$ к ^{144}Ce .

Все количественные значения приводили на 26.04.1986 г.

1.2.1. Диспергированное облученное топливо

По своему составу эта разновидность представлена смесью фаз первоначальной, диоксидной формы урана UO_2 и окисленной $\text{UO}_{2,4}$ [12]. В природном аналоге – минерале уранините – величина кислородного коэффициента варьирует в пределах 2,20–2,91. Ее широко используют в минералогической практике, поскольку отношение кислорода к урану представляет собой функцию времени и определяет степень изменения первичного уранинита.

На поверхности топливных частиц микронным анализом установлены примеси незначительных количеств циркония, алюминия, железа, кремния, меди.

Максимальные размеры частиц (1,0 мм) обнаружены в выпадениях на расстоянии 0,5 км по западному следу. Минимальный (по данным авторадиографий) – 1,5–2,0 мкм. По западному следу на расстояниях от 1 до 13,5 км от 4-го блока средние размеры топливных частиц уменьшаются от 750 до 20 мкм.

Цвет частиц черный, серо-черный. Следует отметить, что цвет диоксида урана при прочих равных условиях зависит от размера частиц и меняется от черного (размер 0,05 мкм) до красно-коричневого (1,0 мкм) [33]. Блеск меняется от сильного, смолистого у массивных частиц до тусклого, матового, характерного для рыхлых разновидностей.

Для определения плотности отбирали топливные частицы размером не меньше 0,4 мм, для которых можно было использовать метод измерения скорости погружения в вязкой среде. Для частиц меньшего размера этот метод неприемлем [34]. Средняя величина плотности составила $8,4 \pm 1,9 \text{ г/см}^3$. Расчетная плотность диоксида урана $10,97 \text{ г/см}^3$, а плотность спеченных таблеток – $10,2\text{--}10,5 \text{ г/см}^3$. В облученном диоксиде урана плотность уменьшается в связи с образованием микропор за счет газовыделения (вспучивания) [35].

Для таких же крупных частиц определяли максимальное сопротивление сжатию (условную твердость). Если нагрузка превышала эту величину, частицы разрушались. Средняя величина составила $400\text{--}480 \text{ кг/см}^2$. При этом отдельные рыхлые

разновидности легко рассыпались на мелкие фрагменты во время отбора. Для необлученного топлива РБМК максимальная нагрузка значительно выше – 1200–1400 кг/см².

По структурным особенностям выделены две разновидности частиц облученного топлива.

- 1) Частицы фрагментов центральных частей твэлов, в которых оксиды урана имеют массивную, а местами микропористую структуру. Диаметр пор от долей микрометра до 5–7 мкм. Поры газовых включений образуются в процессе эксплуатации твэлов. Таковую структуру облученных таблеток называют «столбчатой» [36]. По данным микронзондового анализа, содержание урана в них варьирует от 93,6 до 97,4 %.
- 2) Для периферийных частей твэлов характерна зернистая структура, образованная изометричными зернами оксидов урана с плоскими многоугольными гранями (рис. 1–3). Размеры таких «микроблоков» от 2 до 18 мкм. Содержание урана – 96,4–97,9 %. Структура является «эксплуатационной», образующейся в процессе облучения и разогрева топливных таблеток. Ее образование сопровождается локальным фракционированием продуктов деления: на границах зерен происходит накопление Mo, Ba, Rh, Ru, Tc, Nd, Sr, Ce, Cs, Zr, Eu. В процессе эксплуатации между зернами образуются участки (1–3 мкм), содержащие не более 40 % урана и до 10 % рутения [36]. Частицы выпадений с зернистой структурой наиболее подвержены измельчению в зоне выветривания. В результате образуются мелкие фрагменты – «горячие» микрочастицы.

Удельная активность ¹⁴⁴Ce для двух подвидов частиц облученного топлива приближается к средней расчетной величине на момент аварии – (1–2)·10¹⁰ Бк/г (табл. 7).

Таблица 7

Содержания, коэффициенты фракционирования и отношения активностей радионуклидов для частиц, сохранивших структуру облученного топлива

№№ проб	Вес, мкг	Активность ¹⁴⁴ Ce, Бк/г·10 ⁻¹⁰	$f_{106/144}$	$f_{137/144}$	Отношение активностей	
					$\frac{^{134}\text{Cs}}{^{137}\text{Cs}}$	$\frac{^{239,240}\text{Pu}}{^{144}\text{Ce}} \cdot 10^4$
68/91	10	1,6	1,3	1,2	0,46	7,4
42/87	226	1,5	1,6	1,4	0,52	7,1
12/90	239	1,4	1,5	1,3	0,44	7,8
63/91	103	1,4	1,1	0,9	0,43	8,0
→»»	383	1,3	1,5	1,1	0,58	7,1
→»»	144	1,3	0,9	0,5	0,33	5,6
→»»	183	1,2	1,3	1,2	0,50	6,9
12/90	248	1,2	1,6	1,0	0,56	7,5
42/87	96	1,2	1,7	0,1	0,42	6,5
60/91	29	1,1	1,0	0,2	0,51	7,2
68/91	19	1,1	1,2	1,2	0,48	7,5
63/91	174	1,1	0,03	0,002	0,64	6,5
→»»	111	1,0	1,1	0,6	0,37	4,6
68/91	30	1,0	1,3	1,3	0,62	4,2

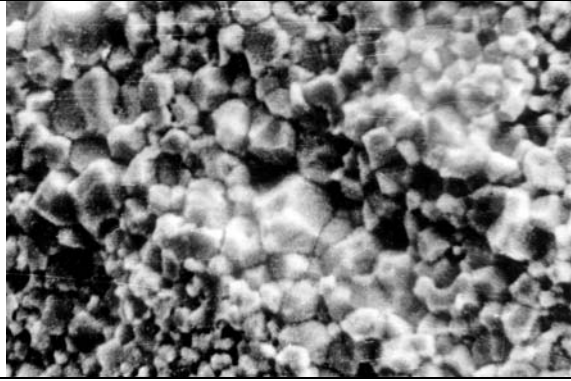


Рис. 1. Микроблочная структура топливной частицы выпадений. Увеличение 2000 (электронный микроскоп).

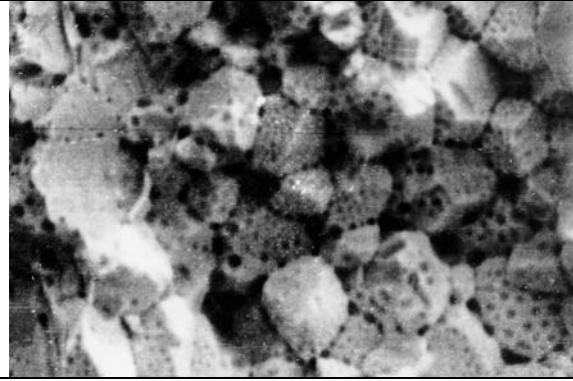


Рис. 2. Эксплуатационная микропористая (0,5–1,5 мкм) структура микроблоков топливной частицы выпадений. Увеличение 3000.

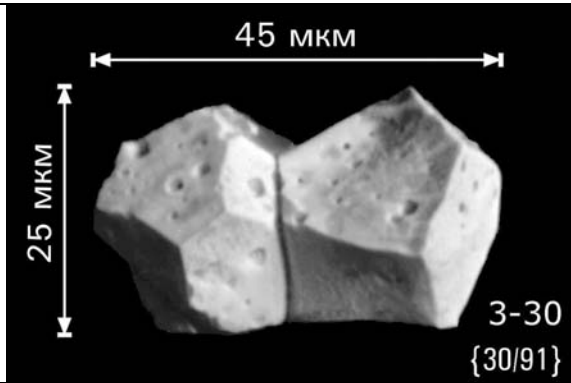


Рис. 3. Топливная частица – агрегат из двух микроблоков (зерен) топлива. Электронно-микроскопическое изображение в режиме обратно-рассеянных электронов. Увеличение 1200.



Рис. 4. Частица уран-циркониевого состава с оплавленной поверхностью. Увеличение 100 (оптический микроскоп).

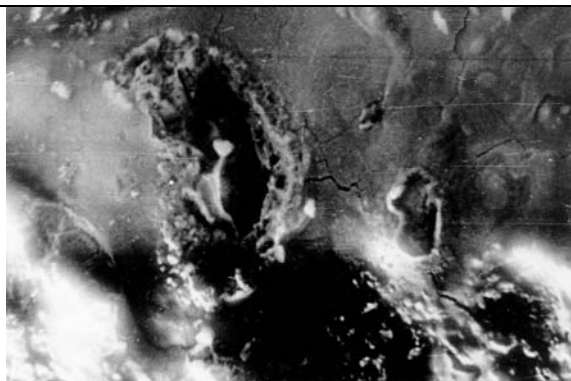


Рис. 5. Кавернозная структура поверхности уран-циркониевой частицы. Увеличение 700 (электронный микроскоп).

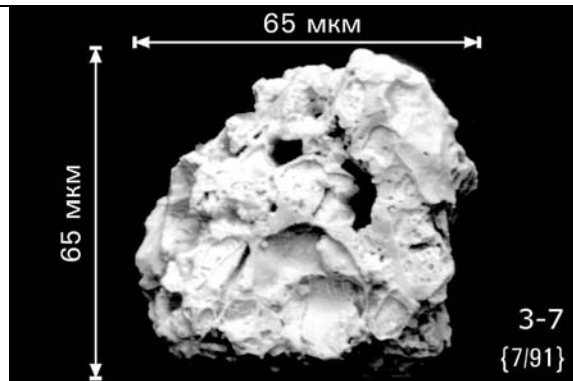


Рис. 6. Кавернозная структура поверхности уран-циркониевой частицы. Увеличение 700 (электронный микроскоп).

Среднее отношение $^{239,240}\text{Pu}/^{144}\text{Ce}$ на 26.04.1986 г. составило $(6,7\pm 1,1)\cdot 10^{-4}$ (расчетная величина $6\cdot 10^{-4}$). На ноябрь 1991 г. за счет распада ^{144}Ce оно увеличилось до $(8,4\pm 1,6)\cdot 10^{-2}$ (табл. 8).

Таблица 8

Содержание и отношение радионуклидов
в частицах выпадений облученного топлива

№№ проб шлихов	Приведено на 26.04.1986		Приведено на 01.10.1991	
	^{144}Ce , Бк/г· 10^{-9}	$\frac{^{239,240}\text{Pu}}{^{144}\text{Ce}}\cdot 10^4$	$\frac{^{239,240}\text{Pu}}{^{144}\text{Ce}}\cdot 10^2$	$\frac{^{241}\text{Am}}{^{239,240}\text{Pu}}$
68/91	15,5	7,4	10,2	0,85
42/87	14,8	7,1	9,2	0,21
12/90	14,3	7,8	10,1	0,90
63/91	13,5	8,0	10,3	0,68
63/91	13,0	7,1	9,8	0,92
63/91	12,8	5,6	7,3	0,26
63/91	12,5	6,9	8,9	0,87
12/90	12,2	7,5	10,2	0,98
42/87	11,8	6,5	8,4	1,40
60/91	11,0	7,2	9,6	0,79
68/91	10,8	7,5	10,5	0,91
63/91	10,6	6,5	9,0	0,46
63/91	10,4	4,6	6,0	0,50
68/91	10,0	4,2	5,8	0,90

В 1986 г. отношение ^{241}Am к изотопам $^{239,240}\text{Pu}$ для частиц выпадений ближней зоны варьировало от 0,34 до 0,40. На окончание 1991 г. это отношение значительно увеличилось и составило $0,76\pm 0,32$, т.е. активность ^{241}Am приблизилась к активности $^{239,240}\text{Pu}$.

В целом для проанализированных топливных частиц выпадений содержания и отношения радионуклидов близки к расчетным оценкам на момент аварии.

1.2.2. Частицы смешанного уран-циркониевого состава

Вторая разновидность – это агрегаты переменного уран-циркониевого состава. Соотношение компонентов матрицы может варьировать в широком диапазоне. Уран представлен оксидами U_4O_9 и UO_2 , цирконий – α -цирконием и продуктами окисления. Окраска обычно темная, черная. Другие внешние признаки, в том числе и структура, крайне разнообразны. Встречаются частицы с гладкой блестящей поверхностью, покрытой сетью трещин и микрократерами следов выброса газов (рис. 4–6). На таких же гладких поверхностях крупных частиц наблюдаются следы течения. Встречаются участки с микропористой структурой. Многие частицы покрыты тонкими (1–3 мкм) пленками стекломассы с натечными, скорлуповатыми структурами. Стеклофаза имеет преимущественно силикатный состав. На ее поверхности обычно находятся «приваренные» частицы с размерами до 5–7 мкм, в которых присутствуют Si, Ca, Mg, Fe, Al, Cr, Cu, Zn, Pb. На сколах отдельных крупных частиц (0,7–0,8 мм) было обнаружено урановое ядро облученного топлива, покрытое слоем смешанного уран-циркониевого состава и поверхностной пленкой стекла с частично ассимилированными субмикронными включениями. Плотность частиц снижается по сравнению с топливными до $3,5\text{--}4,0\text{ г/см}^3$. Весьма существенно, что при этом заметно увеличиваются прочностные свойства. Предельные нагрузки остеклованных частиц варьи-

ругот от 650 до 1300 кг/см², что, безусловно, отразится на их устойчивости в зоне выветривания.

В начале западного следа выпадений, в 0,5 км от 4-го блока обнаружены агрегаты топливосодержащих частиц с крупными металлическими включениями сферической формы.

Структурное многообразие и наличие стеклофазы отражают совокупность термально-механических и химических процессов, приведших к образованию частиц выпадений смешанного состава. Прогрессивный этап взрывного метаморфизма – мгновенный разогрев, взаимодействие урана с цирконием, разрушение и диспергирование компонентов твэлов – сменился регрессивным этапом – быстрым охлаждением и захватом микронных частиц в канале газовой-аэрозольного выброса с последующей «закалкой» оплавленной поверхности и образованием пленок стеклофазы.

Подобные структуры характерны для выпадений, инициируемых наземными ядерными взрывами, – гранул. Это макрочастицы округлой формы с размерами до 1–3 см, в ядре которых малоизмененная порода или минерал, а поверхность покрыта стекломассой с «приварившимися» пылевыми частицами [37].

Удельная активность ¹⁴⁴Ce для уран-циркониевых частиц варьирует от 0,08·10¹⁰ до 1·10¹⁰ Бк/г и находится в прямой зависимости от концентрации урана. Как правило, частицы обеднены по отношению к ¹⁴⁴Ce цезием и рутением. Значения $f_{137/144}$ изменяется в широких пределах – от 0,006 до 1,2. Среднее значение коэффициента фракционирования $f_{106/144} = 0,6$, однако, для частиц с металлическими включениями $f_{106/144}$ возрастает до 20–50.

Более стабильно отношение активностей ^{239,240}Pu к ¹⁴⁴Ce, которое составляет в среднем $(5,6 \pm 2,3) \cdot 10^{-4}$, что в пределах погрешности совпадает с этой величиной для частиц облученного топлива – $(6,7 \pm 1,1) \cdot 10^{-4}$. Эти данные подтверждают, что одним из преобладающих процессов формирования топливосодержащих выпадений является смешение и разбавление облученных диоксидов урана компонентами твэлов, в первую очередь цирконием, и в меньшей степени другими примесными элементами, захваченными в процессе взрывного выброса (Si, Al, Ca, Mg и др.).

В табл. 9 приведены данные для двух наиболее характерных частиц, представляющих выделенные нами разновидности из шлиха № 12, отобранного в 1990 г. в 2,7 км от 4-го блока по оси западного следа.

Детальные исследования топливосодержащих частиц западного следа наряду с двумя основными разновидностями выявили наличие более редких серпентинитовых матриц с включениями Zr–U–O, полифазных металлических матриц, содержащих сплавы меди и железа [18, 21]. Установлена тесная взаимосвязь химического состава и морфологии частиц с их радионуклидным составом. Все процессы преобразования исходного облученного топлива реактора РБМК находят свое отражение в вариациях количества и соотношений продуктов деления, изотопов элементов с различными физико-химическими свойствами. В процессе формирования и транспортировки в частицах выпадений ближней зоны одновременно происходят сложные процессы фракционирования с потерями, перераспределением и захватом радионуклидов.

Таблица 9

Основные характеристики индивидуальных частиц двух разновидностей

Характеристики	Топливная частица	Частица смешанного U–Zr состава
Масса, мкг	291±5	547±5
Цвет	Серый	Черный
Блеск	Матовый	Стеклянный
Излом	Неровный	Раковистый
Структура	Зернистая	Кавернозная
Элементный состав, %		
U	92,1	58,1
Zr	3,6	40,6
Ru	1,2	0,65
Si	0,31	0,00
Al	2,15	0,41
Fe	0,20	0,00
Гамма-спектрометрический анализ, Бк/г (приведено на 26.04.1986 г.)		
¹⁴⁴ Ce	1,43·10 ¹⁰	7,7·10 ⁸
¹⁵⁴ Eu	2,13·10 ⁷	7,6·10 ⁵
Отношение активности (приведено на 26.04.1986 г.)		
^{239,240} Pu/ ¹⁴⁴ Ce	7,8·10 ⁻⁴	6,4·10 ⁻⁴
¹³⁴ Cs/ ¹³⁷ Cs	0,44	0,44
<i>f</i> _{106/144}	1,5	0,9
<i>f</i> _{137/144}	1,3	0,15
Альфа-спектрометрический анализ, Бк/г (приведено на октябрь 1991 г.)		
Удельная альфа-активность	2,7·10 ⁷	9,2·10 ⁵
^{239,240} Pu	1,1·10 ⁷	4,9·10 ⁵
²³⁸ Pu + ²⁴¹ Am	1,5·10 ⁷	4,1·10 ⁵

Выявлены дополнительные закономерности распределения и потерь относительно ¹⁴⁴Ce отдельных радионуклидов из частиц ближней зоны выпадений [21].

1. Для частиц малоизмененного облученного топлива небольшие структурные изменения сопровождаются потерями изотопов цезия. При этом разные механизмы их накопления в период эксплуатации приводят к преимущественной потере ¹³⁷Cs. В отдельных случаях наблюдается незначительный недостаток ¹²⁵Sb.
2. Высокотемпературное воздействие на облученное топливо приводит к значительной или полной потере ¹²⁵Sb, ¹³⁷Cs, ¹³⁴Cs и частичной – ¹⁰⁶Ru.
3. Аналогичный дефицит указанных радионуклидов характерен для частиц с матрицей состава Zr–U–O.
4. При формировании частиц смешанного состава Zr–U–O + Fe–Cr–Ni на поведение ¹⁰⁶Ru и ¹²⁵Sb воздействуют два конкурирующих процесса – вынос при высоких температурах и удержание радионуклидов переплавленными металлическими компонентами. Благодаря сродству платиноидов к группе железа захват ¹⁰⁶Ru преобладает над его термическим выносом.
5. Существуют частицы, которые имеют практически нерадиоактивную матрицу. Радионуклидный состав таких выпадений определяется захваченными и ассимилированными на их поверхности микрочастицами.

Термохимические механизмы фракционирования продуктов деления для топливосодержащих частиц близки к аналогичным явлениям, ранее установленным для выпадений наземных ядерных взрывов [8].

С использованием достаточно стабильного отношения активностей $^{239,240}\text{Pu}/^{144}\text{Ce}$ проведена оценка загрязнения $^{239,240}\text{Pu}$ ландшафтно-геохимических полигонов, которая составила (Ки/км²):

- ЛГП I «Корогод» – 0,07;
- ЛГП II «Белая Сорока» – 0,16;
- ЛГП III «Зимовище» – 0,66;
- ЛГП IV «Буряковка» – 0,66;
- ЛГП V «Садоводство» – 8,1;
- ЛГП VI «Пойма» – 1,9.

Для расчетов использовали данные, полученные для проб, отобранных в 1986–1987 гг., когда все частицы выпадений находились в приповерхностном слое грунта на глубине до 1,0–1,5 см. В дальнейшем была установлена возможность локального перераспределения радиоактивных частиц выпадений потоками дождевых вод. На открытых песчаных грунтах происходило постоянное «проседание» тяжелых топливосодержащих частиц. На берегах р. Припять и пруда-охладителя радиоактивные частицы углубились в хорошо отсортированных кварцевых песках на глубину 20–25 см. Как известно, аналогичное явление происходит в природных условия при формировании россыпей тяжелых минералов.

Проведена оценка «запасов» $^{239,240}\text{Pu}$ в выпадениях по западному следу от базы «Гидроэлектромонтаж» до с. Толстый Лес. Ширина следа на расстоянии 1 км от 4-го блока составляет около 200 м. Вблизи с. Толстый Лес на расстоянии 20 км от 4-го блока след расширяется до 1 км и распадается на отдельные пятна с повышенными уровнями мощности дозы гамма-излучения. Выделенную площадь западного следа (11,6 км²) разбивали на 10 участков («трапеций»), на которых подсчитывали «запасы». Плотность загрязнения $^{239,240}\text{Pu}$ на этих участках варьировала от 0,008 до 17 Ки/га. Общее количество $^{239,240}\text{Pu}$, содержащегося в частицах выпадений, составляет 320 Ки, или 0,5 % от содержания этих изотопов в активной зоне реактора 4-го блока ЧАЭС на момент аварии.

Необходимо отметить, что уже на конец 1991 г. «запасы» ^{241}Am в выпадениях западного следа составляли 240 Ки.

По результатам исследований ближней зоны выпадений, проведенных в 1986–1992 гг., можно выделить несколько процессов, которые обусловлены специфическими свойствами топливосодержащих частиц – основного фактора радиоактивного загрязнения территории.

1. Ближайшим природным аналогом топливосодержащих частиц выпадений являются тяжелые примесные минералы, для которых известны закономерности распределения и миграции в приповерхностных зонах выветривания и в рыхлых осадочных породах, условия формирования россыпей и пр. Природный диоксид урана – минерал уранинит – нехарактерен для россыпных месторождений, поскольку он неустойчив в зоне выветривания, со временем окисляется, превращается в легко разрушаемые вторичные урановые минералы.
2. Из разновидностей выпадений облученного топлива наиболее интенсивно разрушаются макрочастицы облученного топлива, имеющие зернистую структуру. В зоне выветривания они разделяются на отдельные фрагменты – микрочастицы размером 3–7 мкм, которые способны мигрировать в водных потоках, вовлекаться

- в процессы ветрового переноса, изменяться под влиянием природных факторов. Весьма существенно, что при измельчении вскрываются межзерновые пространства, в которых сконцентрированы продукты деления – Ru, Tc, Sr, Cs и др. В дальнейшем субмикронные частицы могут мигрировать совместно с аэрозольными радиоактивными продуктами, образовавшимися после взрыва реактора.
3. Более устойчивы в зоне выветривания частицы выпадений смешанного уранциркониевого состава, и особенно те, которые частично остеклованы или покрыты пленками алюмосиликатной стекломассы.
 4. По результатам изучения систематически отбираемых проб за сравнительно небольшой отрезок времени – 5 лет – в ближней зоне выпадений не выявлено существенных изменений морфологии и радиохимического состава топливосодержащих частиц. На территориях, где не проводились рекультивационные работы, остаются стабильными границы первичных радиационных аномалий, например, запятого следа выпадений.
 5. Измельчение топливосодержащих частиц увеличивает вероятность выщелачивания и последующей миграции находящихся в них радионуклидов, представляющих радиоэкологическую опасность, таких как стронций, цезий, плутоний, америций. Следует учитывать, что геохимическая обстановка 30-километровой зоны может обеспечить условия как для миграции, так и для удерживания радионуклидов на природных барьерах. На территории зоны существуют сорбционные (глинистые, слюдистые, железистые и пр.) барьеры, восстановительные барьеры торфяников и заболоченных участков. Именно такие природные барьеры и биохимические цепочки миграции радионуклидов должны стать объектами дальнейших радиогеохимических и экологических исследований. Особого внимания требует ^{241}Am , количества которого постоянно возрастают.

2. Топливосодержащие стекломассы подреакторных помещений

В июле 1988 г. из подреакторных помещений 4-го блока были отобраны пробы радиоактивных техногенных новообразований, в том числе и топливосодержащих стекломасс. Их морфологическое и вещественное разнообразие потребовало разработки классификации, разделения на типы и виды в зависимости от структурно-минералогических и радиохимических особенностей. В предложенной классификации (табл. 10) [38] использовали принципы типизации вулканогенных пород, импактитов [39], а также собственный опыт исследований продуктов ударно-термального метаморфизма ядерных взрывов.

Характерным признаком топливосодержащих новообразований является присутствие стеклофазы, что оправдывает термин «стекломасса». В ряде публикаций их без объяснений называли «лавой» или «керамикой» [40, 41]. Присутствие стеклофазы – отличительный признак особого термического режима. Образование стекла происходит при резком снижении температуры силикатных расплавов. Для крайне специфических условий аварии на 4-м блоке, по-видимому, не всегда можно оценить фазовые границы многокомпонентного высокотемпературного процесса. Как известно, искажение параметров прогрессивного и регрессивного (кристаллизационного) термического процессов происходит по целому ряду причин, в частности, за счет присутствия примесей кристаллизаторов, флюсов, воды и пр. Например, присутствие бора приводит к образованию в силикатном расплаве двух несмешивающихся фаз, различающихся по плотности и составу. В природных условиях при быстром снижении температуры в стеклах возникают необычные формы микровыделений минера-

лов – кристаллиты размером от долей до 10–15 мкм. Встречаются шаровые, волосовидные, игольчатые и скелетные формы кристаллитов различного состава.

Таблица 10

Классификация радиоактивных техногенных новообразований
аварийного блока ЧАЭС

Тип	Вид
1. Малоизмененные материалы строительных, защитных сооружений, металлическая арматура	1.1. Бетон 1.2. Графит 1.3. Металл 1.4. Материалы засыпки блока (песок, доломит и пр.)
2. Новообразованные смеси:	
механические	2.1. Брекчии 2.2. Конгломераты 2.3. Стеклобрекчии 2.4. Шлаки
термические	
3. Новообразованные породы и минералы: нераскристаллизованные	3.1. Стекла 3.2. Пемзы 3.3. Технолиты, названия которых определяются особенностями структуры и состава
4. Гранулы	4.1. Стеклогранулы 4.2. Металлические «капли»

Разработанная классификация учитывала структурные, минералогические, химические и радиохимические особенности стекломасс 4-го блока, которые в своей совокупности отражали специфические условия их образования.

Первая партия проб была отобрана из исследовательских скважин, парораспределительного коридора и бассейна-барботера (табл. 11) [42].

Изучение шлифов показало наиболее характерную особенность топливосодержащих стекломасс – их неоднородность, обусловленную присутствием включений различного состава и происхождения. Различия наблюдаются также и в количественных соотношениях стекла матрицы и присутствующих в ней включений.

Образование стекломасс в подреكتورных помещениях 4-го блока происходило в специфических условиях экстремального разогрева облученного топлива, последующего плавления силикатных смесей с образованием подвижного расплава. Быстрое снижение температуры определило наличие стеклофазы в техногенных топливосодержащих новообразованиях.

В макрообразцах стекла сохраняют характерные признаки своих технических и вулканогенных аналогов. Блеск стеклянный или жирный, излом раковистый, изотропия в шлифах. Бурая или зеленоватая окраска стекол связана с присутствием включений. В шлифах они бесцветные или светло-желтые. Текстура кавернозно-пористая, образованная газовыми включениями различных размеров: от 1–3 мкм до 2,5–3,0 мм. Пробы из бассейна-барботера по своей структуре являются аналогами вулканической пемзы – пористых масс с каркасом из стекла. Образование пемзооб-

разных стекломасс 4-го блока происходило, по-видимому, как и в природных условиях: при резком расширении газовых включений или при контакте расплавов с водой.

Таблица 11

Удельная активность и отношения активностей гамма-излучающих радионуклидов в различных видах техногенных новообразований
(приведено на 26.04.1986 г.)

Тип	Вид	№№ проб	Характер пробы	^{144}Ce , Бк/г	$f_{106/144}$	$f_{137/144}$	$\frac{^{134}\text{Cs}}{^{137}\text{Cs}}$
1	1.1	8-Б-2	Бетон	$4,1 \cdot 10^6$	0,31	1,6	0,51
1	1.1	22	Цемент из бетона	$8,5 \cdot 10^4$	130	6,4	0,58
1	1.2	8-Г	Графит	$5,3 \cdot 10^5$	0,62	0,9	0,46
1	1.3	615-1	Металл	$1,0 \cdot 10^7$	180	0,6	0,29
3	3.1	6-Б-4	Стекло бурое	$2,6 \cdot 10^9$	0,025	0,3	0,56
3	3.1	621	Стекло бурое	$2,3 \cdot 10^9$	0,021	0,3	0,48
3	3.1	003-Б	Стекло бурое	$2,2 \cdot 10^9$	0,015	0,3	0,48
3	3.1	614	Стекло бурое	$2,2 \cdot 10^9$	0,025	0,3	0,44
3	3.1	24-Б	Стекло бурое	$2,1 \cdot 10^9$	0,028	0,3	0,56
3	3.1	623	Стекло зеленое	$1,2 \cdot 10^9$	0,093	0,6	0,50
3	3.1	23-Б	Стекло зеленое	$1,1 \cdot 10^9$	0,25	0,6	0,50
3	3.1	319	Стекло зеленое	$1,0 \cdot 10^9$	0,009	0,3	0,44
3	3.2	9-Б-1	Пемзостекло	$2,5 \cdot 10^9$	0,021	0,3	0,56
3	3.2	21-Б	Пемзостекло	$2,6 \cdot 10^9$	0,025	0,3	0,49
3	3.2	22-Б	Пемзостекло	$2,2 \cdot 10^9$	0,012	0,3	0,50
3	3.3	1-Б	Раскristализованное стекло	$2,5 \cdot 10^9$	0,031	0,3	0,60
3	3.3	2-Б-1	Раскristализованное стекло	$2,5 \cdot 10^9$	0,062	0,3	0,54
4	4.2	5-Б	Металлическая гранула	$1,3 \cdot 10^6$	1100	0,1	—
4	4.2	8-Б-1	Металлическая гранула	$9,2 \cdot 10^4$	4,7	1,6	0,49
4	4.2	6-Б-5	Металлическая гранула	$3,3 \cdot 10^6$	500	0,4	0,7
4	4.2	614-1	Металлическая гранула	$2,6 \cdot 10^6$	780	0,6	0,44
4	4.2	24-Б-1	Металлическая гранула	$8,6 \cdot 10^6$	200	0,4	0,73

Объемная плотность наиболее монолитных частиц стекла $2,8\text{--}2,9 \text{ г/см}^3$. Показатель преломления варьирует от $1,549 \pm 0,003$ до $1,579 \pm 0,006$. Химический состав бурого стекла пробы 6-Б-4 и пемзостекла пробы 9-Б-1 приведены в табл. 12.

Таблица 12

Химический состав топливосодержащих стекломасс

Оксиды элементов, мас%	Бурое стекло, проба 6-Б-4	Пемзостекло, проба 9-Б-1	Раскristализованное стекло, проба 1-Б
Кремний	70,0	61,2	60,7
Алюминий	2,1	7,2	12,6
Титан	0,6	0,8	1,2
Железо	5,4	3,4	7,4
Магний	12,5	12,0	8,8
Кальций	6,3	3,8	3,3
Уран	7,5	11,2	13,9

Включения стекломасс по своему происхождению можно разделить на две группы:

- вещества, не связанные генетически с расплавом, попавшие в него из окружающей среды;
- минералы, образующиеся в процессе снижения температуры, то есть являющиеся продуктами раскристаллизации силикатного расплава.

Первая группа – это разнообразные механические примеси, попавшие в расплав на месте его образования или по пути продвижения по подреакторным помещениям. Отдельные крупные образцы из-за обилия включений могут быть отнесены к типу 2 классификации – новообразованным термическим смесям.

- 1) Минеральные частицы (0,1–0,3 мм) – в основном остроугольные обломки кварца и фрагменты кристаллов полевых шпатов с тонкой оторочкой изотропизации, свидетельствующей о начале плавления минерала (1300–1700°C).
- 2) Металлические включения овальной, сферической формы с размерами от 1–3 мкм до 2–3 мм. Основным компонентом является железо, примесными – хром и никель. В присутствии двух несмешивающихся фаз – силикатной и металлической – в расплаве происходило локальное, но достаточно резкое фракционирование радионуклидов. Расплав железа обогащался ^{106}Ru . Коэффициент фракционирования $f_{106/144}$ для стекла матрицы образца 6-Б-4 составляет 0,025, а извлеченного из стекла металлического включения (образец 6-Б-5) – 500. Наиболее вероятно, что на поверхности «капель» сплавов железа происходило восстановление оксидов рутения до металла и дальнейшее вхождение радионуклида в структуру своего химического аналога – железа. При этом автордиографии показывают равномерное распределение бета-излучающих радионуклидов по всему объему металла. Кроме железосодержащих обнаружены сферические включения свинца.
- 3) Частицы графита (0,2–0,8 мм), с присутствием большого количества которых связана темная, зеленоватая окраска макрообразцов стекла (пробы зеленых стекол в табл. 11).
- 4) Микрочастицы облученного топлива (10–50 мкм) имеют неправильную форму, в шлифах непрозрачные. В ядерных фотоэмульсиях окружены интенсивным бета-ореолом, на фоне которого фиксируются альфа-треки ^{239}Pu . Среднее содержание ^{144}Ce в бурых стеклах составляет $(2,1–2,8) \cdot 10^9$ Бк/г (табл. 11), что соответствует расчетному количеству топлива 10 %. Прямые определения U_3O_8 в стекломассе дают значения 7,5–13,9 мас%. Зеленые стекла почти в два раза обеднены по топливу вследствие присутствия многочисленных включений графита.

Вторая группа – это минералы, кристаллизующиеся из техногенного расплава при его охлаждении.

- 1) Минералы группы моноклинных пироксенов, метасиликатов Mg, Fe, Ca (диопсид, авгит и др.) представлены короткопризматическими кристаллами с размерами по длинной оси 0,05–0,12 мм. Грани кристаллов неровные. Встречаются участки стекломасс с интерсертальной структурой, характерной для природных базальтов, в которых удлиненные кристаллы диопсид-авгита образуют каркас с угловатыми промежутками, заполненными стеклом.
- 2) Уранинит – UO_2 . Обнаружение в 1988 г. новообразованного уранинита [38] дало ответ на целый ряд вопросов, касающихся растворения облученного топлива в силикатных расплавах. В то время в литературе не было данных о кинетике растворения диоксида урана в расплавах сложного состава, отвечающих различным бетонам. Существовало мнение о возможном всплывании урана над расплавом

железа и циркония. Для режима нагревания важную роль могли играть экзотермические реакции продуктов разложения бетона с цирконием. Не исключалась стратификация расплава на оксидный и металлический слои [43].

Исключительное значение, которое придавалось решению вопроса об ассимиляции силикатными расплавами твэлов с последующей кристаллизацией техногенных минералов, потребовало для изучения топливосодержащих стекломасс использовать ультралокальные методы. В Радиовом институте они успешно использовались при изотопных исследованиях урановых минералов [44] и получили дальнейшее развитие при анализах радиоактивных новообразований аварии на ЧАЭС [18, 21, 45, 46].

Изучение различных видов стекол показало, что в них присутствуют несколько структурно-морфологических видов техногенного уранинита, отражающих специфику условий его кристаллизации.

- Уранинит нарастает на непрозрачных ядрах («затравках») микроблоков облученного топлива. Размеры таких агрегатов 5–15 мкм. Новообразованный уранинит прозрачный, красный или бурый.
- Кубические, хорошо выраженные микрокристаллы (2–6 мкм), равномерно распределенные в стекле матрицы (рис. 7). Уран входит в группу элементов, которая в природных силикатных расплавах проявляет тенденцию к образованию собственных минералов даже при низких концентрациях. Мелкая вкрапленность кристаллов уранинита (6–10 мкм) – характерная форма его выделения в природных магматических процессах.
- Различные скелетные формы роста: четырех-, шести-, восьмилучевые «снежинки» со средними размерами 15–20 мкм (рис. 8). Характерно неравномерное развитие отдельных лучей кристаллизации, образование отростков толщиной 2–3 мкм и длиной более 40 мкм (рис. 10).
- Волосовидные выделения сросшихся микрокристаллов уранинита с размерами не более 1–2 мкм. Длина таких нитей достигает 100–200 мкм (рис. 9). Они часто связаны со скелетными формами кристаллизации уранинита.

В природных вулканических стеклах (в лавах) возникновение скелетных форм связано с неравномерным поступлением вещества к разным частям растущего кристалла в сверхбыстроохлаждающихся частях расплава. Волосовидные микролиты образуются при резком остывании быстро передвигающихся расплавов с низкой вязкостью [47].

Формы новообразованного, техногенного уранинита отражают экстремальные условия его кристаллизации – быстрое охлаждение подвижного высокотемпературного расплава. Дополнительное количество центров индивидуальной кристаллизации могло возникнуть при интенсивном ионизирующем излучении [48]. При этом необходимо учитывать полную ассимиляцию химически активным силикатным расплавом диспергированного взрывом облученного топлива. Присутствие различных инициаторов кристаллизации (паров воды, бора, хлора и пр.) могло снижать температуру фазовых переходов диоксида урана.

Авторадиографии показали, что техногенный уранинит не содержит бета-излучающих продуктов деления, которые изначально присутствуют в исходном материале – облученном оксиде урана.

Наряду с новообразованными кристаллами уранинита обнаружены округлые или каплевидные выделения оксидов урана, образовавшиеся в результате плавления микрочастиц ядерного топлива.

- 3) Циркон ($ZrSiO_4$) образует кристаллы дипирамидального габитуса с размерами от 10 до 500 мкм. Встречаются сростки из 5–6 индивидов. Кристаллизация циркона происходит раньше уранинита. Последний часто образует тонкие пленки (менее 1 мкм) или микросростки (0,5–0,7 мкм) на поверхности крупных кристаллов циркона (рис. 11).

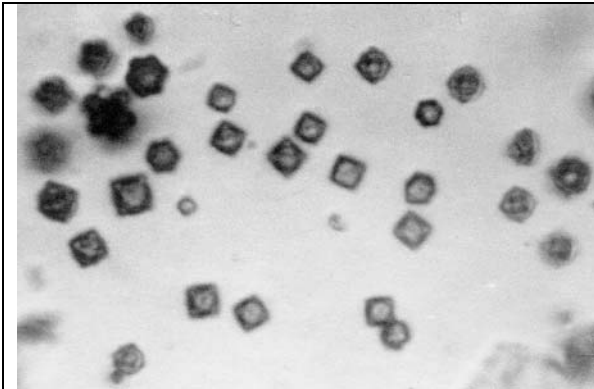


Рис. 7. Кубические микрокристаллы (2–4 мкм) уранинита в стекле. Увеличение 1500 (оптический микроскоп).

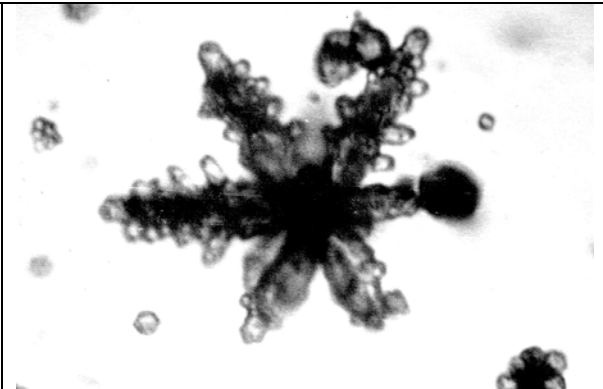


Рис. 8. Скелетная форма кристаллизации уранинита в стекле. Увеличение 1860.

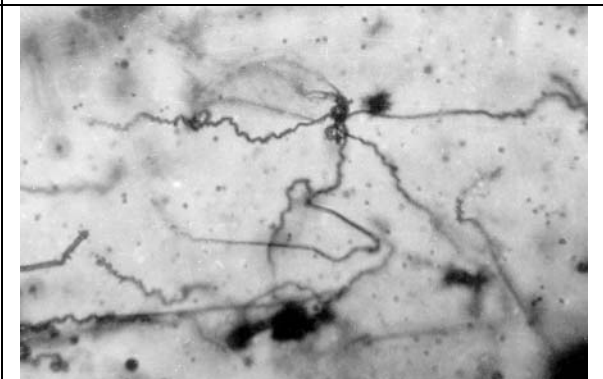
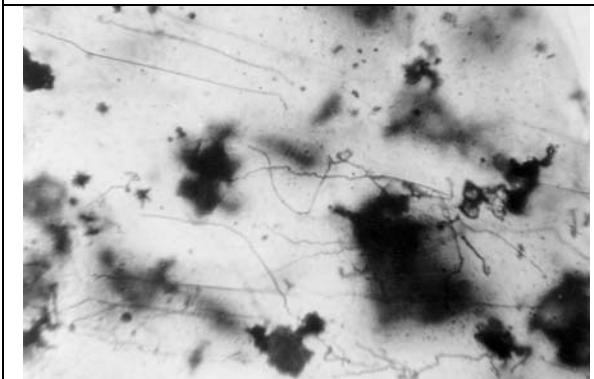


Рис. 9. Нитевидные формы кристаллизации уранинита. Увеличение 200 (левый снимок) и 220 (правый снимок).

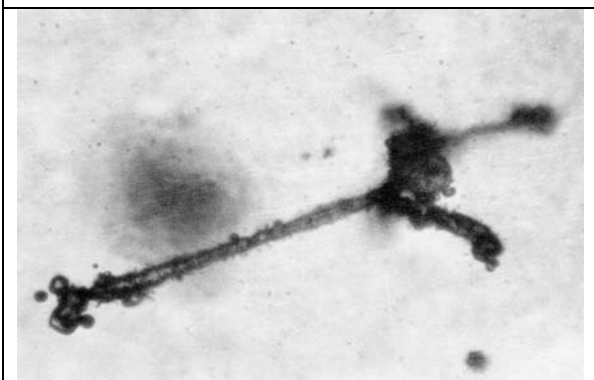


Рис. 10. Направленный рост асимметричных форм кристаллов уранинита. Увеличение 580.

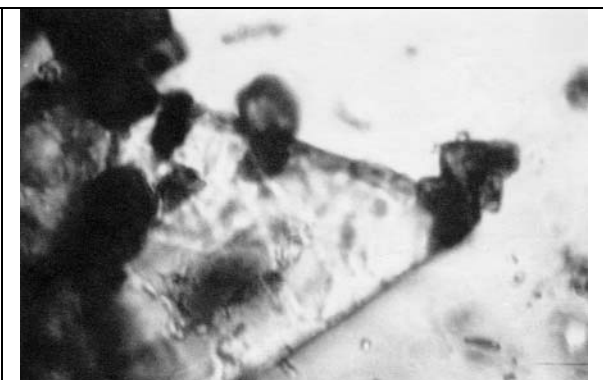


Рис. 11. Нарастание микрокристаллов уранинита на поверхности кристалла циркона. Увеличение 1850.

Начало образования крупных, хорошо ограненных кристаллов циркона происходило, по-видимому, в сравнительно стабильных условиях снижения температуры образовавшегося силикатного расплава, до его распространения по подреакторным помещениям. В таких же условиях шла кристаллизация кубических микрокристаллов уранинита.

Из природных магматических расплавов циркон выделяется одним из первых, раньше уранинита. Близость ионных радиусов четырехвалентного циркония ($R_i = 0,80 \text{ \AA}$) и четырехвалентного урана ($R_i = 0,97 \text{ \AA}$) делает возможным изоморфное замещение этих элементов. В природных цирконах концентрация урана достигает 1,1 % [49]. Кроме урана четырехвалентный цирконий способен замещать торий, гафний, ниобий, тантал, иттрий, редкоземельные элементы.

В техногенном цирконе из топливосодержащих стекломасс концентрация урана достигает 12,9 % [50]. Изучение переплавленных оксидов урана с примесью циркония дало возможность оценить максимальные температуры расплава, которые составляют 2500–2600°C.

Обнаружение высокоуранового техногенного циркона явилось дополнительным стимулом для развития в Радиевом институте научного направления по разработке методов синтеза кристаллических матриц для иммобилизации долгоживущих радионуклидов – плутония, актинидов и ^{129}I [51].

Кристаллизация необычных скелетных и волосовидных форм уранинита происходила, по-видимому, в двигающемся расплаве, который перемещался по подреакторным помещениям 4-го блока.

При изучении топливосодержащих стекломасс наиболее важным было установление ассимиляции облученного топлива и циркониевых оболочек образующимся силикатным расплавом с последующей кристаллизацией техногенных минералов – уранинита и циркона.

Стекломассы подреакторных помещений являются высокоактивными материалами, требующими надежной окончательной изоляции – захоронения в геологических формациях. Решение этой проблемы нельзя откладывать, поскольку в условиях объекта «Укрытие» происходит химическое разрушение стекломасс с последующим образованием на их поверхности нестойких минеральных фаз урана – вторичных урановых минералов. Этот процесс требует особого внимания, поскольку указывает на начало миграции радионуклидов, локализованных на объекте «Укрытие» [52].

Размещение радиоактивных материалов 4-го блока в подземном хранилище является одним из завершающих этапов ликвидации аварии на Чернобыльской АЭС. В связи с этим необходимо отметить, что в Радиевом институте сотрудники лаборатории Л. В. Комлева более 10 лет изучали геологические формации Украинского кристаллического щита в связи с вопросами геохронологии и геохимии радиоактивных элементов. Полученные данные вместе с разработанными в институте геологическими критериями выбора площадок для захоронения радиоактивных отходов в гранитоидных формациях [53] могут быть использованы при выборе перспективных массивов.

Заключение

Облученное топливо – диоксид урана, содержащий продукты деления – присутствует в различных видах новообразований, являющихся конечными продуктами аварии на 4-ом блоке ЧАЭС. В условиях термально-взрывного метаморфизма выде-

лились два типа техногенных радиоактивных продуктов, различающихся своим генезисом, временем и особенностями формирования – частицы выпадений и стекло-массы подреакторных помещений.

Топливосодержащие частицы выпадений представлены, в свою очередь, двумя главными разновидностями:

- 1) диспергированным облученным топливом (UO_2 и окисленным до $UO_{2,8}$), сохраняющим эксплуатационные структуры, захватившим небольшие количества ^{106}Ru и ^{137}Cs в процессе выброса и транспортировки по газовой-аэрозольному каналу миграции. Эта разновидность выпадений наиболее легко изменяется в зоне выветривания и в дальнейшем будет основным источником поступления во внешнюю среду долгоживущих актинидов ^{239}Pu и ^{241}Am ;
- 2) облученным топливом (UO_2 и U_4O_9), смешанным с расплавом циркониевых оболочек, захватившим также частицы силикатного расплава и различных металлов. Соотношение урана и циркония изменяется в широком диапазоне. В процессе своего образования частицы теряют ^{106}Ru и ^{137}Cs , то есть они являются продуктами высокотемпературного метаморфизма. Около 60 % выпадений западного следа представлено частицами смешанного состава – $Zr-U-O$. Они менее, чем собственно облученное топливо, подвержены изменению в зоне выветривания. В песчаных грунтах они перемещаются и накапливаются так же, как и природные тяжелые минералы шлихов.

По западному следу на площади примерно 12 км^2 количество ^{239}Pu в выпадениях топливосодержащих частиц составило не менее 320 Ки, количество ^{241}Am на конец 1991 г. – более 200 Ки.

Первоначально топливосодержащие частицы находились на поверхности, но со временем они углубились в песчаный грунт и почвы, распределились по формам рельефа, осели на дно рек и водоемов. Атмосферно-климатические процессы, динамика биоценоза, деятельность человека способствуют разрушению частиц, «размыванию» первичных и возникновению вторичных ореолов рассеяния радионуклидов.

Проведенные радиогеохимические исследования определили основные свойства, предполагаемые условия образования, характер распределения и оценили количество выпадений топливосодержащих частиц на отдельных участках 30-километровой зоны. Представительность и адекватность информации обеспечивалась систематическими пятилетними наблюдениями и пробоотбором на шести ландшафтно-геохимических полигонах. Использование шлихового метода позволяло выделять для радиохимических исследований представительные пробы определенных структурно-минералогических разновидностей топливосодержащих частиц.

Для составления прогнозов распространения радионуклидов и вероятности их вхождения в гидрогеологические и биологические циклы кроме свойств частиц выпадений необходимо знать формы нахождения, величины выщелачиваемости из частиц и условия миграции радиоактивных изотопов. Эти вопросы решали специальные радиохимические исследования, содержание и результаты которых приведены в настоящем сборнике.

Более двадцати лет на загрязненных территориях происходило естественное перераспределение радиоактивных частиц выпадений, зависящее от их размеров и плотности. Субмикронные частицы смываются водными потоками в донные осадки или задерживаются на почвенных или других барьерах. Крупные и достаточно устойчивые уран-циркониевые частицы распределяются в соответствии с закономер-

ностями поведения природных тяжелых минералов. В зоне выветривания происходят выщелачивание, миграция и перераспределение техногенных радионуклидов.

В сложившейся ситуации для принятия решений по реабилитации и использованию зараженных территорий необходим комплексный мониторинг объектов внешней среды. Особое значение имеет выявление миграционных барьеров, поскольку в 30-километровой зоне наряду с процессами перемещения реализуются процессы удержания радионуклидов на различных геохимических барьерах.

В топливосодержащих стекломассах присутствует конечный продукт полной трансформации облученных оксидов урана, прошедших последовательно взрывное распыление, ассимиляцию и растворение в силикатном расплаве. Таким продуктом является техногенный уранинит. В процессе кристаллизации минерал «очищается» от примесных радионуклидов, содержащихся в облученном топливе. Авторадиографии регистрируют присутствие в нем ^{239}Pu , который может в кристаллической структуре уранинита изоморфно замещать уран. Специфические скелетные, асимметричные, волосовидные и другие формы уранинита отражают необычные, экстремальные условия кристаллизации, обусловленные в первую очередь быстрым перемещением жидкого расплава.

Топливосодержащие стекломассы являются радиоактивными отходами, образовавшимися в результате аварии, и требуют надежной длительной изоляции.

Кроме них в пределах объекта «Укрытие» находятся значительные количества других радиоактивных отходов: графит, переплавленные металлы, бетонные и металлические конструкции и др. Завершающим этапом ликвидации последствий аварии для объекта «Укрытие» должно быть размещение всех радиоактивных материалов в могильниках и хранилищах. Очевидна целесообразность строительства комплексного пункта изоляции отходов с могильником глубокого заложения и приповерхностными хранилищами. Наиболее близко к источнику отходов расположены гранитоиды Коростенского комплекса, которые предлагаются украинскими геологами для постановки работ по выбору перспективных площадок.

Радиогеохимические исследования Радиового института по ликвидации последствий аварии на ЧАЭС включали разнообразные аспекты традиционных для института и вновь создаваемых научно-методических направлений. Пробоотборно-полевые работы в 30-километровой зоне и на объекте «Укрытие» продолжались в течение шести лет. Однако прошедшее время показало, что полное осмысление полученных результатов и отдельные заключения нельзя считать завершенными и в настоящее время.

Катастрофы не имеют аналогов, поскольку представляют необычное сочетание взаимосвязанных причинно-следственных процессов. Вполне очевидна сложность моделирования аварии на ЧАЭС, выделение среди множества явлений доминирующих факторов, составление прогноза развития радиационной обстановки.

Результаты проведенных радиогеохимических исследований заполняют существенный фрагмент в общей картине реставрации аварийных и поставарийных событий. Составной частью различных теоретических моделей являются радиоактивные продукты аварии, которые в результате проведенных исследований систематизированы в соответствии с особенностями развития процессов прогрессивного и регрессивного термохимического метаморфизма [18, 20, 21, 38, 46]. Формы поступления, пути накопления и миграции содержащихся в этих продуктах радионуклидов являются не только вопросами фундаментальных исследований, но и служат осно-

вой прогнозных оценок и научного обоснования для принятия практических решений по устранению последствий аварии.

Список литературы

1. Комлев Л. В. В. Г. Хлопин и геохимия // Академик В. Г. Хлопин: Очерки, воспоминания современников. Л.: Наука, 1987. С. 59–68.
2. Андерсон Е. Б., Савоненков В. Г. Геохимические исследования // Радиевый институт имени В. Г. Хлопина. К 75-летию со дня основания. СПб.: 1997. С. 119–132.
3. Андерсон Е. Б., Савоненков В. Г. Радиогеохимические исследования в Радиевом институте // Разведка и охрана недр. 1998. № 7–8. С. 16–20.
4. Власов В. К., Петрова Т. Б., Микляев П. С. Реконструкция радиационной обстановки на промплощадке Чернобыльской АЭС по результатам γ -спектрометрического анализа проб грунта и литературным данным // Радиохимия. 2007. Т. 49, вып. 6. С. 557–560.
5. Высотский Е. Д., Краснов В. А., Лагуненко А. С. и др. Топливо в помещении 305/2 4-го блока ЧАЭС. Критмассовые зоны. Уточнение сценария образования лавообразных топливосодержащих материалов // Проблемы безопасности атомных электростанций и Чернобиля. Чернобыль, 2007. Вып. 8. С. 77–85.
6. Смирнов В. И. Геологические основы поисков и разведок рудных месторождений. М.: Изд-во МГУ, 1954. 546 с.
7. Беляев Ю. И., Щербаков В. И., Макарова Л. А. К вопросу о представительных пробах горных пород для анализа инструментальными методами // ЖАХ. 1976. Т. XXXI, вып. 2. С. 230–235.
8. Фрейлинг Э., Крокер Г., Адамс Ч. Образование частиц – осколков ядерного взрыва // Радиоактивные выпадения от ядерных взрывов. М.: Мир, 1968. С. 11–53.
9. Дубасов Ю. В., Кривохатский А. С., Савоненков В. Г. и др. Состояние и поведение частиц диспергированного топлива, выброшенного из 4-го блока Чернобыльской АЭС // Радиохимия. 1991. Т. 33, вып. 1. С. 96–101.
10. Комлев Л. В., Данилевич С. И., Иванова К. С. и др. Абсолютный возраст кировоградских и трахитоидных гранитов украинского докембрия по данным свинцово-изотопного и аргонового методов // Тр. VII сессии Комиссии по определению абсолютного возраста геологических формаций. М., 1960. С. 91–111.
11. Ляхович В. В. Акцессорные минералы (их генезис, состав, классификация и индикаторные признаки). М.: Наука, 1968. 273 с.
12. Krivokhatsky A. S., Dubasov Yu. V., Smirnova E. A. et al. Actinides in the Near Release from the Chernobyl NPP Accident // J. Radioanal. Nucl. Chem., Articles. 1991. Vol. 147, N 1. P. 141–151.
13. Кривохатский А. С., Смирнова Е. А., Савоненков В. Г. и др. Устойчивость топливных частиц по отношению к выщелачивающим агентам // Всес. совещание «Принципы и методы ландшафтно-геохимических исследований миграции радионуклидов»: Тез. докл. М., 1989. С. 63.
14. Авдеев В. А., Кривохатский А. С., Савоненков В. Г. и др. Выщелачивание радионуклидов из частиц ядерного топлива и реакторного графита, выделенных из проб 30-километровой зоны Чернобыльской АЭС // Радиохимия. 1990. Т. 32, вып. 2. С. 55–59.

15. Дубасов Ю. В., Кривохатский А. С., Савоненков В. Г. и др. Разновидности топливных частиц в выпадениях ближней зоны Чернобыльской АЭС // Радиохимия. 1992. Т. 34, вып. 5. С. 102–103.
16. Андерсон Е. Б., Бураков Б. Е., Пазухин Э. М. Некоторые особенности химического состава и морфологии топливных частиц ближней зоны Чернобыльской АЭС // Радиохимия. 1992. Т. 34, вып. 5. С. 139–144.
17. Кривохатский А. С., Савоненков В. Г., Смирнова Е. А. и др. Выщелачивание радионуклидов из двух видов топливосодержащих частиц выпадений ближней зоны Чернобыльской АЭС // Радиохимия. 1994. Т. 36, вып. 1. С. 76–81.
18. Burakov B. E., Anderson E. B., Galkin B. Ya. et al. Study of Chernobyl “Hot” Particles and Fuel-Containing Masses: Implications for Reconstructing the Initial Phase of the Accident // Radiochim. Acta. 1994. Vol. 65. P. 199–202.
19. Савоненков В. Г., Смирнова Е. А., Брызгалова Р. В. и др. Топливосодержащие частицы аварийного выброса 4-го блока Чернобыльской АЭС в пробах почв Брянской области // Радиохимия. 1994. Т. 36, вып. 1. С. 94–95.
20. Дубасов Ю. В., Савоненков В. Г., Смирнова Е. А. Систематизация радиоактивных продуктов аварии на Чернобыльской АЭС // Радиохимия. 1996. Т. 38, вып. 2. С. 101–116.
21. Shabalev S. I., Burakov B. E., Anderson E. B. General Classification of “Hot” Particles from the Nearest Chernobyl Contaminated Areas // Scientific Basis for Nuclear Waste Management XX: Mater. Res. Soc. Symp. Proc. 1997. Vol. 465. P. 1343–1350.
22. Богатов С. А., Боровой А. А., Дубасов Ю. В. и др. Форма и характеристики частиц топливного выброса при аварии на Чернобыльской АЭС // Атом. энергия. 1990. Т. 69, вып. 1. С. 36–40.
23. Горяченкова Т. А., Павлоцкая Ф. И., Казинская И. Е. и др. Формы нахождения плутония в «горячих» частицах // Тр. Конф. «Геохимические пути миграции искусственных радионуклидов в биосфере»: Тез. докл. Пушино, 1991. С. 66.
24. Богатов С. А., Боровой А. А. О некоторых свойствах топливосодержащих частиц, образовавшихся при аварии на Чернобыльской АЭС, и особенностях формирования топливного выброса: Препринт ИАЭ–5344/3. М., 1991.
25. Геохимические пути миграции искусственных радионуклидов в биосфере. По материалам конференции, г. Гомель, 1990 г. // Геохимия. 1991. № 10. С. 1514–1518.
26. Лоцилов Н. А., Кашпаров В. А., Поляков В. Д. и др. Ядерно-физические характеристики горячих частиц, образовавшихся в результате аварии на ЧАЭС // Радиохимия. 1992. Т. 34, вып. 4. С. 113–119.
27. Лоцилов Н. А., Кашпаров В. А., Юдин Е. Б. и др. Фракционирование радионуклидов в чернобыльских топливных горячих частицах // Радиохимия. 1992. Т. 34, вып. 5. С. 125–134.
28. Петряев Е. П., Лейнова С. Л., Соколик Г. А. и др. Состав и свойства радиоактивных частиц, обнаруженных в южных районах Беларуси // Геохимия. 1993. № 7. С. 930–939.
29. Хитров Л. М., Черкезян В. О., Румянцев О. В. «Горячие» частицы после аварии на Чернобыльской АЭС // Геохимия. 1993. № 7. С. 963–971.
30. Черкезян В. О., Кашкаров Л. Л., Шалаева Т. В. и др. Изучение состава и распределения чернобыльских «горячих» частиц // Геохимия. 1994. № 2. С. 252–261.
31. Мелкозернистые ядерные эмульсии: Препринт РИ № 1. Л., 1967.

32. Власова И. Э., Калмыков С. Н., Сапожников Ю. А. и др. Радиография и локальный микроанализ для обнаружения и исследования актинидсодержащих микро-частиц // Радиохимия. 2006. Т. 48, вып. 6. С. 551–556.
33. Дымков Ю. М. Природа урановой смоляной руды. М.: Атомиздат, 1973. 240 с.
34. Ильинский Г. А. Определение плотности минералов. Л.: Недра, 1975. 119 с.
35. Ластман Б. Радиационные явления в двуокиси урана. М.: Атомиздат, 1964. 286 с.
36. Котельников Р. Б., Башлыков С. Н., Каштанов А. И. и др. Высокотемпературное ядерное топливо. Изд. 2-е. М.: Атомиздат, 1978. 432 с.
37. Вдовенко В. М., Кривохатский А. С., Савоненков В. Г. и др. Об искусственных аналогах тектитов // Радиохимия. 1968. Т. 10, вып. 6. С. 688–695.
38. Кривохатский А. С., Савоненков В. Г. Классификация радиоактивных техногенных продуктов из развала IV блока Чернобыльской АЭС: Препринт РИ-216. М.: ЦНИИАтоминформ, 1990. 39 с.
39. Stoffler D. Progressive Metamorphism and Classification of Shocked and Brecciated Crystalline Rocks at Impact Craters // J. Geophys. Res. 1971. Vol. 76, N 23. P. 5541–5551.
40. Боровой А. А., Галкин Б. Я., Криницын А. П. и др. Новообразованные продукты взаимодействия топлива с конструкционными материалами 4-го блока Чернобыльской АЭС // Радиохимия. 1990. Т. 32, вып. 6. С. 103–113.
41. Боровой А. А., Галкин Б. Я., Криницын А. П. и др. Новообразованные продукты взаимодействия топлива с конструкционными материалами 4-го блока Чернобыльской АЭС. III. Бассейн-барботер – радиационная обстановка и топливосодержащие массы // Радиохимия. 1991. Т. 33, вып. 4. С. 197–210.
42. Савоненков В. Г., Кривохатский А. С., Дубасов Ю. В. и др. Радиоактивные техногенные новообразования из развала 4-го блока Чернобыльской АЭС // Радиохимия. 1991. Т. 33, вып. 4. С. 140–149.
43. Арутюнян Р. В., Большов Л. А., Васильев А. Д. и др. Физические модели тяжелых аварий на АЭС. М.: Наука, 1992. –232 с.
44. Андерсон Е. Б., Заславский В. Г., Никитин С. А. и др. Использование лазерного пробоотбора при изотопных исследованиях урановых минералов // Геохимия. 1986. № 12. С. 1805–1809.
45. Андерсон Е. Б., Боровой А. А., Бураков Б. Е. и др. Техногенные продукты взаимодействия ядерного топлива и конструкционных материалов, образовавшиеся в результате аварии на Чернобыльской АЭС // Радиохимия. 1992. Т. 34, вып. 5. С. 144–155.
46. Андерсон Е. Б., Плескачевский Л. А., Римский-Корсаков А. А. Ликвидация последствий аварии на Чернобыльской АЭС // Радиовый институт им. В. Г. Хлопина. К 75-летию со дня основания. СПб., 1997. С. 272–285.
47. Бродин В. В. Генезис минеральных индивидов и агрегатов. М.: Наука, 1966. С. 51–71.
48. Козлова О. Г. Рост и морфология кристаллов. Изд-во Львовского ун-та, 1961. 136 с.
49. Ядерная геология / Под ред. И. Е. Старика. М.: Изд-во иностр. литературы, 1953. 555 с.
50. Anderson E. B., Burakov B. E., Pazukhin E. M. High Uranium Zircon (Zr,U)SiO₄ from “Chernobyl Lavas” // Radiochim. Acta. 1993. Vol. 60. P. 149–151.

51. Бураков Б. Е., Андерсон Е. Б., Заморянская М. В. и др. Синтез кристаллических матриц для иммобилизации актиноидов // Тр. Радиового института им. В. Г. Хлопина. 2006. Т. 11. С. 65–104.
52. Андерсон Е. Б., Бураков Б. Е., Пазухин Э. М. Вторичные изменения топливосодержащих масс (ТСМ) 4-го блока Чернобыльской АЭС // Радиохимия. 1992. Т. 34, вып. 5. С. 135–138.
53. Андерсон Е. Б., Савоненков В. Г., Шабалев С. И. Разработка геологической концепции и геологических критериев захоронения радиоактивных отходов в гранитоидных формациях (на примере Нижнеканского массива Енисейского края): Препринт РИ-255. М.: ЦНИИАтоминформ, 2000.

Radiogeochemical Study of Fuel-Containing New Formations Caused by Chernobyl NPP Accident

V. G. Savonenkov, E. B. Anderson, E. A. Smirnova, S. I. Shabalev

A radiochemical study of fuel-containing particles of fallout and glass masses generated by the accident at the 4th unit of the CNPP was made. Landscape-geochemical grounds were assigned, and placer testing was used for sampling of radioactive particles in the 30-km area (1986–1991). Genetic varieties of the fuel-containing new formations are determined, and their mineral and petrographic characteristics, chemical and radiochemical compositions, and specific features of conditions for their generation are presented. Changes in irradiated fuel, from explosive dispersion to complete assimilation in silicate melts, which took place as a result of man-caused metamorphism, are considered.

II.2. Выщелачивание радионуклидов из почвы и частиц радиоактивных выпадений 30-километровой зоны ЧАЭС (1987–1991 гг.)

Е. А. Смирнова, Ю. В. Дубасов, В. Г. Савоненков

Приведены данные по выщелачиванию радионуклидов из проб почвы, частиц облученного топлива и графита 30-километровой зоны ЧАЭС растворами различного состава. Определена степень выщелачивания радионуклидов из проб почвы растворами, близкими по составу к природным. Установлено, что радионуклиды могут находиться в выщелачивающих растворах в псевдоколлоидном состоянии. Приведены результаты определения степени выщелачивания радионуклидов за период с 1987 по 1991 г. Установлено, что степень выщелачивания радионуклидов незначительна ($n \cdot 10^{-2} \%$) и практически не изменилась за 5 лет. Показано, что частицы уран-циркониевого состава более устойчивы к выщелачивающим агентам, чем урановые.

Одной из важнейших задач при изучении радиационной обстановки в районе ЧАЭС является исследование и прогнозирование поведения радионуклидов в окружающей среде, в частности, выявление подвижных форм радионуклидов, способных к миграции. Очевидно, что количество этих форм и последующая их миграция зависят от формы нахождения радионуклидов в выпадениях и почвах (грунтах), физико-химических свойств почв и грунтовых вод, природы радионуклида и других факторов. Основными источниками радиоактивного загрязнения поверхностной части почвенно-грунтового слоя 30-километровой зоны являются различные виды техногенных новообразований: диспергированное ядерное топливо, частицы смешанного уран-циркониевого состава, реакторный графит, радиоактивные частицы, образовавшиеся в результате захвата радионуклидов атмосферной пылью, радиоактивные аэрозоли.

Основной вклад в загрязнение ближней 10-километровой зоны вносят выпадения топливосодержащих частиц. Можно полагать, что первоначально матрица UO_2 будет практически нерастворима в водных растворах, близких по составу природным грунтовым водам. Однако с течением времени под воздействием процессов выветривания происходит разрушение частиц, окисление и самораспыление, что приводит к переходу радионуклидов в более подвижное состояние. По этой причине возрастает значение исследований процессов выщелачивания радионуклидов растворами различного состава как из топливосодержащих частиц, так и из грунтового-почвенных проб, в которых эти частицы находятся.

Лабораторные исследования начались после отбора первых проб в 30-километровой зоне в 1986 г. [1, 2]. Значительная часть грунтов ближней зоны представлена кварцевыми песками, супесями и суглинками отложений поймы р. Припять, которые на отдельных участках перекрыты лесными сероземами или заболочены. В большинстве случаев отбирали пробы грунта или почвы, в которых преобладала сравнительно однотипная песчаная фракция. Далее по тексту все пробы названы почвами. Отбор проводили путем снятия поверхностного слоя на глубину ~ 1 см с площади $\sim 0,3$ м². Для выбора условий эксперимента были использованы две пробы, взятые на различных расстояниях от 4-го блока: дальняя на расстоянии 14,6 км и ближняя на расстоянии 1,2 км от 4-го блока. Мощность экспозиционной дозы на площадках отбора различалась почти на два порядка. Были, естественно, различия и в составе радиоактивных выпадений, в частности, в ближней пробе основной вклад в загрязнение вносили топливосодержащие частицы. В качестве выщелачивающих растворов использовали водные вытяжки опада листьев (рН 5,52), сосновых веток и хвои (рН 4,45), торфа

(рН 5,01), чернозема (рН 6,21) из района ЧАЭС. Из-за сложности состава водных вытяжек идентификации присутствующих в них соединений не проводили. Оценивали только количество органической и минеральной составляющих.

Для дальнейшей пробы выбраны следующие условия постановки опыта: твердая фаза : жидкая фаза = 1 : 25; время перемешивания – 20 ч, температура – комнатная. Максимальная степень выщелачивания установлена при использовании водной вытяжки опада листьев. Она составляла (%): для ^{144}Ce – 0,9, ^{137}Cs – 4,2, ^{106}Ru – 4,1, ^{95}Zr , ^{95}Nb – 0,9. Для других растворов степень выщелачивания была существенно ниже.

Для пробы, отобранной в 1,2 км от 4-го блока, наблюдалось возрастание концентрации радионуклидов, перешедших в раствор по мере увеличения времени контакта фаз от 1 до 12 ч. При последующем перемешивании в течение 20 ч в зависимости от природы радионуклида и используемого раствора концентрация радионуклидов в растворе либо продолжала возрастать (^{137}Cs), либо начинала падать (^{144}Ce , ^{106}Ru , ^{95}Zr , ^{95}Nb). Уменьшение концентрации, очевидно, было вызвано образованием в процессе выщелачивания осадков, способных захватывать указанные радионуклиды, или их сорбцией на компонентах почвы. После 20-часового контакта фаз в растворах было обнаружено 0,1–0,3 % ^{144}Ce , 1,0–4,5 % ^{137}Cs , 0,2–5,5 % ^{106}Ru , $6 \cdot 10^{-3}$ –0,2 % ^{95}Zr , ^{95}Nb .

После пропускания растворов с выщелоченными радионуклидами через фильтры с сечением пор 0,02 мкм либо концентрация радионуклидов в фильтрах существенно снижалась, либо радионуклиды вообще не обнаруживались. Эксперименты по выщелачиванию показали, что при контактах почвы с водой образуются коллоиды, обладающие высокой сорбционной способностью и удерживающие радионуклиды в растворах. В природных условиях мигрирующие радионуклиды будут находиться как в ионном состоянии, так и в виде псевдоколлоидов.

Следует отметить, что результаты опытов по выщелачиванию не дают однозначной информации о степени устойчивости топливосодержащих частиц к выщелачивающим агентам. Это связано с тем, что при выщелачивании радионуклидов из частиц наряду с переходом их в раствор будет иметь место обратный процесс удержания радионуклидов компонентами почвы: слюдястыми, глинистыми минералами, органо-минеральными соединениями и пр.

Для исключения явлений перераспределения радионуклидов в процессе эксперимента пробы почв были заменены шлиховыми концентратами топливосодержащих частиц и отдельными крупными частицами, имеющими визуальную минералогическую характеристику [3, 4]. В 1989 г. была поставлена серия опытов по выщелачиванию шлихов, полученных при отмывке крупных проб (10–25 кг) песчаной почвы, отобранных на пяти контрольных полигонах. Присутствующие в шлихах плотные, хорошо окатанные тяжелые акцессорные минералы не обладали сорбционной способностью по отношению к радионуклидам. Массовая доля топливосодержащих частиц в шлихах варьировала от $6,5 \cdot 10^{-6}$ до $2,6 \cdot 10^{-1}$ %.

Степень выщелачиваемости водной вытяжкой чернозема для ^{106}Ru лежала в интервале 0,03–4,6, а для ^{137}Cs – 0,03–1,4 %. Величина выщелачиваемости этих радионуклидов увеличивалась по мере удаления полигонов от 4-го блока, то есть по мере уменьшения размеров топливосодержащих частиц выпадений. ^{144}Ce в растворах не обнаружен.

Для шлиха пятого полигона (5 км от 4-го блока) в качестве выщелачивающих растворов были использованы вытяжка чернозема, а также растворы 0,1 моль/л и 1 моль/л соляной кислоты. Степень выщелачивания водной вытяжкой чернозема (%)

для ^{106}Ru составляла $4 \cdot 10^{-3}$, ^{137}Cs – $1 \cdot 10^{-3}$, ^{144}Ce – $1 \cdot 10^{-4}$, суммарной α -активности – $8 \cdot 10^{-2}$, урана – $7 \cdot 10^{-2}$. При контакте с растворами соляной кислоты степень выщелачивания радионуклидов возрастала и составляла единицы и десятки процентов. В результате всех обработок в раствор перешло до 30–40 % ТУЭ и около 14 % урана. Степень выщелачивания актинидов возрастала в ряду $\text{U} < \text{Pu} < \text{Am} < \text{Cm}$.

Одновременно в 1987 г. проводились исследования по выщелачиванию радионуклидов из топливосодержащих частиц и графита, выделенных из проб песчаных почв, отобранных в 1986 г. по западному следу выпадений на расстояниях 0,5–2,0 км от 4-го блока [5]. Эксперименты проводили на пробах двух основных разновидностей частиц: имеющих микрoзернистую структуру, матовый блеск, пониженную твердость и частиц с высокой твердостью и стеклянным блеском. В качестве выщелачивающих растворов использовали водную вытяжку чернозема (рН 6,2). Для топливосодержащих частиц степень перехода в раствор (%) составляла: ^{106}Ru и ^{137}Cs – $(1-2) \cdot 10^{-2}$; ^{95}Zr и ^{144}Ce – $(3-4) \cdot 10^{-3}$; урана – $(1-4) \cdot 10^{-3}$; суммарной α -активности (в основном плутония) – $(4-7) \cdot 10^{-3}$, что коррелировало с величиной выщелачивания ^{144}Ce . Степень выщелачивания радионуклидов из графита была значительно выше. Для ^{106}Ru она лежала в интервале 0,6–1,5, для ^{137}Cs – 1,7–4,4, для ^{95}Zr – 0,9–1,7, для ^{144}Ce – 1,2–1,8 %.

Позднее в качестве выщелачивающих растворов использовали дистиллированную воду, аммонийно-ацетатный буфер (рН 4,8) и раствор 1 моль/л соляной кислоты [6]. Эти реагенты были выбраны в связи с их широким применением при определении форм нахождения радионуклидов в почвах [7]. Степень выщелачивания из топливосодержащих частиц дистиллированной водой (%) лежала в интервалах: для ^{106}Ru – $(2,1-11) \cdot 10^{-3}$; ^{137}Cs – $(1,3-3,6) \cdot 10^{-2}$; ^{144}Ce – $(0,87-15) \cdot 10^{-3}$. При использовании буферного раствора степень выщелачивания (%) составила для ^{106}Ru – $(2,7-19) \cdot 10^{-2}$; ^{137}Cs – $(0,9-2,4) \cdot 10^{-2}$; ^{144}Ce – $(1,0-9,0) \cdot 10^{-2}$. На порядок выше была степень выщелачивания радионуклидов из частиц раствором 1 моль/л соляной кислоты.

Установлено, что для всех растворов степень выщелачивания радионуклидов ниже для частиц с высокой твердостью и стеклянным блеском, чем у менее прочных частиц с микрoзернистой структурой.

Для следующих экспериментов были взяты топливосодержащие частицы из проб грунта и шлихов, отобранных в 1990 г. по западному следу выпадений в районе «рыжего» леса [6]. При контакте частиц с водой ^{106}Ru и ^{144}Ce в растворах не были обнаружены, а степень перехода ^{137}Cs составила $6,2 \cdot 10^{-3}$ %, суммарной α -активности – $5 \cdot 10^{-3}$ %.

Для частиц графита ^{106}Ru также не был обнаружен, а степень выщелачивания для ^{137}Cs составила 0,3, для ^{144}Ce – 0,1 %.

После обработки топливосодержащих частиц последовательно растворами 0,1 и 1 моль/л соляной кислоты степень выщелачивания ^{106}Ru составила 0,8, ^{137}Cs – 1,4, ^{144}Ce – 0,9, суммарной α -активности – 1,0 %. Для реакторного графита эти значения соответственно составили 0,9, 9,8, 26,9 и 32,2 %.

Определена также степень выщелачивания из топливосодержащих частиц ^{237}Np , которая при контакте с водой составила $2,2 \cdot 10^{-2}$ %. Последовательная обработка растворами 0,1 и 1 моль/л соляной кислоты привела к переходу в раствор 0,6 % ^{237}Np .

Исследования, проведенные в 1987–1991 гг., показали, что степень выщелачивания радионуклидов из топливосодержащих частиц выпадений (0,2–0,4 мм) растворами, близкими по составу к природным водам, незначительна ($n \cdot 10^{-2}$ %) и практически не изменилась за четыре года. Основными источниками поступления в вод-

ные растворы радионуклидов являются микродисперсные частицы облученного топлива и загрязненный радионуклидами реакторный графит.

Последующие исследования с привлечением ультралокальных вещественно-структурных методов, альфа- и гамма-спектрометрических анализов обосновали выделение двух основных видов топливосодержащих макрочастиц [8]. Первый – облученное топливо, сохранившее структуру топливных таблеток и радионуклидный состав на момент аварии. Второй – новообразованные агрегаты переменного уран-циркониевого состава, в которых уран представлен оксидами U_4O_9 и UO_2 , циркон – α -цирконием и продуктами окисления. Характерен дефицит летучих радионуклидов – рутения и цезия.

Вполне очевидно, что структурно-генетические различия двух видов частиц должны влиять на их устойчивость, на степень выщелачивания радионуклидов. Для обоснования такой связи были поставлены специальные опыты на двух видах частиц из пробы, отобранной в 1991 г. в 2,7 км от 4-го блока по оси западного следа выпадений [9]. На этом участке плотность выпадений топливосодержащих частиц с размерами 0,003–1,0 мм составляла примерно 25 кг/га. В шлихах количество урановых и уран-циркониевых макрочастиц распределялось поровну. В пробах частиц каждого вида (6–7 мг) определяли содержание ^{106}Ru , ^{125}Sb , ^{134}Cs , ^{137}Cs , ^{144}Ce , ^{154}Eu , ^{155}Eu , ^{241}Am , Pu и U . В качестве выщелачиваемых растворов последовательно использовали вытяжки чернозема (рН 5,2), время контакта фаз 5,3 сут и древесины (рН 3,9), время контакта фаз 7,2 сут, а также растворы 0,2 моль/л серной кислоты и 7 моль/л азотной кислоты (табл. 1).

Следует отметить, что при контакте частиц с растворами наблюдается незначительное растворение урановой матрицы. Для урановых частиц степень перехода урана в водную вытяжку чернозема после суточной выдержки составила $3,2 \cdot 10^{-3} \%$, и снизилась до $2,3 \cdot 10^{-3} \%$ через 5,3 сут, что, очевидно, обусловлено образованием гидратированных оксидов урана на поверхности частиц. Не исключено, что при более длительной выдержке содержание урана в растворе было бы еще ниже.

Степень перехода в водную вытяжку чернозема гамма-излучающих радионуклидов более высокая, чем для урана. Это может быть связано с наличием двух механизмов перехода радионуклидов в раствор: в результате растворения урановой матрицы и выщелачивания из матрицы. При последующем контакте частиц диспергированного топлива (U) с водной вытяжкой древесины (рН 3,9) степень перехода урана в раствор несколько выше, чем при контакте с водной вытяжкой чернозема (рН 5,2), что, очевидно, связано с более низкими значениями рН раствора.

Для частиц уран-циркониевого состава ($U-Zr$) в водной вытяжке чернозема были обнаружены только изотопы цезия и урана, количества которых существенно ниже, чем для собственно топливных частиц. Наглядная разница в устойчивости двух видов частиц к выщелачивающим агентам наблюдается при воздействии растворов минеральных кислот. Из частиц диспергированного топлива (U) раствором серной кислоты ^{144}Ce , ^{241}Am , Pu и U извлекаются в большей степени, а ^{137}Cs – в меньшей, чем из уран-циркониевых частиц ($U-Zr$). Различие в степени перехода радионуклидов в раствор в зависимости от вида частиц наблюдается и для раствора 7 моль/л азотной кислоты, когда из урановых частиц в раствор перешло $>85 \%$ радионуклидов, а из уран-циркониевых – около 50 %. Переход в раствор основной части радионуклидов из уран-циркониевых частиц происходит только в присутствии иона F^- в растворе серной кислоты.

Таблица 1

Степень перехода радионуклидов в растворы при контакте их с урановыми (U)
и уран-циркониевыми (U-Zr) частицами, %

Радионуклид	Водная вытяжка чернозема		Водная вытяжка древесины		0,2 моль/л H ₂ SO ₄		7 моль/л HNO ₃		7 моль/л HNO ₃ + + 0,1 моль/л NH ₄ F	
	U	U-Zr	U	U-Zr	U	U-Zr	U	U-Zr	U	U-Zr
¹⁰⁶ Ru	6,2·10 ⁻³	–	–	–	–	–	–	–	–	–
¹²⁵ Sb	9,0·10 ⁻²	–	1,9·10 ⁻²	–	–	–	–	–	–	–
¹³⁴ Cs	2,4·10 ⁻²	5,1·10 ⁻²	5,8·10 ⁻³	–	–	–	–	–	–	–
¹³⁷ Cs	2,6·10 ⁻²	6,5·10 ⁻²	6,0·10 ⁻³	2,2·10 ⁻²	3,4	6,9	95,6	86,9	0,8	4,8
¹⁴⁴ Ce	9,3·10 ⁻³	–	6,8·10 ⁻³	3,9·10 ⁻³	3,2	1,1	87,2	52,4	9,4	38,6
²⁴¹ Am	–	–	3,5·10 ⁻²	–	6,3	1,3	85,2	46,3	8,5	42,3
Pu	–	–	–	–	4,2	1,5	90,7	57,4	5,0	37,6
U	2,3·10 ⁻³	3,6·10 ⁻⁴	7,6·10 ⁻³	–	2,2	0,6	91,4	41,4	6,2	52,0

Таким образом, проведенные исследования показали, что топливосодержащие макрочастицы выпадений, определяющие радиоактивное загрязнение ближней зоны ЧАЭС, в 1991 г. обладали достаточной устойчивостью к воздействию растворов, имитирующих водную фазу природной среды. При выбранных условиях проведения экспериментов степень перехода в растворы таких радионуклидов, как ^{106}Ru , ^{125}Sb , ^{137}Cs , ^{144}Ce и U , составила сотые и тысячные доли процента. В первые дни контакта частиц с растворами наблюдалось незначительное растворение урановой матрицы. Однако можно полагать, что при длительном контакте частиц с растворами при соответствующих условиях произойдет пассивация их поверхности за счет образования гидратированных оксидов урана.

Прочность удержания радионуклидов, за исключением изотопов цезия, уран-циркониевыми частицами выше, чем диспергированными топливом. Это обусловлено образованием в частицах смешанного состава труднорастворимых сплавов и прочных агрегатов облученных оксидов урана с цирконием, кремнием, магнием, а также появлением стеклофазы.

Топливные частицы с микроблочной структурой по сравнению с частицами уран-циркониевого состава легко измельчаются, что приводит к увеличению перехода радионуклидов в растворы. Именно эта разновидность частиц выпадений ближней зоны является источником поступления радионуклидов в грунтовые и почвенные воды.

Список литературы

1. Кривохатский А. С., Смирнова Е. А., Савоненков В. Г. и др. Устойчивость топливных частиц по отношению к выщелачивающим агентам // Всесоюз. совещание «Принципы и методы ландшафтно-геохимических исследований миграции радионуклидов». Суздаль, 1989. Тез. докл. М., 1989. С. 63.
2. Авдеев В. А., Бирюков Е. И., Кривохатский А. С. и др. Выщелачивание радионуклидов растворами различного состава из проб почвы, отобранной в районе Чернобыльской АЭС // Радиохимия. 1990. Т. 32, вып. 2. С. 59–64.
3. Кривохатский А. С., Савоненков В. Г., Смирнова Е. А. и др. Шлиховой метод анализа грунтов из района ЧАЭС и основные закономерности переноса // Всесоюз. совещание «Принципы и методы ландшафтно-геохимических исследований миграции радионуклидов». Суздаль, 1989. Тез. докл. М., 1989. С. 174.
4. Дубасов Ю. В., Кривохатский А. С., Савоненков В. Г. и др. Состояние и поведение частиц диспергированного топлива, выброшенного из 4-го блока Чернобыльской АЭС // Радиохимия. 1991. Т. 33, вып. 1. С. 96–101.
5. Авдеев В. А., Кривохатский А. С., Савоненков В. Г. и др. Выщелачивание радионуклидов из частиц ядерного топлива и реакторного графита, выделенных из проб 30-километровой зоны Чернобыльской АЭС // Радиохимия. 1990. Т. 32, вып. 2. С. 55–59.
6. Кривохатский А. С., Смирнова Е. А., Савоненков В. Г. и др. Выщелачивание радионуклидов из частиц ядерного топлива и реакторного графита, выделенных из проб 30-километровой зоны Чернобыльской АЭС. II. Результаты по выщелачиванию радионуклидов на 1989–1991 гг. // Радиохимия. 1992. Т. 34, вып. 5. С. 92–101.
7. Павлоцкая Ф. И. Формы нахождения и миграция радиоактивных продуктов глобальных выпадений в почвах: Автореф. докт. дис. М.: ГЕОХИ, 1981.

8. Дубасов Ю. В., Кривохатский А. С., Савоненков В. Г. и др. Разновидности топливных частиц в выпадениях ближней зоны Чернобыльской АЭС // Радиохимия. 1992. Т. 34, вып. 5. С. 102–103.
9. Кривохатский А. С., Савоненков В. Г., Смирнова Е. А. и др. Выщелачивание радионуклидов из двух видов топливосодержащих частиц выпадений ближней зоны Чернобыльской АЭС // Радиохимия. 1994. Т. 36, вып. 1. С. 76–81.

**Radionuclide Leaching from Soil and Particles of Radioactive Fallouts
in 30-km Area of CNPP (1987–1991)**

E. A. Smirnova, Yu. V. Dubasov, V. G. Savonenkov

Leaching of radionuclides by solutions of various compositions from samples of soil, irradiated fuel particles, and graphite taken within CNPP's 30-km area was studied. The degree of radionuclide leaching from soil samples by solutions simulating natural solutions was determined. Radionuclides in leaching solutions occur in the pseudo-colloidal state. The degree of radionuclide leaching-out during the period from 1987 to 1991 was determined. The degree of radionuclide leaching-out is very slight ($n \cdot 10^{-2}$ %) and did not change significantly during a period of 5 years. The particles of uranium-and-zirconium composition are more resistant to leaching agents in comparison with uranium-based particles.

II.3. Выщелачивание радионуклидов из техногенных новообразований, отобранных в подреакторных помещениях 4-го блока ЧАЭС

В. Г. Савоненков, Е. А. Смирнова, Ю. М. Рогозин

Приведены данные по выщелачиванию радионуклидов из образовавшихся в результате аварии на 4-м блоке ЧАЭС радиоактивных продуктов (бурое и зеленое стекло, пемзостекло, металлические гранулы) раствором 0,01 моль/л хлорида натрия. Проведено минералого-петрографическое исследование образцов, установлен их радиохимический состав. Определены степень и скорость выщелачивания радионуклидов из исследуемых образцов. Установлено, что из двух видов стекол (бурое, зеленое) наиболее устойчивым к выщелачиванию является зеленое стекло. Показано, что содержание радионуклидов в водной фазе может существенно превышать их допустимые количества в природной воде.

Пробы радиоактивных техногенных новообразований были отобраны из подреакторных помещений 4-го блока (парораспределительного коридора, бассейна-барботера) и исследовательских скважин в июне–июле 1988 г. В результате проведенных минералого-петрографических и радиохимических исследований выделены несколько типов техногенных новообразований, различающихся по минералогоструктурным особенностям, вещественному и радионуклидному составу [1, 2]. Установленные различия отражали характерные особенности условий образования отдельных типов и видов радиоактивных продуктов. Было доказано, что в процессе формирования силикатных расплавов произошло полное преобразование твэлов с последующей кристаллизацией топливосодержащих стекломасс, выделением новых техногенных минералов и металлической фазы. Термальный метаморфизм сопровождался разномасштабным фракционированием радионуклидов [3].

Для прогноза поведения радионуклидов при воздействии на техногенные новообразования водных растворов необходимы данные по устойчивости этих продуктов к выщелачивающим агентам. Для изучения выщелачивания были взяты пробы наиболее распространенных и характерных видов новообразований: двух видов различно окрашенных стекол (бурых и зеленых), пемзостекла и металлических гранул [4, 5].

По своему внешнему виду стекла, особенно темноокрашенные, напоминают природные обсидианы. Плотность массивных стекломасс 2800–2900 кг/м³, показатель преломления варьирует от 1,546 до 1,579. Излом раковистый, структура массивная или кавернозно-пористая.

Окраска стекла зависит от окислительно-восстановительных условий кристаллизации. В окислительных условиях образуются красно-бурые хлопьевидные (13–25 мкм) хромофоры из оксидов железа, которые окрашивают стекла. Восстановительная обстановка обусловлена присутствием мелкодисперсного черного графита, окрашивающего стекла совместно с красно-бурыми включениями в зеленые тона. В бурых и в зеленых стеклах присутствуют также микровключения уранинита, циркона, газовые и металлические включения сферической формы. Размеры металлических гранул варьируют в широких пределах – от долей микрона до 1,5–2 мм.

Пемзостекла, как и их природные аналоги, образовались в результате быстрого охлаждения расплава. Отобранные образцы представляют собой рыхлую пенообразную массу, обильно насыщенную газовыми и твердыми включениями, представленными минеральными частицами, металлическими гранулами, графитом, а также новообразованными микрокристаллами диоксида урана. Окраска неоднородная,

пятнистая, серая, красновато-серая. Кажущаяся плотность крупных образцов менее 1 г/см^3 , мелких обломков стекла – $\sim 2,5 \text{ г/см}^3$.

Проба макрогранул (1–2 мм) отобрана в помещении парораспределительного коридора. Гранулы имеют светло-серебристый цвет, металлический блеск, излом неровный, плотность $8,1 \text{ г/см}^3$. После травления на шлифованной поверхности проявляются очертания дендритовидных кристаллов железа, которое является основным компонентом гранул. В качестве примесей присутствуют Cr, Ni, Ti, Cu, Zn.

В табл. 1 приведены результаты определения удельного содержания γ -излучающих радионуклидов в образцах (из расчета на 26.04.86 г.), а также значения коэффициентов фракционирования $f_{106/144}$ и $f_{137/144}$ (на 26.04.1986). Видно, что стекла в значительной степени обеднены ^{106}Ru и в меньшей степени ^{137}Cs по сравнению с топливными частицами. Для металлических гранул характерно обогащение по ^{106}Ru . Близкий состав радионуклидов бурых стекол и пемзостекла позволяет предполагать о существовании единого для этих двух видов новообразований резервуара жидкого силикатного расплава.

Таблица 1

Удельное содержание γ -излучающих радионуклидов в исследуемых пробах, Бк/г, и значения коэффициентов фракционирования $f_{106/144}$ и $f_{137/144}$ (на 26.04.1986 г.)

Образец	^{60}Co	^{106}Ru	^{125}Sb	^{134}Cs	^{137}Cs	^{144}Ce	^{154}Eu	$f_{106/144}$	$f_{137/144}$
Бурое стекло	–	$1,6 \cdot 10^7$	–	$2,5 \cdot 10^7$	$5,3 \cdot 10^7$	$2,3 \cdot 10^9$	–	0,02	0,30
Зеленое стекло	–	$2,9 \cdot 10^6$	–	$8,4 \cdot 10^6$	$1,9 \cdot 10^7$	$1,0 \cdot 10^9$	–	0,10	0,25
Пемзостекло	–	$2,0 \cdot 10^7$	–	$2,7 \cdot 10^7$	$5,5 \cdot 10^7$	$2,6 \cdot 10^9$	–	0,02	0,28
Металлические гранулы	$2,9 \cdot 10^6$	$5,7 \cdot 10^8$	$3,7 \cdot 10^6$	$1,0 \cdot 10^5$	$3,7 \cdot 10^5$	$1,0 \cdot 10^7$	$3,8 \cdot 10^4$	190	0,49

Опыты по выщелачиванию проводили следующим образом. Для проб стекол и металлических гранул образцы в виде пластинок с известной площадью поверхности, соприкасающейся с раствором, помещали в емкость из тефлона, куда добавляли раствор 0,01 моль/л хлорида натрия (рН 6,5). Опыты проводили в статических условиях. Через заданные интервалы времени определяли содержание радионуклидов в растворах. На основании полученных данных оценивали степень и скорость выщелачивания радионуклидов из образцов.

Скорость выщелачивания рассчитывали по формуле:

$$R_n = \frac{a_n / A_0}{\frac{F}{m} \cdot \tau_n},$$

где R_n – скорость выщелачивания, $\text{г}/(\text{см}^2 \cdot \text{сут})$;

a_n – активность, выщелоченная в период времени n , Бк;

A_0 – начальная активность образца, Бк;

F – поверхность образца, находящаяся в контакте с раствором, см^2 ;

m – масса образца, г;

τ_n – продолжительность выщелачивания, сут.

1. Бурое стекло.

При проведении опытов с бурым стеклом по мере выдержки образца в емкости раствор приобретал желтоватую окраску, которая, по-видимому, связана с переходом в раствор небольших количеств солей железа(III). Общее время контакта образца с раствором составило 39 сут. Конечное значение pH раствора равнялось 4,23. Раствор был прозрачным. Результаты спектрального анализа раствора дали следующие результаты (содержание элементов в расчете на оксиды, мас%): $\text{Fe}_2\text{O}_3 - 1 \cdot 10^{-2}$, $\text{PbO} - 1,5 \cdot 10^{-3}$, $\text{MgO} - 1,2 \cdot 10^{-3}$, $\text{NiO} - 1 \cdot 10^{-5}$, $\text{CaO} - 1 \cdot 10^{-3}$. Раствор содержал следовые количества Al, Mn, Cs, Co, Mo, Ti, V, Sn, W, Nb. После обработки поверхность стекла осталась практически без изменений, только на включениях металлических гранул образовался отчетливый «чехол» гидроксидов железа.

В табл. 2 и 3 приведены результаты определения степени и скорости выщелачивания радионуклидов из бурого стекла. Видно (табл. 2), что наиболее высокое значение степени выщелачивания наблюдалось для ^{106}Ru , ^{137}Cs и ^{144}Ce выщелачивались в равной степени. Удельное содержание радионуклидов в растворе (январь 1990 г.) составило: $^{106}\text{Ru} - 9,3 \cdot 10^2$ Бк/мл, $^{137}\text{Cs} - 6,5 \cdot 10$ Бк/мл, $^{144}\text{Ce} - 1,2 \cdot 10^2$ Бк/мл, U – 6,1 мкг/мл, Pu – 1,6 Бк/мл.

Таблица 2

Степень перехода радионуклидов в раствор, % от исходного содержания в образце бурого стекла (на январь–февраль 1990 г.)

Время выдержки, сут	^{106}Ru	^{137}Cs	^{144}Ce	U	Pu	^{244}Cm
0,1	$4,0 \cdot 10^{-2}$	$2,2 \cdot 10^{-3}$	$1,2 \cdot 10^{-3}$	–	–	–
1,1	$1,9 \cdot 10^{-1}$	$3,6 \cdot 10^{-3}$	$2,8 \cdot 10^{-3}$	–	–	–
4,1	$4,0 \cdot 10^{-1}$	$4,5 \cdot 10^{-3}$	$4,3 \cdot 10^{-3}$	–	–	–
8,1	$7,8 \cdot 10^{-1}$	$5,0 \cdot 10^{-3}$	$5,0 \cdot 10^{-3}$	–	$2,7 \cdot 10^{-3}$	–
15,1	1,1	$5,5 \cdot 10^{-3}$	$6,3 \cdot 10^{-3}$	–	–	–
22,1	2,2	$5,3 \cdot 10^{-3}$	$6,2 \cdot 10^{-3}$	$3,0 \cdot 10^{-1}$	$2,9 \cdot 10^{-3}$	–
29,1	2,8	$5,4 \cdot 10^{-3}$	$6,2 \cdot 10^{-3}$	–	–	–
39,1	3,2	$4,9 \cdot 10^{-3}$	$6,1 \cdot 10^{-3}$	$2,1 \cdot 10^{-1}$	$2,6 \cdot 10^{-3}$	$6,2 \cdot 10^{-3}$

Таблица 3

Скорость выщелачивания радионуклидов из бурого стекла в зависимости от времени выдержки, г/(см²·сут)

Время выдержки, сут	^{106}Ru	^{137}Cs	^{144}Ce	U	Pu
0,1	$4,5 \cdot 10^{-4}$	$2,4 \cdot 10^{-5}$	$1,3 \cdot 10^{-5}$	–	–
1,1	$2,3 \cdot 10^{-4}$	$4,3 \cdot 10^{-6}$	$3,4 \cdot 10^{-6}$	–	–
4,1	$1,3 \cdot 10^{-4}$	$1,5 \cdot 10^{-6}$	$1,4 \cdot 10^{-6}$	–	–
8,1	$1,3 \cdot 10^{-4}$	$8,2 \cdot 10^{-7}$	$8,3 \cdot 10^{-7}$	–	$4,6 \cdot 10^{-6}$
15,1	$9,6 \cdot 10^{-5}$	$4,9 \cdot 10^{-7}$	$5,6 \cdot 10^{-7}$	–	–
22,1	$1,3 \cdot 10^{-4}$	$3,2 \cdot 10^{-7}$	$3,8 \cdot 10^{-7}$	$1,8 \cdot 10^{-5}$	$1,8 \cdot 10^{-6}$
29,1	$1,3 \cdot 10^{-4}$	$2,5 \cdot 10^{-7}$	$2,9 \cdot 10^{-7}$	–	–
39,1	$1,3 \cdot 10^{-4}$	$1,7 \cdot 10^{-7}$	$2,1 \cdot 10^{-7}$	$7,3 \cdot 10^{-6}$	$8,0 \cdot 10^{-7}$

Как следует из приведенных в табл. 3 данных, наибольшая скорость перехода радионуклидов в раствор наблюдалась в первые моменты контакта фаз, а затем она либо постепенно снижалась (^{137}Cs , ^{144}Ce), либо с течением времени в первом приближении оставалась постоянной (^{106}Ru).

Сравнение скоростей выщелачивания радионуклидов показало, что выщелачивание происходило с заметно различающимися скоростями [$n \cdot 10^{-7} - n \cdot 10^{-4}$ г/(см²·сут)], то есть процесс индивидуален. Можно полагать, что эта индивидуальность может быть обусловлена как различной приуроченностью основной массы радионуклидов к различным по природе компонентам стекла, так и различным механизмом процесса выщелачивания. Так как выщелачивание производилось нейтральными растворами, не исключено, что в процессе выщелачивания происходило частичное вторичное перераспределение гидролизующихся элементов. Относительно высокая степень выщелачивания ^{137}Cs и ^{144}Ce в первые моменты контакта образца с раствором и последующее снижение скорости выщелачивания позволили предположить, что на начальной стадии происходило выщелачивание радионуклидов из поверхностного слоя матрицы и последующий медленный перенос их из объема стекла.

2. Зеленое стекло.

В опытах с зеленым стеклом после двадцатисуточного контакта фаз концентрация радионуклидов в растворе составила (Бк/мл): 1,1 ^{144}Ce , 0,4 ^{106}Ru , 3,1 ^{137}Cs и 0,35 ^{134}Cs . Степень выщелачивания равнялась, %: $4,7 \cdot 10^{-3}$ ^{144}Ce , $2,3 \cdot 10^{-1}$ ^{106}Ru , $2,1 \cdot 10^{-2}$ ^{137}Cs и $1,8 \cdot 10^{-2}$ ^{134}Cs . Поверхность стекла после выщелачивания практически не изменялась. Раствор был бесцветный, pH раствора 5,75.

По ранее приведенной формуле была оценена скорость выщелачивания радионуклидов при времени контакта образца с раствором 20 сут, которая составила, г/(см²·сут): для ^{144}Ce – $3,2 \cdot 10^{-8}$, для ^{106}Ru – $1,6 \cdot 10^{-6}$, для ^{137}Cs – $1,5 \cdot 10^{-7}$. Из полученных данных следовало, что скорость выщелачивания ^{106}Ru из зеленого стекла на два порядка, ^{144}Ce – на один порядок ниже, чем из бурого стекла, то есть зеленое стекло более устойчиво к выщелачиванию радионуклидов, чем бурое стекло.

3. Металлические гранулы.

При проведении опыта с образцом металлической гранулы в процессе выдержки образца в растворе на дне емкости появился осадок, количество которого постепенно возрастало. Как показали результаты исследований, при времени контакта образца с раствором 24 сут выпавший осадок представлял собой гидроксид железа(III). После окончания выщелачивания 2/3 поверхности образца покрылись бурым, буро-красным налетом оксидов и гидроксидов железа. 1/3 часть поверхности осталась без изменений, что, по-видимому, было обусловлено наличием сплава железа с легирующими добавками, исключаяющими окисление.

Всего из образца было выщелочено $5,1 \cdot 10^{-3}$ % ^{137}Cs , $9,5 \cdot 10^{-3}$ % ^{125}Sb , $2,5 \cdot 10^{-1}$ % ^{60}Co и $5,8 \cdot 10^{-3}$ % ^{106}Ru . Выщелоченный ^{137}Cs практически полностью находился в растворе, ^{125}Sb – в осадке. В осадке содержалось около 75 % ^{106}Ru и 80 % ^{60}Co от выщелоченных из образца количеств. ^{144}Ce ни в осадке, ни в растворе обнаружить не удалось. Очевидно, выщелоченная его часть захватилась оксидной пленкой, покрывающей поверхность гранулы.

Из результатов эксперимента следовало, что при коррозионном разрушении новообразованных металлических гранул степень выхода радионуклидов в водную фазу и их содержание в водной фазе будут зависеть от химических свойств радионуклидов, их перераспределения в процессе коррозии.

4. Пемзостекло.

Из-за хрупкости пемзостекла опыты ставились в динамических условиях при пропускании раствора 0,01 моль/л хлорида натрия через стеклянную колонку, заполненную частицами пемзостекла. Раствор пропускали непрерывно сверху вниз сквозь слой пробы в течение 11,3 сут. Через определенные интервалы времени определяли содержание радионуклидов в отдельных порциях вытекающего из колонки раствора. Средняя скорость прохождения раствора 0,03 мл/мин.

Всего за 11,3 сут в 500 мл раствора перешло $2,4 \cdot 10^{-1} \% \text{ }^{106}\text{Ru}$, $3,2 \cdot 10^{-2} \% \text{ }^{134}\text{Cs}$, ^{137}Cs и $2,9 \cdot 10^{-3} \% \text{ }^{144}\text{Ce}$ от их исходных количеств в пемзостекле. Удельная активность 500 мл раствора после выщелачивания составила 70 Бк/мл ^{106}Ru , 26 Бк/мл ^{137}Cs , 110 Бк/мл ^{144}Ce (на апрель 1990 г.).

Изучение процесса выщелачивания радионуклидов подтвердило многокомпонентный состав новообразованных стекломасс, сложный характер распределения в них радионуклидов и существенные различия в свойствах отдельных компонентов. Основным условием формирования стекловидной фазы являлось быстрое охлаждение расплава и отделение летучих компонентов. Известное значение имеет также химический состав расплавленных масс. Стекломассы подреакторных помещений 4-го блока образовывались и кристаллизовались в экстремальных условиях, отличных от известных природных или технических процессов. Например, по оценкам количества вновь образованного уранинита, в радиоактивных новообразованных стеклах начальная концентрация U_3O_8 составляла не менее 5–7 мас%. В природных обсидианах концентрации урана составляют всего $3,3 \cdot 10^{-3} \%$, а в искусственных силикатных расплавах растворимость урана составляет в среднем 0,03 мас% [6]. Большое количество кристаллитов и скелетных форм уранинита подтверждают высокую скорость кристаллизации стекломасс. Экстремальные условия кристаллизации, обилие различных по составу включений будут в дальнейшем способствовать дезинтеграции и разрушению стекломасс, увеличению выщелачивания радионуклидов. При этом уровень перехода радионуклидов в водную фазу может существенно превысить допустимые нормы их содержания в воде. Проникающие в объект «Укрытие» атмосферные осадки способны выщелачивать радиоактивные материалы, переносить радионуклиды в грунтовые воды и с ними далее по направлению стока в р. Припять. О начале водных процессов перераспределения и миграции в стекломассах свидетельствует образование на стеклах поверхностных пленок вторичных урановых минералов [7].

Вполне очевидно, что до решения проблемы объекта «Укрытие» требуется надежная гидроизоляция мест нахождения радиоактивных новообразований, создание инженерных барьеров на путях возможной миграции радионуклидов в окружающую среду.

Список литературы

1. Савоненков В. Г., Кривохатский А. С. Классификация радиоактивных техногенных продуктов из развала IV блока Чернобыльской АЭС: Препринт РИ-216. М.: ЦНИИАтоминформ, 1990. 39 с.
2. Савоненков В. Г., Кривохатский А. С., Дубасов Ю. В. Радиоактивные техногенные новообразования из развала 4-го блока Чернобыльской АЭС // Радиохимия. 1991. Т. 33, вып. 4. С. 140–149.
3. Дубасов Ю. В., Савоненков В. Г., Смирнова Е. А. Систематизация радиоактивных продуктов аварии на Чернобыльской АЭС // Радиохимия. 1996. Т. 38, вып. 2. С. 101–116.

4. Рогозин Ю. М., Смирнова Е. А., Савоненков В. Г. и др. Выщелачивание радионуклидов из некоторых новообразованных продуктов, извлеченных из реакторной зоны 4-го блока Чернобыльской АЭС. I. Выщелачивание радионуклидов из стеклоподобных продуктов // Радиохимия. 1991. Т. 33, вып. 1. С. 160–167.
5. Рогозин Ю. М., Смирнова Е. А., Савоненков В. Г. и др. Выщелачивание радионуклидов из некоторых новообразованных продуктов, извлеченных из реакторной зоны 4-го блока Чернобыльской АЭС. II. Выщелачивание из пемзостекла и гранул металла // Радиохимия. 1993. Т. 35, вып. 1. С. 166–171.
6. Юдинцев С. В. Растворимость уранинита в водонасыщенном гранитном расплаве // ДАН СССР. 1986. Т. 287, № 1. С. 205–207.
7. Андерсон Е. Б., Бураков Б. Е., Пазухин Э. М. Вторичные изменения топливосодержащих масс (ТСМ) 4-го блока Чернобыльской АЭС // Радиохимия. 1992. Т. 34, вып. 5. С. 135–138.

Radionuclide Leaching from the Manmade New Formations Sampled in Subreactor Premises of the 4th Unit of CNPP

V. G. Savonenkov, E. A. Smirnova, Yu. M. Rogozin

Radionuclide leaching-out by 0.01 M solution of sodium chloride from radioactive products (brown and green glass, pumice glass, metal granules) generated by the accident at the 4th unit of the CNPP was studied. A mineral and petrographic study of the samples was made, and their radiochemical composition was determined. The degree and rate of radionuclide leaching from the samples studied were determined. Green glass was found to be more resistant to leaching than the brown glass. The concentrations of radionuclides in the aqueous phase can substantially exceed their permissible concentrations.

II.4. Результаты комплексных исследований, проведенных на контрольных полигонах Радиевого института им. В. Г. Хлопина в 30-километровой зоне ЧАЭС (1986–1991 гг.)

Е. А. Смирнова, Ю. В. Дубасов, Ю. М. Рогозин, В. Г. Савоненков

Для проведения комплексных систематических исследований в 30-километровой зоне ЧАЭС были выделены и обустроены контрольные ландшафтно-геохимические полигоны. Представлены результаты изучения радиационных полей, распределения радионуклидов по гранулометрическим классам и фракциям почвенно-грунтовых проб, по глубине наиболее характерных почвенных разрезов на полигонах и по западному следу выпадений. Для выявления подвижных форм радионуклидов проведены специальные натурные исследования – промывки почвы растворами различного состава. Установлены основные формы нахождения радионуклидов в грунтах: водорастворимые, обменные, кислоторастворимые и пр. На основании анализа экспериментальных данных выделены основные виды миграции, определяющие дальнейшее изменение радиационной обстановки в 30-километровой зоне.

Уровни и характер радиоактивного загрязнения в 30-километровой зоне ЧАЭС отличались крайним разнообразием, что в значительной степени затрудняло какое-либо прогнозирование динамики поведения радионуклидов во внешней среде. Для наиболее адекватной оценки состояния значительной по размерам территории (около 3 тыс. км²) осенью 1986 г. экспедиционной группой сотрудников Радиевого института в пределах 30-километровой зоны были выбраны и обустроены пять контролируемых ландшафтно-геохимических полигонов. В 1990 г. в связи с особым водным режимом пойменных участков реки на левом берегу р. Припять был выбран шестой полигон (рис. 1).



Масштаб 1 : 275 000

Рис. 1. Схема расположения полигонов Радиевого института в 30-километровой зоне ЧАЭС.

Выбор полигонов определялся с учетом следующих основных требований:

- полигоны располагаются внутри 30-километровой зоны в различных направлениях и на различных расстояниях от 4-го блока ЧАЭС;
- полигоны должны представлять типичные ландшафтные особенности зоны с возможно более полным охватом характерных почвенно-растительных участков;
- средние уровни экспозиционной дозы гамма-излучения на различных полигонах должны по возможности отличаться друг от друга;
- площадь полигона должна составлять около 0,5 км², расстояние точек пробоотбора одна от другой – 100 м;
- на полигонах должны быть расположены достаточно большие открытые участки слабо задернованного грунта, открытого для сбора выпадений, по которым можно было бы проводить сравнительные исследования.

Этих требований придерживались при выборе площадок в пределах зоны и выделении полигонов на конкретном участке местности (табл. 1).

Таблица 1

Положение и основные характеристики полигонов Радиевого института

№	Название полигона	Площадь, км ²	Азимут от 4-го блока	Среднее расстояние от 4-го блока, км	Площадь, занятая лесом, %	Средняя мощность дозы, мР/ч, в октябре 1986 г.
I	Корогод	0,88	ЮЗ 194°	15,0	1	1–2
II	Белая Сорока	0,45	СЗ 304°	17,5	50	5–7
III	Зимовище	0,50	СВ 40°	5,3	15	30
IV	Буряковка	0,30	ЮЗ 259°	13,5	35	70
V	Садоводство	0,38	ЮЗ 248°	5,0	30	100
VI	Пойма	0,35	СВ 25°	3,0	0	Образован в 1990 г.

Для выполнения периодических радиометрических измерений и пробоотбора на каждом полигоне была создана однотипная прямоугольная сеть наблюдений с шагом 100 м. Измерения и пробоотбор проводили в узлах этой сети. Количество контрольных точек измерений варьировало на разных полигонах от 30 до 88. Систематические исследования, проведенные на полигонах в течение шести лет, включали:

- изучение радиационных полей, их сезонные изменения и прогнозные оценки мощностей доз,
- периодический отбор проб почвы с целью определения их гранулометрического и радиохимического состава,
- комплексные исследования радиоактивных частиц выпадений,
- оценка плотности выпадений частиц и отдельных радионуклидов, включая трансурановые элементы,
- изучение вертикальной миграции радионуклидов по профилю почвы,
- определение форм нахождения радионуклидов в различных типах почв,
- исследование выщелачивания радионуклидов из проб почвы и частиц радиоактивных выпадений,
- прогнозные оценки миграционных процессов и эффективности геохимических барьеров.

1. Радиационная обстановка на полигонах

Мощность экспозиционной дозы определяли на стандартной высоте 1 м над поверхностью земли и на уровне земли. Экранирующее действие снежного покрова оценивали по данным измерения мощности дозы на высоте 1 м и на поверхности земли при наличии снежного покрова и без него. Результаты гамма-съемки, проведенной в октябре 1986 г. (на 173-й день после аварии), использовали в качестве опорных для сравнения с результатами последующих гамма-съемок. Результаты измерений приведены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты гамма-съемки, проведенной в октябре 1986 г., и повторных измерений, проведенных в мае и октябре 1987 г. и мае и августе 1988 г. (Д = 26.04.86.)

Полигон	Количество измерений	Мощность дозы, мР/ч, на день Д + 173	Стандартное отклонение, %	Отношение мощности экспозиционной дозы при повторных измерениях к измеренной на день Д + 173			
				Д + 380	Д + 538	Д + 758	Д + 839
I, Корогод	38	0,6	21	0,20	0,17	0,13	0,13
II, Белая Сорока	49	1,7	24	0,34	0,30	0,24	0,19
III, Зимовище	58	11,4	28	0,24	0,15	0,08	0,10
IV, Буряковка	30	28	19	0,22	0,17	0,14	0,13
V, Садоводство	37	111	24	0,22	0,16	0,09	0,11

Анализ приведенных в табл. 2 данных позволил сделать вывод о том, что на всех полигонах спад мощности дозы обусловлен в основном радиоактивным распадом. Полигоны I, II, IV и V довольно однородны по радионуклидному составу и имеют загрязнение «топливного» типа. Полигон II отличался избытком радионуклидов цезия, что приводило к более медленному спаду на нем мощности дозы.

В 1990 г. результаты измерений, проведенных на новом VI полигоне, показали, что для стандартных условий – 1 м над поверхностью грунта – диапазон экспозиционной дозы гамма-излучения составил 0,9–2,5 мР/ч. Увеличение экспозиционной дозы было обнаружено на береговом склоне, покрытом травянистой растительностью – до 25 мР/ч.

По измерениям, проведенным на пяти полигонах, влияния процесса миграции на результирующее гамма-поле не обнаружено. Этот вывод был положен в основу прогнозной оценки среднего значения мощности дозы вплоть до 1996 г. (табл. 3).

Таблица 3

Прогнозные значения мощности экспозиционной дозы на контрольных полигонах до 1996 г., мР/ч

Полигоны	10.86 г.	05.90 г.	05.91 г.	05.92 г.	05.93 г.	05.94 г.	05.95 г.	05.96 г.
I	0,6	0,043	0,037	0,033	0,031	0,029	0,027	0,026
II	1,7	0,28	0,25	0,23	0,20	0,19	0,19	0,18
III	11,4	0,81	0,71	0,64	0,59	0,55	0,52	0,50
IV	28	2,2	1,9	1,7	1,6	1,5	1,4	1,3
V	111	8,5	7,5	6,8	6,3	5,9	5,6	5,4

Начиная с осени 1986 г., два раза в год на полигонах проводили отбор проб грунта. В большинстве случаев глубина отбора составляла 1,5 см. Отдельные пробы отбирали до глубины 7 см. Результаты анализа показали значительную неравномерность загрязнения («пятнистость») по площади. Для некоторых выборок коэффициент вариации превышал 1. Причем значение коэффициента вариации не менялось во времени. Дисперсия, обусловленная высокой неоднородностью первичных выпадений, значительно превосходила возможные изменения в распределении активности, происходящие под действием природных факторов. Сравнение результатов, полученных в разное время, не выявило значимого отличия средних значений поверхностной активности для ^{137}Cs , ^{106}Ru и ^{144}Ce . Этот факт указывал на то, что крупномасштабного (на расстоянии примерно 1 км) перераспределения на поверхности не происходило. Детальная статистическая обработка различных выборок проб, отобранных за время работы на полигонах, показала, что в тот период не происходило значимых перераспределений и на меньших расстояниях.

В табл. 4 приведены значения поверхностного загрязнения полигонов I–V, усредненные за пять лет (1986–1990 гг.), и полигона VI на 1990 г. Видно, что наиболее загрязненным является полигон V. Полигоны IV и VI, на которых эти значения в 3–4 раза меньше, близки по уровню загрязнения. Далее по мере снижения уровня загрязнения следуют полигоны III, II и I.

Таблица 4

Усредненные за пять лет значения поверхностного загрязнения полигонов I–V и полигона VI (1990 г.), Ки/км²

Полигоны	^{106}Ru	^{134}Cs	^{137}Cs	^{144}Ce
I	1,3	0,6	4,6	1,6
II	1,8	2,6	22,0	2,1
III	16,4	9,3	71,5	27,3
IV	44,8	26,8	224,7	66,1
V	157,6	87,4	680,0	231,4
VI	43,8	21,9	205,0	62,2

Определение содержания актиноидных элементов в поверхностных пробах полигонов, как прямое, так и на основании установленных корреляций с γ -излучающими радионуклидами, позволило сделать вывод о степени загрязнения контролируемых территорий α -излучателями, в частности плутонием (табл. 5).

Таблица 5

Результаты оценки загрязнения полигонов $^{239,240}\text{Pu}$

№	Полигон	Радиоактивность $^{239,240}\text{Pu}$, Ки/км ²
I	Корогод	0,07
II	Белая Сорока	0,16
III	Зимовище	0,66
IV	Буряковка	0,66
V	Садоводство	8,1
VI	Пойма	1,9

Сравнение результатов исследования поверхностного распределения радионуклидов, полученных в 1990 г., с аналогичными результатами, полученными в предыдущие годы, показало, что заметные перемещения радионуклидов за границы полигонов за прошедшее время отсутствовали.

2. Исследования распределения радионуклидов по классам и фракциям в грунтово-почвенных пробах

Грунтово-почвенные пробы представлены минеральными частицами с различными размерами (различными гранулометрическими классами) и с различной плотностью (различными плотностными фракциями). Исследования распределения радионуклидов по классам и фракциям позволили определить радиохимический состав и радиоактивность компонентов почвы, ведущих себя различно в процессах водного переноса и отложения осадков, то есть прогнозировать изменения характера радиоактивного загрязнения поверхности рельефа со временем.

Пробы отбирались в реперных точках полигонов путем снятия с площадок размером примерно $0,3 \text{ м}^2$ открытого поверхностного слоя песчаных почв на глубину не более 2 см. На шестом полигоне «Пойма» для сравнения были взяты две пробы. Первая – на участке редколесья вблизи берега реки, а вторая – на заболоченном участке вблизи дамбы. На каждом полигоне было отобрано по 20–25 кг поверхностных песчаных грунтово-почвенных проб.

Разделение проб на классы и фракции проведено по стандартным методам, используемым в геолого-минералогической практике. Исходную пробу первоначально делили на два класса с размерами зерен больше и меньше 0,1 мм. Из крупного класса делением в тяжелых жидкостях выделяли фракцию с плотностью $<2,9 \text{ г/см}^3$, представленную в основном зернами кварца и полевых шпатов, и фракцию с плотностью $>2,9 \text{ г/см}^3$, состоящую из тяжелых акцессорных минералов. В тяжелую фракцию выделялись присутствующие в пробах топливосодержащие частицы.

Максимальное количество мелких частиц (класс $<0,1 \text{ мм}$) – примерно 40 % – характерно для первого полигона (табл. 6). Для других полигонов эта величина лежала в интервале 4–22 %. Содержание тяжелой фракции изменялось в небольших пределах – 0,20–0,35 мас%. Результаты определения содержания γ -излучающих радионуклидов в отдельных классах и тяжелых фракциях показали, что удельная активность сравнительно небольшой по массе тяжелой фракции превосходила в десятки и сотни раз удельную активность других фракций и классов. Это было обусловлено присутствием в тяжелой фракции топливных частиц.

Необходимо отметить важную роль мелкого класса с размером частиц менее 0,1 мм, с которым связана значительная часть трех исследуемых радионуклидов (табл. 7). При этом абсолютное количество мелкодисперсных частиц (класс «глин») может не иметь существенного значения. Так, например, для полигона I количество класса $<0,1 \text{ мм}$ в пробе составляло 40,4 %, а для полигона II – 4,0 мас%. Однако с этим классом одного и другого полигонов связаны близкие количества радионуклидов. Так, для полигона I в мелкой фракции содержалось до 85,0 % ^{106}Ru , 73,0 % ^{137}Cs и 76,3 % ^{144}Ce , для полигона II – 74,7 % ^{106}Ru , 48,5 % ^{137}Cs и 66,6 % ^{144}Ce .

Таблица 6

Усредненные за пять лет результаты фракционно-гранулометрического анализа проб почвы полигонов I–V и полигона VI (1990 г.), мас%

Полигон	Массовая доля, %			
	классы, мм		тяжелая фракция	
	<0,1	>0,1		
I	40,4	59,4	0,24	
II	4,0	95,8	0,20	
III	9,7	90,0	0,35	
IV	5,2	94,6	0,22	
V	5,3	94,5	0,20	
VI	1-я проба	21,9	77,9	0,20
	2-я проба	6,4	93,4	0,20

Таблица 7

Распределение γ -излучающих радионуклидов по классам и фракциям, %

Полигоны	^{106}Ru			^{137}Cs			^{144}Ce			
	классы, мм		тяжелая фракция	классы, мм		тяжелая фракция	классы, мм		тяжелая фракция	
	<0,1	>0,1		<0,1	>0,1		<0,1	>0,1		
I	85,0	11,0	4,0	73,0	23,8	3,2	76,3	23,7	7,0	
II	74,7	18,3	7,0	48,5	49,5	2,0	66,6	28,1	5,3	
III	80,7	16,3	3,0	52,2	42,3	5,5	53,2	37,8	9,0	
IV	48,0	25,0	27,0	40,0	46,3	13,7	44,5	27,5	28,0	
V	60,0	23,0	17,0	58,2	31,3	10,5	55,0	28,0	17,0	
VI	1-я проба	58,0	23,0	19,0	62,0	37,0	1,0	71,0	26,0	3,0
	2-я проба	27,0	30,0	43,0	24,0	43,0	33,0	25,0	33,0	42,0

3. Распределение радионуклидов по глубине

Наряду с изучением поверхностного распределения радионуклидов в 30-километровой зоне ЧАЭС большое значение приобретал вопрос исследования вертикальной миграции радионуклидов по профилю поверхностного грунтового-почвенного слоя. Для этого в течение 1987–1991 гг. было изучено распределения радионуклидов по вертикальным разрезам, сделанным в различных типах почв (песчаных, дерново-подзолистых, черноземе, торфе) на полигонах и по западному следу выпадений [1–3]. Пробы отбирали на глубину 20–40 см. Весь разрез разделяли на отдельные слои толщиной от 0,4 до 2 см. Далее определяли содержание радионуклидов в отдельных слоях разрезов методом гамма-спектрометрического анализа. Как правило, содержание радионуклидов в пробах, отобранных с глубины более 10 см, находилось на

уровне фоновых значений. На основании полученных данных определяли зависимости удельной активности проб от глубины пробоотбора.

Как было установлено, для разрезов, сделанных в песчаной или дерново-подзолистой почве, в пределах 0–2 см наблюдалось существенное снижение содержания радионуклидов (^{106}Ru , ^{137}Cs , ^{144}Ce) с глубиной. Характер уменьшения содержания исследуемых радионуклидов в данном слое сохранялся во времени и в первом приближении формально описывался полулогарифмической зависимостью удельного содержания от глубины. В качестве примера на рис. 2 приведены данные по распределению радионуклидов в вертикальном разрезе, сделанном в 1992 г. в песчаной почве на полигоне IV.

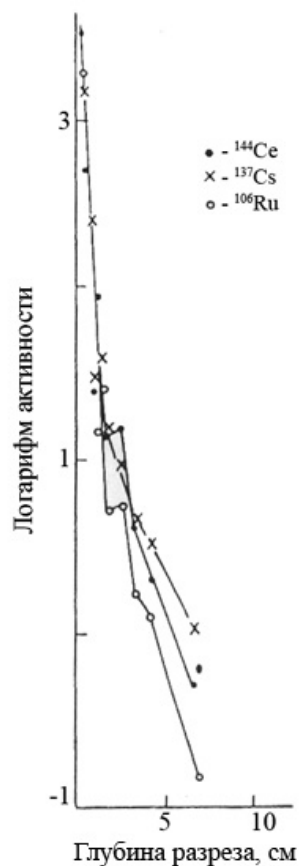


Рис. 2. Распределение радионуклидов по глубине в песчаной почве полигона IV «Буряковка».

Так как в интервале указанной глубины сохранилось постоянство отношений содержания радионуклидов, равное отношениям для топлива, то можно было полагать, что вертикальное заглубление радионуклидов произошло преимущественно в виде топливных частиц. Это подтверждалось автордиографиями почвенного среза, на которых фронт гравитационного заглубления тяжелых топливосодержащих частиц через 6 месяцев после выпадения фиксировался на глубине 0,5 см (рис. 3). На отдельных участках залегания незадернованных, однородных, хорошо фильтрующих кварцевых песков тяжелые топливосодержащие частицы уходили на глубину 3–4 см, а на откосах песчаных берегов пруда-охладителя и р. Припять — до глубины 20–25 см (1991 г.).



Рис. 3. Авторадиография вертикального среза верхнего почвенного слоя полигона «Садоводство». Гравитационное заглубление на сентябрь 1986 г. Концентрация ^{144}Ce в верхнем слое почвы в пересчете на момент аварии составляла $2,1 \cdot 10^4$ Бк/г, загрязнение полигона $^{239,240}\text{Pu}$ составляло 0,08 Ки/га.

За пределами гравитационного «проседания» топливосодержащих частиц происходит своеобразное фракционирование радионуклидов. Как правило, снижение содержания ^{137}Cs в пробах разрезов с глубиной происходило более медленно, чем ^{144}Ce и ^{106}Ru . Однако ^{137}Cs проникает значительно глубже этих радионуклидов.

По сравнению с песчаными и дерново-подзолистыми почвами распределение радионуклидов по торфяным и черноземным разрезам носило более «размытый» характер, свидетельствующий о различном поведении анализируемых радионуклидов в иных геохимических условиях (рис. 4).

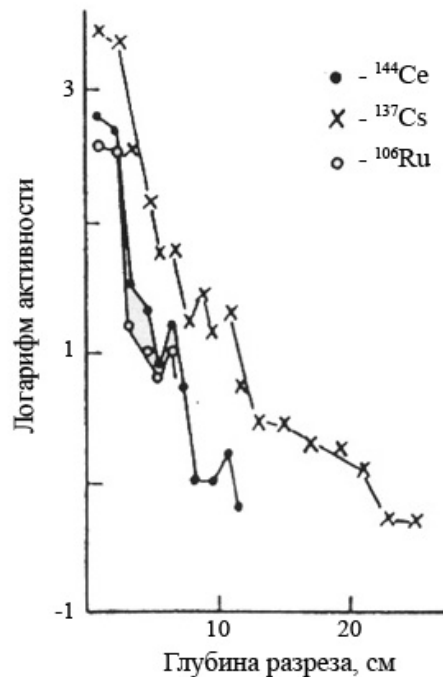


Рис. 4. Распределение радионуклидов по глубине в торфяной почве полигона V «Садоводство».

В ноябре 1990 г. на участке левобережной поймы р. Припять (полигон VI) были отобраны пробы трех вертикальных разрезов, сделанных в дерново-подзолистой почве. Первый разрез был сделан на участке, который в случае подъема воды в р. Припять на 2–2,3 м мог быть затоплен, второй разрез – на наиболее возвышенной части полигона, третий – на небольшом возвышении между двумя затопленными участками. Для всех трех разрезов наблюдалось существенное снижение содержания радионуклидов с глубиной. При этом уменьшение содержания ^{137}Cs происходило более плавно, чем ^{106}Ru и ^{144}Ce . Характер уменьшения удельного содержания радионуклидов с глубиной описывался полулогарифмической зависимостью, как и для дерново-подзолистых почв полигонов IV «Буряковка» и V «Садоводство». Такая зависимость прослеживалась до глубины примерно 2 см для ^{106}Ru и ^{144}Ce и до 3,8–4,0 см для ^{137}Cs . Однако глубже она не сохранялась.

В разрезах 1 и 2 основная доля радионуклидов ($\geq 90\%$) сосредоточена в верхней части разреза в интервале 0–2 см. Удельное содержание ^{137}Cs на глубине 7–8 см составляло 0,3 Бк/г. В разрезе 3 распределение радионуклидов по глубине носило более «размытый» характер. В интервале 0–2 см сосредоточено 60–80 % радионуклидов. На глубине 3–4 см присутствовало 3–5 % ^{106}Ru и ^{144}Ce и примерно 12 % ^{137}Cs от их количеств во всем разрезе. Удельное содержание ^{137}Cs на глубине 7–8 см составляло 0,5 Бк/г.

Установлено, что коэффициенты фракционирования ^{90}Sr $f_{90/144}$ и $f_{90/137}$ для поверхностных частей разрезов существенно меньше единицы. Однако с увеличением глубины наблюдалось обогащение слоев разрезов ^{90}Sr как относительно ^{144}Ce , так и ^{137}Cs . Максимальное значение $f_{90/144}$ составляло 5,5.

Более сложное по сравнению с дерново-подзолистыми почвами распределение радионуклидов в черноземах. Пробы огородного чернозема были отобраны в 1991 г. по западному следу выпадений («рыжий» лес). Исследования показали, что различные радионуклиды имеют свой специфический характер распределения. До 90 % радионуклидов содержалось на глубине 0–2 см, из которых 50 % приходилось на слой в интервале 1–2 см. На глубине 3–4 см было обнаружено до 3–4 % ^{137}Cs , ^{106}Ru и ^{144}Ce от содержания их количеств во всем разрезе. Содержание ^{137}Cs на глубине 7–8 см составляло 2,5 Бк/г, на глубине 18–20 см – 0,6 Бк/г. В верхних слоях разреза коэффициенты фракционирования $f_{106/144}$ и $f_{137/144}$ близки к единице. На глубине 3–3,5 см наблюдалось обеднение ^{137}Cs относительно ^{144}Ce , а в интервале 4–5 см – наоборот, обогащение ^{137}Cs . Верхние слои разреза были обеднены ^{90}Sr относительно ^{144}Ce , но на глубине 4–5 см $f_{90/144}$ приближался к единице. Такое «пестрое» распределение радионуклидов может быть связано с различным характером миграции радионуклидов в сложной природной системе черноземных почв и одновременно с различными формами радиоактивных выпадений на этом участке западного следа.

В результате проведенных исследований миграции радионуклидов в вертикальных разрезах почв было установлено, что к 1991 г. независимо от типа почвы и природы радионуклида их основное количество ($\geq 90\%$) находилось в приповерхностной части (0–3 см). Однако в пределах этого слоя наблюдались различия в распределении радионуклидов, зависящие от характера почвенного покрова. Так, в песчаной и дерново-подзолистой почве в слое на глубине 0–2 см находилось 90 % радионуклидов от всего их количества в разрезах. В этом же интервале глубин в черноземе на бывшем пахотном поле – около 80 %, в торфе и черноземе на бывшем огороде – около 40 %. Как правило, в торфе и черноземе распределение радионуклидов по глубине носило более размытый характер, чем в случае песчаной и дерново-подзоли-

той почвы. Глубина проникновения радионуклидов достигала 15–20 см. Наибольшее проникновение в глубь разрезов наблюдалось для ^{137}Cs .

То, что в течение пяти лет основное количество радионуклидов было сосредоточено в верхнем слое профиля разреза, указывало на малую скорость миграции радионуклидов. Оценка скорости вертикальной миграции радионуклидов по профилю почвы могла быть сделана только после более длительного изучения распределения радионуклидов по разрезам. При этом требовалось изучение таких вопросов, как фильтрационные и сорбционные свойства почв, их удерживающая способность, влияние почвенных кислот на поглощение радионуклидов почвой и др.

С целью выявления подвижных и потенциально подвижных форм радионуклидов в почве 30-километровой зоны ЧАЭС был использован метод вертикальной промывки слоя почвы растворами различного состава с последующим изучением распределения радионуклидов по профилю почвы [4].

Натурные исследования проводили в 1987 и 1989 годах на полигонах IV «Буряковка» и V «Садоводство». Для искусственных промывок были выбраны участки с песчаной почвой и черноземом. В качестве промывных растворов использовали воду, растворы нитрата аммония (2 г/л) и гидроксида натрия (1 г/л). При промывке водой мигрировали водорастворимые формы радионуклидов, при промывке нитратом аммония в раствор переходили радионуклиды, находящиеся в почве в обменной форме, а при промывке щелочью могли мигрировать радионуклиды, связанные с органическими соединениями. Общий расход растворов составлял 40–80 л, время промывки – 4–8 ч.

Результаты промывки песчаной почвы на полигонах IV и V показали, что пропускание воды не привело к существенному перераспределению радионуклидов по профилю почвы. Однако при промывке раствором нитрата аммония наблюдалось существенное заглубление фронта загрязнения разрезов радионуклидами (до 15–30 см). Каждый радионуклид имел свою характерную зависимость изменения содержания по глубине разреза (рис. 5).

В 1989 г. исследования по вертикальному распределению радионуклидов по профилю почвы после промывки были продолжены. При промывке чернозема на огороде раствором нитрата аммония характер распределения радионуклидов по разрезу изменился в большей степени, чем при промывке песчаной почвы. Произошло перераспределение радионуклидов по слоям разреза. Углубился фронт загрязнения разреза ^{137}Cs , так что на глубине 10 см в слое разреза толщиной 1 см содержалось до 1,5–2,0 % ^{137}Cs от содержания в разрезе.

Осенью 1989 г. на полигоне V была проведена промывка слоя чернозема на бывшем пахотном поле растворами нитрата аммония и щелочи. Промывку проводили в двух точках растворами нитрата аммония и щелочи и в одной точке последовательно раствором щелочи и далее раствором нитрата аммония. Промывка раствором нитрата аммония привела к заглублению фронта загрязнения разреза радионуклидами. Если до промывки примерно 80 % радионуклидов было сосредоточено в верхнем слое (0–2 см), то после промывки радионуклиды «размылись» по профилю почвы, 25–30 % радионуклидов от содержания во всем разрезе находились в слое с глубиной 3–4 см. Следовые количества радионуклидов были обнаружены в слое с глубиной 9–10 см.

Промывка раствором щелочи также изменила, но в меньшей степени, чем промывка раствором нитрата аммония, характер распределения радионуклидов по слоям разреза.

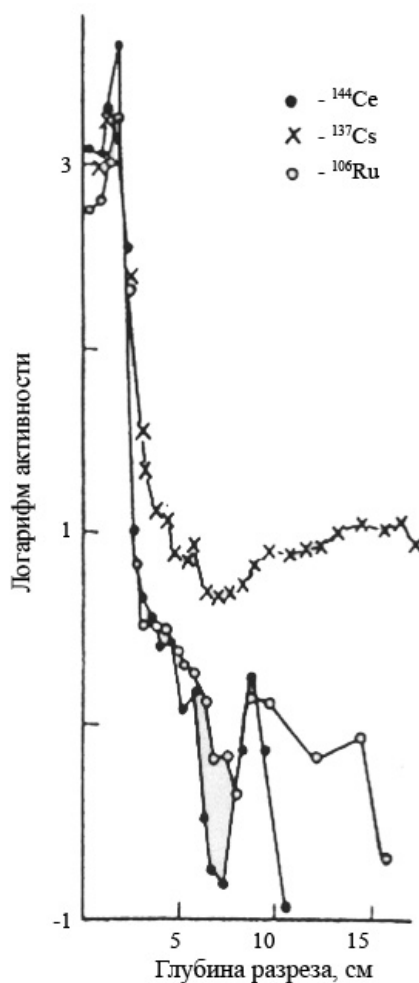


Рис. 5. Вертикальное распределение радионуклидов в песчаной почве полигона IV «Буряковка» после промывки раствором нитрата аммония.

Отличался от исходного и характер распределения радионуклидов по слоям разреза в результате последовательной промывки профиля почвы растворами щелочи и нитрата аммония. На глубине 7–8 см было обнаружено до 10–15 % ^{106}Ru и ^{144}Ce и примерно 5 % ^{137}Cs от содержания во всем разрезе.

Таким образом, результаты промывок вертикального слоя почвы 30-километровой зоны ЧАЭС свидетельствовали о наличии в почве подвижных форм радионуклидов. То, что промывка водой профиля почвы не привела к существенному перераспределению радионуклидов в разрезах, свидетельствовало об отсутствии или незначительных количествах в почве водорастворимых форм радионуклидов. Промывки растворами нитрата аммония и щелочи указывали на наличие в почвах радионуклидов как в обменной форме, так и в форме соединений с органическими веществами почв.

Можно было полагать, что появление этих форм обусловлено процессами изменения топливных частиц под воздействием внешних и внутренних факторов, сопровождающимися переходом радионуклидов в подвижное состояние, фиксацией их в той или иной степени на компонентах почвы с последующим переходом в раствор путем десорбции при промывке раствором нитрата аммония и растворением в растворе щелочи органических соединений, связывающих радионуклиды.

4. Формы нахождения радионуклидов в пробах почвы 30-километровой зоны ЧАЭС

Результаты, полученные при вертикальных промывках почвы, свидетельствовали о том, что в почве радионуклиды находятся как в обменной форме (промывка раствором нитрата аммония), так и в связанном с органическими соединениями состоянии. В связи с этим было целесообразно более подробно изучить формы их нахождения в почве.

Для исследования форм нахождения радионуклидов использовали пробы вертикальных разрезов, сделанных в 1986–1990 гг. в различных типах почв (песчаных, дерново-подзолистых, черноземе, торфе) контрольных полигонов и по западному следу выпадений [5, 6]. Как правило, формы нахождения определяли в пробах до глубины 3–4 см. Определение форм нахождения в пробах с более глубоких горизонтов было затруднено из-за низкой удельной активности проб. Для исследований использовали методы, применяемые в почвоведении и геохимии, основанные на селективном выщелачивании элементов при последовательной обработке проб растворами различного состава [7].

В качестве обрабатывающих растворов были выбраны дистиллированная вода, ацетатно-аммонийный буфер (рН 4,8) и раствор 1 моль/л соляной кислоты. В соответствии с используемыми растворами в пробе определяли количество водорастворимых форм радионуклидов (обработка водой), обменных и легкорастворимых (обработка буферным раствором), непрочно сорбированных оксидами железа и алюминия, глинистыми минералами (обработка раствором 1 моль/л соляной кислоты).

Радионуклиды в пробах почвы могут быть связаны не только с минеральной, но и с органической составляющей. Поэтому наряду с вышеперечисленными реагентами использовали раствор 0,1 моль/л щелочи (NaOH), содержащий 0,05 моль/л $\text{Na}_2\text{C}_2\text{O}_4$, и раствор Тамма. Это позволяло определить долю радионуклидов, связанных с аморфными соединениями (органическими природными кислотами – гумусовыми, низкомолекулярными и т. д., их соединениями, гидроксидами железа и алюминия), покрывающими в виде пленок минеральные частицы и растворяющимися в вышеупомянутых реагентах. Были проведены также исследования по выявлению связей радионуклидов с отдельными компонентами органического вещества изучаемых проб.

Результаты исследований показали, что радионуклиды (^{106}Ru , ^{137}Cs , ^{144}Ce) находятся в почве в следующих формах: водорастворимой, обменной и легкорастворимой, кислоторастворимой, в составе аморфных соединений, покрывающих в виде пленок минеральные частицы почвы, и в прочносвязанной форме.

Установлено, что относительное содержание той или иной формы зависело в первую очередь от природы радионуклида, типа почвы, интервала пробоотбора, времени, прошедшего после аварии, и расстояния от 4-го блока. Последний фактор в значительной мере определял количества и соотношения различных форм радиоактивных выпадений.

Для всех исследованных радионуклидов и типов почв наименьшая доля радионуклидов в пробах приходилась на водорастворимые формы. Результаты определения форм нахождения в поверхностных пробах песчаных почв, отобранных в период 1987–1990 гг. на пяти контрольных полигонах, показали, что количество водорастворимых форм радионуклидов в пробах зависит от природы радионуклида и места отбора пробы. Для ^{106}Ru количество этих форм составляло 0,5–8 %, для ^{137}Cs – 0,2–0,7 %, для ^{144}Ce – 0,1–4,0 %. Наиболее высокое содержание водорастворимых форм было характерно для полигонов I–III (юго-запад 15 км, северо-запад 17,5 км и северо-восток 5,3 км).

Количество обменных форм радионуклидов в пробах лежало в пределах 0,5–23 %: для ^{106}Ru – 0,5–7, ^{137}Cs – 1,4–23, ^{144}Ce – 3,6–16 %. Наибольшее количество обменных форм ^{137}Cs содержалось в пробе полигона II (северо-запад 17,5 км), а ^{144}Ce – в пробе полигона V (юго-запад 5 км).

В пробах, взятых с глубины разрезов в дерново-подзолистой почве и в черноземе, по сравнению с поверхностными пробами увеличивалось количество водорастворимых и обменных форм радионуклидов. Особенно наглядно это было видно на примере ^{144}Ce и ^{106}Ru в пробе, взятой в черноземе с глубины 7–8 см, где 45–50 % радионуклидов присутствовали в подвижной форме (водорастворимая + обменная + легкорастворимая). Для проб разрезов, сделанных в песчаной почве, увеличения количества подвижных форм радионуклидов с глубиной не наблюдалось.

В пробах, отобранных в районе «рыжего» леса, формы нахождения радионуклидов определяли на целинном участке и с глубины 0,65–0,75 м разреза в траншее, содержащей грунт, захороненный при дезактивации загрязненного участка «Рыжий лес К-1». Обе пробы были представлены песчано-торфянистой почвой. Как было установлено, основное количество радионуклидов находилось в пробах в прочносвязанной форме. Для пробы целинного участка количество этой формы для ^{137}Cs составляло примерно 80 %, для ^{144}Ce – 84 %. Для пробы из траншеи – примерно 90 % для ^{137}Cs и 76 % для ^{144}Ce . Было отмечено, что в пробе из траншеи значительное количество ^{144}Ce (~23 %) находилось в подвижной форме.

Важную роль в поглощении радионуклидов, особенно ^{144}Ce , играют аморфные соединения. В пробах полигонов с органическими веществами связано до ~18 % ^{144}Ce , 3–7 % ^{106}Ru , 0,3–4 % ^{137}Cs . В пробах из района «рыжего» леса с аморфными соединениями связано до 13–14 % ^{106}Ru , 17–30 % ^{125}Sb , 5–10 % ^{137}Cs и 16–18 % ^{144}Ce . Результаты изучения распределения радионуклидов по компонентам органических веществ показали, что ^{106}Ru приурочен главным образом к фракции гуминовых кислот, ^{125}Sb , ^{137}Cs и ^{144}Ce – к фракции фульвокислот.

Результаты исследований форм нахождения радионуклидов показали, что в различных типах почв присутствуют лишь потенциально подготовленные к миграции формы радионуклидов. Основное количество радионуклидов в 1990–1991 гг., как правило, находилось в прочносвязанной форме.

Обобщая полученные за пять лет данные, можно выделить несколько основных видов и механизмов миграции радионуклидов в 30-километровой зоне:

- твердофазная гравитационная миграция топливосодержащих частиц высокой плотности в дезинтегрированных, в первую очередь песчаных почвах и грунтах. Локальные вертикальные перемещения частиц, либо горизонтальный перенос водными потоками на отдельных специфических участках рельефа [8]. Растительный травянистый покров (дерновый слой) эффективно удерживает значительную часть выпадений даже на затопляемых береговых склонах пойменных участков. В ближних зонах выпадений тяжелые топливосодержащие макрочастицы останутся на длительное время основным фактором радиоактивного загрязнения почв и грунтов;
- твердофазная миграция микрочастиц различного происхождения, содержащих радионуклиды: фрагменты топливных частиц выпадений размером менее 3–5 мкм, радиоактивные аэрозоли, частицы глинистых минералов, захватившие радионуклиды, труднорастворимые соединения минеральных и органических кислот и пр. Перемещение мелкодисперсного радиоактивного материала (класс –1 мм) осуществляется водными потоками в процессе природных изменений строения почв и грунтов под влиянием климатических факторов. В дальнейшем смывы накапливаются на дне рек и водоемов, на пониженных, заболоченных участках рельефа;

- водная миграция радионуклидов. По наблюдениям 1986–1991 гг. она весьма ограничена. Эти ограничения связаны как с незначительными количествами водорастворимых форм, так и с присутствием в почвах и грунтах разнообразных природных барьеров, задерживающих мигрирующие в водной среде радионуклиды.

Список литературы

1. Рогозин Ю. М., Смирнова Е. А., Кривоухатский А. С. и др. Распределение радионуклидов в вертикальных разрезах почв 30-километровой зоны Чернобыльской АЭС по западному следу выброса. I. Песчаная почва // Радиохимия. 1993. Т. 35, вып. 2. С. 132–139.
2. Рогозин Ю. М., Смирнова Е. А., Кривоухатский А. С. и др. Распределение радионуклидов в вертикальных разрезах почв 30-километровой зоны Чернобыльской АЭС по западному следу выброса. II. Чернозем // Радиохимия. 1993. Т. 35, вып. 2. С. 139–143.
3. Рогозин Ю. М., Смирнова Е. А., Кривоухатский А. С. и др. Распределение радионуклидов в вертикальных разрезах почв 30-километровой зоны Чернобыльской АЭС по западному следу выброса. III. Дерново-подзолистая почва / Радиохимия. 1993. Т. 35, вып. 2. С. 144–149.
4. Рогозин Ю. М., Смирнова Е. А., Кривоухатский А. С. и др. Распределение радионуклидов в вертикальных разрезах почв 30-километровой зоны Чернобыльской АЭС по западному следу выброса. IV. Распределение радионуклидов после промывки вертикального слоя почвы растворами различного состава // Радиохимия. 1993. Т. 35, вып. 2. С. 149–156.
5. Кривоухатский А. С., Смирнова Е. А., Авдеев В. А. и др. Формы нахождения радионуклидов в пробах почвы, отобранных в 1986–1990 гг. в 30-километровой зоне Чернобыльской АЭС: Препринт РИ-232. М.: ЦНИИАтоминформ, 1991.
6. Кривоухатский А. С., Смирнова Е. А., Авдеев В. А. и др. Формы нахождения радионуклидов в пробах почвы, отобранных в 30-километровой зоне Чернобыльской АЭС (район «рыжего» леса) // Радиохимия. 1994. Т. 36, вып. 1. С. 71–75.
7. Павлоцкая Ф. И. Формы нахождения и миграция радиоактивных продуктов глобальных выпадений в почвах. Автореферат дис.... д. х. н. М.: ГЕОХИ, 1981.
8. Кривоухатский А. С., Савоненков В. Г., Смирнова Е. А. и др. Шлиховой метод анализа грунтов из района ЧАЭС и некоторые закономерности переноса // Радиохимия. 1990. Т. 32, вып. 5. С. 142–145.

Outcomes of Comprehensive Studies Conducted at the Pilot Sites of V. G. Khlopin Radium Institute, Located in 30-km CNPP's Area (1986–1991)

E. A. Smirnova, Yu. V. Dubasov, Yu. M. Rogozin, V. G. Savonenkov

Landscape-geochemical testing sites were picked out and equipped in order to conduct comprehensive systematic studies within the 30-km area of the CNPP. The radiation fields, radionuclide distribution over grain-size classes and fractions of soil-and-ground samples, over the depth of the most characteristic soil profiles at the testing sites, and throughout the western trace of the fallout were studied. Special on-site studies, namely, soil washing with various solutions, were carried out to reveal migrating forms of radionuclides. The forms of radionuclide occurrence: water-soluble water, exchangeable, acid-soluble, etc., were determined. General types of migration, determining further variation of radiation conditions within the 30-km area, were specified on the basis of experimental data.

II.5. Радиационная обстановка в Северо-Западном регионе Советского Союза и восточной части Балтийского моря в результате аварии на ЧАЭС

В. П. Тишков, А. В. Степанов, В. М. Гаврилов

После сообщения по радио об аварии на Чернобыльской АЭС исследования радиационной обстановки, проводившиеся лабораторией мониторинга окружающей среды в штатном режиме, были резко увеличены. Рейс судна «Боян» по Финскому заливу и Советской части Балтики до Калининграда был подготовлен и проведен в сжатые сроки. Для контроля радиационной обстановки на территории региона были организованы две экспедиции, охватившие северо-восточную и западную часть Ленинградской области, Эстонию, Латвию, Литву, Псковскую область. Объектами исследования являлись выпадения из атмосферы в районе Ленинграда, вода и донные отложения Балтийского моря, Ладожского озера и территория водосбора Балтийского моря в пределах Советского Союза. Пробы воды отбирали из всех значимых рек и озер и анализировали на содержание радионуклидов. Все это позволило накопить огромный материал по загрязнению атмосферы и гидросферы региона, определить уровни глобальных выпадений и вывести закономерности поведения радионуклидов при попадании их во внешнюю среду.

Введение

В течение более тридцати лет лаборатория мониторинга радиоактивного загрязнения окружающей среды вела наблюдения за радиационной обстановкой в районе Ленинграда и Балтийского моря. Это было обусловлено проведением ядерных испытаний в различных средах, наличием в регионе АЭС и предприятий, связанных с ядерной энергетикой. Для этих целей вблизи Ленинграда в Зеленогорске была создана радиометрическая станция, где непрерывно отбирали пробы атмосферных аэрозолей, атмосферных выпадений и осадков. Экспедиционное судно «Боян» в период навигации совершало рейсы по Финскому заливу, собственно Балтийскому морю и Ладожскому озеру, в которых отбирали пробы воды и донных осадков. Территорию водосбора Балтийского моря в пределах Советского Союза контролировали специальными рейсами, в ходе которых отбирали пробы почв и воды из озер и значимых рек дренажной территории.

Все это позволило накопить огромный материал по загрязнению атмосферы и гидросферы региона, определить уровни глобальных выпадений и вывести закономерности поведения радионуклидов при попадании их во внешнюю среду.

После официального сообщения по радио об аварии на Чернобыльской АЭС объемы исследований радиационной обстановки были резко увеличены. Период смены фильтров ФПП-15 был уменьшен до нескольких часов, организован рейс судна «Боян» по Финскому заливу и советской части Балтики до Калининграда. Для контроля радиационной обстановки на территории региона были организованы две экспедиции, охватившие северо-восточную и западную часть Ленинградской области, Эстонию, Латвию, Литву, Псковскую область.

Данные по радиационной обстановке немедленно передавались вышестоящим органам власти. Возглавлял лабораторию в это время Л. И. Геденов.

Радиационная обстановка в воздушной среде Ленинграда в связи с аварией на Чернобыльской АЭС

В материалах, выпущенных лабораторией мониторинга радиоактивного загрязнения окружающей среды до аварии на ЧАЭС, были приведены данные по содержанию радиоактивных продуктов искусственного происхождения от ядерных взрывов в атмосфере, попавшие в район Ленинграда за счет глобального переноса.

В первом квартале 1986 г. объемные активности в приземном воздухе Ленинграда определялись долгоживущими радионуклидами: ^{137}Cs и ^{90}Sr , а также космогенным ^7Be и долгоживущим продуктом распада $^{222}\text{Rn} - ^{210}\text{Pb}$. В табл. 1 приведены усредненные месячные объемные активности отдельных радионуклидов в приземном воздухе Ленинграда в январе–апреле 1986 г. (до аварии на Чернобыльской АЭС).

Таблица 1

Среднемесячные объемные активности (Бк/м³) в приземном воздухе Ленинграда в январе–апреле 1986 г.

Дата сбора	^{137}Cs	^7Be
Январь	0,69	970
Февраль	0,96	1360
Март	0,57	1730
Апрель		1230

В этот период наблюдений содержание искусственных радионуклидов снизилось до минимальных величин за весь период наблюдений с 1959 г.

Определение объемной активности в этот период производили с периодичностью 6 раз в месяц так, что смену фильтра осуществляли через 5–6 дней. Последняя смена фильтра перед аварией на Чернобыльской АЭС была 26 апреля 1986 г. Состав радионуклидов не отличался от того, который представлен в табл. 1.

Следующая смена фильтра пришлось на 9 часов утра 29 апреля 1986 г. В этом фильтре было обнаружено присутствие 25 радионуклидов искусственного происхождения, большинство из которых ранее не наблюдалось. Часть из них имели короткий период полураспада, что свидетельствовало об их свежем происхождении.

Эти результаты получены путем неоднократного измерения пробы на гамма-спектрометре с идеальным германиевым детектором. Следует сразу отметить, что на фильтровом полотне ФПП-15 улавливалась лишь аэрозольная составляющая радиоактивных изотопов иода, а парообразная форма иода и иодорганические соединения проскакивали через фильтр. Доля летучего иода по дальнейшим оценкам на порядок превышала аэрозольную составляющую изотопов иода.

Наличие в приземном воздухе Ленинграда указанных радионуклидов свидетельствовало о серьезном нарушении целостности 4-го энергоблока Чернобыльской АЭС и о значительном газоздушном выбросе радиоактивных веществ в атмосферу.

В дальнейшем отбор проб проводили с периодом от 12 до 24 ч. Были выбраны семь основных дозообразующих радионуклидов, по которым легко получалась информация, а их вклад в суммарную объемную активность составлял основную долю.

Результаты наблюдений за период с 26 апреля по 18 июня 1986 г. приведены в табл. 2.

Таблица 2

Объемная активность некоторых гамма-излучающих радионуклидов
в приземном воздухе Ленинграда за период наблюдений
с 26 апреля по 18 июня 1986 г.

Дата и время отбора пробы	¹³² Te	¹³¹ I	¹⁴⁰ Ba	¹³⁶ Cs	¹⁰³ Ru	¹³⁴ Cs	¹³⁷ Cs
	Бк/м ³						
26.04 9 ⁰⁰ , 29.04 10 ⁰⁰	1,97	4,64	0,470	0,200	0,143	0,614	1,21
29.04 10 ⁰⁰ –22 ⁰⁰	0,0154	0,0521	0,0186	0,0012	0,0124	0,0027	0,0056
29.04 22 ⁰⁰ , 30.04 9 ⁰⁰	0,0124	0,0332	0,0039	0,0009	0,0023	0,0036	0,0067
30.04 – 1.05	0,00120	0,0384	0,0004	0,0001	0,0004	0,0005	0,0010
1.05 – 2.05	0,0175	0,256	0,0038	0,0017	0,0028	0,0066	0,0128
2.05 9 ⁰⁰ –21 ⁰⁰	0,0279	0,325	0,0051	0,0032	0,0046	0,0116	0,0218
2.05 21 ⁰⁰ , 3.05 9 ⁰⁰	0,0171	0,207	0,0027	0,0024	0,0023	0,0085	0,0163
3.05 9 ⁰⁰ –21 ⁰⁰	0,0138	0,147	0,0023	0,0016	0,0026	0,0068	0,0120
3.05 21 ⁰⁰ , 4.05 9 ⁰⁰	0,00328	0,0485	0,0007	0,0006	0,0007	0,0024	0,0044
4.05 – 5.05	0,00589	0,0632	0,0015	0,0010	0,0016	0,0045	0,0085
5.05 – 6.05	0,00114	0,0316	0,0006	0,0002	0,0004	0,0012	0,0025
6.05 – 7.05	0,00290	0,0396	0,0008	0,0007	0,0007	0,0032	0,0058
7.05 – 8.05	0,00258	0,0311	0,0010	0,0004	0,0020	0,0019	0,0037
8.05 – 9.05	0,00334	0,0177	0,0013	0,0006	0,0050	0,0021	0,0048
9.05 – 10.05	0,00094	0,0097	0,0007	0,0002	0,0012	0,0012	0,0024
10.05 – 11.05	0,00223	0,0130	0,0014	0,0002	0,0047	0,0018	0,0034
11.05 – 12.05	0,00024	0,0124	0,0003	0,0000	0,0023	0,0006	0,0011
12–13.05	0,0154	0,0433	0,0025	0,0009	0,118	0,0045	0,0009
13–14.05	0,00015	0,0021	0,0000	–	0,0002	0,0000	0,0001
14–15.05	0,00020	0,0040	0,0000	–	0,0001	0,0001	0,0002
15–16.05	0,00008	0,0027	0,0000	–	0,0002	0,0002	0,0004
16–17.05	0,00013	0,0030	0,0001	–	0,0014	0,0003	0,0007
17–18.05	0,00003	0,0007	0,0000	–	0,0004	0,0002	0,0006
18–19.05	0,00013	0,0007	0,0001	–	0,0002	0,0003	0,0006
19–20.05	0,00003	0,0010	0,0001	–	0,0002	0,0004	0,0007
20–21.05	0,00014	0,0036	0,0002	–	0,0022	0,0015	0,0029
21–22.05	–	0,0005	0,0000	–	0,0002	0,0002	0,0003
22–23.05	–	0,0007	0,0000	–	0,0003	0,0002	0,0004
23–24.05	–	0,0008	0,0001	–	0,0015	0,0007	0,0014
24–25.05	–	0,0014	0,0001	–	0,0021	0,0008	0,0015
25–26.05	0,00076	0,0077	0,0005	–	0,0485	0,0014	0,0031
26–27.05	–	0,0002	0,0001	–	0,0005	0,0003	0,0006
27–28.05	–	0,0002	0,0001	–	0,0006	0,0005	0,0009
28–29.05	–	0,0003	–	–	0,0006	0,0003	0,0006
29–30.05	–	0,0001	0,0000	–	0,0002	0,0001	0,0002
30.02–2.06	–	0,0001	0,0000	–	0,0004	0,0001	0,0002
2–4.06	–	0,0003	0,0000	–	0,0031	0,0001	0,0002
4–5.06	–	0,0001	–	–	0,0002	0,0000	0,0000
5–6.06	–	0,0001	–	–	0,0003	0,0000	0,0001
6–9.06	–	0,0000	–	–	0,0003	0,0000	0,0001
9–11.06	–	0,0000	–	–	0,0001	0,0000	0,0001
11–13.06	–	0,0000	–	–	0,0000	0,0000	0,0001
13–16.06	–	0,0000	–	–	0,0002	0,0001	0,0001
16–18.06	–	0,0000	–	–	0,0000	0,0000	0,0001

Из приведенных результатов видно, что в рассматриваемый период радиоактивность приземного воздуха претерпевала значительные изменения как по величине объемной активности, так и по составу радионуклидов. Анализ отношений активностей пар изотопов одного и того же химического элемента показывает, что в воздухе находились радионуклиды одного генетического происхождения.

Пересчитанные на ночь 26 апреля 1986 г. отношения ^{136}Cs к ^{137}Cs составляли $0,212 \pm 0,028$, а ^{134}Cs к ^{137}Cs – $0,518 \pm 0,060$. Это свидетельствует об их происхождении из одного источника.

За рассматриваемый период наблюдений объемная активность аэрозольной составляющей ^{131}I изменилась на пять порядков и к 18 июня 1986 г. достигла нижнего порога обнаружения этого радионуклида на спектрометре.

Несколько замечаний по ходу изменения содержания отдельных радионуклидов в приземном воздухе Ленинграда. Из данных табл. 2 видно, что ход изменения объемной активности ^{103}Ru в приземном воздухе сильно отличается от вариаций других радионуклидов. В отдельные дни, например 12 и 25 мая, отмечалось увеличение его объемной активности на два порядка, в то время как по другим радионуклидам эти изменения были скромнее. Это свидетельствовало о том, что по ряду причин в газоздушном выбросе на 4-ом энергоблоке Чернобыльской АЭС происходило фракционирование отдельных радионуклидов.

К середине июня 1986 г. содержание искусственных радионуклидов в приземном воздухе заметно уменьшилось, а относительное содержание естественных радиоактивных продуктов распада ^{220}Rn и ^{222}Rn стало превышать их величину, что затрудняло получение оперативной информации. По этой причине пробы, полученные фильтрацией атмосферного воздуха, необходимо было выдерживать несколько дней до радиоактивного распада ^{212}Pb – дочернего продукта ^{220}Rn – и увеличивать время экспозиции фильтра до 2–3 сут.

Аналогичная картина наблюдалась по выпадениям аэрозолей из приземного слоя воздуха, собираемым на планшеты. Это позволяло рассчитать кумулятивный запас основных дозообразующих техногенных радионуклидов на земной поверхности.

Что касается ^{90}Sr , то его превышение над глобальным уровнем было менее значимым по сравнению с изотопами цезия.

Для иллюстрации на рис. 1–3 приведены графики, показывающие закономерности изменения радиационной обстановки и кумулятивного накопления,

В дальнейшем постоянно и непрерывно велось наблюдение за приземным слоем атмосферы, что находило свое отражение в национальных отчетах и статьях [1–3].

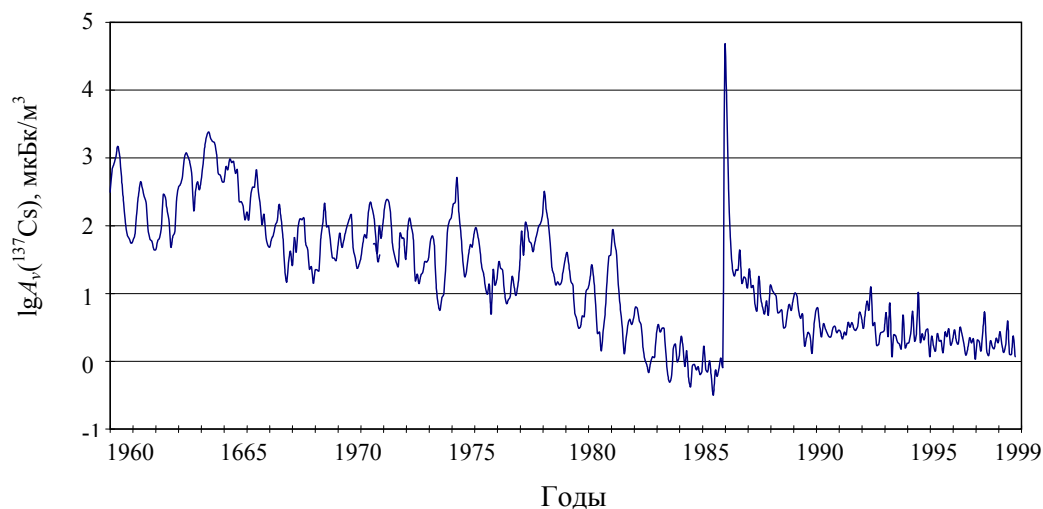


Рис. 1. Активность $A_v(^{137}\text{Cs})$ в приземном воздухе Санкт-Петербурга в 1959–1999 гг.

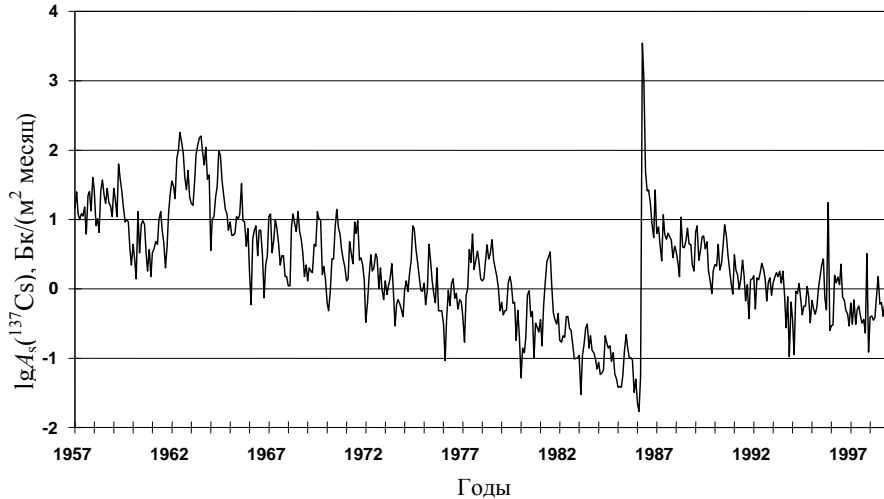


Рис. 2. Радиоактивные выпадения ^{137}Cs (A_s) на земную поверхность в окрестности Санкт-Петербурга в 1957–1999 гг.

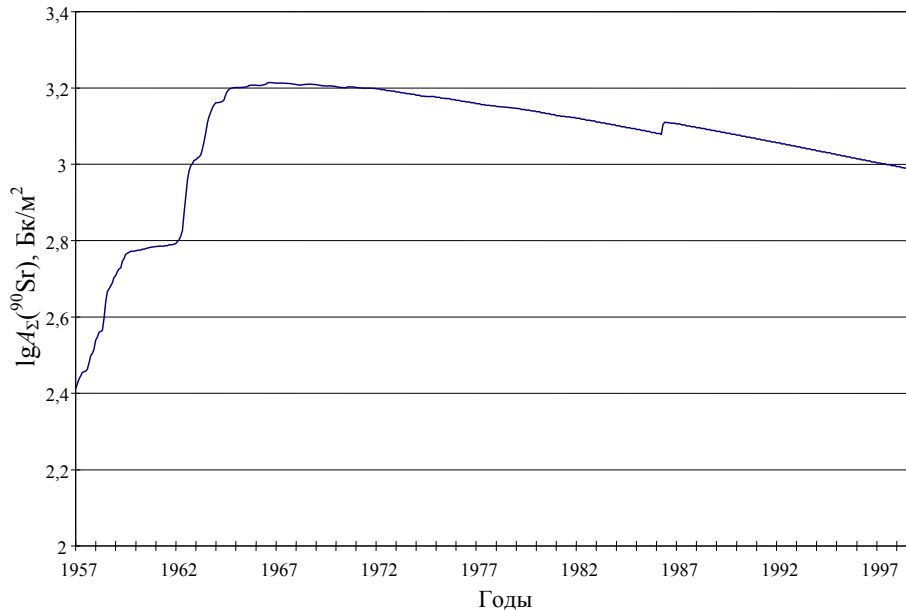


Рис. 3. Кумулятивное накопление ^{90}Sr (A_Σ) на земной поверхности в окрестности Санкт-Петербурга в 1957–1998 гг.

В апреле–мае 1986 года в связи с аварией на ЧАЭС в радиологическом режиме Балтийского региона произошли значительные изменения. В настоящее время наряду с Ирландским и Черным морями Балтика характеризуется самым высоким содержанием радиоактивных веществ по сравнению со всеми другими морями земного шара. Помимо аварии в Чернобыле другими источниками значительного количества искусственных радионуклидов в Балтийском море являются глобальные выпадения и транспорт через датские проливы морской воды, загрязненной западноевропейскими заводами по переработке ядерного топлива, в первую очередь в Селлафилде. По сравнению с такими источниками, как глобальные выпадения, транспорт воды из Селлафилда и Ла Ага, чернобыльские выпадения, роль выбросов атомных электростанций и научно-исследовательских центров, расположенных на территории водосбора, крайне мала.

Загрязнение Балтийского моря в результате аварии на ЧАЭС было неравномерным в силу различной интенсивности радиоактивных атмосферных выпадений, что связано с интенсивностью выпадения атмосферных осадков. Одним из наиболее загрязненных оказался район центральной части Финского залива, включая район расположения Ленинградской АЭС – Копорскую губу [4].

Изменение содержания основного техногенного загрязнителя акватории Балтийского моря – ^{137}Cs – в период 1970–1998 гг. показано на рис. 4 и 5. Как видно из графиков, в 1986 году содержание ^{137}Cs возросло как в поверхностных, так и в придонных водах. Со временем ^{137}Cs начал переходить в донные осадки.

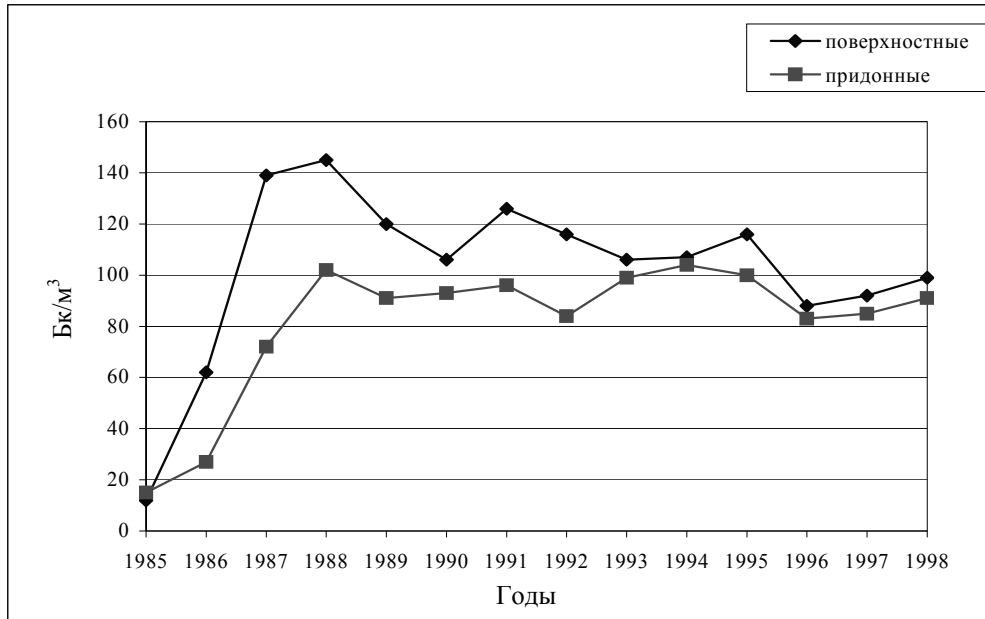


Рис. 4. Усредненные величины концентраций ^{137}Cs в поверхностных и придонных водах восточной части собственно Балтийского моря в 1985–1998 гг.

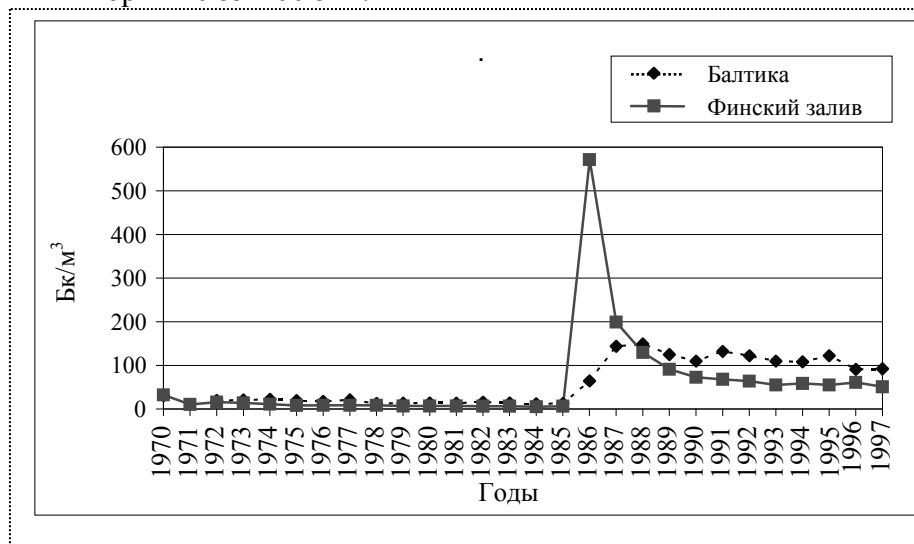


Рис. 5. Усредненные величины содержания ^{137}Cs в поверхностных водах собственно Балтийского моря и Финского залива в 1970–1997 гг.

Последствия аварии на ЧАЭС для Копорской губы – места расположения ЛАЭС

В 1986 г. в результате атмосферного переноса радионуклидов из района аварии Чернобыльской АЭС радиационная обстановка в регионе Балтийского моря резко изменилась. Контроль приземного воздуха в районе расположения ЛАЭС позволил проследить динамику поступления радионуклидов, образовавшихся в результате аварии на Чернобыльской АЭС. Наибольшее содержание радионуклидов в приземном воздухе в районе ЛАЭС было зафиксировано 28 и 29 апреля 1986 г. Мощность дозы гамма-излучения в точке контроля (14 км от ЛАЭС) начала возрастать с 29 апреля, но значительное увеличение произошло 30 апреля, после выпадения дождей. Максимальная мощность дозы гамма-излучения составляла 170 мкР/ч.

Повсеместно в водах Копорской губы в 1986 г. наблюдалось резкое увеличение содержания ^{137}Cs . Оно колебалось в пределах от 400 до 470 Бк/м³, в среднем составляя 420 Бк/м³; появился ^{134}Cs в количестве от 180 до 230 Бк/м³, в среднем – 210 Бк/м³. Соотношение активностей $^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$ в начальный период после аварии составляло 0,52 – характерную для чернобыльского источника загрязнение величину [4]. Во всех пробах, отобранных в водах Копорской губы, были зафиксированы изотопы радиоактивного рутения и другие короткоживущие гамма-излучающие нуклиды, но количественно они не определялись, поскольку при концентрировании не были введены соответствующие носители. Создалась ситуация, когда на Ленинградской АЭС использовалась для охлаждения вода, загрязненная в результате аварии на Чернобыльской АЭС. В мелководной Копорской губе выпавшие на водную поверхность радионуклиды быстро распространились по всей водной массе, и к моменту проведения экспедиционного обследования (июнь 1986 г.) содержание радиоактивного цезия в поверхностных и придонных водных слоях было практически одинаковым.

Сопоставление данных 1985 и 1986 гг. показывает, что в июне 1986 г. средний уровень содержания ^{137}Cs в водах Копорской губы превысил уровень содержания этого нуклида в 1985 г. в 60 раз. В этот же период времени в центральной части Финского залива были отмечены концентрации ^{137}Cs , достигающие 1000 Бк/м³. Эти величины превышали уровень 1985 г. в 100 раз.

Увеличения содержания ^{90}Sr в водах Копорской губы и в водах Финского залива, даже наиболее загрязненных радиоактивным цезием, замечено не было. Оно и не ожидалось, поскольку в атмосферных выпадениях в регионе Балтийского моря увеличения содержания ^{90}Sr в период чернобыльской аварии или совсем не было зафиксировано (район Хельсинки, апрель–июль 1986 г.), или это увеличение было очень незначительным по сравнению с ^{137}Cs (район Санкт-Петербурга, апрель–июль 1986 г.).

Дополнительного загрязнения тритием в 1986 г. также не наблюдалось. Концентрации трития в воде Копорской губы в 1986 г. составляли от 6,5 до 12 кБк/м³, в среднем – 8,6 кБк/м³, что близко к уровню 1985 г.

Дальнейшие наблюдения показали довольно быстрое уменьшение концентраций радиоактивного цезия в водах Копорской губы и в восточной части Финского залива. Уже через год, в июле 1987 г., содержание ^{137}Cs в водах Копорской губы уменьшилось более, чем вдвое и составило в среднем 180 Бк/м³, содержание ^{134}Cs снизилось до 65 Бк/м³. Снижение концентраций радиоактивного цезия шло и продолжает идти в основном за счет разбавления речными водами, прежде всего Невы. Концентрация ^{137}Cs в водах Невы в мае 1986 г. составляла 240 Бк/м³, а в декабре того же года – только 22 Бк/м³, в октябре 1987 г. – 10 Бк/м³. Более чистые речные воды

разбавляли воды с высокими концентрациями радиоактивного цезия в восточной части Финского залива и, в частности, в Копорской губе. Изменение содержания техногенных радионуклидов в Неве приведено на рис. 6.

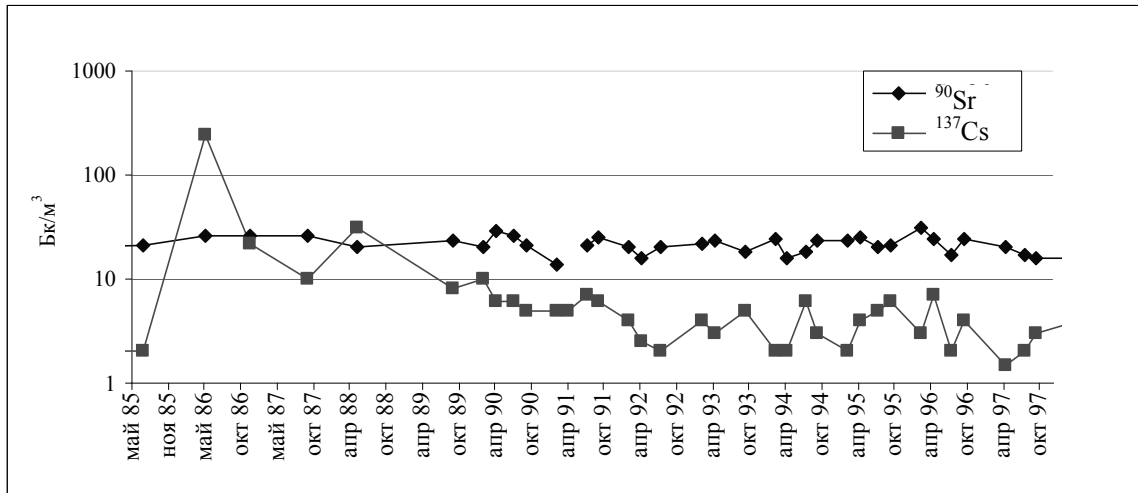


Рис. 6. Содержание ^{90}Sr и ^{137}Cs в воде Невы в 1985–1997 гг.

По данным 1988 г., содержание ^{137}Cs в водах Копорской губы уменьшилось еще на одну треть и составило в среднем 130 Бк/м^3 . В последующие три года снижение концентраций радиоактивного цезия продолжалось достаточно интенсивно. Средние величины концентраций ^{137}Cs в водах Копорской губы составили: в 1989 г. – 100, в 1990 г. – 80, в 1991 г. – 60 Бк/м^3 . В период 1986–1991 гг. соотношение активностей $^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$ в водах Копорской губы (с учетом преимущественного радиоактивного распада ^{134}Cs) однозначно указывало на чернобыльский источник загрязнения. В этот период в Финском заливе отчетливо наблюдались изменения концентраций радиоактивного цезия в поверхностных и придонных водах, шло выравнивание концентраций, проявилась и общая тенденция распространения загрязнения в западном направлении с выходом в собственно Балтийское море, где в 1986 г. чернобыльское загрязнение было минимальным.

После 1991 г. в водах Копорской губы снижение концентраций радиоактивного цезия замедлилось. Наблюдения 1992–1994 гг. показали стабилизацию содержания ^{137}Cs на уровне 50 Бк/м^3 , ^{134}Cs находился ниже предела обнаружения [5, 6]. Приток речных вод, безусловно, продолжает способствовать снижению загрязнения в водах восточной части Финского залива и Копорской губы в том числе, поскольку содержание ^{137}Cs в их водах значительно меньше; например, в водах Невы в 1992–1993 гг. оно составляло $2\text{--}5 \text{ Бк/м}^3$. Но имеет место и противоположный процесс – поступление с придонным течением более соленых вод из западной части Финского залива, а там содержание ^{137}Cs в 1992–1993 гг. составляло $80\text{--}100 \text{ Бк/м}^3$. Резерв разбавления загрязнения за счет вод собственно Балтийского моря, по-видимому, исчерпан: исследования, проведенные Радиевым институтом, показали, что в восточной части собственно Балтийского моря к 1993–1994 гг. сформировался высокий уровень содержания ^{137}Cs , составляющий $100\text{--}120 \text{ Бк/м}^3$. В таких условиях трудно рассчитывать на дальнейшее интенсивное снижение концентраций ^{137}Cs в водах Копорской губы. В настоящее время уровень содержания ^{137}Cs в водах Копорской губы превышает уровень 1985 г. в 7 раз.

Влияние водного стока Невы сказывается на изменении концентраций не только радиоактивного цезия, но и ^{90}Sr , однако по действию оно противоположно. Содержание ^{137}Cs в водах Невы значительно ниже, чем в Балтийском море. Напротив, содержание ^{90}Sr несколько выше. Так же как постоянное поступление в Копорскую губу вод с пониженным содержанием ^{137}Cs обуславливает снижение концентрации этого нуклида в ее водах, поступление вод с повышенной концентрацией ^{90}Sr способствует поддержанию уровня содержания ^{90}Sr в Копорской губе на более высоком уровне, чем в собственно Балтийском море.

Ежегодные усредненные данные о содержании ^{90}Sr и ^{137}Cs в водах Копорской губы в 1971–1998 гг., а также данные о содержании ^{134}Cs в 1986–1991 гг. приведены на рис. 7. Показан ход изменения содержания этих радионуклидов в водах Копорской губы за период наблюдения. Выполненные исследования показали, что радиационная обстановка в Копорской губе – водоеме-охладителе ЛАЭС – оставалась вполне благополучной до аварии на Чернобыльской АЭС.

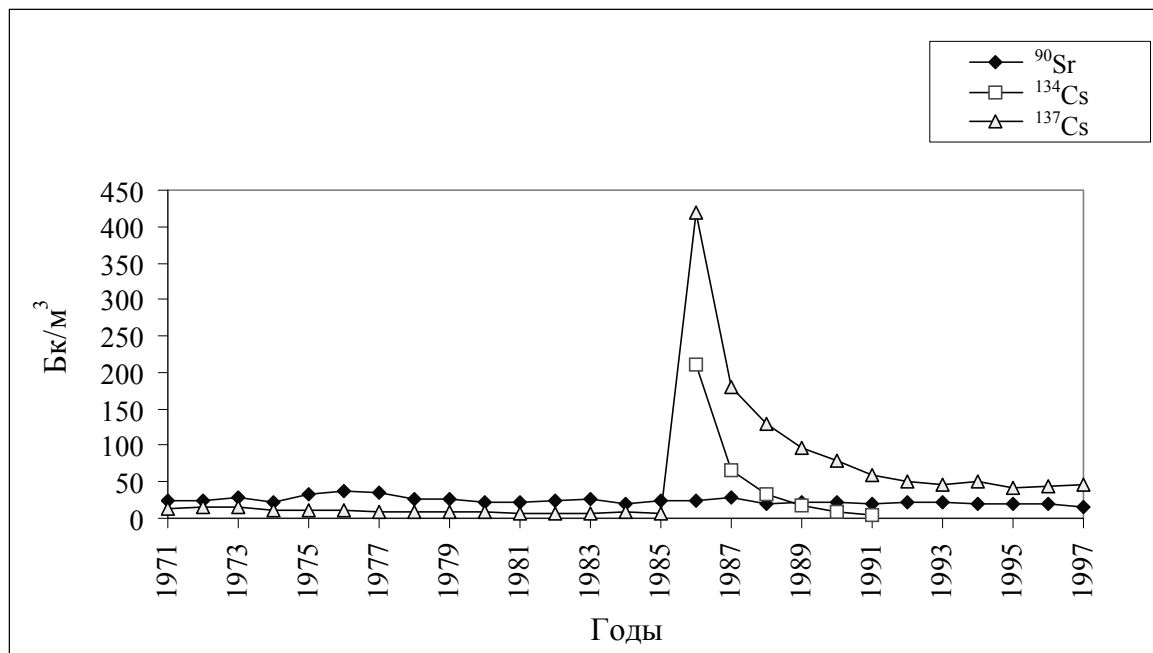


Рис. 7. Усредненные значения объемных активностей ^{90}Sr , ^{134}Cs и ^{137}Cs в водах Копорской губы Финского залива в 1971–1997 гг.

Резкое увеличение радиоактивного загрязнения за счет аварии на Чернобыльской АЭС безусловно привело к ее ухудшению.

Негативная сторона произошедшего очевидна. Вместе с тем, создавшаяся ситуация позволила проследить поведение загрязнения вод Финского залива, в частности в Копорской губе. Метеообстановка в период аварии на Чернобыльской АЭС определила атмосферные выпадения таким образом, что в центральной части Финского залива оказалось крупное пятно с высокими концентрациями радиоактивного цезия. Это пятно своей восточной частью захватывало Копорскую губу, а на западе распространялось до линии Хельсинки–Таллин. При этом собственно Балтийское море оказалось наименее загрязненным и, что не менее важно, район Ладожского озера и его дренажная система также не были подвержены значительным загрязнениям. Благодаря мощному речному стоку Невы, питающейся водами Ладожского озера, именно в восточной части Финского залива, в том числе и в Копорской губе, началось снижение концентраций радионуклидов. При этом загрязненные воды продвигались в за-

падном направлении, выходя в собственно Балтийское море. В итоге уже через 3–4 года в восточной части собственно Балтийского моря сформировались наиболее высокие концентрации радиоактивного цезия, а в восточной части Финского залива они стали минимальными. Пятно с высоким уровнем загрязнения практически исчезло. Проведенные исследования показали, что загрязнение, возникшее в Финском заливе, в том числе в Копорской губе, не только не остается локальным, но и неминуемо приводит к сосредоточению загрязнения в водах собственно Балтийского моря.

Донные отложения играют важную роль в радиоэкологических исследованиях морской среды, так как значительная часть попадающих в воду радиоактивных веществ адсорбируется на частицах взвесей и осаждается в отложениях.

Уже в июне 1986 г. четкое увеличение содержания ^{137}Cs чернобыльского происхождения наблюдалось в отложениях некоторых станций пробоотбора. В течение всего периода наблюдений наибольшая скорость седиментации ^{137}Cs была зарегистрирована в восточной части Финского залива и в Ботническом заливе. Этот факт хорошо согласуется с картиной распределения выпадений ^{137}Cs по территории Балтийского моря. В 1990 году наибольшая общая активность ^{137}Cs в донных отложениях составляла 43 кБк/м² на востоке Финского залива и 21 кБк/м² в Ботническом заливе.

Заключение

Комплексные исследования морской воды были проведены в период с 1984 по 1991 гг. После аварии в Чернобыле в некоторых районах содержание ^{137}Cs увеличилось на несколько порядков. Наибольшие значения содержания ^{137}Cs были зарегистрированы в Финском заливе и южной части Ботнического залива. Первоначальная неоднородность распределения ^{137}Cs из чернобыльских осадков сглаживалась впоследствии вплоть до 1991 г. в связи с перемешиванием водных масс. Однако в 1991 г. содержание ^{137}Cs в южной части Ботнического залива все еще составляло около 200 Бк/м³ по сравнению со 100 Бк/м³ в собственно Балтике.

Общее содержание ^{137}Cs в Балтийском море увеличилось в 1986 г. более чем в 10 раз и затем уменьшилось наполовину к 1991 г. вследствие седиментации и выноса за пределы региона.

В 1991 г. концентрация ^{137}Cs в Балтийском море была существенно выше, чем в любых других шельфовых морях мира, как, например, в центральной части Северного моря, где средний уровень достигал значений около 20 Бк/м³.

Донные отложения играют важную роль в радиоэкологических исследованиях морской среды, так как значительная часть попадающих в воду радиоактивных веществ адсорбируется на частицах взвесей и осаждается в отложениях.

Уже в июне 1986 г. четкое увеличение содержания ^{137}Cs чернобыльского происхождения наблюдалось в отложениях некоторых станций пробоотбора. В течение всего периода наблюдений наибольшая скорость седиментации ^{137}Cs была зарегистрирована в восточной части Финского залива и в Ботническом заливе. Этот факт хорошо согласуется с картиной распределения выпадений ^{137}Cs по акватории Балтийского моря. В 1990 году наибольшая общая активность ^{137}Cs в донных отложениях составляла 43 кБк/м² на востоке Финского залива и 21 кБк/м² в Ботническом заливе.

Общее содержание ^{137}Cs в донных отложениях Балтийского моря в 1991 г. оценивалось в 1400 ТБк, а содержание $^{239,240}\text{Pu}$ – в 18 ТБк. Соответствующие значения, рассчитанные в начале 1980-х годов, составляли 277 и 15 ТБк.

Принятые меры по наблюдению за радиационной обстановкой в регионе позволили правильно оценивать развитие ситуации в связи с аварией на ЧАЭС, информировать вышестоящие органы и избегать непродуманных решений.

Список литературы

1. Baltic Sea Environment Proc. № 31. Baltic Marine Environment Protection Commission. Helsinki, December 1989.
2. Gedeonov L. I., Gritchenko Z. G., Tishkov V. P. et al. Study of Radioactive Substances in the Baltic Sea in 1986–1987. STUK-B-VALO 69. Helsinki, April 1991.
3. Гедеонов Л. И., Гритченко З. Г., Тишков В. П. и др. Исследование радиоактивных веществ в Балтийском море в 1986–1987 гг.: Препринт РИ-234. М.: ЦНИИАтоминформ, 1992.
4. Гаврилов В. М., Гритченко З. Г., Тишков В. П. и др. Стронций-90, цезий-134 и цезий-137 в водоемах Прибалтийского региона Советского Союза // Радиохимия. 1990. Т. 32, вып. 3. С. 171–179.
5. Гритченко З. Г., Иванова Л. М., Тишков В. П. и др. Исследование радиоактивности Балтийского моря в 1991 г.: Национальный отчет Российской Федерации. СПб., 1992.
6. Исследование радиоактивных веществ в Балтийском море в 1988–1989 гг.: Препринт РИ-241. М.: ЦНИИАтоминформ, 1994.

Activity of Radium Institute on the Monitoring of Radiation Conditions over the Northwest Region of the Soviet Union and the Baltic Sea, Caused by CNPP Accident

V. P. Tishkov, A. V. Stepanov, V. M. Gavrilov

After the message by radio about an accident at the Chernobyl Nuclear Power Plant, the studies of the radiation conditions, carried out by the Laboratory for environmental monitoring, were sharply increased. Cruise of the Boyan research vessel across the Gulf of Finland and the Soviet part of the Baltic up to Kaliningrad was prepared and carried out in a short time. For monitoring of the radiation conditions over the region, two expeditions covering the northeastern and western parts of Leningrad region, Estonia, Latvia, Lithuania, and Pskov region were organized. Objects of research were atmospheric fallout in the area of Leningrad, water and bottom sediments of the Baltic Sea, Lake Ladoga, and territory of the Baltic sea watershed, within the border of the Soviet Union. Water samples were collected and analyzed for the radionuclide contents from all significant rivers and lakes. On the basis of the data obtained, the level of environmental radioactive contamination was evaluated. As a result, data required for making administrative decisions were obtained, extensive information on contamination of the atmosphere and hydrosphere of the region was accumulated, the levels of global fallout were determined, and the laws of radionuclide behavior in the environment were deduced.

II.6. Радиоактивное загрязнение Балтийского моря после аварии на ЧАЭС

А. В. Степанов, В. П. Тишков, Ю. А. Пантелеев, В. М. Гаврилов

Для стран, расположенных вокруг Балтийского моря, весьма актуальными являются проблемы, связанные с радиоактивным загрязнением этого внутреннего моря Северной Европы (с учетом крайне низкой способности этого моря к самоочищению). Для более 80 миллионов населения 9 стран Балтийского региона (Германия, Дания, Латвия, Литва, Польша, Россия, Финляндия, Швеция, Эстония), живущего на берегах Балтики, вопросы экологии Балтики имеют первостепенное социальное и экономическое значение. Часто эти проблемы помимо практического и научного значения имеют выраженную социально-политическую окраску, особенно после аварии на Чернобыльской АЭС. В настоящее время в рамках Межправительственного соглашения государств-членов Хельсинкской Конвенции по Балтийскому морю (ХЕЛКОМ) развернуто широкое, гласное и интенсивное международное сотрудничество России со странами Северной и Центральной Европы по решению экологических проблем, в частности, по постоянному контролю (мониторингу) радиоактивного загрязнения природных сред Балтики. На основе данных, полученных всеми государствами-членами Хельсинкской Конвенции (рабочая группа HELCOM MORS), установлено, что наиболее важным источником искусственных радионуклидов, повлиявшим на их общее содержание в Балтийском море, стали выпадения после аварии на Чернобыльской АЭС в апреле 1986 года. Другим важным источником искусственных радионуклидов стали глобальные выпадения после проведения испытаний ядерного оружия. В работе представлены результаты исследований радиоактивного загрязнения Балтийского моря, проводимые Радиовым институтом в период с начала семидесятых годов по настоящее время.

Введение

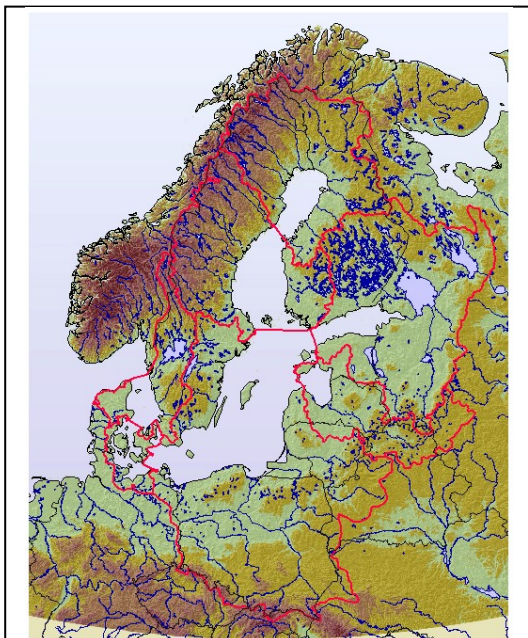


Рис. 1. Бассейн водосбора Балтийского моря [1].

Бассейн водосбора Балтийского моря (рис. 1), особенно его российский и финский сектора, находятся под потенциальным воздействием предприятий и опасных объектов Северо-Западного региона России. В связи с этим, рассматривая вопросы экологического состояния Балтийского моря, мы не можем не обращать внимания на процессы, происходящие в регионе.

Северо-Западный регион – один из крупнейших экономических районов России. Кроме того, Северо-Западный регион России является одним из самых насыщенных в нашей стране радиационно-опасными объектами. Он занимает всю северную часть Европейской территории Российской Федерации. Площадь 1270 тыс. км² (около 10 % территории России). Общая численность населения – более 15 миллионов человек. Плотность населения – около 12 человек на 1 км². В регионе 120 городов, около 150 по-

селков городского типа, в которых живет две трети населения региона. Высокая освоенность территории обусловила значительную антропогенную нагрузку на природную среду и нарушение экологического равновесия. Опасность для населения и окружающей среды определяется наличием в промышленности, энергетике и коммунальном хозяйстве большого количества радиационно-, химически-, пожаро- и взрывопожароопасных производств и технологий. Всего на территории региона насчитывается около 3000 таких объектов.

Территория Северо-Западного региона России характеризуется сложной радиационной обстановкой, связанной с наличием и функционированием ядерно- и радиационноопасных предприятий и объектов, а также последствиями их эксплуатации и имевшими место авариями. Исторически сложилось так, что в Северо-Западном регионе сосредоточены самые разнообразные предприятия – источники повышенной радиационной опасности. К их числу относятся:

- исследовательские и опытные ядерные реакторы и ядерно-энергетические установки (ЯЭУ), находящиеся в научно-исследовательских центрах и институтах;
- опытные и полупромышленные установки, на которых производится радионуклидная продукция, а также изделия на ее основе;
- судостроительные и судоремонтные предприятия, осуществляющие строительство, ремонт, модернизацию и утилизацию объектов атомного флота;
- корабли и суда с ядерными энергетическими установками и объекты их жизнеобеспечения и базирования;
- народнохозяйственные радиационноопасные объекты, использующие в своей деятельности радиоактивные вещества и изделия на их основе.

Северо-Западный регион насыщен объектами, представляющими потенциальную радиационную опасность. Здесь размещены: АЭС (Кольская и Ленинградская), а также две АЭС соседствуют с регионом (Игналинская в Литве, Калининская в г. Удомля Тверской области). Создаются, базируются и ремонтируются атомные надводные и подводные корабли гражданского и военно-морского флотов, причем значительная часть из них подлежит утилизации. На побережье Баренцева и Белого морей размещены объекты хранения облученного ядерного топлива ВМФ. В районах расположения АЭС действуют промышленные накопители и региональные хранилища радиоактивных отходов. Существуют полигоны, на которых осуществлялись ядерные взрывы – Новая Земля (воздушные, подводные и подземные взрывы), Хибины (гора Куэльпор в 1972 и 1984 годах); места складского хранения ядерного оружия, а также пункты обращения с радиоактивными отходами и пункты их окончательной изоляции, в том числе в Баренцевом и Карском морях. Свыше 3 тыс. предприятий используют радиоизотопные приборы и устройства. Регион оказался в зоне чернобыльского радиоактивного следа, который захватил западную и юго-западную части Северо-Западного региона. Обстановка осложнена наличием загрязненных зон, появившихся вследствие радиоактивных выпадений от ядерных взрывов на полигоне Новая Земля, последствиями строительства, эксплуатации и утилизации ядерных энергетических установок кораблей ВМФ и судов Атомфлота, наличием повышенного естественного радиоактивного фона и радоноопасных территорий, а также накоплением природных радионуклидов в результате техногенной деятельности горнодобывающих производств и ТЭЦ.

Если рассматривать Балтийский регион в целом, то можно сказать, что и он также характеризуется сложной радиационной обстановкой, связанной с наличием и

функционированием множества ядерно- и радиационноопасных предприятий и объектов. Так, в водосборном бассейне Балтийского моря размещены 12 шведских, 4 финских и 19 немецких действующих энергоблоков, в Финском заливе – Ленинградская АЭС. В планах развития атомной энергетики предполагается строительство замещающих мощностей АЭС (в частности, ЛАЭС-2 в Сосновом Бору) и ряда новых как в России (Калининградская область), так и в других странах Балтийского региона. В районах расположения АЭС действуют хранилища РАО, в том числе региональные. Помимо этого на радиационную обстановку повлияла авария на Чернобыльской АЭС.

Начальный этап исследований радиоактивной загрязненности Балтийского моря

Широкомасштабные исследования радиоактивной загрязненности Балтийского моря были начаты в 1970 году. На научно-исследовательском судне (НИС) «Академик Вернадский» силами сотрудников Лаборатории № 5 Радиевого института им. В. Г. Хлопина было выполнено экспедиционное обследование юго-восточной части Балтийского моря, включая Финский залив. Полученные результаты положили начало ежегодным исследованиям, проводимым Радиевым институтом в Балтийском море по настоящее время. Важно отметить, что в 1970 году воды Балтийского моря еще не использовались для охлаждения реакторов атомных электростанций. Было установлено, что уровень загрязнения мелководного и полужамкнутого Балтийского моря изотопами цезия и стронция значительно выше, чем Атлантического и даже Тихого океанов. При этом соотношение активностей $^{137}\text{Cs}/^{90}\text{Sr}$ не превышало 1, а с уменьшением солености в заливах заметно уменьшалось. В устьях рек, впадающих в Балтийское море, это соотношение составляло доли единицы. Дальнейшие исследования показали, что это связано с различиями в сорбционном поведении этих радионуклидов в системе вода–твердая фаза водосборных площадей, обусловленными в основном специфической сорбцией ^{137}Cs глинистыми материалами. По этой причине воды рек были обогащены стронцием и обеднены цезием. Исследования прибалтийских рек, а также Дуная однозначно свидетельствовали об очень низких концентрациях ^{137}Cs в их водах (Л. И. Геденов, В. М. Гаврилов, З. Г. Гритченко, Л. М. Иванова, В. П. Тишков, А. В. Степанов, В. М. Флегонтов, О. С. Цветков и др.).

В 1974 г. состоялось большое экспедиционное обследование Балтийского и Северного морей совместно с АтлантНИРО (Калининград) на НИС «Вяндра» (И. И. Драгунов, А. В. Степанов). В результате анализа отобранных проб было установлено значительное влияние радиохимических перерабатывающих заводов в Селлафилде (Великобритания) и на мысе Ла Аг (Франция) на радиационную обстановку Балтийского моря. Морская вода, содержащая существенно более высокие уровни ^{137}Cs и ^{90}Sr , поступала с придонными течениями через датские проливы в Балтийское море. Повышенные уровни активности ^{137}Cs и ^{90}Sr в придонных слоях воды прослеживались вплоть до Невской губы Финского залива. С 1976 г. практически весь объем экспедиционных морских пробоотборных работ обеспечивался научно-экспедиционным судном «Боян» – парусно-моторной крейсерской яхтой, оснащенной необходимым навигационным оборудованием, средствами связи и пробоотборными устройствами.

Начиная с 1974 года в лаборатории начались работы по использованию неорганических избирательных сорбентов для концентрирования радионуклидов цезия и стронция из морских и природных вод (Л. И. Геденов, В. Н. Крылов, А. В. Сте-

панов). Перспективность этого метода очевидна: простота, мобильность, возможность проводить массовые обследования акваторий, что было наглядно продемонстрировано в работах иностранных исследователей, в первую очередь из США (Т. Folsom). Были разработаны оригинальные методики синтеза неорганических сорбентов различного типа, а также концентрирования радионуклидов из морских и природных вод, позволяющие получать экспрессные результаты определения цезия в морской воде непосредственно на борту судна. Отработку методик проводили в экспедиционных условиях на судах Литовской гидрометеослужбы «Океанограф» и Атлантического отделения института океанологии АН СССР «Шельф» в Балтийском море, Морского гидрофизического института АН УССР «Муксун» и «Михаил Ломоносов» в Черном море. Разработанные в Радиевом институте сорбционные методики успешно применялись в исследованиях океанологических и гидрофизических процессов в Черном море, Атлантическом и Индийском океанах специалистами Морского гидрофизического института АН УССР (гамма-спектрометрический анализ экспонированных сорбентов выполняли в подземной низкофоновой лаборатории Радиевского института). Позже их широко использовали в работах на Чернобыльской АЭС и при изучении радиоэкологических последствий, связанных с гибелью АПЛ «Комсомолец» и «Курск».

Международное сотрудничество – первые шаги (дочернобыльская эра)

Начиная с 1975 г. исследования в регионе Балтийского моря выполнялись совместно со специалистами Польши и ГДР, проводившими наблюдения по своим национальным программам. Конкретными исполнителями совместной работы стали: Центральная лаборатория радиологической защиты (Варшава, Польша), Лаборатория Государственного комитета по атомной и радиационной безопасности (Берлин, ГДР), Радиобиологическая лаборатория Института биофизики (Москва) и Лаборатория № 61 Радиевского института им. В. Г. Хлопина (в период с 1973 по 1977 гг. Лаборатория входила в состав аналитического отдела под руководством А. А. Липовского). Вскоре эти исследования были объединены Программой СЭВ. В 1978 году Соглашение о сотрудничестве по исследованию радиоактивного загрязнения Балтийского моря было заключено с Финляндией, исполнителем со стороны которой стал Финский центр радиационной и ядерной безопасности. В 1979 г. аналогичное Соглашение было подписано со Швецией (Шведский институт радиационной защиты). В 1982–1985 гг. исследования радиоактивного загрязнения Балтийского моря объединила Программа МАГАТЭ, к которой присоединились все страны Балтики. Работы по Программе подразумевали оценку долговременного поведения радионуклидов, попадающих в Балтийское море, включая пути их проникновения в организм человека, и проводились совместно учеными из всех стран, окружающих Балтийское море, и сотрудниками Международной лаборатории морской радиоактивности в Монако.

Национальные интересы СССР, а затем России в этом цикле работ и в дальнейших представляли и представляют специалисты Лаборатории мониторинга радиоактивного загрязнения окружающей среды Радиевского института. В результате были получены глубокие знания в отношении содержания и поведения искусственных радионуклидов в Балтийском море до аварии на реакторе Чернобыльской атомной электростанции. Необходимо отметить, что начиная с 1975 г. систематические исследования региона проводятся в рамках тематик Минатома (Росатома).

Итогом программы МАГАТЭ в период 1982–1985 гг. стал документ, в котором была сделана оценка источников поступления радионуклидов в бассейн Балтийского моря. К 1985 году накопление ^{137}Cs в Балтийском море оценивалось следующими величинами: от глобального источника – 670 ТБк, от ядерных перерабатывающих заводов Западной Европы (с водами Северного моря) – 150 ТБк, от всех АЭС балтийского региона – 2 ТБк. Таким образом, работа этих АЭС, суммарная мощность которых к 1985 году составляла более 17000 МВт, практически не повлияла на запас ^{137}Cs в Балтийском море [2].

Радиационная обстановка Балтийского моря после аварии на ЧАЭС

В апреле 1986 г. регион Балтийского моря подвергся радиоактивному загрязнению в результате аварии на Чернобыльской АЭС. В апреле–мае 1986 г. в связи с аварией в радиологическом режиме Балтийского региона произошли значительные изменения. В настоящее время наряду с Ирландским и Черным морями Балтика характеризуется самым высоким содержанием радиоактивных веществ по сравнению со всеми другими морями земного шара.

Помимо аварии в Чернобыле, другими источниками значительного количества искусственных радионуклидов в Балтийском море являются глобальные выпадения и транспорт через датские проливы морской воды, загрязненной западноевропейскими заводами по переработке ядерного топлива, в первую очередь в Селлафилде. По сравнению с такими источниками, как глобальные выпадения, транспорт воды из

Селлафилда и Ла Ага, чернобыльские выпадения, роль выбросов атомных электростанций и научно-исследовательских центров, расположенных на территории водосбора, крайне мала. Например, по данным работы [3], соотношение накопленных в Балтийском море ^{137}Cs и ^{90}Sr характеризовалось величинами, приведенными в табл. 1.

Загрязнение Балтийского моря в результате аварии на ЧАЭС было неравномерным. Специалисты Финского центра радиационной и ядерной безопасности (STUK), обобщив все имеющиеся данные, построили карту плотности чернобыльских выпадений (рис. 2). Одним из наиболее загрязненных оказался район центральной части Финского залива, включая район расположения Ленинградской АЭС – Копорскую губу. Доминирующим нуклидом в этом загрязнении оказался ^{137}Cs . Как и следовало ожидать, снижение содержания ^{137}Cs началось с восточных районов Финского залива, где реки, в основном Нева и Нарва, обеспечивают приток пресных вод с низким содержа-

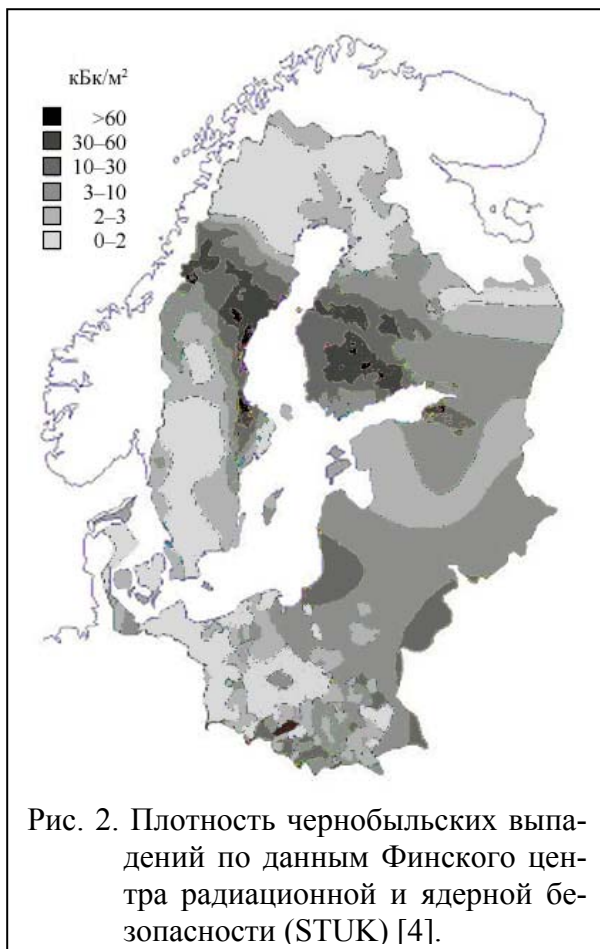


Рис. 2. Плотность чернобыльских выпадений по данным Финского центра радиационной и ядерной безопасности (STUK) [4].

нием этого радионуклида. Сложный комплекс гидрологических процессов, воздействию которых подвергся поступивший на поверхность моря ^{137}Cs , явился причиной перераспределения первоначально сформировавшихся участков радиоактивного загрязнения. К настоящему времени содержание ^{137}Cs в водах Финского залива меньше, чем в водах собственно Балтийского моря, в то время как до 1986 года эта часть моря была наименее загрязнена. В этом заключается один из наиболее важных выводов исследований радиоактивной загрязненности Балтийского моря – загрязнение вод Финского залива, в том числе и Копорской губы, не только не остается локальным, но приводит к его распространению и сосредоточению в водах собственно Балтийского моря.

Таблица 1

Накопление ^{137}Cs и ^{90}Sr в Балтийском море
с учетом поправки на распад на 1998 г.

Источник загрязнения	^{137}Cs , ТБк	^{90}Sr , ТБк
Глобальные выпадения	800	500
Чернобыльские выпадения	4700	80
Западно-европейские заводы по переработке ядерного топлива	250	40
Ядерные предприятия (АЭС)	1,66	0,76

Международное сотрудничество – первые шаги (постчернобыльская эра)

В 1974 г. СССР и другими балтийскими странами была подписана Хельсинкская конвенция, основной целью которой стала защита морской окружающей среды района Балтийского моря, восстановление и сохранение его экологического баланса, обеспечение рационального использования природных ресурсов Балтийского моря. В 1992 г. Хельсинкская конвенция была подписана вновь всеми странами региона и ратифицирована Российской Федерацией.

Руководящим органом Конвенции является Хельсинкская комиссия по охране морской природной среды Балтийского моря (ХЕЛКОМ), которая разработала и одобрила более 100 Рекомендаций для правительств стран региона Балтийского моря, направленных на выполнение статей и приложений Конвенции. Выполнение требований, заложенных в Рекомендациях ХЕЛКОМ, должно осуществляться через принятие национальных, отраслевых или территориальных нормативно-методических и законодательных документов, а также разработку национальных или региональных программ. Государства-члены Конвенции каждые три года представляют в ХЕЛКОМ национальные отчеты о выполнении Рекомендаций в соответствии с форматами отчетности.

Хельсинкская конвенция затрагивает все виды хозяйственной деятельности на водосборном бассейне Балтийского моря, связанные со сбросами и выбросами вредных веществ и образованием опасных отходов, а также деятельность в самом море, включая судоходство и разработку морского дна (добыча нефти, песка, гравия). Хельсинкская конвенция регулирует вопросы снижения сбросов и выбросов

вредных веществ, опасных для здоровья человека, морских экосистем, животного мира и среды обитания путем внедрения наилучшей существующей технологии и природоохранной практики.

В 1984 г. в рамках Конвенции появились вопросы, связанные с радиоактивным загрязнением окружающей среды и деятельностью объектов ядерной энергетики. В 1986 году решением Хельсинкской комиссии организована Группа экспертов (Monitoring of Radioactive Substances – MORS) для сбора и оценки данных по радиоактивному загрязнению Балтийского моря. Группа объединила в своем составе экспертов из стран прилегающего региона: СССР, Финляндии, Дании, Швеции, ФРГ, ГДР, Польши. В настоящее время в состав группы входят эксперты: Российской Федерации, Финляндии, Дании, Швеции, Германии, Польши, Эстонии, Литвы, Латвии. В качестве наблюдателей в работе группы принимают участие ряд международных организаций, в том числе МАГАТЭ (лаборатория в Монако) и ЕС. Необходимость создания группы была продиктована следующими обстоятельствами:

- завершение соответствующей тематики МАГАТЭ;
- значительное загрязнение региона, вызванное последствиями Чернобыльской аварии;
- необходимость создания международной системы мониторинга радиоактивного загрязнения важнейшего водного бассейна Европы.

С начала работы по изучению радиоактивного загрязнения Балтийского моря в рамках Хельсинкской конвенции по решению Минатома РФ и Минэкологии РФ Радиовый институт представляет интересы страны в Хельсинкской комиссии по вопросам, связанным с радиоактивным загрязнением окружающей среды региона.

Основной задачей на первом этапе работ группы MORS являлась оценка последствий Чернобыльской аварии. С этой целью по требованию ХЕЛКОМ все государства-члены резко интенсифицировали программы пробоотбора и измерений, начиная с весны 1986 года. Компиляция данных с 1986 по 1988 гг. по загрязнению воды и донных осадков Балтийского моря была проведена экспертами СССР и передана в ХЕЛКОМ. Эта работа завершилась в 1989 г. выпуском публикации ХЕЛКОМ №31: «Трехлетние наблюдения за уровнями ряда радионуклидов в Балтийском море после Чернобыльской аварии» [5].

Для выполнения задач, сформулированных Хельсинкской комиссией в соответствии с Рекомендацией ХЕЛКОМ 10/3, являющейся продолжением Рекомендации ХЕЛКОМ 8/1, принятой в 1987 году (в дальнейшем – переработанные Рекомендации 18/1 и 26/3, соответственно), группой MORS разработана постоянно действующая система международного мониторинга радиоактивного загрязнения Балтийского моря, которая включает в себя:

- сеть обязательных станций пробоотбора воды, донных отложений и гидробионтов, закрепленных за странами-участниками;
- сеть дополнительных станций пробоотбора, используемых участниками на добровольной основе.

Работы по мониторингу радиоактивных веществ в Балтийском море вплоть до настоящего времени постоянно сопровождаются работами по Программе обеспечения качества данных измерений с целью обеспечения достоверности получаемой информации. Несколько межлабораторных интеркалибрационных сравнений результатов анализов образцов морской воды, донных отложений и биоты были организо-

ваны Лабораторией морской среды (Marine Environmental Laboratory – MEL) Международного агентства по атомной энергии (МАГАТЭ) в Монако. Эти эксперименты подтвердили высокое качество данных, представляемых всеми лабораториями, участвующими в программе мониторинга.

В 1995 г. была выпущена публикация ХЕЛКОМ, подводящая итоги деятельности государств-членов за указанный период в рамках программ MORS [4]. Публикация содержит главы, отражающие деятельность Секретариата ХЕЛКОМ по организации совместных исследований в Балтийском регионе, анализ содержания базы данных ХЕЛКОМ по мониторингу радиоактивного загрязнения Балтийского моря, анализ источников радиоактивного загрязнения и исследования по содержанию радионуклидов в различных средах исследуемого региона, результаты работ по моделированию процессов накопления и распространения радионуклидов в экосистеме Балтийского моря и оценки дозовых нагрузок на население, результаты работ по обеспечению качества аналитических измерений.

Обобщение всех данных, касающихся периода 1984–1998 годов, было проведено в рамках проекта MARINA-BALT [6]. В 2003 году выпущена очередная публикация ХЕЛКОМ № 85 «Радиоактивность Балтийского моря, 1992–1998» [3]. В 2006 г. вышла в свет публикация ХЕЛКОМ №110 «Долгоживущие радионуклиды на морском дне Балтийского моря» [7]. В работе представлены результаты исследования донных осадков, выполненные группой экспертов ХЕЛКОМ в 2000–2005 гг. Цель исследования состояла в том, чтобы получить дополнительную информацию относительно запаса долгоживущих радионуклидов на дне Балтийского моря, включая недостающие данные в районах «белых пятен» и данные по радионуклидам, которые не были представлены в более ранних обзорах. В 2009 году опубликована совместная работа, отражающая долгосрочные изменения радиоактивности Балтийского моря вплоть до 2006 года [8].

Изучение Копорской губы как водоема-охладителя ЛАЭС

В исследованиях, проводимых Лабораторией Радиевого института на Балтийском море, наиболее пристальное внимание постоянно уделялось и уделяется району расположения Ленинградской АЭС – Копорской губе Финского залива. Здесь исследования начались в 1971 г., то есть за два года до пуска 1-го блока АЭС, и ведутся ежегодно по настоящее время. Для сопоставления радиационной обстановки вблизи Ленинградской АЭС и АЭС Ловииса в 1995 и 1996 годах были проведены совместные экспедиции специалистов Финского центра радиационной и ядерной безопасности (STUK) и Радиевого института в Копорскую губу и в шхеры северной части Финского залива, являющиеся водозаборными и сбросными резервуарами для АЭС Ловииса.

Ежегодные наблюдения в Копорской губе Финского залива показали, что радиационная обстановка в районе расположения Ленинградской АЭС сохранялась вполне благополучной до аварии на Чернобыльской АЭС. Резкое увеличение радиоактивного загрязнения воды в Копорской губе за счет аварии на Чернобыльской АЭС привело к ее значительному ухудшению. В июне 1986 г. средний уровень содержания ^{137}Cs превышал уровень 1985 г. в 60 раз. Создалась ситуация, когда на Ленинградской АЭС использовалась для охлаждения вода, загрязненная в результате аварии на Чернобыльской АЭС. Загрязнение Копорской губы явилось частью радиоактивного пят-

на, возникшего в центральной части Финского залива в 1986 г. в результате воздушного переноса радионуклидов из района аварийной Чернобыльской АЭС. В этот период район Ладожского озера и его дренажная система не были подвержены значительному загрязнению. Это позволило Неве сравнительно быстро очиститься от загрязнения и приносить в Невскую губу воды, содержащие значительно меньшие концентрации радиоактивного цезия, чем имелось в водах Финского залива. Благодаря мощному речному стоку Невы в восточной части Финского залива, в том числе и в Копорской губе, началось снижение концентраций радионуклидов [9].

Результаты исследований содержания основных дозобразующих радионуклидов в воде и донных отложениях прибалтийских рек и Ладожского озера, Финского залива и собственно Балтийского моря в 2007 г.

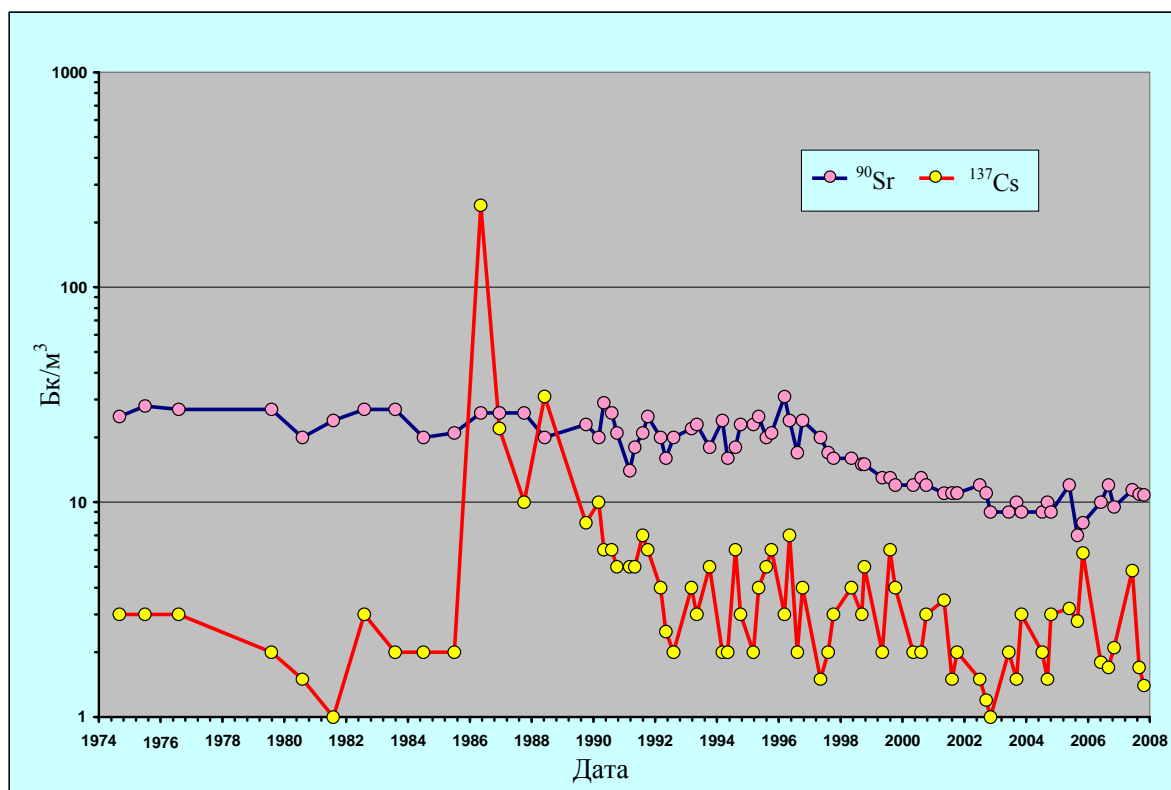
Содержание основных дозобразующих радионуклидов в воде прибалтийских рек и Ладожского озера

Систематические наблюдения за содержанием радионуклидов ^{90}Sr и ^{137}Cs в водах российских балтийских рек Нева, Луга и Нарва ведутся начиная с 1970 г. Анализ воды этих рек позволяет проводить радиационный контроль огромной дренажной территории, в том числе территории водосбора бассейна Ладожского озера. Отбор проб воды из рек, как правило, выполняется в мае, августе и октябре.

Результаты многолетних наблюдений за уровнем содержания ^{90}Sr в водах реки Нева по сравнению с реками Луга и Нарва показывают несколько повышенное содержание ^{90}Sr . Содержание ^{90}Sr в водах Невы в 2006 году находилось в пределах 9,5–12,2 Бк/м³. Сравнение данных по содержанию ^{90}Sr , полученных в 2007 г., позволяет сделать вывод о том, что радиационная ситуация в Ладожском озере, из которого вытекает река Нева, является стабильной. Результаты определения содержания ^{90}Sr и ^{137}Cs в пробах воды, отобранных из рек Нева, Нарва и Луга в 2007 г., представлены в табл. 2. Результаты определения содержания ^{90}Sr и ^{137}Cs в пробах воды, отобранных в Неве в 1974–2007 гг., представлены на рис. 3.

Таблица 2
Содержание ^{90}Sr и ^{137}Cs в воде рек Нева, Нарва и Луга в 2007 году

Река	Место отбора пробы	Дата отбора	Объемная активность, Бк/м ³	
			^{90}Sr	^{137}Cs
Нева	Санкт-Петербург	31.05.07	11,4±2,3	4,8±1,4
		22.08.07	10,9±2,2	1,7±1,3
		17.10.07	10,8±2,2	<1,4
Нарва	Ивангород	31.05.07	9,6±1,9	3,2±0,7
		22.08.07	8,6±1,7	1,4±0,6
		17.10.07	8,6±1,7	3,1±1,1
Луга	Кингисепп	31.05.07	19,2±3,8	5,7±0,9
		22.08.07	7,0±1,4	5,7±1,1
		17.10.07	7,8±1,6	4,5±1,6

Рис. 3. Содержание ^{90}Sr и ^{137}Cs в воде Невы.

Содержание ^{137}Cs в воде реки Луга в 2007 г., как и в предыдущие годы, было выше, чем в Неве и Нарве, и находилось в пределах 4,5–5,7 Бк/м³. Это объясняется тем, что Луга протекает по территории, повышенно загрязненной радиоактивным цезием в результате чернобыльской аварии. Смыв загрязненных частиц почвы во время паводка и дождей приводит к увеличению содержания ^{137}Cs в водах Луги, а разбавление водной массой не столь велико, как это имеет место, например, в Неве (по средним многолетним данным расход воды в Неве – 2510, в Нарве – 347, в Луге – 91,6 м³/с). Результаты определения содержания ^{90}Sr и ^{137}Cs в пробах воды, отобранных в Ладожском озере в 2007 г., представлены в табл. 3.

Таблица 3

Содержание ^{90}Sr и ^{137}Cs в воде Ладожского озера в 2007 г.

Район отбора пробы	Дата отбора	Объемная активность, Бк/м ³	
		^{90}Sr	^{137}Cs
Район Петрокрепости	10.07.07	11,8±2,4	<1,6
Район Северо-западного архипелага	11.07.07	13,3±2,7	4,8±1,6
Северная часть озера	14.07.07	12,2±2,4	<1,6

Речные воды, поступающие в Финский залив, являются пресными и имеют меньшее содержание ^{137}Cs и ^{90}Sr , по сравнению с морской водой. В целом поступление в Финский залив этих речных вод, минимально загрязненных ^{137}Cs , оказывает

огромное воздействие на уровень содержания радиоактивного цезия в водах Финского залива и всего Балтийского моря, стабильно снижая уровень загрязнения ^{137}Cs водных масс.

Содержание основных дозообразующих радионуклидов в воде Балтийского моря

В 2007 г. наблюдалось небольшое снижение содержания ^{137}Cs в водах западной части Финского залива по сравнению с предыдущими годами. В районе расположения Ленинградской АЭС, в водах Копорской губы Финского залива содержание ^{137}Cs в 2006 г., составлявшее в среднем 25 Бк/м^3 , в 2007 г. не превышало 20 Бк/м^3 . Содержание ^{90}Sr в 2007 г. в водах Копорской губы в среднем составило 14 Бк/м^3 .

Распределение ^{137}Cs по поверхностным и придонным водным горизонтам этой части залива было таким же, как и в предыдущие годы: в поверхностных слоях воды с низкой соленостью содержание ^{137}Cs ниже, чем в придонных с большей соленостью, при этом увеличение концентрации ^{137}Cs наблюдается, как и ранее, с востока на запад.

В центральной части Балтийского моря также наблюдается снижение содержания ^{137}Cs . В 2007 г. оно составило в среднем $45,7 \text{ Бк/м}^3$. Тенденция изменения содержания ^{137}Cs в поверхностных водах Финского залива и восточной части собственно Балтийского моря на базе усредненных данных в период 1985–2007 гг. представлена на рис. 4. Усредненные значения концентраций ^{90}Sr , ^{134}Cs и ^{137}Cs в водах Копорской губы Финского залива в 1971–2007 гг. представлены на рис. 5.

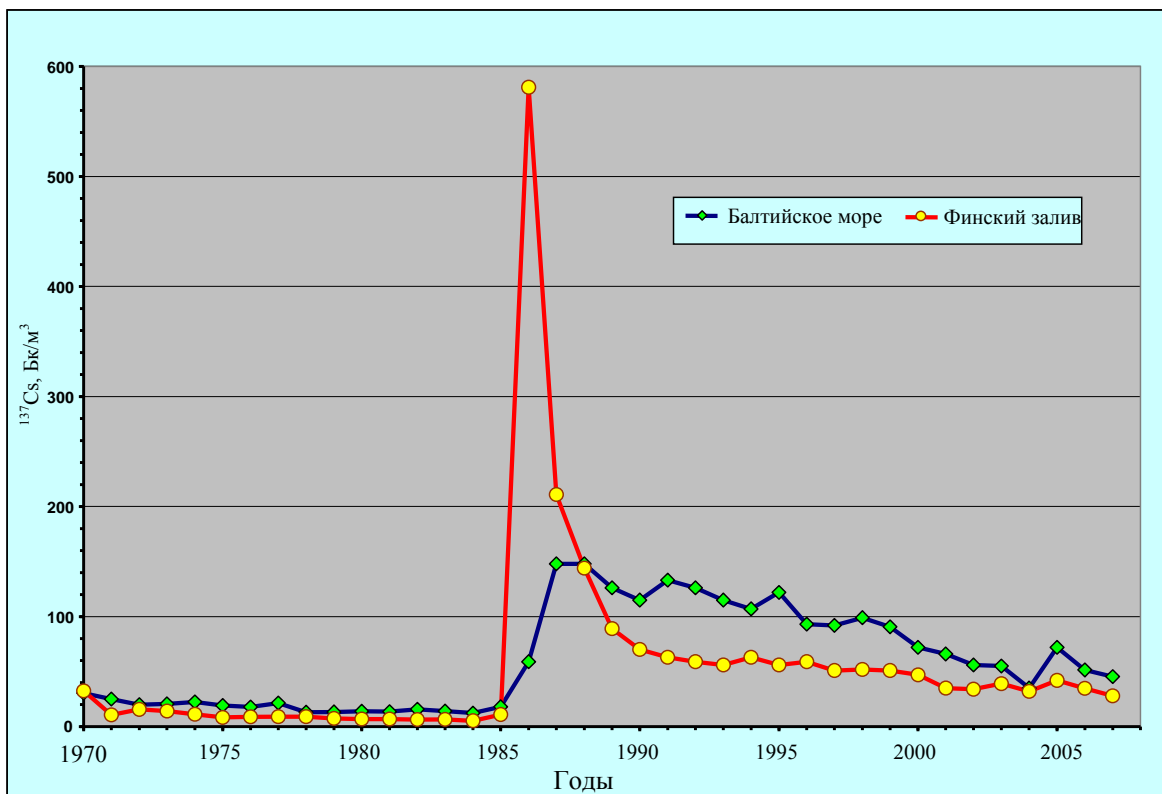


Рис. 4. Усредненные значения концентраций ^{137}Cs в поверхностных водах восточной части собственно Балтийского моря и Финского залива в 1970–2007 гг.

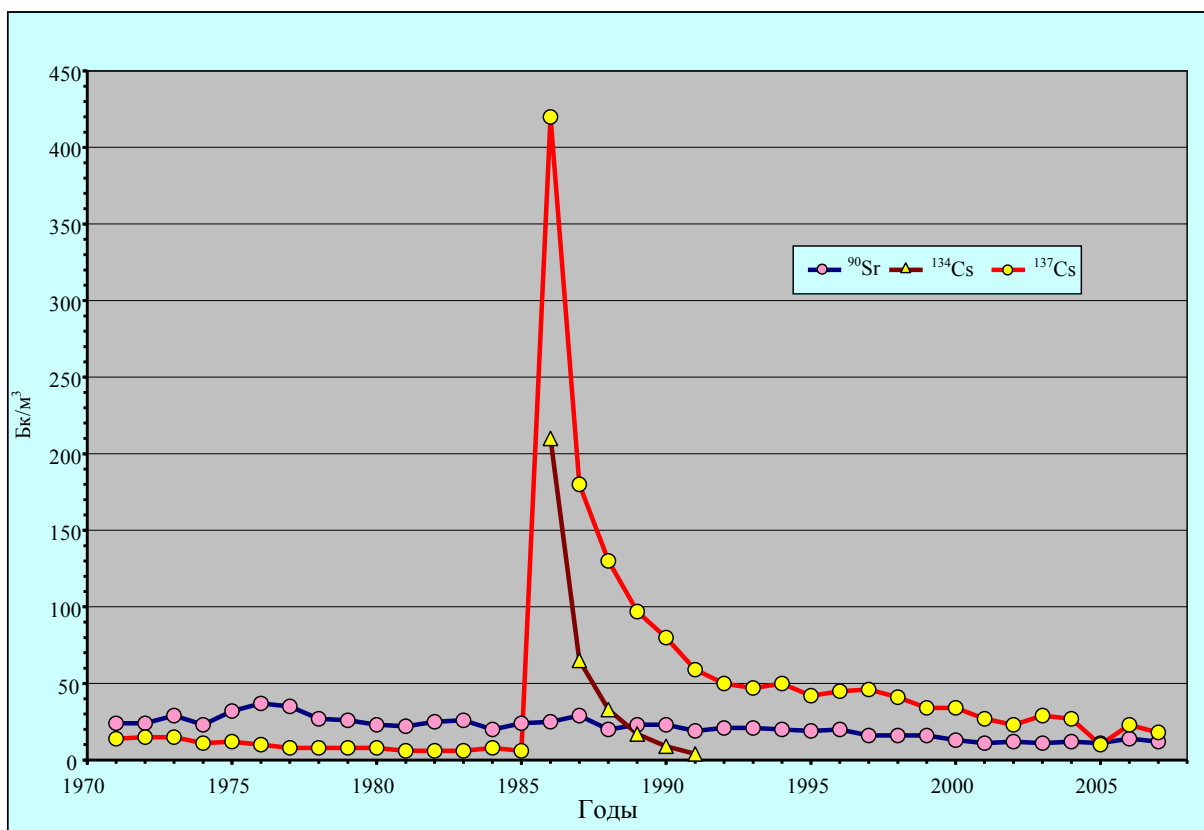


Рис. 5. Усредненные значения концентраций ^{90}Sr , ^{134}Cs и ^{137}Cs в водах Копорской губы Финского залива в 1971–2007 гг.

Содержание основных дозобразующих радионуклидов в донных отложениях Балтийского моря и Финского залива

Среди обследованных районов моря наибольшие значения удельной активности ^{137}Cs в донных осадках наблюдались в восточной части Финского залива, наименьшие – в центральной части Финского залива. В донных осадках Балтийского моря зафиксированы существенные различия содержания ^{137}Cs как в разных районах наблюдения, так и в одних и тех же точках отбора, но в разные годы. Полученные результаты определения ^{137}Cs свидетельствуют о неравномерном загрязнении донных осадков Балтийского моря. Особого внимания заслуживает восточная часть Финского залива – район интенсивного смешивания морских и пресных вод. Здесь в течение всего периода наблюдений отмечалась наиболее высокая плотность отложений. В зоне смешения речных и морских вод, в самой восточной части Финского залива, происходит формирование илов. Именно на стыке пресной воды, поступающей из рек Нева, Нарва, Луга, и морской воды Финского залива идет интенсивная сорбция радиоактивного цезия формирующимися донными осадками.

Послойное распределение в донных осадках показывает существенные различия между кернами как по величинам активности, так и по глубине распределения. ^{137}Cs в большинстве кернов концентрировался в самых верхних слоях. Разница в распределении ^{137}Cs по глубине керна может влиять на величину запаса: самый верхний слой больше подвержен размывам и намывам взвесей, а глубокие слои более надежно фиксируют радионуклиды. Прослеживается и другая тенденция: по мере удаления в

сторону запада глубина проникновения ^{137}Cs уменьшается. Возможно, это связано с большей стабильностью гидрологического режима по мере удаления от устья Невы.

Анализ послойного распределения ^{137}Cs по глубине донных осадков в пробах, отобранных по направлению с запада на восток, показал, что максимальное его количество содержится в поверхностном слое и составляет 25–45 кБк/м³. Распределение по глубине керна, как и следовало ожидать, может быть описано экспоненциальной функцией с показателями в пределах 03–06. Таким образом, в слоях ниже 7–10 см содержание ^{137}Cs выходит на уровни глобального загрязнения, имевшегося до 1986 года. Экспоненциальный ход продвижения ^{137}Cs в глубину донных осадков предполагает, что основным механизмом продвижения является диффузия. Для проб, отобранных в ближних мелководных зонах, картина сложнее, распределение не может быть описано простыми функциями, что говорит о наличии других механизмов перераспределения, например действия биоорганизмов, взмучивания верхнего слоя осадков и прочих факторов.

В пробах донных осадков, разделенных по слоям, также определяли удельную активность ^{90}Sr . Полученные данные характеризуют глобальный уровень содержания ^{90}Sr в донных осадках.

Заключение

На основе данных, полученных всеми государствами-членами Хельсинкской конвенции (рабочая группа HELCOM MORS), установлено, что наиболее важным источником искусственных радионуклидов, повлиявшим на их общее содержание в Балтийском море, стали выпадения после аварии на Чернобыльской АЭС в апреле 1986 г. Другим важным источником искусственных радионуклидов стали глобальные выпадения после проведения испытаний ядерного оружия. Радионуклиды из этого источника более равномерно распределялись по акватории Балтийского моря. В этих выпадениях доминировали ^{137}Cs и ^{90}Sr в соотношении около 1,6. Сбросы заводов по переработке ядерного топлива в Селлафилде и Ла Аге оказали влияние на содержание радионуклидов в Балтийском море через поступление загрязненной морской воды через датские проливы. Однако в связи со значительным сокращением сбросов в Селлафилде и Ла Аге в последние годы эти источники играют все менее и менее заметную роль. Наименее существенное влияние на содержание искусственных нуклидов в Балтике оказывают сбросы ядерных предприятий, расположенных в дренажном бассейне Балтийского моря. Большинство нуклидов может быть зарегистрировано только в непосредственной близости от источника загрязнения.

Общее содержание ^{137}Cs в Балтийском море увеличилось в 1986 г. более чем в 10 раз и затем уменьшилось в половину к 1991 г. вследствие процессов седиментации и выноса за пределы региона. В 1991 г. концентрация ^{137}Cs в Балтийском море была существенно выше, чем в любых других шельфовых морях мира, как, например, в центральной части Северного моря, где средний уровень достигал значений около 20 Бк/м³.

В рамках программы ХЕЛКОМ были проведены расчеты доз облучения, получаемых человеком при потреблении балтийских морепродуктов, зараженных ^{137}Cs и ^{90}Sr . При рассмотрении роли различных источников радиоактивного загрязнения оказалось, что до момента чернобыльской трагедии наибольшее значение имели глобальные выпадения как следствие испытаний ядерного оружия. С 1986 г. доминируют радионуклиды чернобыльских осадков. Максимальные дозовые уровни отмечены для 1986 г. на уровне 0,2 мЗв/год. Соответствующий уровень доз, получае-

мых с морепродуктами из-за естественной радиоактивности (^{210}Po), составляет около 1,2 мЗв, что в 6 раз больше. В настоящее время дозы облучения, получаемые обычными людьми через морепродукты, составляют около 1 % от таковой из наземных источников, и, следовательно, не вызывают беспокойства. Дозы облучения, источниками которых являются находящиеся в регионе ядерные предприятия, приблизительно на два порядка ниже соответствующих значений для глобальных выпадений.

Полная коллективная доза, получаемая человеком от антропогенной радиоактивности, оценивается в 2600 человеко-Зивертов (manSv). За приблизительно 2/3 этого уровня облучения ответственны чернобыльские осадки, за 1/4 – глобальные выпадения, за 8% – европейские перерабатывающие заводы, и только 0,04 % происходят от ядерных объектов, находящихся в регионе Балтийского моря. В расчет принимались данные о радиоактивности Балтики за период с 1950 по 1996 гг., а дозы облучения рассчитаны на 100-летний период (до 2050 года). Для того же периода рассчитана ожидаемая коллективная доза, получаемая человеком из-за естественной радиоактивности морепродуктов, что составляет порядка 20000 человекЗв, то есть в 10 раз превышает таковую от ^{137}Cs и ^{90}Sr . Максимальная общая доза, обусловленная ^{137}Cs и ^{90}Sr , отмечена для 1986 г. и составила 160 человекЗв, что приблизительно равно годовой дозе от естественных радионуклидов, встречающихся в морепродуктах (200 человекЗв).

Проводя анализ результатов, полученных в 2007 г., следует отметить, что в целом уровень содержания ^{137}Cs , поступившего в результате аварии на Чернобыльской АЭС и продолжающего оставаться основным нуклидом, загрязняющим Балтийское море, по сравнению с предыдущими годами продолжает незначительно снижаться. В 2007 году, как и ранее, наибольшие концентрации ^{137}Cs сохранялись в водах собственно Балтийского моря (51,5 Бк/м³), наименьшие – в восточной части Финского залива (2,2 Бк/м³). В снижении уровня загрязнения вод Балтийского моря ^{137}Cs исключительно велика роль рек, в особенности Невы и питающего ее Ладожского озера. В водах рек Нева, Нарва, Луга и Ладожского озера концентрации ^{137}Cs незначительны (1,5–5 Бк/м³), что способствует снижению загрязнения вод Балтийского моря, в том числе восточной части Финского залива.

Следует подчеркнуть, что поведение ^{90}Sr существенно отличается от поведения цезия при попадании в водные системы. В водах Балтийского моря ^{90}Sr имеет глобальное происхождение и распределен практически равномерно вне зависимости от уровня солености воды. В 2007 г. объемная активность ^{90}Sr в воде Балтийского моря находилась в пределах 10,4–15,4 Бк/м³.

Данные гамма-спектрометрического анализа еще раз подтвердили неравномерность загрязнения донных осадков Балтийского моря. Установление закономерностей распределения ^{137}Cs в донных осадках затруднено неустойчивым распределением радионуклида, его возможной подвижностью, размывами дна и переотложением верхнего нестабильного слоя. Наибольшие количества ^{137}Cs сосредоточились в донных осадках восточной части Финского залива, а наименьшие – в центральной части Финского залива.

Список литературы

1. Baltic Environmental Atlas, UN Environment Programme / GRID-Arendal. <http://maps.grida.no/baltic>.

2. Lasarev L. N., Kuznetsov Yu. V., Gedeonov L. I. et al. Investigation of the Radioactive Contamination of the Baltic Sea in 1980–1983 // Study of Radioactive Materials in the Baltic Sea: IAEA TECDOC-362. 1986. P. 162–175.
3. Radioactivity in the Baltic Sea 1984–1991. Baltic Sea Environment Proc.: Publ. HELCOM N 61. 1995.
4. Radioactivity in the Baltic Sea 1992–1998. Baltic Sea Environment Proc.: Publ. HELCOM N 85. 2003.
5. Three Years Observations of the Levels of Some Radionuclides in the Baltic Sea after the Chernobyl Accident. Seminar on Radionuclides in the Baltic Sea, May 29, 1989. Rostock–Warnemuende (German Dem. Rep.). Baltic Sea Environment Proc.: Publ. HELCOM N 31. 1989.
6. European Commission, 2000. Radiation Protection N 110.
7. Long-Lived Radionuclides in the Seabed of the Baltic Sea. Report of the Sediment Baseline Study of HELCOM MORS-PRO in 2000–2005. Baltic Sea Environment Proc.: Publ. HELCOM N 110. 2006.
8. Radioactivity of the Baltic Sea, 1999–2006. HELCOM Thematic Assessment. Baltic Sea Environment Proc.: Publ. HELCOM N 117. 2009.
9. Гедеонов Л. И., Анисимов В. В., Гаврилов В. М. и др. Радиоактивное загрязнение воды Балтийского моря в районе расположения Ленинградской АЭС, 1971–1994 гг.: Препринт РИ-244. 1996.

Baltic Sea Contamination after the CNPP Accident

A. V. Stepanov, V. P. Tishkov, Yu. A. Panteleev, V. M. Gavrilov

The countries located around the Baltic Sea have the problems of current importance, associated with radioactive contamination of this closed sea in Northern Europe (with account for extremely low ability of this sea for self-purification). For more than 80-million population of 9 states located in the Baltic region (Germany, Denmark, Latvia, Lithuania, Poland, Russia, Finland, Sweden, and Estonia), living on Baltic shores, the problems of Baltic ecology are of primary social and economic importance. These problems, in addition to practical and scientific significance, have often a pronounced socio-political slant, especially after the accident at the Chernobyl NPP. Intensive wide-spread and public international cooperation between Russia and states of Northern and Central Europe is launched at present within the frameworks of the Intergovernmental Agreement of the states participating in the Baltic Sea Helsinki Convention (HELCOM) to solve environmental problems, particularly, to arrange current inspection (monitoring) of radioactive pollution of Baltic Sea natural environments. On the basis of the data obtained by all the states participating in Helsinki Convention (HELCOM MORS working group) it is determined that the fallout after the Chernobyl NPP accident in April 1986 can be considered as the main source of manmade radionuclides, which has brought an effect on their total content in the Baltic Sea. Global fallout after nuclear weapon tests has become another substantial source of manmade radionuclides. The paper includes the results of the researches on the Baltic Sea contamination, which have been conducted by Radium Institute since early seventies.

II.7. Ретроспективная оценка эффективности мероприятий по повышению радиационной безопасности объекта «Укрытие»

А. П. Криницын

На основании результатов радиационного мониторинга выполнена оценка эффективности некоторых мероприятий по повышению безопасности объекта «Укрытие». Показана взаимосвязанность процессов образования жидких радиоактивных отходов внутри объекта «Укрытие» и выноса радиоактивных аэрозолей в окружающую среду. Сделан вывод, что недооценка сложности и взаимосвязанности процессов, прямо или косвенно влияющих на уровень безопасности объекта «Укрытие», приводит к неоправданным дозовым, материальным и финансовым затратам.

Объект «Укрытие»

26 апреля 1986 г. произошла одна из самых тяжелых техногенных катастроф в мире – в результате неправильных действий оперативного персонала (нарушения технологического регламента эксплуатации реакторной установки) взорвался 4-й энергоблок Чернобыльской АЭС. Авария привела к разрушению активной зоны реактора и выбросу миллионов кюри долгоживущих радионуклидов в окружающую среду.

Для того чтобы ограничить выброс радионуклидов из разрушенного реактора, было принято решение о строительстве конструкции, изолирующей радиоактивные материалы и предотвращающей их разрушение под воздействием природных факторов (атмосферные осадки, воздушные потоки и др.). Несмотря на экстремальные условия строительно-монтажные работы по созданию Саркофага – объекта «Укрытие» (ОУ) – были завершены осенью 1986 г. В 1988–1991 гг. были проведены работы по усилению отдельных строительных конструкций объекта «Укрытие» и монтажу систем безопасности.

Очевидно, что созданный в экстремальных радиационных условиях объект «Укрытие», хотя и ограничил выход радионуклидов в окружающую среду, но оставался ядерно- и радиационно-опасным сооружением. Наибольшую опасность представляли следующие факторы:

- выброс радиоактивных аэрозолей в атмосферу;
- утечка загрязненной воды из объекта «Укрытие» в гидрогеологическую среду;
- риск возникновения самопроизвольной цепной реакции (СЦР) в ядерно-опасных скоплениях топливосодержащих материалов (ТСМ).

Для контроля радиационной и ядерной безопасности объекта «Укрытие» на базе Комплексной экспедиции Института атомной энергии им. И. В. Курчатова в рамках Межотраслевого научно-технического центра «Укрытие» (МНТЦ «Укрытие») Академии наук Украины был создан отдел радиационного мониторинга. Сотрудники Радиевого института им. В. Г. Хлопина Э. М. Пазухин, М. А. Суворов, В. А. Цирлин, Л. Д. Николаева, А. М. Фридкин, С. В. Кочергин и многие другие внесли большой творческий и трудовой вклад в эту работу. Разработанные специалистами Радиевого института аналитические приборы и методики выполнения измерений стали основой системы радиационного мониторинга объекта «Укрытие». Эта система включает контроль выбросов радиоактивных аэрозолей, контроль утечки жидких радиоактивных отходов (ЖРО) из ОУ, а также контроль состояния скоплений лавообразных топливосодержащих материалов (ЛТСМ).

Системы контроля радиационной безопасности ОУ

Для контроля параметров радиационной безопасности ОУ кроме системы мониторинга МНТЦ «Укрытие» использовались штатные системы контроля радиационной безопасности ЧАЭС и объекта «Укрытие».

Контроль выброса радиоактивных аэрозолей в атмосферу и загрязнения воздуха внутри ОУ и в пределах санитарно-защитной зоны ЧАЭС включал:

- штатную систему контроля организованного выброса радиоактивных аэрозолей через вентиляционную трубу ВТ-2;
- систему контроля неорганизованных выбросов радиоактивных аэрозолей через проемы легкой кровли ОУ;
- системы контроля уровней загрязнения воздуха в помещениях ОУ, в локальной зоне ОУ и в пределах санитарно-защитной зоны ЧАЭС (СЗЗ ЧАЭС).

Контроль утечки ЖРО в гидрогеологическую среду включал:

- систему контроля скоплений и потоков ЖРО в помещениях ОУ;
- систему контроля уровня загрязнения грунтовых вод в локальной зоне ОУ и в пределах санитарно-защитной зоны ЧАЭС.

Контроль ядерно-физических параметров ТСМ включал:

- Информационно-измерительную систему (ИИС) «Финиш»;
- Информационно-измерительную систему «Финиш-М»;
- Комплекс «Шатер».

Мероприятия по повышению ядерной и радиационной безопасности объекта «Укрытие»

Создание и модернизация системы пылеподавления

Анализ и обобщение результатов многолетнего контроля параметров, определяющих ядерную и радиационную безопасность объекта «Укрытие», позволяют объективно оценить эффективность защитных мероприятий, выполненных в период наблюдений.

В конце 1989 г. была введена в эксплуатацию система пылеподавления (СПП), предназначенная для ограничения выброса радиоактивных аэрозолей в атмосферу. СПП включала оборудование для приготовления и подачи пылеподавляющих составов в подкровельное пространство через 14 форсунок, размещенных в верхней части бывшего центрального зала (ЦЗ) 4-го энергоблока ЧАЭС. Схема расположения форсунок СПП представлена на рис. 1. Образующаяся на поверхности развала ЦЗ пленка должна была локализовать и закрепить пылевые частицы.

Из данных, представленных на рис. 2, видно, что в период ввода в эксплуатацию СПП действительно наблюдалось значительное снижение уровня загрязнения воздуха в локальной зоне ОУ. Однако этот эффект может быть связан и с прекращением буровых работ в наиболее загрязненных помещениях ОУ, которые приводили к значительному повышению уровней загрязнения воздуха в зоне производства работ в результате вторичного пылеподъема.

С 1991 г. уровень загрязнения воздуха медленно снижался. Небольшие отклонения объясняются аномальными метеоусловиями и техногенными факторами. Следует отметить, что объемная альфа-активность аэрозолей вблизи ОУ в этот пе-

риод была более чем в 100 раз ниже допустимого предела для санитарно-защитной зоны ЧАЭС.

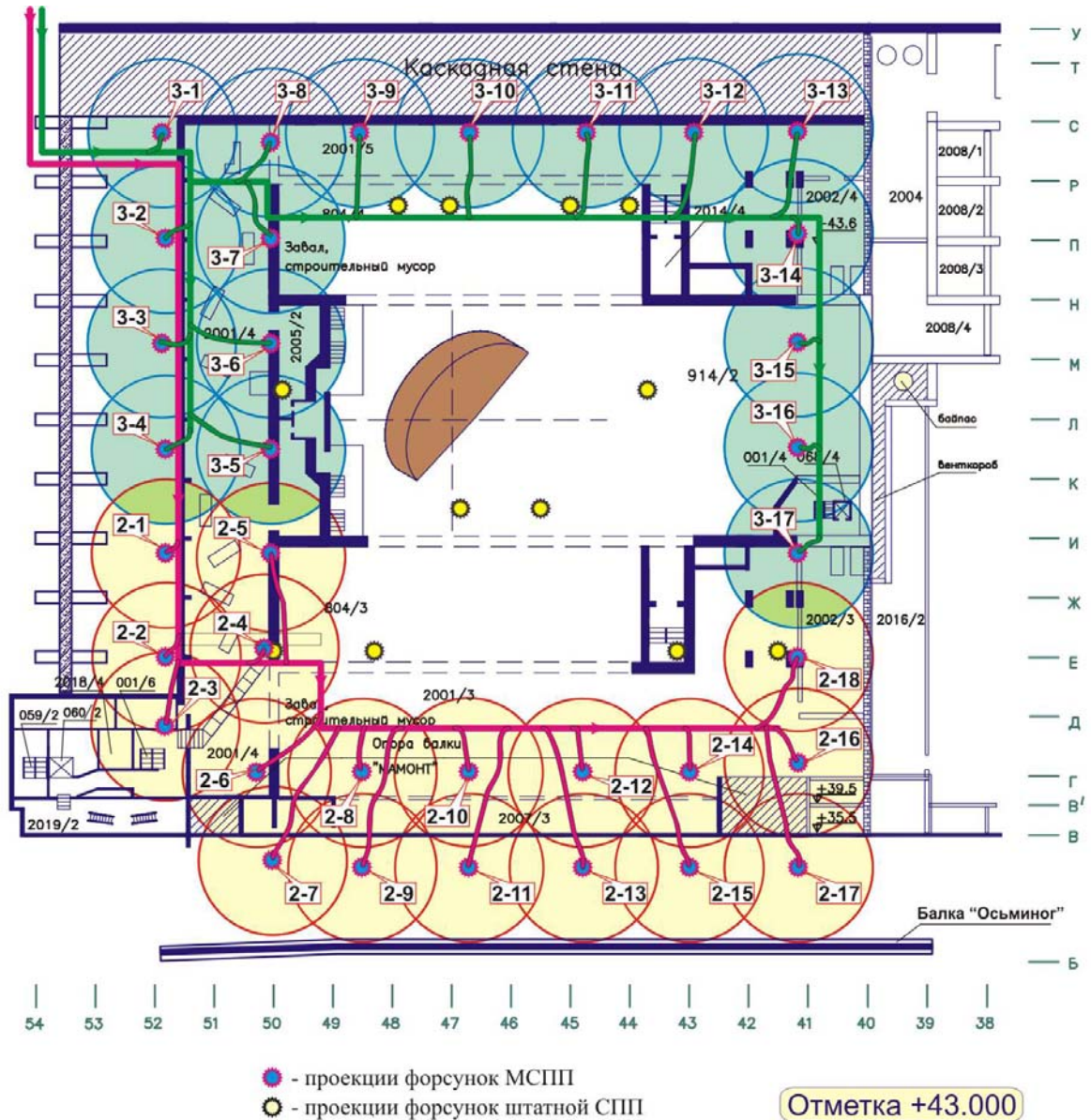


Рис. 1. Схема расположения коллекторов и зоны охвата СПП и МСПП (модернизированная СПП).

Однако это не повлияло на принятие решения о расширении существующей системы пылеподавления. В 2004 г. была введена в эксплуатацию модернизированная система пылеподавления (МСПП), которая позволяла распылять специальные составы над поверхностью большей части подкровельного пространства объекта «Укрытие». Схема расположения форсунок МСПП, а также проекции факелов пылеподавляющих растворов представлены на рис. 1.

Результаты испытаний МСПП оказались парадоксальными – пуск системы, предназначенной для ограничения распространения радионуклидов, привел к значи-

тельному увеличению выброса радиоактивных аэрозолей и, как следствие, к повышению уровней загрязнения воздуха в СЗЗ ЧАЭС.

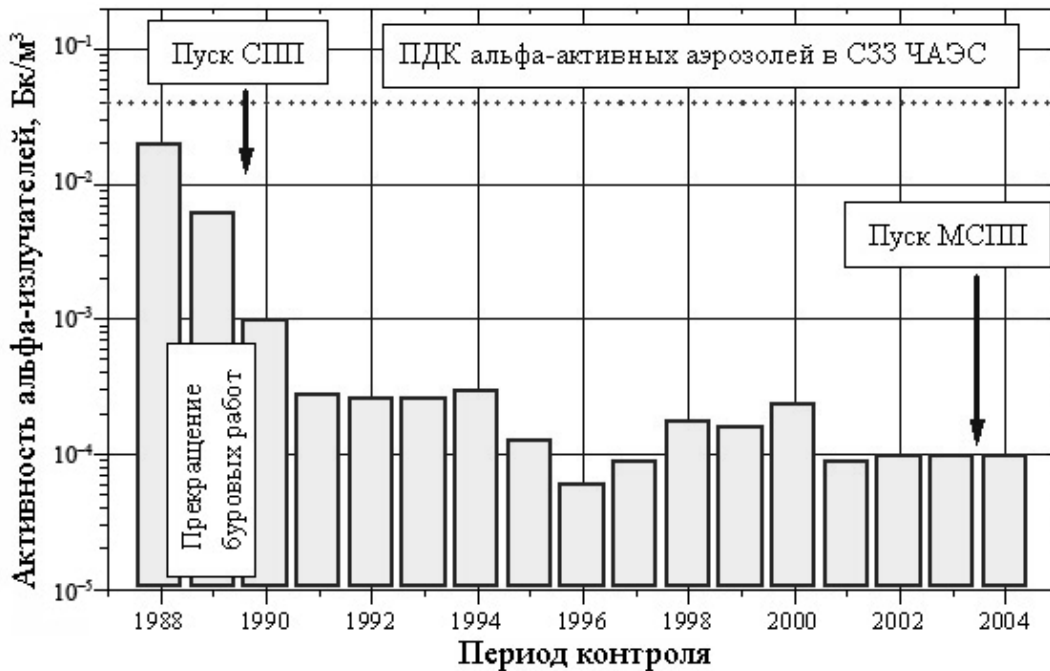


Рис. 2. Динамика уровня загрязнения воздуха α -активными аэрозолями в локальной зоне ОУ (данные МНТЦ «Укрытие»).

Из представленных данных (рис. 3) хорошо видно, что в период пусков МСПП (23.12–25.12.2003) скорость выброса ^{137}Cs в ВТ-2 и из люков легкой кровли резко возросла (в 10–50 раз). Повышение уровня загрязнения воздуха вблизи ОУ и в санитарно-защитной зоне ЧАЭС более чем на порядок было зафиксировано всеми задействованными системами контроля.

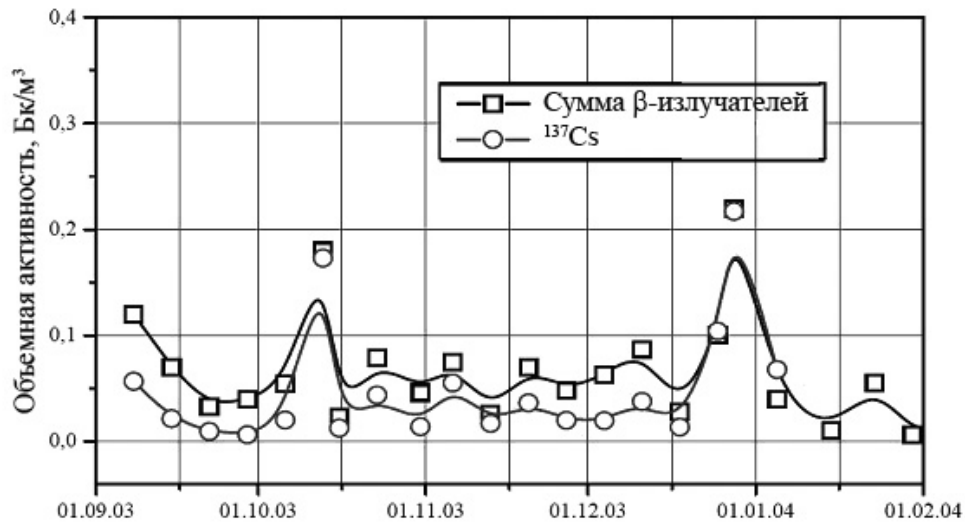


Рис. 3. Объемные активности в организованном выносе аэрозолей из ОУ в ВТ-2 (данные ЦРБ ЧАЭС).

В периоды пусков МСПП возросли объемные активности аэрозолей и в ряде помещений постоянного и периодического пребывания персонала объекта «Укрытие». Наибольшее повышение объемной активности аэрозолей (почти в 100 раз) было зарегистрировано в необслуживаемых помещениях, примыкающих к зоне действия МСПП.

В 2004 г. были проведены работы по минимизации негативных эффектов и устранению конструктивных недостатков МСПП, однако, как видно из представленных на рис. 2 и 4 данных, добиться положительного эффекта не удалось – уровень загрязнения воздуха вблизи ОУ, обусловленный выносом радиоактивных аэрозолей, не уменьшился.

Таким образом, работы по созданию МСПП, выполненные без учета результатов НИР по радиационному мониторингу ОУ, привели к неоправданным дозовым нагрузкам на персонал и большим финансовым затратам.

Опыт многолетних исследований показывает, что интенсивность выноса радиоактивных аэрозолей из объекта «Укрытие» определяется действием суммы природных и техногенных факторов, в том числе:

- интенсивностью и периодичностью выпадения атмосферных осадков;
- метеоусловиями на промплощадке (температура, влажность, направление и скорость ветра);
- интенсивностью процессов конденсации и испарения влаги внутри объекта;
- объемом, составом и частотой подачи пылеподавляющих растворов в подкровельное пространство;
- характером и интенсивностью выполняемых работ.

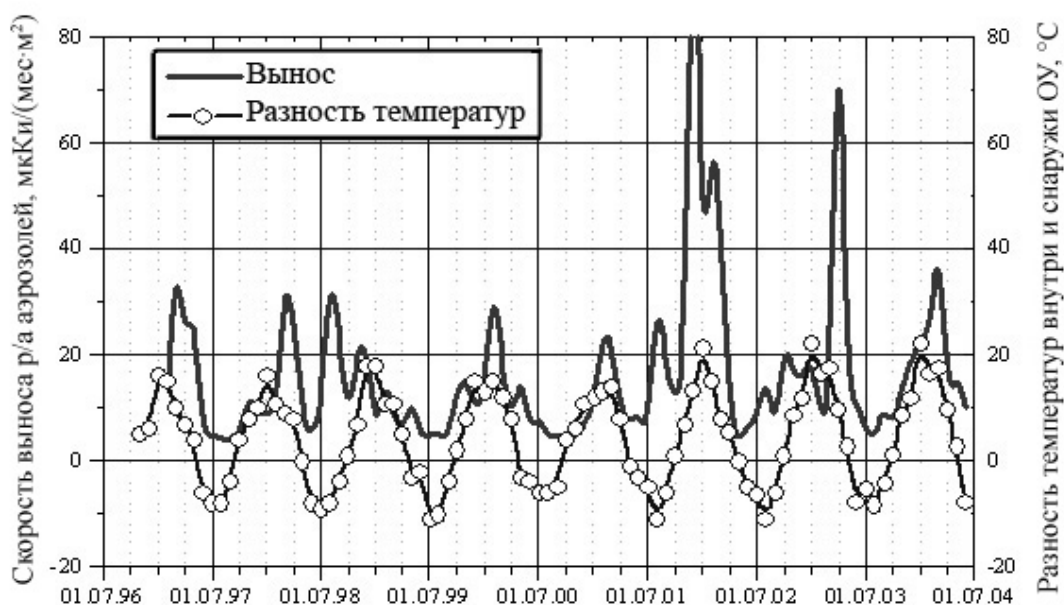


Рис. 4. Динамика неорганизованного (через проемы легкой кровли) выноса радиоактивных аэрозолей из объекта «Укрытие».

Полученные результаты показали, что чем суше внутри блока, тем интенсивнее вынос радионуклидов из объекта «Укрытие», и, наоборот, чем больше воды из того или другого источника поступает в объект, тем чище воздух внутри и меньше вынос радионуклидов в окружающую среду.

Это означает, что уменьшение поступления влаги без принятия специальных мер по уменьшению пылегенерирующей способности поверхности ТСМ и загрязненных конструкционных материалов может привести как к значительному увеличению выноса радиоактивных аэрозолей из объекта, так и к превышению допустимого уровня загрязнения воздуха внутри него. Характер сезонных изменений интенсивности выноса показывает, что в настоящее время природные факторы – интенсивность атмосферных осадков и процесс конденсации – оказывают не меньшее влияние на динамику выноса, чем техногенный фактор – распыление пылеподавляющих растворов.

Исходя из этого можно сделать вывод, что наиболее реальной возможностью ограничения процессов пылеподъема и выноса радиоактивных аэрозолей в окружающую среду является оптимизация периодичности и графика распыления аккумулярующих и локализирующих растворов.

В то же время увеличение объема влаги внутри 4-го блока приводит к уменьшению загрязнения воздуха и выноса радиоактивных аэрозолей в воздушную среду, но при этом возрастают объемы ЖРО на нижних отметках и, следовательно, риск неконтролируемой утечки ЖРО в гидрогеологическую среду. И, наоборот, уменьшение объема влаги внутри объекта «Укрытие» снизит риск утечки ЖРО, но при этом значительно возрастет риск загрязнения воздушной среды.

Таким образом, высокие дозовые нагрузки на персонал в процессе монтажа МСПП были напрасными, а значительные финансовые затраты (миллионы долларов) оказались бесполезными. Более того, протечки пылеподавляющих растворов привели к значительному увеличению объема ЖРО на нижних отметках 4-го блока (рис. 5), а также к изменению их химического состава. Высокие концентрации органических соединений (ПАВ, пленкообразующие соединения) и трансурановых элементов исключают возможность утилизации ЖРО ОУ по штатной технологии ЧАЭС.



Рис. 5. Скопление среднеактивных ЖРО на нижних отметках ОУ.

Герметизация кровли блока «Б» и машзала

На верхних отметках объекта «Укрытие» после завершения основных строительно-монтажных работ осталось много проемов и неплотностей, через которые происходил вынос радиоактивных аэрозолей в окружающую среду и поступление атмосферных осадков в помещения 4-го блока. Для подавления этих негативных процессов было принято решение герметизировать кровлю над помещениями блока «Б» и машзалом.

Работы по герметизации кровли потребовали значительных финансовых затрат и были сопряжены с высокими дозовыми нагрузками, однако эффект от этого мероприятия оказался отрицательным – объемы воды и, следовательно, ЖРО внутри ОУ значительно возросли из-за резкого увеличения объема конденсационной влаги.

В результате этого пришлось проводить работы по оптимизации воздушных потоков и температурных режимов в помещениях блока «Б», которые включали установку дополнительных дверей и создание системы обогрева ряда помещений на нижних отметках блока.

Проведенные работы позволили стабилизировать температурно-влажностные режимы внутри объекта «Укрытие», но привели к высыханию загрязненных поверхностей и, как следствие, к повышению загрязненности воздуха радиоактивными аэрозолями. Следует отметить, что работы по герметизации кровли ОУ и машинного зала не решили главную проблему – ограничение поступления влаги и количества образующихся ЖРО.

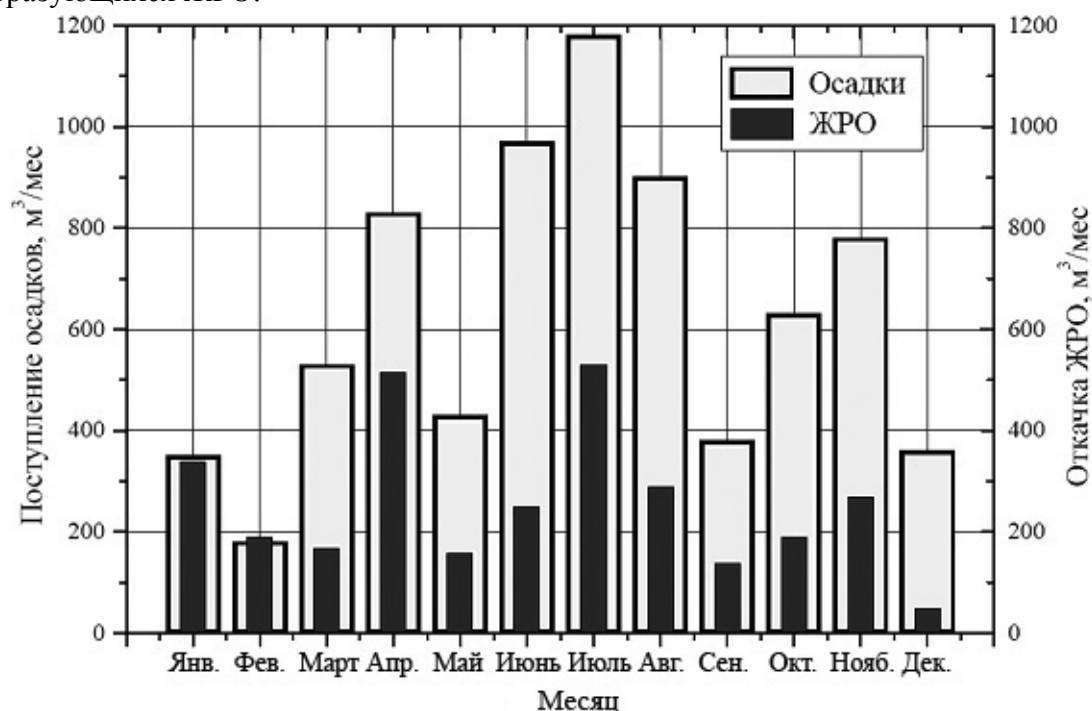


Рис. 6. Динамика поступления атмосферных осадков и откачки ЖРО из машинного зала в 1998 г.

Как видно из данных, представленных на рис. 6, между количеством выпавших на кровлю машинного зала и деаэрационной этажерки атмосферных осадков и объемами откачанных из машзала ЖРО наблюдается заметная корреляция. Разница

между количеством выпавших атмосферных осадков и объемами откачанного обусловлена эффектом испарения.

Таким образом, работы по герметизации кровли машинного зала не решили главную проблему – ограничить поступление влаги и количество образующихся ЖРО. Оказалось, что организация откачки низкоактивных ЖРО из машинного зала в химцех ЧАЭС – намного более эффективный способ решения проблемы по сравнению с дорогостоящими и радиационно-опасными работами по герметизации кровли.

Представленные результаты показывают, что проблемы преобразования объекта «Укрытие» в экологически безопасную систему необходимо решать комплексно с учетом взаимосвязанности протекающих внутри объекта процессов, а также принимать во внимание воздействие природных и техногенных факторов.

Опыт Чернобыля наглядно показал, что относительно небольшие затраты на научно-исследовательские работы позволяют значительно сократить объем дорогостоящих и радиационно-опасных работ по ликвидации последствий аварии на 4-ом блоке ЧАЭС.

Retrospective Assessment of Efficiency of Measures for Enhancing the Radiation Safety of the Shelter Facility

A. P. Krinitsyn

The efficiency of certain measures intended to enhance the Shelter facility safety is assessed on the basis of radiation monitoring results. The processes of liquid radioactive waste generation inside the Shelter facility and radioactive aerosol carrying-over into the environment are interconnected. The underestimation of the complexity and interconnectivity of processes affecting directly or indirectly the Shelter facility safety level leads to unreasonable dose burdens and material and financial expenditures.

II.8. Преобразование объекта «Укрытие» в экологически безопасную систему и обращение с радиоактивными отходами зоны отчуждения ЧАЭС

М. К. Абдулахатов

В статье рассмотрены некоторые научно-технические работы по преобразованию объекта «Укрытие» (ОУ) в экологически безопасную систему (ЭБС), в которых принимали участие сотрудники Радиевого института им. В. Г. Хлопина как в составе научных бригад ФГУП НПО РИ, так и в составе международных консорциумов. Наряду с различными аспектами преобразования ОУ в ЭБС, среди которых: разработка стратегии извлечения топливосодержащих материалов (ТСМ) и РАО, обращение с водными скоплениями ОУ, создание Интегрированной автоматизированной системы контроля (ИАСК) ОУ, рассмотрены также вопросы, связанные с оценкой объемов радиоактивных отходов, образовавшихся в результате чернобыльской катастрофы и мероприятий по ликвидации ее последствий, путем создания инфраструктуры для обращения с радиоактивными отходами. Настоящая статья основана на материалах публикаций, выпущенных с участием сотрудников ФГУП НПО РИ, а также научно-технических отчетов, проектных документов, других технических документов, выпущенных международными консорциумами в процессе выполнения различных проектов, финансирование которых осуществлялось в рамках программ ТАСИС и SIP (Shelter Implementation Plan/План осуществления мероприятий по преобразованию ОУ).

Введение

Объект «Укрытие законсервированного энергоблока № 4» (сокращенно – объект «Укрытие» или ОУ) был принят на техническое обслуживание персоналом ЧАЭС по Решению № 327 Правительственной комиссии 28 ноября 1986 г. Необходимо отметить, что на всех этапах его проектирования и строительства Генпроектировщик (ВНИПИЭТ) использовал в качестве исходных данных результаты исследований радиационной обстановки, состава и свойств загрязненного грунта на площадке ЧАЭС, оценки объемов и состава радиоактивных материалов и РАО, образовавшихся в результате аварии и мероприятий по ликвидации ее последствий, полученных специалистами комплексной экспедиции Курчатовского института, в состав которой входили и сотрудники НПО РИ.

Построенный в рекордно короткие сроки в чрезвычайно сложных радиационных условиях объект не мог в полной мере удовлетворять требованиям, предъявляемым к объектам атомной энергетики. Поэтому после проведения в 1988 г. первых ремонтных (стабилизационных) работ уже в 1990 г. ВНИПИЭТ разработал несколько вариантов кардинального решения проблем объекта «Укрытие». Среди прочих рассматривались варианты от полного омоноличивания законсервированного энергоблока (проект «Монолит») до строительства над ним нового укрытия (проект «Укрытие-2»).

Необходимо также отметить, что наряду с работами, направленными на преобразование собственно объекта «Укрытие» в экологически безопасную систему, проектными и научными организациями Минатомпрома СССР были начаты работы по комплексному решению проблем дезактивации, транспортировки, переработки и захоронения радиоактивных отходов с территорий, загрязненных в результате аварии на Чернобыльской АЭС. Однако из-за распада СССР эти работы не были завершены, и дальнейшая деятельность в этих направлениях проводилась уже организа-

циями независимой Украины и зарубежных стран за счет средств бюджета Украины и международных фондов.

К сожалению, в силу того, что новые российские власти вследствие тяжелого экономического положения России в середине 1990-х годов отказались от финансовой поддержки Международного фонда «Чернобыль», вклад российских организаций в реализацию мероприятий по преобразованию ОУ в ЭБС и в решение вопросов обращения с РАО зоны отчуждения ЧАЭС резко сократился. Поэтому и участие специалистов ФГУП НПО РИ в проектах, осуществляемых на площадке ЧАЭС после 1991 г., выразилось в работе отдельных специалистов в составе украинских организаций и украинских и международных консорциумов, выполнявших те или иные проекты в рамках различных международных программ. Вместе с тем, по оценкам украинских специалистов, сотрудники ФГУП НПО РИ внесли значимый вклад в решение некоторых задач преобразования ОУ, а также в работы, связанные с созданием инфраструктуры обращения с РАО в зоне отчуждения ЧАЭС. Ниже не в порядке хронологии, а скорее в порядке значимости перечислены некоторые результаты работ, в которых автор статьи и другие специалисты РИ принимали участие в период с 1997 по 2004 гг.

1. Участие сотрудников ФГУП НПО РИ в работах по преобразованию ОУ в экологически безопасную систему

Как было отмечено выше, вариант создания «Укрытия-2» не был единственным среди предложенных проектными организациями различных стран, принимавшими участие в Международном конкурсе Киев-92. Этот конкурс был проведен по инициативе Национальной академии наук Украины (НАНУ) и был направлен на выбор наиболее целесообразного варианта преобразования ОУ в ЭБС. Однако в дальнейшем, несмотря на результаты конкурса, именно идея создания «Укрытия-2» возоблудала над другими вариантами и прорабатывалась на стадии технико-экономического обоснования нового объекта с характеристиками контайнмента (прочного герметичного сооружения) и конфайнмента (негерметичного защитного сооружения). В 1996 г. исходя из соображений стоимости нового укрытия было рекомендовано «Укрытие-2» в виде конфайнмента, и международная группа экспертов разработала План осуществления мероприятий/Shelter Implementation Plan (ПОМ/SIP) на объекте «Укрытие» [1], который был одобрен странами Большой семерки и Украиной. Этот план реализуется сейчас в соответствии с Рамочным соглашением между Украиной и Европейским банком реконструкции и развития (ЕБРР) относительно деятельности Чернобыльского фонда «Укрытие». Рамочное соглашение ратифицировано Верховной Радой Украины [2]. В нормативно-законодательном поле Украины SIP имеет статус нормативного документа высшего уровня.

Следует отметить, что к разработке SIP были привлечены около 20 организаций Украины, Великобритании, Германии, Италии, США, Франции и Японии. К сожалению, к этой работе по разным причинам не были привлечены ни один НИИ, проектная или конструкторская организация Минатома России, принимавшие участие в работах по ликвидации Чернобыльской аварии, по проектированию и строительству объекта «Укрытие». Это обстоятельство, на наш взгляд, привело к тому, что разработанный документ, несмотря на все усилия его разработчиков, содержит некоторые недостатки, связанные с недостаточным знанием специфики объекта, состава и свойств радиоактивных материалов, находящихся внутри ОУ и на его площадке, с отсутствием опыта организации и проведения крупномасштабных работ по ликвидации радиационных аварий.

Весь объем работ, планируемых в рамках SIP, был разделен на 22 задачи, сформированные в пять пакетов, каждый из которых был направлен на решение важных проблем. Первый пакет, объединявший восемь различных задач, был направлен на сокращение возможности коллапса/обрушения ОУ. Второй пакет, включавший три задачи, должен решить вопросы сокращения воздействия вредных факторов в случае, если коллапс произойдет (вопросы пылеподавления, разработку мер готовности к подобной аварии и т.д.). Третий пакет, включавший три задачи, был направлен на решение вопросов улучшения ситуации с ядерной безопасностью на ОУ. В четвертый пакет, состоящий из четырех задач, были включены вопросы сокращения вредного воздействия ОУ на персонал и окружающую среду. И, наконец, пятый пакет объединял четыре задачи, направленные на разработку стратегии извлечения ТСМ и обращения с РАО, разработку технологий извлечения ТСМ, а также разработку и реализацию проекта нового безопасного конфайнмента (НБК). Расчетный объем финансирования всех 22 задач SIP [1], по оценкам его разработчиков, включая расходы на руководство проектом, составлял 758 млн. 168 тыс. долларов США.

Каждая из 22 задач SIP отражает тот или иной аспект проблематики преобразования ОУ в ЭБС и имеет важное значение для понимания многообразия проблем SIP. Однако даже их краткое описание привело бы к слишком большому объему данной статьи. Поэтому мы ограничимся лишь изложением результатов работ, выполненных автором в сотрудничестве с российскими, украинскими специалистами и специалистами Великобритании, Германии, США, Франции, Швейцарии и Японии, принимавшими участие в реализации задачи 19 «Разработка стратегии извлечения ТСМ и обращения с РАО», задачи 13 «Обращение с водой (водными скоплениями) ОУ» и задачи 17 «Создание интегрированной системы мониторинга ОУ».

1.1. Стратегии извлечения ТСМ, обращения с РАО и вопросы преобразования ОУ в ЭБС

В соответствии с SIP «основной целью деятельности на объекте «Укрытие» является защита персонала, населения и окружающей среды от опасности ядерных и радиоактивных материалов посредством извлечения и изоляции этих материалов и их захоронения» [1]. Наиболее полное обоснование необходимости извлечения радиоактивных материалов было выполнено в процессе подготовки SIP и приведено в приложении 5 SIP [1]. Как известно, основные краткосрочные риски объекта «Укрытие» предполагается уменьшить путем выполнения минимально необходимого объема стабилизационных работ и строительства нового безопасного конфайнмента (НБК). В контексте SIP термин «конфайнмент» относится к ограждающему сооружению, способному предотвратить выход загрязнителей в окружающую природную среду во время обычной эксплуатации и работ по извлечению.

Последующее направление работ определяется в SIP следующим образом: «Как только риск коллапса будет практически исключен, то оставшиеся риски относятся к управлению безопасностью содержащихся в объекте отходов. Эта задача концентрируется на выборе подходящих технологий извлечения, сроков начала и продолжительности работ» [1].

Следует отметить, что проблема извлечения радиоактивных материалов была одной из основных причин разработки SIP. Во время встречи делегации Большой семерки с делегацией Правительства Украины в Вашингтоне вначале 1997 г. Украина настояла на том, чтобы SIP «сформулировал задачи, относящиеся к топливосо-

держащим материалам (ТСМ), которые находятся в Блоке № 4, прежде всего для того, чтобы обосновать осуществимость, стоимость и с учетом рисков пользу различных вариантов извлечения ТСМ» [1].

Относительно сроков извлечения ТСМ в SIP различают две возможности: раннее извлечение и отсроченное извлечение. Под ранним извлечением подразумевается выборочное извлечение ТСМ в течение ближайших 50 лет. Отсроченное извлечение ТСМ предполагает отложить извлечение ТСМ на несколько сотен лет. Объемы работ SIP в сроки, отведенные на реализацию SIP (до 2005 г.), не предусматривали извлечение ТСМ. Важно отметить, что в плане [1] не отдается предпочтение ни раннему, ни отсроченному извлечению. Кроме финансовых затрат и коллективной дозы при реализации SIP на определение сроков начала работ влияет также наличие системы обращения с отходами на промплощадке ЧАЭС и на Украине в целом.

Предварительное рассмотрение технической осуществимости и безопасности раннего (в течение 40 лет) извлечения радиоактивных отходов из объекта «Укрытие» было выполнено в соавторстве с другими специалистами и изложено в работах [3–8] в рамках ранних тендерных проектов SIP.

Эффективность деятельности по реализации SIP было предложено рассматривать с точки зрения снижения различных компонентов риска и считать, что цели безопасности ОУ могут считаться достигнутыми, если:

- 1) риски радиационного влияния объекта «Укрытие» на персонал, население и окружающую природную среду будут снижены до уровней, которые могут быть разумно достижимы с учетом экономических и социальных факторов и
- 2) риск радиационного влияния на персонал, население и окружающую природную среду не будет превышать соответствующих показателей безопасности, установленных для АЭС (с учетом того, что объект «Укрытие» находится в зоне отчуждения ЧАЭС).

На рис. 1 в условных единицах показаны риски ОУ и промплощадки. Начало оси координат соответствует 10 годам после аварии, когда риск ОУ условно принимается равным 1. В соответствии с оценками отношения количества ТСМ на промплощадке к количеству ТСМ внутри ОУ риск промплощадки принимается равным $5 \cdot 10^{-3}$.

Вертикальные штриховые прямые определяют границы раздела между областями, где преимущественный вклад в риск дают осколки деления (I), трансурановые элементы (II) и природный уран (III). Масштаб на обеих осях логарифмический. Из данных, представленных на рис. 1, видно, что при сохранении локализации радиоактивных веществ внутри объекта «Укрытие» и на площадке риски будут далее уменьшаться по мере радиоактивного распада осколков деления и трансурановых элементов.

В то же время при сохранении существующей локализации ТСМ на площадке объекта «Укрытие» в будущем следует предположить увеличение риска, связанного с миграцией радионуклидов в грунтовые воды и последующим загрязнением ими бассейна реки Припять.

В целом, оценивая различные аспекты современного состояния ОУ, можно отметить, что оно характеризуется четырьмя основными факторами радиологического риска, обусловленными соответствующими исходными событиями:

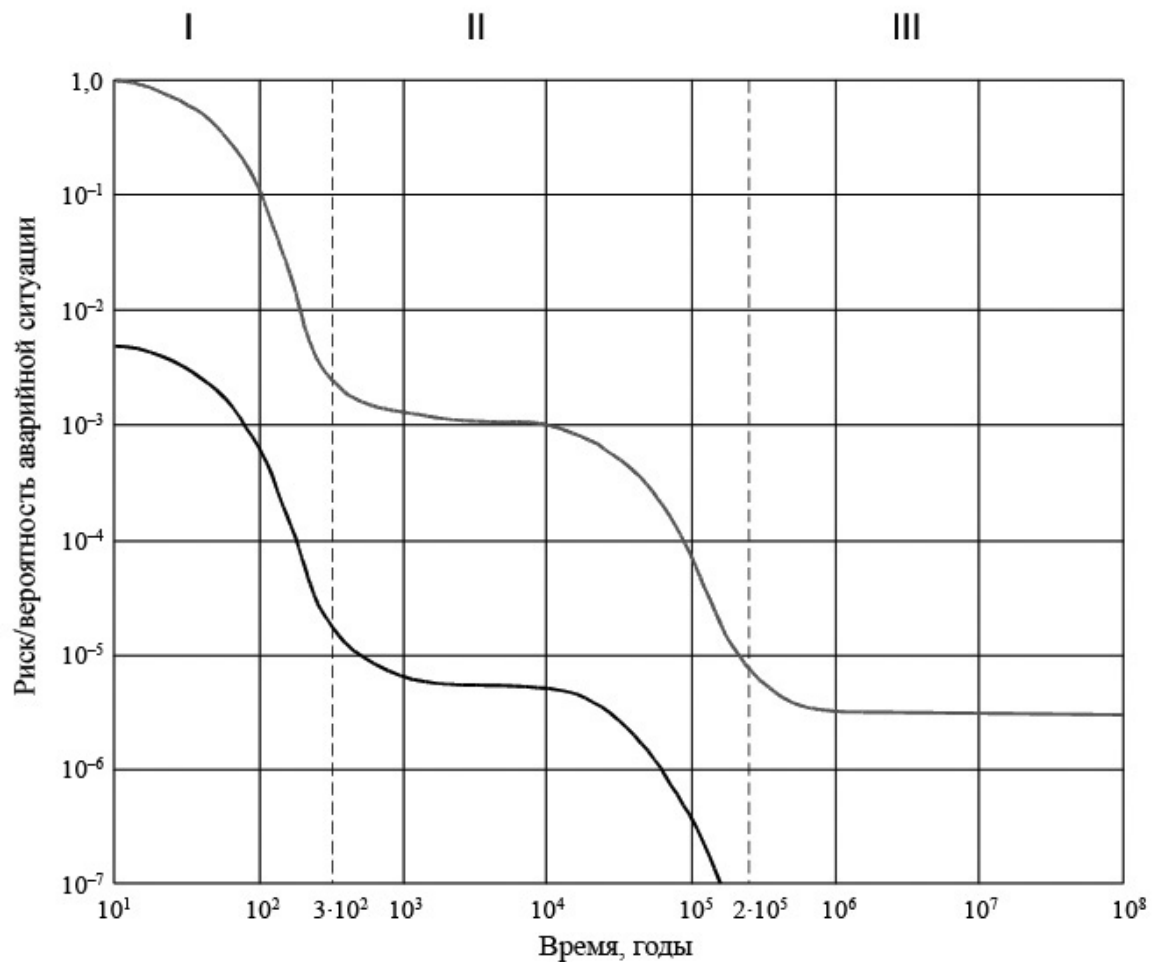


Рис. 1. Риск ОУ (верхняя кривая) и промплощадки (нижняя кривая).

1. Коллапс. Существующая конструкция ОУ имеет ограниченный срок эксплуатации – 30 лет, начиная с ноября 1986 г. Саморазрушение или коллапс может превратить ОУ в практически открытый источник ионизирующих излучений с общей активностью до $6,3 \cdot 10^{17}$ Бк (по состоянию на ноябрь 2000 г.). Такое событие следует классифицировать как радиационную аварию.

2. Обрушение. Некоторые элементы конструкции ОУ находятся в аварийном состоянии и нуждаются в срочном ремонте. Обрушение таких конструкций может привести к увеличению выброса радиоактивности из объекта по «штатным» путям (неплотности и т.д.), а также инициировать коллапс ОУ (в любом случае это событие также является радиационной аварией).

3. Энерговыделение внутри ОУ (критичность, взрыв, пожар). Неизвестно местонахождение части отработавшего ядерного топлива (ОЯТ) внутри ОУ, следовательно, точный прогноз его критичности проблематичен. Неконтролируемое воздействие на такие ТСМ может инициировать достижение критичности, дополнительный выброс по «штатным» путям, обрушение конструкций и коллапс (независимо от последствий, выход на критичность является радиационной аварией). Взрыв и пожар внутри ОУ также могут явиться источниками дополнительного энерговыделения.

4. Миграция радионуклидов в грунтовые воды³. Часть ТСМ находится на площадке ОУ и является открытым источником локального радиоактивного загрязнения грунтовых вод. Область радиоактивного загрязнения увеличивается вследствие миграции радионуклидов, при достижении водоносных горизонтов или бассейна реки Припять возможно увеличение коллективной дозы населения Украины.

Очевидно, что на радиологический риск ОУ влияют все перечисленные выше факторы. Существуют и другие факторы (пожар, наводнение и т.д.), также влияющие на риск ОУ. Выработка и реализация контрмер может осуществляться параллельно с целью минимизации каждого компонента риска⁴.

В самом общем виде риск (P) оценивается как произведение вероятности события (B) на его последствия (Π):

$$P = B \cdot \Pi$$

Соответственно, минимизировать риск возможно, снижая либо вероятность исходного события, либо возможные последствия, либо и то, и другое одновременно. Очевидно, что последствия любой радиационной аварии на объекте «Укрытие», вызванной вышеуказанными событиями, зависят от наличия или отсутствия ТСМ и других РАО в объекте (поскольку они представляют собой источник радиологической опасности) и от наличия или отсутствия систем локализации аварии. Следует отметить, что проводимые последние несколько лет работы по стабилизации строительных конструкций предполагают снижение рисков, связанных с коллапсом и обрушением.

При определении вариантов Стратегии было предложено рассмотреть возможные меры снижения (контрмеры) как вероятности вышеперечисленных исходных событий, так и их последствий, если они произойдут.

В результате анализа авторами работ [3–8] было предложено сформулировать три типа контрмер:

1. Тактические контрмеры: мероприятия, выполняемые на ОУ для предотвращения коллапса, обрушения, критичности, пожара и миграции радионуклидов в грунтовые воды. Это, как правило, краткосрочные мероприятия, требующие постоянного привлечения людских и материальных ресурсов в течение, по существу, неопределенного промежутка времени эксплуатации ОУ. При этом нет абсолютной уверенности в том, что тактические контрмеры предотвратят радиационную аварию на ОУ, тем не менее, они направлены на снижение ее вероятности.

2. Пассивные контрмеры: мероприятия, выполняемые в ОУ, направленные на уменьшение последствий радиационных аварий на ОУ, если они произойдут, путем заблаговременного создания систем локализации аварий. Эти контрмеры являются долгосрочными мероприятиями, требуют привлечения значительных людских и материальных ресурсов в короткий промежуток времени (фаза строительства) и постоянной эксплуатации в течение, по существу, неопределенного времени.

3. Активные контрмеры: мероприятия, выполняемые в ОУ, направленные на исключение радиологической опасности при возникновении аварии путем устранения

³ Неуправляемый процесс, поэтому может рассматриваться как протяженное во времени исходное событие.

⁴ В случае перерастания любого из перечисленных рисков из вероятностного события в достоверное событие, то есть в случае возникновения критичности, обрушения, коллапса и т. д. в разных сочетаниях, риски становятся взаимосвязанными, что в конечном счете может привести к увеличению суммарного радиологического риска.

источника радиологической опасности. Активные контрмеры требуют привлечения значительных людских и материальных ресурсов в течение ограниченного времени (активная фаза), превращают ОУ и промплощадку в радиационно-безопасный объект после завершения активной фазы.

В табл. 1 представлен перечень контрмер для каждого компонента риска ОУ, рассмотрение которых позволяет сделать следующие выводы:

1. Стабилизация является основным элементом тактических контрмер. Наряду с укреплением строительных конструкций необходимо также стабилизировать нынешнее состояние скоплений ТСМ, элементов реакторной установки и гидрогеологической обстановки на промплощадке.

2. Создание «Укрытия-2» в виде либо контайнмента (тяжелое, герметичное «Укрытие-2»), либо конфайнмента (легкое, негерметичное «Укрытие-2») является ключевым элементом пассивных контрмер. Для предотвращения выноса радионуклидов за пределы промплощадки в качестве пассивной контрмеры может быть создана гидрогеологическая защита, локализирующая ТСМ и другие РАО вне ОУ.

3. Извлечение ТСМ и других РАО из ОУ решает все вопросы, необходимые как для существенного уменьшения радиологического риска от существования ОУ, так и для снятия с эксплуатации разрушенного энергоблока № 4 ЧАЭС. Это является единственным решением для обеспечения адекватной долговременной безопасности после окончания административного контроля.

Таблица 1

Риски и контрмеры ОУ

№ п/п	Компонент риска	Тактические контрмеры	Пассивные контрмеры	Активные контрмеры
1.	Коллапс ОУ (раскрытие кровли, обрушение несущих конструкций)	Перманентный ремонт (стабилизация) ОУ	Создание «Укрытия-2», омоноличивание	Извлечение ТСМ и других РАО; разборка ОУ
2.	Обрушение (внутренние строительные конструкции, падение схемы «Е»)	Стабилизация отдельных конструкций, укрепление схемы «Е»	Создание «Укрытия-2», омоноличивание	Извлечение ТСМ и других РАО; разборка ОУ
3.	Энерговыделение внутри ОУ (критичность, взрыв, пожар)	Характеризация/исследование свойств и размещения ТСМ; стабилизация состояния скоплений ТСМ. Противопожарные мероприятия, контроль концентрации пыли, водорода и т.п.	Создание «Укрытия-2», омоноличивание	Извлечение ТСМ и других РАО; разборка ОУ
4.	Радиологический риск промплощадки ОУ (растворение и миграция ТСМ, находящихся на промплощадке ОУ)	Создание штатной системы мониторинга промплощадки. Стабилизация состояния промплощадки	Создание гидрогеологической защиты (противофильтрационной защиты)	Извлечение ТСМ и других РАО с промплощадки ОУ

Для выбора оптимальной стратегии извлечения ТСМ и обращения с РАО и преобразования ОУ в ЭБС в ходе выполнения задачи 19 было предложено всю совокупность стратегий разбить на три семейства:

1. «Нулевые» варианты. ТСМ и другие РАО в ходе реализации стратегии из ОУ не извлекаются.

2. Позднее извлечение. ТСМ и другие РАО извлекаются из ОУ через несколько сотен лет.

3. Раннее извлечение. ТСМ и другие РАО выборочно извлекаются из ОУ в течение ближайших 50 лет (жизни одного–двух поколений).

Логически построение семейств и затем конкретных вариантов Стратегии начинается с ответа на вопрос:

1. Извлекать или не извлекать топливо? Переход на следующий уровень детализации требует получения ответов на следующие вопросы:

2. Требуется ли для извлечения ТСМ и других РАО из действующего ОУ строительство «Укрытия-2»?

3. Может ли потребоваться для извлечения ТСМ и других РАО создание гидрогеологической защиты промплощадки ОУ?

Системный подход к определению (идентификации) вариантов Стратегии предполагает, что положительные и отрицательные ответы на 3 указанных вопроса рассматриваются как равнозначные [4]. Тогда логически формируются 12 основных вариантов, которые схематически показаны на рис. 2: 4 «нулевых» варианта, которые нумеруются О1, О2, О3 и О4; варианты, ориентированные на извлечение ТСМ (восемь), которые нумеруются Т1, Т2, Т3, Т4 для раннего извлечения и Т5, Т6, Т7, Т8 для позднего извлечения [4–6].

На рис. 2 для полноты картины указывается направление на скорейшее извлечение ТСМ, которое не рассматривается в ПОМ как вариант вообще, но является содержанием ряда документов, утвержденных правительством Украины. Под скорейшим извлечением ТСМ понимается стратегия преобразования объекта «Укрытие» в экологически безопасную систему, в которой извлечение ТСМ из объекта «Укрытие» и надежная их изоляция от окружающей природной среды объявляется наивысшим приоритетом. Поскольку скорейшее извлечение отличается от других вариантов только временем начала работ, являясь, по существу, продолжением любого из «нулевых» вариантов, то в настоящей статье этот вариант отдельно не рассматривается.

Особо следует подчеркнуть, что по формальным соображениям только варианты О2, Т2 и Т6 должны рассматриваться в рамках ПОМ, как это следует из его содержания. Однако для обоснованного принятия решения и обеспечения уверенности в конечном результате, то есть в том, что выбранный вариант Стратегии действительно оптимален, следует рассмотреть все возможные варианты Стратегии, в том числе предусмотренные ПОМ. В отдельный блок на рис. 2 выделены работы и технологии по обращению с ТСМ и РАО.

Представленный на рис. 2 подход позволяет выявить несколько десятков вариантов Стратегии. Выбор оптимального варианта предполагается на основе оценки затрат и выгоды, связанных с различными вариантами, и последующего сравнения вариантов. Рассматриваемые варианты Стратегии существенно различаются как по содержанию, так и по срокам реализации. В связи с этим возникает потребность в разработке некоего универсального механизма (способа) оценки затрат, одинаково применимого для всех вариантов. Тогда задача оценки затрат может быть существенно облегчена.

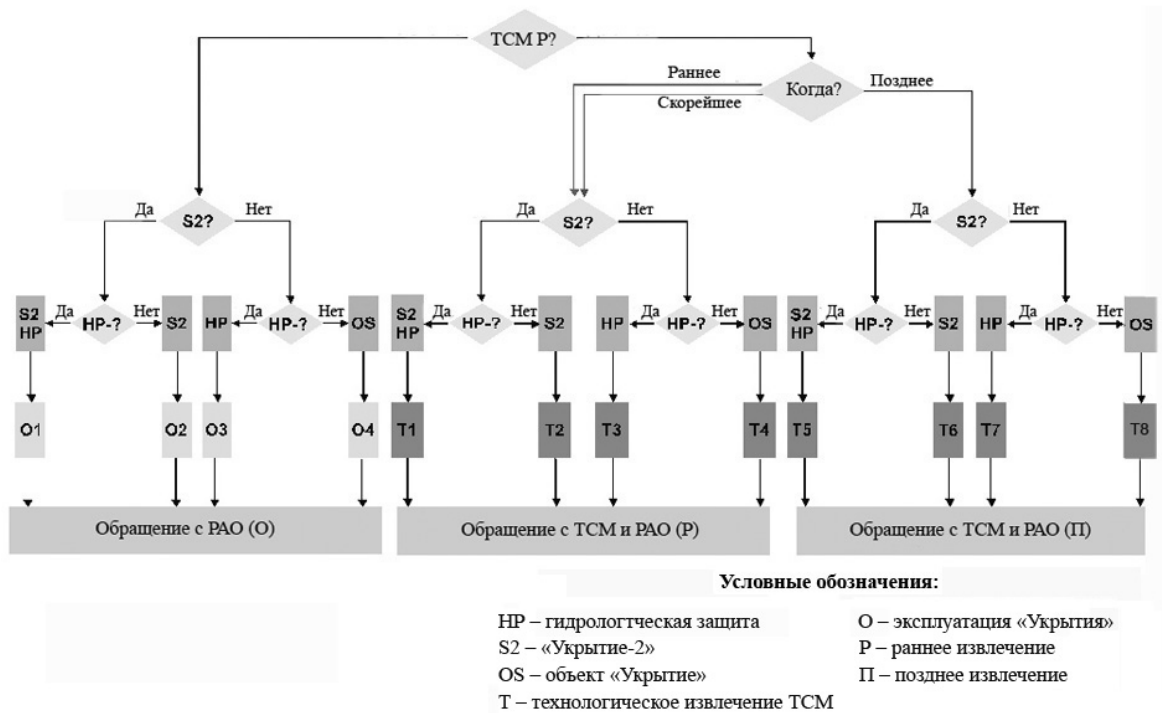


Рис. 2. Схема выбора стратегии извлечения ТСМ и обращения с РАО.

С этой целью в работах [3–8] был использован оригинальный подход, основанный на том, что любая рассматриваемая стратегия представляет собой ту или иную совокупность (матрицу) базисных элементов, стоимость каждого из которых была оценена в долларах США на ноябрь 2000 г.

Использованные значения базисных элементов были взяты авторами из научно-технической литературы, из проектно-конструкторской документации проекто-аналогов. Кроме того, использовались экспертные оценки специалистов в области проектирования объектов ядерного топливного цикла. Оценки стоимости различных базисных элементов стратегии колебались на уровне:

- нескольких миллиардов долларов [как, например, необходимых для инфраструктуры для захоронения долгоживущих (ДЖО) и высокоактивных отходов (ВАО) на Украине];
- нескольких сотен миллионов долларов [при создании инфраструктуры для обращения с низко- и среднеактивными короткоживущими отходами (НСАКЖО)];
- нескольких миллионов долларов (например, при проведении работ по стабилизации нестабильных строительных конструкций, дренажных работ на промплощадке ОУ и т.д.).

Не вдаваясь в детальный анализ использованных оценок стоимости, следует отметить, что такой подход стал инструментом, позволяющим проводить достаточно объективное сопоставление различных вариантов стратегии извлечения ТСМ и РАО из ОУ и дальнейшего преобразования ОУ в ЭБС. Произведенные с использованием такого подхода оценки стоимости различных вариантов показали, что наименьшие затраты на этапе реализации начальных стадий осуществления стратегии преобразования ОУ в ЭБС характерны для проекта «Монолит», разработанного во ВНИПИЭТ. По этому проекту, как известно, предусматривается омоноличивание (заливка бето-

ном) ОУ до отметки +42.0, что приведет к исключению контакта ТСМ и РАО с окружающей средой и фактически к созданию приповерхностного хранилища. Однако такое техническое решение привело бы к нарушению законодательства Украины, запрещающего захоронение высокоактивных отходов в приповерхностных хранилищах. Поэтому такой проект не может быть принят в качестве проекта, окончательно решающего проблему преобразования ОУ в ЭБС, так как в последующем необходимо будет произвести разборку «Монолита» с целью изоляции ТСМ и ВАО в геологических хранилищах. В этом случае большое количество РАО от разборки «Монолита» существенно увеличит стоимость реализации стратегии «Монолит».

Оценки, проведенные авторами работ [6, 7], показывают, что наиболее приемлемыми являются стратегии, предусматривающие извлечение ТСМ и РАО и преобразование ОУ в ЭБС в сроки, связанные с жизненным циклом нового безопасного конфайнмента (НБК), оцениваемые в 100 лет. При этом важно отметить, что создание НБК без учета дальнейших работ по преобразованию ОУ в ЭБС не приведет к решению проблемы ОУ, что было показано в работах сотрудников РИ, ВНИПИЭТ и ряда украинских организаций [9, 10]. Следует отметить, что, несмотря на начало работ по созданию проекта НБК, дискуссия [11–18] о подходе к решению проблем преобразования ОУ в ЭБС не завершена и специалисты РИ, ВНИПИЭТ и других специализированных организаций России еще могут внести свой вклад в обсуждение и решение данной проблемы.

1.2. Обращение с водой объекта «Укрытие» (ОУ)

Предполагается, что одним из этапов преобразования ОУ, как отмечалось выше, станет создание НБК. Это кардинальная мера против попадания воды в объект. Но пока, несмотря на принимаемые меры, тысячи кубометров атмосферной влаги, конденсационной и технологической воды оказываются внутри «Укрытия».

Вода, поступающая в объект, служит источником нескольких видов опасности. Основные из них три:

- попадая на скопления ТСМ, она приводит к увеличению эффективного коэффициента размножения нейтронов в системе;
- вода разрушает ТСМ и способствует неконтролируемому перемещению радиоактивности по внутренним помещениям и выносу радионуклидов за пределы ОУ;
- одновременно вода способствует разрушению строительных конструкций ОУ.

Кроме этих «непосредственных» воздействий на состояние ОУ, вода оказывает и негативное «косвенное» влияние. Она нарушает нормальную работу диагностических систем, препятствует проведению исследований по повышению безопасности объекта, превращает помещения ОУ в особо опасные (с точки зрения электробезопасности) и т.п.

К сказанному выше можно добавить следующее. Протекая через помещения ОУ, потоки воды собираются в нижних помещениях, как бы «опрашивая» многие, в том числе и недоступные сейчас контролю, скопления ТСМ. Поэтому вода может нести важную информацию о состоянии этих скоплений.

Большой вклад в исследования водных скоплений внесли работы А. П. Криницына [19], в которых наряду с сотрудниками РИ принимали участие специалисты КЭ ИАЭ им. И. В. Курчатова, Межотраслевого научно-технического центра (МНТЦ) «Укрытие» Национальной академии наук Украины (НАНУ). В результате этих работ были установлены источники скопления воды; основные места скопления воды в ОУ

и объем водных скоплений; химический и радионуклидный состав основных водных скоплений.

Было показано, что общий объем водных скоплений внутри помещений ОУ составляет 3000–6000 м³ [19] и может колебаться внутри указанного интервала в зависимости от погодных условий и неконтролируемых протечек. Основной объем водных скоплений сосредоточен на нижних отметках +2,20 м и –0,65 м блока Б и вспомогательных сооружений реакторного отделения (ВСРО).

Основными источниками поступления влаги в ОУ являются действующая система пылеподавления (СПП) около 200 м³/год, осадки в зависимости от погодных условий примерно 200 м³/год, конденсационная влага, которая также зависит от погодных условий [19].

Химический (содержание анионов, ионов металлов) и радионуклидный состав в различных точках отбора приведены в табл. 2–4.

Таблица 2

Химический состав воды из ряда помещений объекта «Укрытие»
(по результатам измерений в 1998–1999 гг.)

Номер точки	Концентрация компонента, мг/л				рН
	СО ₃ ²⁻	НСО ₃ ⁻	НРО ₄ ²⁻	U	
6	90	570	4	20	8,8
7	510	2700	30	0,55	9,0
20	210	230	4	0,31	9,6
27	100	530	2	0,57	9,0
30	150	410	3	3,0	9,1
32	210	750	4	23	9,0

Таблица 3

Концентрации металлов в блочных водах
(по результатам измерений в 1998–1999 гг.)

Номер точки	Концентрация элемента, мг/л				
	Fe	Ni	Cu	Zn	Pb
6	0,90	0,04	Не обнаружена	0,42	0,20
7	3,0	0,07	0,10	0,21	0,30
20	0,42	0,06	0,25	0,20	0,04
27	1,7	0,04	0,10	0,30	0,19
30	0,57	0,04	0,03	0,19	0,06
32	1,4	0,35	0,05	1,05	0,30

Наряду с анализом водных скоплений на содержание растворенных компонентов значительное внимание уделяли и исследованию коллоидных форм радионуклидов. В работе [20] было показано, что растворенные и коллоидные формы радионуклидов переносятся водотоками на нижние отметки ОУ. Коллоидные частицы коа-

гулируют, осаждаются и образуют высокоактивные донные отложения в водных скоплениях на нижних отметках 4-го блока. Оценка объема донных отложений показала, что только в помещении 001/3 их объем составляет около 65 м³.

Таблица 4

Средние концентрации радионуклидов и урана в блочной воде (за 2000 г.)

Номер точки	Концентрация компонента, Бк/м ³			
	¹³⁷ Cs	⁹⁰ Sr	Суммарный Pu	U, мг/л
6	6,2·10 ¹⁰	1,0·10 ¹⁰	4,0·10 ⁶	48
7	6,0·10 ¹⁰	6,3·10 ⁸	3,2·10 ⁶	31
8	2,4·10 ⁷	6,8·10 ⁶		0,013
20	1,2·10 ¹⁰	4,2·10 ⁸	2,7·10 ⁵	1,7
21	3,9·10 ¹⁰	4,7·10 ⁸	9,4·10 ⁵	15
26	8,1·10 ⁹	1,7·10 ⁷	7,7·10 ³	0,18
27	5,9·10 ⁹	4,0·10 ⁷	1,0·10 ⁴	0,34
30	5,2·10 ⁹	1,0·10 ⁹	3,6·10 ⁵	8,9
32	1,3·10 ¹¹	2,2·10 ¹⁰	4,1·10 ⁶	109

Были проведены исследования твердой фазы (взвеси) в пробах воды из нескольких скоплений. Для этого использовали метод последовательного фильтрования пробы воды через набор фильтров с размером пор 82, 10 и 0.2 мкм. Полученные фракции высушивали, взвешивали и после выжигания органических примесей проводили обычную процедуру анализов для определения радионуклидного и элементного состава.

Содержание взвесей в пробах воды для исследованных скоплений составляло 0.02–0.6 г/л (для частиц >0,2 мкм). Оказалось, что на них транспортируется до 30 % изотопов цезия, практически 100 % изотопов плутония и америция. В растворе остается 85–99 % урана.

Поскольку эти данные получены для ограниченного числа водных скоплений и по относительно небольшому количеству проб, их следует рассматривать лишь как оценочные.

На основе полученных данных по объему и составу водных скоплений в рамках Задачи 13 SIP с участием сотрудников ФГУП НПО РИ Криницына А. П. и Абдулахатова М. К. были разработаны рекомендации по обращению с водными скоплениями в помещениях ОУ. Так как состав водных скоплений на нижних отметках ОУ включает в себя большое количество взвешенных частиц, поверхностно-активных органических компонентов пылеподавляющего раствора, которые могут привести к выводу из строя штатных систем обращения с ЖРО химцеха ЧАЭС, было предложено создать в составе химцеха ЧАЭС специализированный узел для переработки вод ОУ. Были разработаны рекомендации по аппаратурно-технологическому оформлению этого узла, дооснащению лаборатории приборами и методами контроля, проведена инженерная оценка стоимости необходимого оборудования и приборов [20].

1.3. Создание системы радиационного контроля (СРК)

Создание интегрированной автоматизированной системы контроля (ИАСК) было определено в качестве одной из важнейших задач, связанных с преобразованием ОУ в ЭБС и дальнейшей эксплуатацией действующего ОУ и вновь создаваемого НБК. ИАСК в соответствии с задачей 17 SIP должна включать в себя следующие

подсистемы: контроля ядерной безопасности, радиационного контроля, контроля сейсмического состояния в районе ОУ/ЧАЭС, контроля состояния строительных конструкций. В рамках данной статьи в краткой форме будут изложены только результаты разработки концептуального проекта стационарной системы радиационного контроля (ССРК), в которой в составе международного консорциума НУТЕКО принимали участие автор и специалисты SGN (Франция), BNFL Engineering Ltd. (Великобритания), RWE NUKEM Solutions (Германия), Technicatome (Франция), JGC Nikki (Япония).

При выборе мест установки датчиков стационарной системы радиационного контроля (ССРК) во внимание принимались следующие факторы [21]:

- Требования регулирующих документов: НРБУ-97, НРБУ-97/Д-2000, СП АС-88 и ОСПУ (с учетом применимости отдельных положений указанных документов к условиям ОУ).
- Необходимость установки датчиков на границах ядерно-опасных зон (ЯОЗ), в саншлюзах, санпропускниках, барьерах и отдельных помещениях ОУ, в которых проводятся постоянные или периодические работы, а также на маршрутах следования персонала к местам выполнения работ.
- Периодичность проведения работ в помещении в соответствии с действующим «Технологическим регламентом ОУ» 1Р-ОУ, другими нормативными документами и инструкциями объекта «Укрытие».
- Освоенность помещений, в которых предполагается установка датчиков, то есть возможность доступа в помещения и наличие в них освещения.
- Радиационная обстановка в предполагаемых местах установки датчиков, то есть условия, в которых будут проводиться работы по монтажу, наладке и обслуживанию датчиков ССРК.
- Наличие в помещении обслуживаемого (действующего) технологического оборудования, предназначенного для обеспечения текущих регламентных работ, а также оборудования разрабатываемой ИАСК, обслуживание которого предусматривается в будущем.
- Наличие локальных источников радиационной опасности, например, скопленных ТСМ, твердых (ТРАО) или жидких (ЖРО) радиоактивных отходов.
- Сложившаяся практика работ в данном помещении (периодичность и длительность пребывания персонала в этом помещении).
- Действующая в настоящее время и планируемая практика дозиметрического контроля на ОУ с использованием переносных приборов и оборудования (при этом принималось во внимание, что разрабатываемая ССРК предусматривает в будущем совместное использование как стационарных, так и переносных средств контроля).
- Конфигурация помещений. При этом в протяженных помещениях (например, в коридорах) датчики предложено размещать, как правило, на входе и выходе из помещений.
- Особенности воздушных потоков в различных местах ОУ (например, в лестничных проемах, на переходах между блоками и т.п.), учитываемые при выборе мест установки датчиков контроля радиоактивности аэрозолей.

В результате был разработан концептуальный проект ССРК, включавший в себя:

- 38 датчиков измерения мощности дозы гамма-излучения, размещенных на отметках от 0.0 до отметки +55.0;
- 13 датчиков измерения альфа- и бета-активности аэрозолей;
- 2 датчика измерения расхода воздуха через байпас вентрубы (ВТ-2) для оценки выброса;

Концептуальный проект ССРК включал кроме указанных выше датчиков контроля и другие технические средства, а именно: устройства связи с объектом (УСО), устройства сбора данных (УСД), побудители расхода воздуха для пробоотборных устройств при контроле аэрозольного загрязнения, блоки аудио-визуальной сигнализации, предназначенные для предупреждения персонала, находящегося в зонах расположения соответствующих датчиков, кабельные линии и т.п.

Наряду с перечисленными техническими средствами ССРК концептуальный проект включал требования к архитектуре ССРК и программному обеспечению, предназначенному для обслуживания работы ССРК.

Схематичное размещение технических средств ССРК в помещениях ОУ представлено на рис. 3.

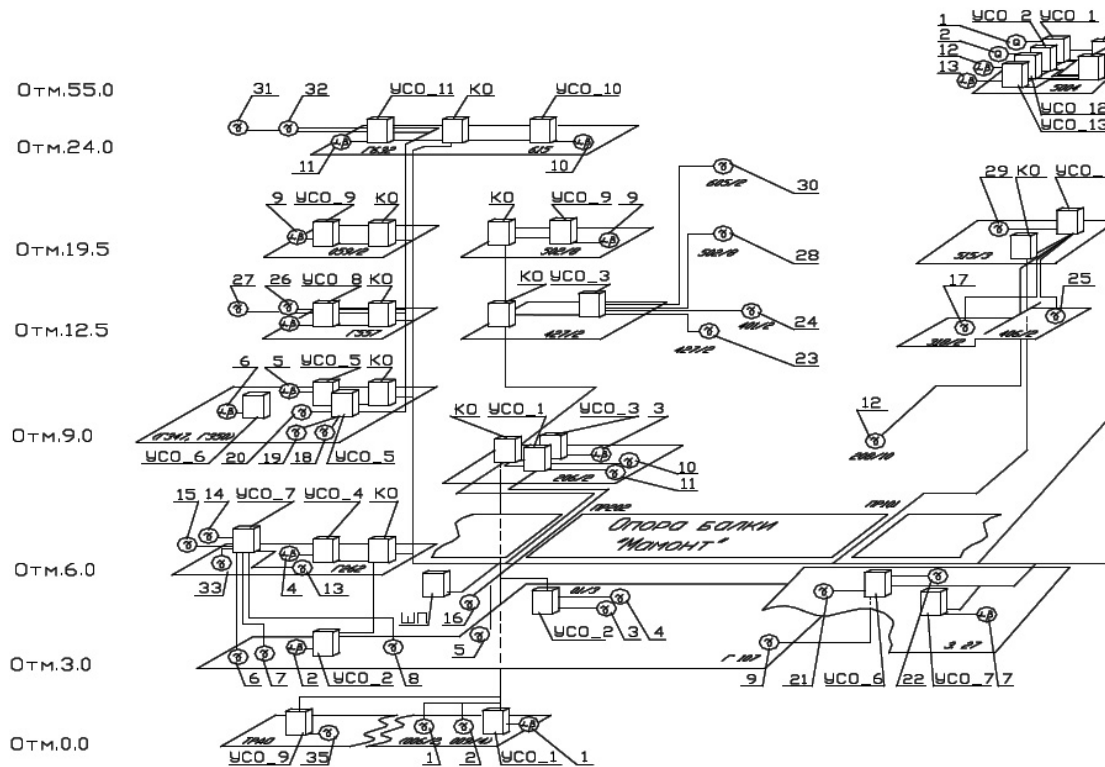


Рис. 3. Принципиальная схема размещения технических средств стационарной системы радиационного контроля.

Следует отметить, что места, в которых предполагалось разместить технические средства ССРК, характеризовались в ряде случаев очень высокими уровнями МЭД. Например, в пом. 206/3, отм. +6.0, ось 50, ряд Г–Д МЭД достигала значений 10 мЗв/ч, а в пом. 515/3 на отм. +19.5 ось 42–43, ряд Е–И – 15 мЗв/ч [21]. В других точках значения МЭД были ниже, но вместе с тем они превышали уровни, предусмотренные нормативными документами Украины. В ходе работ по концептуально-

му проекту ССРК была проведена оценка коллективной дозы при создании ССРК, исходя из радиационной обстановки в местах размещения технических средств ССРК, нормативов времени на монтаж, наладку и пуск в эксплуатацию технических средств, прокладку кабельных трасс и т. д. По нашим оценкам, эффективная доза внешнего облучения может составить 572 мЗв, а эффективная доза внутреннего ингаляционного облучения – 16 мЗв [21].

Разработанный в результате работ концептуальный проект ССРК [21], так же как и проект ИАСК в целом, в последующем был принят за основу при разработке детального/рабочего проекта ИАСК ОУ, введенной в эксплуатацию в конце 2007 г.

2. Результаты работ по созданию инфраструктуры обращения с РАО в зоне отчуждения ЧАЭС

Как отмечалось выше, авария на 4-м блоке ЧАЭС, мероприятия по ликвидации ее последствий, строительные работы по созданию ОУ в 1986 г. привели к образованию большого количества РАО различного уровня активности и состава. В силу сжатых сроков, в которые проводилось большинство мероприятий в 1986 г., отсутствия требуемого нормативными документами технико-экономического обоснования для организации пунктов временной локализации радиоактивных отходов (ПВЛРО) и пунктов захоронения радиоактивных отходов (ПЗРО) длительное время после аварии не был налажен должный учет количества РАО в зоне отчуждения (ЗО) ЧАЭС. В то же время необходимость в уточнении данных о местах расположения ПВЛРО, ПЗРО, объеме РАО в них, об их химическом и радионуклидном составе стала возрастать по мере того, как в ЗО ЧАЭС стали проводиться работы по созданию инфраструктуры обращения с РАО.

Работа по инвентаризации РАО ЗО ЧАЭС была выполнена в рамках проекта (OSAT/OSAT – On Site Assistance Team/Группа содействия работам на площадке ЧАЭС), финансируемого программой ТАСИС. Работу по данному проекту выполнял консорциум в составе: SGN (Франция – лидер консорциума), AEA Technology (Великобритания) и EWN (Германия). В составе данного проекта наряду с персоналом указанных выше западных компаний работали специалисты украинских специализированных предприятий и РИ. В ходе проекта, в частности:

- подготовлены Технические спецификации на создание Промышленного комплекса по обращению с твердыми радиоактивными отходами (ПКОТРО), ориентированного на отходы, которые будут возникать при проведении работ по снятию с эксплуатации ЧАЭС (блоков 1–3);
- проведена инвентаризация РАО в зоне отчуждения;
- подготовлены также Технические спецификации на создание Центра по переработке и захоронению радиоактивных отходов в ЗО ЧАЭС, ориентированного на отходы, которые в настоящее время хранятся в региональных комбинатах УкрГО «Радон», будут образовываться в результате деятельности предприятий ЯТЦ Украины, а также при проведении работ по преобразованию ОУ в ЭБС. Во всех перечисленных работах принимал участие сотрудник Радиевого института Абдулахатов М. К.

Ниже в краткой форме приведены основные результаты этих работ.

2.1. Разработка Технических спецификаций на выполнение проектирования, лицензирования, изготовления, поставки, строительства, монтажа и ввода в эксплуатацию ПКОТРО

Технические спецификации в терминологии, принятой в международных технических документах, по своему статусу могут соответствовать таким российским документам, как исходные данные. В Технические спецификации на ПКОТРО авторами были включены [22]:

1. Технические и функциональные требования к ПКОТРО.
2. Данные по твердым радиоактивным отходам, планируемым к извлечению, переработке и захоронению на ПКОТРО.
3. Основные требования к обращению с твердыми радиоактивными отходами на ПКОТРО.
4. Сведения о нормативных документах по лицензированию и сертификации.
5. Данные по предлагаемым площадкам размещения ПКОТРО, инфраструктуре и системам подключения.
6. Климатические, геологические, гидрогеологические и сейсмические данные.
7. Требования к радиационной защите и контролю.
8. Требования к физической защите.

Технические спецификации в комплекте с другими документами по существу определили состав и содержание Технического предложения, которое должен был представить каждый консорциум-участник тендера на создание ПКОТРО. Следует отметить, что Техспецификации прошли все необходимые по украинскому и международному законодательству процедуры согласования в надзорных органах Украины и экспертных организациях.

На основе разработанных Техспецификаций был проведен тендер на создание ПКОТРО (рис. 4), в котором победителем была признана немецкая фирма NUKEM, которая, разработав и согласовав проектную документацию на ПКОТРО, в настоящее время ведет работы по созданию трех основных лотов, а именно по созданию установок по извлечению РАО из объектов, подлежащих снятию с эксплуатации ЧАЭС, установок по сортировке РАО и, наконец, по созданию хранилища для низко- и среднеактивных (НСА) короткоживущих (КЖО – по украинской классификации короткоживущих) отходов, которые будут образовываться в процессе проведения работ по снятию с эксплуатации 1-го–3-го блоков ЧАЭС. Оценки показывают, что их объем не будет превышать 70 тыс. м³. Именно на такой объем НСА КЖО рассчитана первая очередь хранилища «Вектор», которая и составила 3-й лот. В настоящее время работы по созданию первой очереди хранилища «Вектор» близятся к завершению.

2.2. Инвентаризация отходов 3О ЧАЭС

Работы по инвентаризации РАО 3О ЧАЭС проводились с целью оценки разных вариантов дальнейшей стратегии по обращению с РАО, в том числе выбора оптимальных способов их переработки и захоронения.

Основные материалы по инвентаризации РАО 3О ЧАЭС были обобщены в отчете [23], выпущенном группой экспертов международного проекта ОСАТ, включая Абдулахатова М. К. В нем приведены сведения о:

- местонахождении и объеме (массе) отходов;
- физических свойствах и составе (металл, дерево, бетон, почва);
- удельной активности α -, β -, γ -излучателей и радионуклидном составе;

- условиях хранения (дополнительные меры по изоляции радионуклидов от окружающей среды).

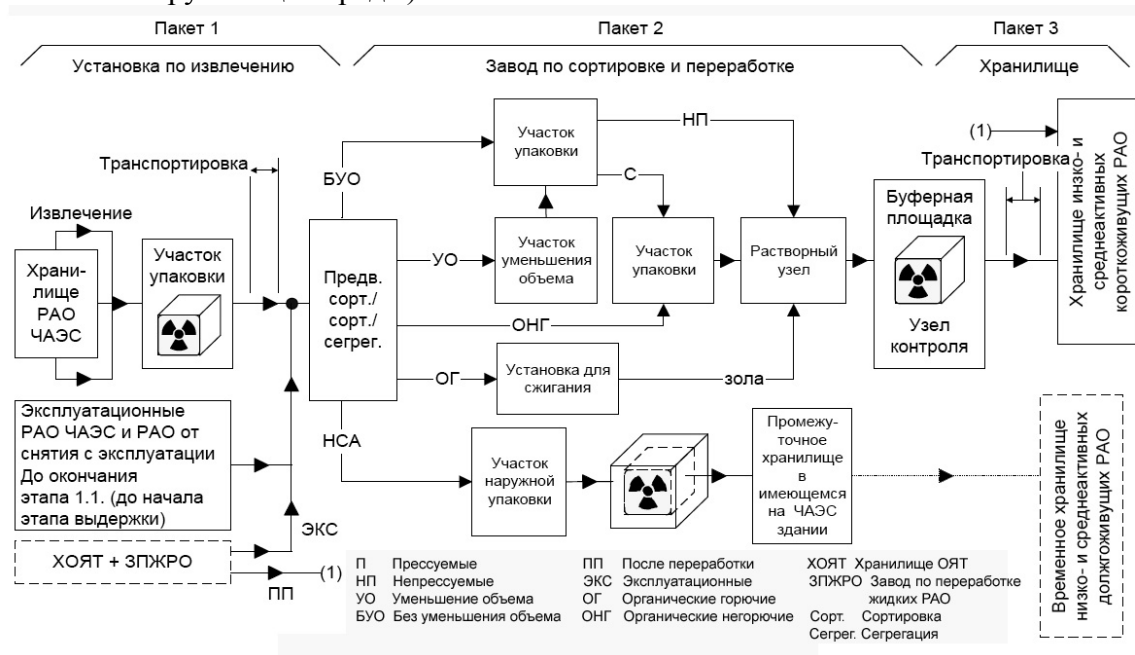


Рис. 4. Принципиальная технологическая схема ПКОТРО.

При инвентаризации РАО была проведена верификация использованной информации с целью оценки ее достоверности.

Было показано, что основной объем РАО в ЗО ЧАЭС сосредоточен в пунктах временной локализации радиоактивных отходов (ПВЛРО) и пунктах захоронения радиоактивных отходов (ПЗРО). На рис. 5 приведены основные ПВЛРО и ПЗРО зоны отчуждения, за исключением ПЗРО «Буряковка», не вошедшего в рисунок данного масштаба из-за своего более удаленного расположения.

Местоположение всех остальных ПВЛРО, таких, как Песчаное плато, г. Припять, станция Янов, «Рыжий» лес, «Нефтебаза», «Стройбаза», «Очистные сооружения», ПЗРО «Подлесный» и ПЗРО «Комплексный», приведено на указанном рисунке.

Было показано, что:

- 1) объем отходов в отвалах, зарегистрированных как ПВЛРО, составляет около 4075004 м^3 (2772802 т) с общей активностью $1,94 \cdot 10^{15} \text{ Бк}$. Эти цифры дают основание полагать, что средняя удельная активность составляет $6,99 \cdot 10^8 \text{ Бк/т}$ ($4,77 \cdot 10^8 \text{ Бк/м}^3$);
- 2) объем отходов в ПЗРО в зоне отчуждения составляет около 570770 м^3 (889474 т), включая ПЗРО «Буряковка», при общей активности $5,49 \cdot 10^{15} \text{ Бк}$. Эти цифры дают основание полагать, что средняя удельная активность в ПЗРО составляет $6,18 \cdot 10^9 \text{ Бк/т}$ ($9,62 \cdot 10^9 \text{ Бк/м}^3$);
- 3) объем отходов в отвалах, незарегистрированных как ПВЛРО/ПЗРО, составляет около 44715 м^3 . По этой части отходов нет данных об удельной активности;
- 4) на основе информации, приведенной в трех предыдущих пунктах, становится возможным сделать заключение, что общий объем отходов в зоне отчуждения составляет 4690489 м^3 ;
- 5) в дополнение к 26196 м^3 отходов, указанных для ПЗРО «Комплексный», можно прибавить дополнительно около 88000 т загрязненного оборудования и около 50000 м^3 отходов в контейнерах.

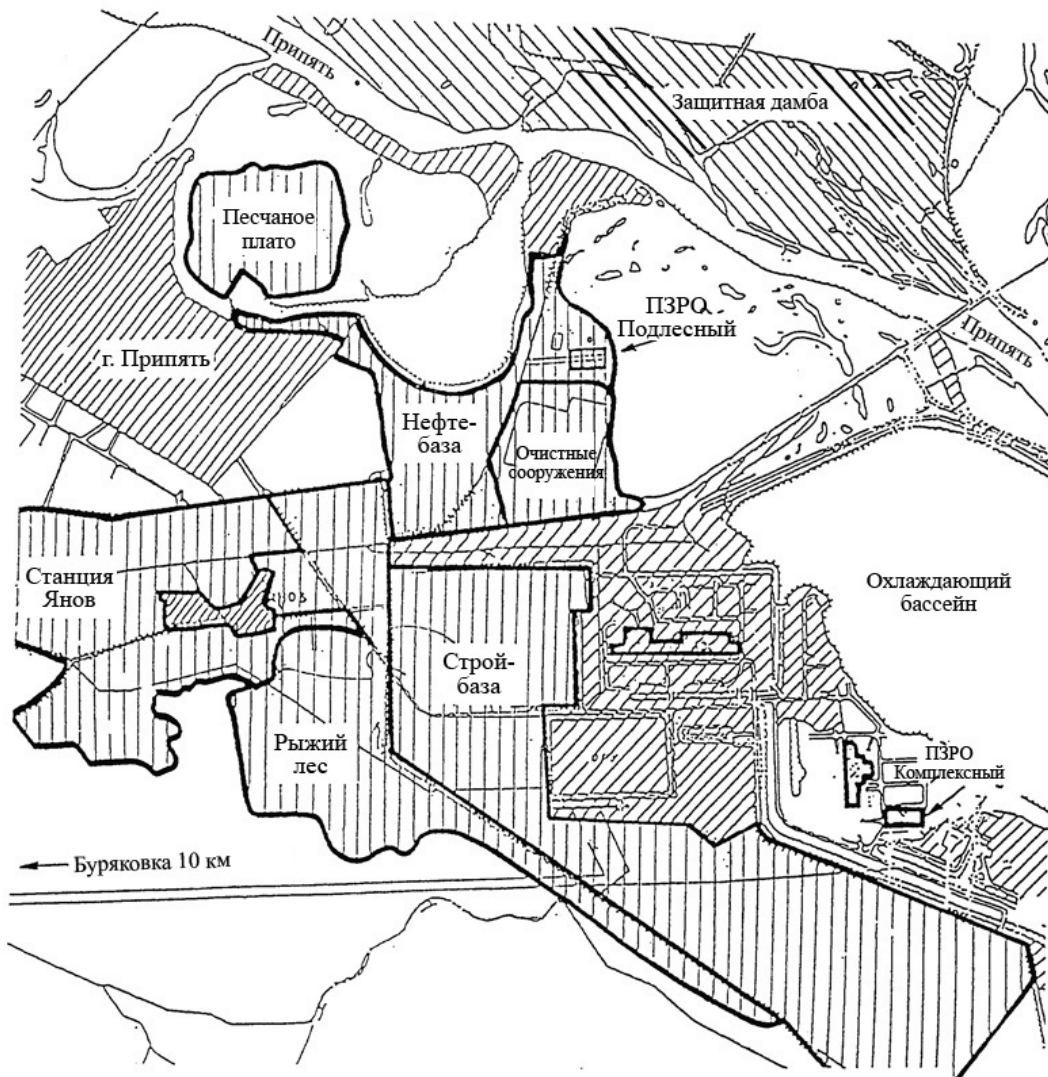


Рис. 5. Расположение ПВЛРО и ПЗРО зоны отчуждения ЧАЭС.

Необходимо отметить, что наряду с оценкой объемов и состава отходов в ПВЛРО и ПЗРО в зоне отчуждения в рамках проекта ОСАТ была проведена оценка объемов отходов, размещенных в региональных спецкомбинатах УкрГО «Радон». Источниками отходов, направляемых на хранение и захоронение в региональные спецкомбинаты, являются украинские медицинские, научно-исследовательские и промышленные учреждения. Эта часть работы была связана с необходимостью разработки Стратегии обращения с РАО Украины в специализированном Центре по переработке и захоронению (ЦПЗ) радиоактивных отходов, который предполагается разместить в ЗО ЧАЭС. Разрабатываемая стратегия основана на том, что если на Украине будет создаваться подобный ЦПЗ, где будут переработаны и захоронены все РАО Украины, включая РАО, хранящиеся в настоящее время в устаревших региональных спецкомбинатах УкрГО «Радон», то его наиболее целесообразно расположить в ЗО ЧАЭС, как территории безусловного выселения, связанного с аварией на ЧАЭС.

Результаты оценки объема РАО в региональных спецкомбинатах приведены в табл. 5. При разработке стратегии обращения с РАО Украины и создании ЦПЗ необходимо иметь наряду с отходами ЗО ЧАЭС и оцененные данные по объему и составу РАО в региональных спецкомбинатах УкрГО «Радон».

Таблица 5

Отходы, источником которых является «Радон» (по состоянию 01.01.1998)

Региональные спецкомбинаты	Твердые РАО		Жидкие РАО		Биологические РАО		Долгоживущие РАО		Общая активность
	объем, м ³	активность, кКи/Бк	объем, м ³	активность, Ки/Бк	объем, м ³	активность, кКи/Бк	объем хранилища, кг-экв Ra	объем захороненных РАО, кг-экв Ra	суммарная активность, кКи, кг-экв Ra
Днепропетровский	377,5	165,73/6,13·10 ^{15*}	0	0	47,5	165,73/6,13·10 ^{15*}	20	0,2	165,73 + 0,2 кг-экв Ra
Донецкий	200	280 (г-экв Ra)	0	0	0	0	0	0	0,28 кг-экв Ra
Киевский	580, 1200**	535/1,98·10 ^{16**}	350	0,1/3,7·10 ⁹	20	1,008/3,73·10 ¹³	120	42	536,01 + 42 кг-экв Ra
Львовский	200,** 60	0,667/2,47·10 ¹³ , 0,222/8,21·10 ^{12*}	0	0	8,0	0,222/8,21·10 ^{12*}	80	56	0,889 + 56 кг-экв Ra
Одесский	515	40/1,48·10 ¹⁵	140	12/4,44·10 ¹¹	0	0	50	40	40,01 + 40 кг-экв Ra
Харьковский	1462,9	9,45/3,49·10 ¹⁴	25	1,78·10 ⁻⁴ /6,59·10 ⁶	60	0,002/7,4·10 ⁷	40	0,63	9,45 + 0,63 кг-экв Ra
Итого	3195,4	751,1/2,78·10¹⁶ + 280 г-экв Ra	515	12,1/4,48·10¹¹	135,5	166,96/6,18·10¹⁵	310	138,83	752,1 + 139,11 кг-экв Ra

Примечание: данные таблицы базируются на информации, полученной от УкрГО «Радон», № 1-02/ 11-211 от 25.04.98. (Характеристика РАО в спецкомбинатах УкрГО «Радон» по состоянию на 01.01.98).

* Твердые + биологические РАО.

** Информация о точном объеме РАО недоступна.

2.3. Разработка Технических спецификаций на ЦПЗ

Как ранее отмечалось, в результате аварии в апреле 1986 г. на 4-м блоке ЧАЭС обширная зона вокруг АЭС подверглась сильному загрязнению, население этой зоны было эвакуировано. Зона эвакуации (радиусом около 30 км) и является так называемой зоной отчуждения, в центре которой находится ЧАЭС.

РАО, образовавшиеся в результате аварии (такие, как загрязненный лес, грунты, материалы разрушенных зданий, бетон, металлические конструкции оборудования, приборы, автотранспортные средства), были захоронены в 600–800 специальных хранилищах для временного хранения и окончательного захоронения – траншеях, буртах и в инженерных сооружениях. Большинство эти хранилища для временного хранения и захоронения расположены в пределах 5 км от ЧАЭС. Эти хранилища были созданы в кратчайшие сроки в первые месяцы после аварии в качестве первоочередных мер по ликвидации последствий аварии. По этой причине эти хранилища не соответствуют действующим требованиям к хранению и захоронению РАО и подлежат рекультивации.

Существуют два варианта проведения рекультивации, они могут комбинироваться. Первый вариант заключается в извлечении и последующей переработке РАО. Второй вариант включает в себя переработку РАО на месте с отверждением и/или изолированием РАО для сведения к минимуму доступа вод (грунтовых и атмосферных) к РАО и миграции радионуклидов в окружающую среду. В рамках работ по извлечению и переработке и/или обращению на месте с РАО, хранящимися в настоящее время в ПВЛРО зоны отчуждения, необходимо строительство нескольких объектов по обращению с радиоактивными отходами в зоне отчуждения, а именно: установки по извлечению твердых отходов, завода по переработке твердых и жидких отходов (Центр по переработке и захоронению), хранилищ для захоронения короткоживущих радиоактивных отходов, хранилищ для временного хранения долгоживущих радиоактивных отходов и/или установки по отверждению и изоляции радиоактивных отходов на месте. Эти новые объекты образуют промышленный комплекс, включающий в себя объекты, которые будут возведены на площадке, отводимой для строительства ЦПЗ на базе комплекса «Вектор», а также ряд установок, располагаемых вне промплощадки ЦПЗ. С точки зрения комплексного подхода к вопросу обращения с РАО зоны отчуждения весь этот комплекс целесообразно объединить в единое предприятие [Центр по переработке и захоронению (ЦПЗ)] независимо от окончательно выбранной технологии по обращению с РАО.

Работа по разработке Технической спецификации/Исходных данных на выполнение проектирования, лицензирования, изготовления оборудования, его поставки и ввода в эксплуатацию ЦПЗ была выполнена в рамках международного проекта ОСАТ с участием Абдулахатова М. К. Техническая спецификация включала в себя:

- общую характеристику проекта, включая информацию об объектах, входящих в состав ЦПЗ, место размещения ЦПЗ и т.п.;
- оценки объема работ и стоимости;
- требования к нормативной базе, лицензированию, оценке воздействия на окружающую среду и т.п.;
- технические требования к функциональным характеристикам объектов, входящих в состав ЦПЗ, требования к инфраструктуре ЦПЗ и т. п.;
- технические требования к оборудованию;
- оценку объемов строительных работ;

- вопросы обеспечения качества работ;
- требования к документации по проекту и т. п.

В целом разработанная Техническая спецификация [24], включавшая Техническую записку и 13 Приложений, представляет собой документ общим объемом свыше 440 страниц машинописного текста, в котором изложены все сведения, предусмотренные нормативными документами для такого рода проектов. Разработанный документ может служить основой для проведения тендера на проектирование и строительство ЦПЗ и прошел предварительное согласование в регулирующих органах.

Заключение

Подводя итоги работ, направленных на преобразование ОУ в ЭБС, создание инфраструктуры обращения с РАО в ЗО ЧАЭС, следует отметить следующее. Несмотря на то, что указанные работы проводились в период после распада СССР, в условиях, когда российские научно-исследовательские и проектные организации по финансовым, организационным и политическим причинам не принимали широкого участия в проводимых в ЗО ЧАЭС работах, ФГУП НПО РИ и его отдельные сотрудники внесли свой вклад в решение указанных проблем.

По нашему мнению, этот вклад мог быть бóльшим, если бы специализированные организации Украины и России, в том числе ФГУП НПО РИ, смогли бы обеспечить более широкое представительство в составе международных консорциумов, принимающих участие в реализации SIP, других проектов, финансируемых международными фондами. Одной из основ расширенного участия российских организаций в том числе мог бы стать финансовый вклад России в Чернобыльский фонд, от которого Россия отказалась в 1996–1997 гг. в связи с тяжелым экономическим положением в указанный период. Складывавшаяся до последнего времени благоприятная конъюнктура на рынке природных энергоресурсов могла бы способствовать вступлению России в число доноров Международного фонда «Чернобыль», что открыло бы возможность более широкого участия российских организаций в осуществляемых проектах. Об этом свидетельствует опыт участия специализированных организаций основных стран-доноров этого фонда, таких, как США, Франция, Германия и Великобритания. В том же, что российские специалисты, и в частности сотрудники ФГУП НПО РИ, обладают необходимым опытом, знаниями, глубоким пониманием специфических особенностей ОУ и других объектов ЧАЭС, не сомневаются ни украинские, ни западные специалисты, как показывает опыт участия наших сотрудников на всех этапах работ, связанных с аварией на 4-ом блоке ЧАЭС.

Список литературы

1. Chernobyl Unit 4 Shelter Implementation Plan, Published 31 May 1997 by Tacis services DG-1A, European Commission and US Department of Energy.
2. Рамочное соглашение между Украиной и ЕБРР в отношении деятельности Чернобыльского фонда «Укрытие» в Украине (ратифицировано Верховной Радой Украины, Закон Украины № 80/98-ВР от 04.02.98).
3. Абдулахатов М. К., Девиссон Б., Линс В., Ляйстер П., Токаревский В. В., Шибецкий Ю. А. Предварительная стратегия извлечения ТСМ и обращения с РАО / 4-я Международная научно-практическая конференция объекта «Укрытие» ГСП ЧАЭС. Ноябрь 2001 г. С. 53–54.
4. Анализ затрат и выгоды для вариантов стратегии извлечения ТСМ и обращения с РАО: Отчет T19-R8.-SIP-EBPD-R-0070.-30.06.2000.

5. Определение и описание вариантов стратегии извлечения ТСМ и обращения с РАО: Отчет T19-D2. SIP-EBPD-D-0059. 16.06.2000.
6. Альтернативные варианты извлечения ТСМ и обращения с РАО, присуждение баллов, отбраковка, ранжирование: Отчет T19-D3. SIP-EBPD-D-0084. 23.10.2000.
7. Анализ стратегии извлечения ТСМ и обращения с отходами: Итоговый отчет. Отчет T19-D4. SIP-EBPD-D-0091. 17.11.2000.
8. Пазухин Э. М., Дрозд И. П., Токаревский В. В. Авария на ЧАЭС и проблема америкии-241 // Радиохимия. 1994. Т. 36, вып. 6. С. 533–539.
9. Kupny V., Shestopalov V., Sobotovich E., Tokarevsky V., Veryuzhsky Yu., Abdulakhatov M. Peer Review for Conceptual Design of the New Safe Confinement for the Chernobyl NPP Shelter Object // Proc. Int. Conf. on Nuclear Energy System for Future Generation and Global Sustainability “Global’05”. Tsukuba, Japan: Tsukuba Int. Congr. Center, October 9–13, 2005. Paper N 287.
10. Abdulakhatov M., Moiseev I., Tokarevsky V. New Confinement for the Shelter Object: Arch or Monolith? // Proc. Int. Conf. on Nuclear Energy System for Future Generation and Global Sustainability “Global’05”. Tsukuba, Japan: Tsukuba Int. Congr. Center, October 9–13, 2005. Paper N 182.
11. Baryakhtar V., Gonchar V., Zhidkov A., Zhidkov V. Radiation Damages and Self-Sputtering of High-Radioactive Dielectrics: Spontaneous Emission of Submicronic Dust Particles // Condens. Matter Phys. 2002. Vol. 5, N 3(31). P. 449–471.
12. Bondarenko O. A., Aryasov P. B., Melnichuk D. V., Medvedev S. Y. Analysis of Aerosol Distribution inside the Object Shelter at the Chernobyl Nuclear Reactor Site // Health Phys. 2001. Vol. 81, N 2. P. 114–123.
13. Закон Украины от 26.04.2001 «Об общих принципах дальнейшей эксплуатации и снятия с эксплуатации Чернобыльской АЭС и преобразовании разрушенного четвертого энергоблока этой АЭС в экологически безопасную систему».
14. Норми радіаційної безпеки України. Доповнення. Радіаційний захист від джерел потенційного опромінення (НРБУ-97/Д-2000). Державні гігієнічні нормативи ДГН 6.6.1. 6.5.061-2000. Видання офіційне. Київ, 2000.
15. Закон України «Про поводження з радіоактивними відходами». Постанова Верховної Ради України № 256/95-ВР від 30.06.95 р.
16. Закон України «Про використання ядерної енергії та радіаційну безпеку», Постанова Верховної Ради України №39/95-ВР від 08.02.95 р.
17. Документ AD-301, разработанный в рамках концептуального проекта НБК. Цитируется по публикации 16.
18. Матвеев И. В., Мелошенко Ю. Б. К обоснованию конструктивного решения нового безопасного конфайнмента объекта «Укрытие» ЧАЭС // VI ежегодная конф. Междунар. Чернобыльского центра, Славутич, Украина, 9–12 сентября 2003. С. 113–115.
19. Боровой А. А., Толстоногов В. К. и др. Результаты обследования скоплений воды в помещениях объекта «Укрытие». Предложения контрмер: Отчет ОЯРБ МНТЦ «Укрытие» ПО ЧАЭС. Инв. № 2849. Чернобыль, 1993.
20. Контроль накопления радионуклидов и топлива в воде разных помещений объекта «Укрытия»: Отчет ОЯРБ МНТЦ «Укрытие» / научный руководитель А. А. Боровой. Инв. № 3789. Чернобыль, 1999. 39 с.
21. Концептуальный проект. Общая схема размещения элементов Интегрированной автоматизированной системы (ИАСК) ОУ. D2/001 SIP. Инв. № NUTESCO-03-CDP-001.10. 16.08.2002. 114 с.

22. Техническая спецификация на выполнение проектирования, лицензирования, изготовления, поставки, строительства, монтажа и ввода в эксплуатацию промышленного комплекса по обращению с твердыми радиоактивными отходами: Проект NUCUK 9403A/97-0305. Инв. № OSAT/RPT/OSA/00014T. 20.05.1999. 78 с.
23. Окончательный отчет по инвентаризации РАО зоны отчуждения: Проект NUCUK 9403A/97-0305. Инв. № OSAT/RPT/OSA/00031. 08.06.1999. 52 с.
24. Техническая спецификация на выполнение проектирования, лицензирования, изготовления, поставки и ввода в эксплуатацию Центра по переработке и захоронению радиоактивных отходов: Проект NUCUK 9403A/97-0305. Инв. № OSAT/RPT/OSA/00044. 02.07.1999. 81 с.

Transformation of the Shelter Object into the Environmentally Safe System and Management of Radioactive Waste of CNPP Exclusion Zone

M. K. Abdulakhatov

Scientific and technical works for the transformation of the Shelter Object (SO) into an environmentally safe system (ESS), performed with the participation of employees of the V. G. Khlopin Radium Institute (KRI) both in the staff of the scientific groups of KRI and in the staff of international consortiums, are considered. Along with different aspects of transformation of SO into ESS, including: the development of strategy for retrieval of fuel-containing materials (FCM) and radioactive waste (RAW); treatment of water accumulation sites of SO; creation of Integrated Automated Monitoring System (IAMS) for SO, questions related to estimation of RAW volume formed as a result of Chernobyl catastrophe and of the activity for elimination of its consequences, as well as to the development of the infrastructure for RAW management, are considered. This paper is based on papers published with the participation KRI employees, as well as on scientific and technical reports, design documents, and other technical documents released by international consortiums within the framework of implementation of different projects financed by TACIS programme and Shelter Implementation Plan (SIP).

III. Воспоминания участников

III.1. Чернобыль. Первые дни, растянувшиеся на годы

Ю. В. Дубасов

В воспоминаниях участника ликвидации аварии на Чернобыльской АЭС рассказывается о работе сотрудников отдела радиохимических исследований Радиевого института им. В.Г. Хлопина, начиная с первых дней мая 1986 г. Основное внимание в воспоминаниях уделено исследованию радиоактивного загрязнения 30-километровой зоны вокруг ЧАЭС и поселков из зоны реэвакуации. Описаны условия работы и жизни в первый период, решения возникавших проблем, не терпящих промедления.

Наш отдел 30 участвовал в проведении ядерных испытаний и мирных ядерных взрывов, для чего на базе отдела была создана радиометрическая автомобильная колонна, позволяющая проводить полевые исследования радиационной обстановки. Поэтому, узнав об аварии 29 апреля 1986 г., дирекция позвонила в Министерство и предложила воспользоваться возможностями Радиевого института. Если Вы помните, тогда АЭС были в ведении Министерства энергетики и электростанций. Нам предложили ждать распоряжений. Звонок из Москвы последовал, кажется, 2 мая. 4 мая (воскресенье) выехала первая группа из трех человек – начальники лабораторий Ю. Г. Петров и А. А. Римский-Корсаков с водителем Г. Ф. Пановым. Сбор экспедиции проходил под руководством профессора Анатолия Сергеевича Кривохатского – начальника отдела 30 и Галины Сергеевны Синецкой – заместителя директора, курировавшей наш отдел.

В то время я находился в творческом отпуске, который мне предоставили для завершения докторской диссертации. Я пошел к директору института Леонарду Николаевичу Лазареву и попросил его отозвать меня из отпуска, так как я надеялся получить дополнительные результаты, которые нужны были нам для выполнения вновь открытой научно-исследовательской работы в области ядерных взрывов. При этом я сказал директору, что это ненадолго, может быть, через месяц мы закончим все исследования, на что он ответил, что как знать, во что это все выльется. И он оказался прав – эта работа втянула наш институт на долгие 5 лет.

Итак, 5 мая после обеда выехала основная группа экспедиции на 3 автомашинах. Уже в Могилеве на бензозаправке мы заметили повышение радиационного фона, но как-то не придали этому особого значения, но, тем не менее, продолжали периодический контроль гамма-фона. На остановках, выходя из машин, измеряли фон и видели, что он неуклонно повышается. Нас это не пугало, так как мы были привычны к таким ситуациям. В Киеве фон в отдельных его районах, где-то рядом с конторой «Изотоп», доходил до 3 мР/ч (это по прибору СРП-68, который обычно показывает завышенные уровни, так как не учитывает ход жесткости). В район Чернобыля мы прибыли 7 мая вечером. По дороге из Киева, проезжая поселки и села, мы окунулись в движение встречного транспорта с эвакуированными жителями, словно во время войны.

Кажется, в Иванкове, это в 30 км от Чернобыля, мы стали искать полковника милиции, но нас как-то быстро нашел Юрий Георгиевич Петров и занялся нашим размещением. Нас разместили на базе отдыха «Трудовик», расположенной в стороне от основной дороги в лесу. Мы все разместились в трех домиках. При этом нам необходимо было развернуть три гамма-спектрометра с Ge(Li)-детекторами. За жидким азотом приходилось периодически ездить в Киев. Было помимо этого много

других дозиметрических и радиометрических приборов. Всего нас было в первый период 25 человек.

В то время вместе с нами на базе находились сотрудники ВНИПИЭТ во главе с В. А. Курносовым, а также сотрудники СНИИПа во главе с Г. А. Крашенинниковым. В мае–июне у нас на этой же базе жил Ефим Павлович Славский – наш прославленный министр. Приезжал он в течение мая–июня несколько раз. Одевался в зеленую спецодежду и рано утром уезжал в Чернобыль. Подъем для нашей экспедиции был в 6 утра, и в 7 утра мы выезжали в Чернобыль, возвращались часов в 9–10 вечера, а ложились спать около часа ночи, и так все 40 дней. Ю. Г. Петров и Г. Ф. Панов (механик-водитель) жили в пионерлагере где-то вблизи Чернобыля (название забыл). Но если у нас радиационный фон был сравнительно невысоким, то там, в пионерлагере, он даже по нашим меркам был высоким.

8 мая мы приступили к работе вблизи ЧАЭС. Проезжая по дороге от Чернобыля в г. Припять, обнаружили след шириной около 100–200 м с уровнем радиации до 2 Р/ч. Здесь на этой полосе (на запад от ЧАЭС) буквально на наших глазах в течение нескольких дней сосновый лес менял свою окраску, становясь желтым. Имея в своем распоряжении 3 автомашины повышенной проходимости, мы были автономны и независимы в передвижении по зоне. В первые дни наземные исследования проводились в западном и северном направлении от разрушенного блока. Концентрация аэрозолей была довольно высока и, что особенно характерно, было необычно много урана, то есть помимо диспергированного топлива, выпавшего на землю, было много урана в виде аэрозолей, образовавшихся вследствие пожара на блоке. Группа наших сотрудников, возглавляемая Н. Н. Ильиным, проводила отбор проб почвы и аэрозолей, передвигаясь в ближней зоне на бронетранспортере. К этому времени военными и представителями Гидромета были составлены карты радиационной обстановки в 5-, 10- и 30-километровых зонах как по уровням радиации, так и по долгоживущим радионуклидам.

Вместе с военными на вертолете в облете реактора участвовал А. А. Римский-Корсаков, были получены пробы аэрозолей из шлейфа дыма и методом гамма-спектрометрии определен их радионуклидный состав, а также применением простой модели был оценен примерный выброс радионуклидов.

Суточный выброс до 10 мая составлял порядка 20 тысяч кюри, к середине мая он уменьшился, затем после дождя опять подрос и 29 мая стал уже сравнительно небольшим.

Примерно 12 мая к нам на подмогу прибыла большая машина-лаборатория «Тунец» на базе а/м «Урал», позволявшая вести дистанционный сбор информации о радиационной обстановке с помощью нескольких датчиков, расставленных на различных удалениях. «Тунец» был доставлен на грузовом самолете «Антей». «Тунец» расположился вблизи машзала и собирал информацию. Вместе с сотрудниками СНИИПа были измерены уровни радиации на стене машзала с помощью самоходной тележки и коллимированного рентгенометра – были зафиксированы уровни порядка нескольких тысяч рентген в час. В этой работе приняли участие И. И. Тютюгин, А. П. Простяков и Г. П. Тюрин.

В то время возглавлял бригаду сотрудников Минсредмаша зам. министра Лев Дмитриевич Рябев. Он ежедневно в составе Правительственной комиссии во главе с заместителем председателя Совета министров Б. Е. Щербиной ездил на аварийный 4-й блок и был в курсе всех событий. Он поставил перед нами задачу: определить, сколько же топлива и плутония лежит в пределах 10–30-километровой зоны. Надо

сказать, что если с осколочными радионуклидами особых проблем определения не было, то проблема содержания плутония действительно была весьма серьезной.

Имея опыт исследования продуктов взрывов, мы знали, что плутоний и тугоплавкие осколки ^{95}Zr и ^{144}Ce не фракционируют. Поэтому, если определить их соотношение в выброшенном топливе, то по активности осколков можно оценить активность плутония. Кажется, первые пробы были доставлены в Ленинград 9–10 мая. Доставку проб организовал Ю. Г. Петров, вместе с ним на машине УАЗ-452 были Г. Ф. Панов (водитель) и Ю. С. Савченков. Петров и Панов поочередно вели машину, их сопровождала спецмашина милиции, и они доехали до института за 24 часа. Надо сказать, что Ю. Г. Петров умел решать многие организационные проблемы, быстро находил контакты с начальниками разных уровней. В институте пробы анализировались в различных лабораториях, которым ставила задачу Г. С. Сеницына. У нас в отделе радиохимические анализы выполнялись под руководством Н. В. Сковородкина, блестящего радиохимика, имевшего огромный опыт анализа проб от ядерных взрывов. В результате анализа было найдено соотношение $^{144}\text{Ce}/^{239+240}\text{Pu}$, которым мы еще долгое время пользовались для экспресс-оценок. После этого мы по концентрации ^{144}Ce рассчитывали содержание плутония как в почве, так и в аэрозолях. Однако в первоначальный момент основным α -излучателем был не ^{239}Pu , а ^{242}Cm с периодом полураспада 162 сут. К 20-м числам мая было определено, что в ближней зоне протяженностью 20–30 км выпало 3–4 % топлива. Эту оценку мы обсуждали вместе с академиками В. А. Легасовым и Ю. А. Израэлем (председателем Госкомитета по гидрометеорологии). Юрий Антониевич Израэль до этого, будучи сотрудником, а затем и директором Института прикладной геофизики, участвовал в исследованиях при атмосферных и подземных ядерных взрывах, и мы были с ним знакомы с 1959 г. Наша цифра по величине выпавшего топлива была принята, согласовывалась с данными ИАЭ, полученными по другой методике, и вошла в доклад В. А. Легасова на внеочередной сессии МАГАТЭ. С В. А. Легасовым я ранее не встречался, но меня поражал его высокий профессионализм, храбрость и отвага.

В тот период необходимо было установить критические уровни загрязнения почвы осколочными нуклидами ^{137}Cs , ^{90}Sr , а также плутонием. Если по осколочным нуклидам нормы тогда уже были, и медики, и представители Госкомитета по гидрометеорологии их знали, то нормы по плутонию отсутствовали вообще. И вот мы вместе с представителями Института биофизики Минздрава, среди них был Кеирим-Маркус, О. Кочетков и др., стали прикидывать допустимую величину плотности загрязнения почвы плутонием. Ориентировались в первую очередь на допустимую концентрацию аэрозолей согласно НРБ-76. Но для того, чтобы определить допустимый уровень загрязнения почвы, необходимо было знать величину коэффициента ветрового подъема. Вот здесь-то Кеирим-Маркус и пытался вспомнить эту величину. В конце концов ему это удалось, и, остановившись на величине 10^{-9} м^{-1} , допустимая величина была принята. Надо сказать, что при дальнейших уточнениях она не сильно отличалась (10^{-8} м^{-1}), от той, что была принята в тяжелых условиях Чернобыля. Посмотрев отчет того периода, я увидел, что в течение мая 1986 г. коэффициент ветрового подъема был на четыре порядка больше, чем осенью, то есть 10^{-4} м^{-1} . А коэффициент ветрового подъема определяется как отношение концентрации радионуклида (аэрозоля) в воздухе ($\text{Бк}/\text{м}^3$) к плотности загрязнения грунта ($\text{Бк}/\text{м}^2$). По всей видимости, столь высокий коэффициент ветрового подъема был обусловлен высокой концентрацией аэрозолей в атмосфере (дождей тогда практически не было), интенсивностью перемещения транспорта на промплощадке и около нее. Тогда велись работы по созданию системы охлаждения грунта под реактором и

возведению специального барьера, исключая проплавление реакторной шахты расплавленной зоной и попадание таким способом радиоактивных продуктов в подземные воды.

Прибывший в Чернобыль академик Е. П. Велихов предложил определить, как далеко распространился выброс, так как эта проблема была в то время очень злободневной. Для этого было предложено провести обследование с отбором проб в радиусе 500 км, было организовано 12 маршрутов. Командующий вертолетами в зоне Чернобыля генерал-лейтенант Штейнбок мне сказал, что решение о выделении вертолетов должен принять командующий западным направлением генерал армии Герасимов Иван Александрович. Если штаб правительственной комиссии располагался в здании Горкома КПСС, то штаб военных находился напротив – в здании Горисполкома. Я пошел к генералу Герасимову и, ссылаясь на просьбу Е. П. Велихова и мнение руководства штаба МСМ, попросил организовать полеты по выбранным маршрутам. Конец мая в Чернобыле выдался жарким. Генерал в кабинете был без кителя и напоминал В. И. Чапаева, рассматривающего карту. Мы с ним разговорились о радиационной обстановке в районе 4-го блока, и я стал говорить ему, что теперь обстановка уже стабилизировалась и все худшее позади. На это он мне сказал, что реактор еще ночью светится бледно-голубым цветом, то есть он еще «живой». Я стал объяснять, что это результат взаимодействия гамма-излучения с атомами азота воздуха и не более. В результате генерал Герасимов отдал распоряжение, и военные выделили для этих исследований 2 или 3 вертолета. Мы, разделившись на две, а может быть три, бригады, начали обследование. Прилетали в Молдавию, летали вплоть до предместий г. Николаева, где нас арестовали на аэродроме, так как местная ПВО нас не заметила, а когда мы сели на аэродром для заправки, начальство очень удивилось. Пришлось заночевать на аэродроме, пока утром не были улажены все формальности. В процессе вертолетных обследований мы измеряли уровни радиации в местах посадок (через каждые 100 км) и отбирали пробы почвы. Всего было отобрано около 500 проб. Доставленные в лабораторию № 31 пробы были частично измерены на содержание плутония методом непосредственной альфа-спектрометрии на альфа-камере большого объема, разработанной и изготовленной М. И. Якуниным. К счастью, уровни загрязнения плутонием на больших удалениях от Чернобыля оказались близкими к уровням глобальных выпадений.

В период нашей первой командировки в Чернобыль, продолжавшейся 40 дней, мы провели обследование г. Брагин в Белоруссии, где сложилась очень напряженная ситуация со стороны не только жителей, но и руководства городом. Пришлось отобрать пробы почвы и проанализировать их на содержание ^{90}Sr . Помимо этого Л. Д. Рябев и сменивший его заместитель министра нашего Министерства А. Д. Захаренков поручили нам провести обследование 44 населенных пунктов из зоны реэвакуации. Это мы стали проводить в первую неделю после приезда. Несмотря на то, что из этих деревень и поселков все должны были быть эвакуированы, мы там встречали многих жителей, в основном это были пожилые люди, отказывавшиеся куда-либо уезжать. Помнится, приехали мы в деревню Чистоголовку и там подходит к нам мужчина лет 50 и спрашивает, можно ли тут оставаться жить, порошок и другую живность он спрятал в подвале. Говорит, что работал в Томске-7, вышел на пенсию и теперь проживает здесь и ничего, мол, не боится. Мы ему популярно объяснили, что ту дозу, которую он получил за 10 лет работы на комбинате (не более 50 бэр), он здесь получит за один месяц проживания. Он призадумался, а мы потом вспоминали этот случай как курьезный – человек приехал поправлять свое здоровье после работы в особо вредных условиях и попал в ситуацию, которая

гораздо хуже той, откуда он выехал. Особо тяжкое впечатление на нас произвел вид вымершего города Припять.

Беда в Чернобыле свела меня с товарищами и знакомыми, с которыми я не виделся многие годы. Там я встретил своих однокурсников – контр-адмирала Владимира Виктора Алексеевича (в то время он был начальником химической службы Северного флота) и генерала Роберта Федоровича Разуванова – начальника военного института. Встретился с Юрием Васильевичем Сивинцевым – профессором из Института атомной энергии, которого я не встречал около 30 лет, после того как познакомился с ним на Адмиралтейском заводе при спуске на воду и швартовых испытаниях первого атомохода – ледокола «Ленин» – в 1958 г. Ю. В. Сивинцев возглавил в 1987 г. комиссию при ИАЭ по дозиметрическим измерениям, куда входили и мы с А. С. Кривоухатским. Ну, а встречи с сотрудниками Семипалатинского полигона, ВНИИЭФ (Арзамас-16), ПромНИИПроекта (Москва) и Института прикладной геофизики не были неожиданными, так как именно участники ядерных испытаний и показали здесь свою отвагу и высокий профессионализм. Например, Самат Габдрашилович Смагулов – сотрудник полигона – руководил бригадой солдат, которые сбрасывали куски твелов с крыши разрушенного блока. Говоря о военных, вспоминаю, как в мае в Чернобыль прибыл министр обороны маршал С. Л. Соколов. Он был вместе с Е. П. Славским, они зашли в здание Горкома партии, где работали бригады от институтов Минсредмаша, поинтересовались, как нам тут работается.

Во время чернобыльской аварии плотность загрязнения почвы обычно измерялась в единицах Ки/км² (мкКи/м²). Для того, чтобы точно определять загрязненность, мы с Валентином Ивановичем Чернышевым приспособили консервные банки диаметром 100 мм (фиксированная площадь), в банках делали пропилы, в которые вставляли пластины и ограничивали глубину отбора пробы 1,5 см. Потом по приезду в институт мы уже сделали кольца высотой 5 см, затем настоящие цилиндрические пробоотборники и пользовались ими на протяжении нескольких лет. Вот с помощью такого нехитрого приспособления мы (М. Н. Москалев, В. И. Чернышев и я) произвели отбор проб почвы с фиксированной площадки размером, кажется, 5×5 м² вблизи промплощадки 4-го блока (около автобусной остановки у Промбазы), где уровень радиации доходил до нескольких Р/ч. Отобрав 5 проб, мы гамма-спектрометрически определили плотность загрязнения почвы по (⁹⁵Zr + ⁹⁵Nb) и ¹⁴⁴Ce, а затем А. А. Римский-Корсаков и В. В. Карасев, поместив на вертолет спектрометр СПИН-6000, записали спектр над этой площадкой и откалибровали таким образом спектрометр. Это позволило обработать полученные над крышами и площадкой разрушенного блока аэрогамма-спектры и определить запас выпавшего облученного топлива на промплощадке Чернобыльской АЭС и на крыше разрушенного блока.

Настало время окончания командировки. Лев Дмитриевич Рябев на начальном периоде сообщил, что Минздрав разрешает работать до накопленной дозы 25 бэр, либо по правилам командирования 40 дней. Как водится у профессионалов, мы свои дозиметры старались оставлять в домиках, где мы проживали, или в иных местах, так как обычно за превышением дозы следовало наказание.

В этой связи я вспомнил случай, когда я был в командировке в г. Электро-сталь, в цехе по производству источников ²²⁶Ra, готовил препараты в рамках кандидатской диссертации, еще будучи аспирантом Ленинградского университета, и получил дозу, во много раз превышающую допустимую. На имя Виктора Михайловича Вдовенко (моего научного руководителя) вдруг приходит письмо от директора завода Золотухи М. И. о таком нарушении. В следующую поездку для продолжения

работы мне пришлось объясняться с главным инженером завода Д. Д. Соколовым и я, идя в цех для работы, дозиметр (фотокассету) оставлял в раздевалке.

Поэтому наша первая бригада уехала из Чернобыля через 40 дней. Я и три сотрудника лаборатории № 31 Ю. С. Савченков, М. Н. Москалев и В. И. Чернышев уезжали на двух специальных автомашинах (автобус повышенной проходимости ПАЗ – Москалев – дозиметрист-водитель и ГАЗ-66 – Чернышев – дозиметрист-водитель). Так как на Киевском шоссе везде стояли дозиметрические посты, а наша техника, конечно же, была загрязнена и мы не хотели ее оставлять, так как она должна была нам еще послужить, то мы назад пробирались уже как партизаны, обходными путями. Уехали на запад от Чернобыля, затем в Белоруссию, Латвию и Эстонию, въехав в Ленинград со стороны Нарвы. Режим работы был такой: без выходов с 6 утра до 1 часа ночи.

В отличие от условий ядерных полигонов и испытаний в Чернобыле некуда было деться: везде был высокий фон в течение мая. В первые дни, находясь в Чернобыле, мы ходили обедать в городской ресторан по выдаваемым талонам. Однако ресторан был быстро закрыт, и питание было организовано военными в имевшихся там столовых. В середине мая в Зону приехала милиция, в частности ГАИ, и тут же начались первые ДТП.

В середине июня нашим министерством было создано Управление строительства УС-605, которое возглавляло все работы, проводимые сотрудниками министерства. В этот же период в составе УС-605 создается лаборатория нашего института, первым начальником которой был сотрудник лаборатории Петрова Ю. Г. – Матвиенко В. И. Лаборатория размещалась на территории Чернобыльской типографии «Червонный прапор», это здание А. А. Римский-Корсаков присмотрел еще в мае. Эта типография послужила нам пристанищем на многие годы, мы иногда там и на ночь оставались.

В конце августа Г. С. Синицына попросила меня съездить в Чернобыль, так как у Правительственной комиссии возникли вопросы по выбору места для строительства нового города вместо Припяти для размещения персонала станции. Я и А. А. Боровой (начальник лаборатории ИАЭ им. Курчатова) летали на вертолете, проводили замеры на местности, отбирали пробы и определили территорию для такого строительства, представив данные в Правительственную комиссию. Но что-то там на какой-то стадии согласования и проектирования случилось, и город Славутич начали строить как раз на радиоактивном пятне. Вследствие этого возникли на «ровном» месте проблемы, и строители стали работать в радиоактивной зоне с соответствующими льготами.

А. С. Кривохатский, В. Г. Савоненков и Ю. М. Рогозин предложили в зоне Чернобыля организовать контрольные полигоны, на которых можно было бы наблюдать за поведением радионуклидов в различных почвенных зонах и следить за их миграцией. В октябре 1986 г. большая группа сотрудников отдела 30 во главе с Г. С. Синицыной выехала в район Чернобыля для создания радиационно-почвенных полигонов и обследования населенных пунктов в зоне реэвакуации. На сей раз нас разместили в поселке Иванково, это, вероятно, в 30 км от г. Чернобыля. Там вообще размещались все прикомандированные. Это было помещение, кажется, интерната для душевнобольных, которые были эвакуированы в другое место.

В октябре заканчивалось строительство временного «Укрытия» для разрушенного 4-го блока. Главный инженер ВНИПИЭТа Владимир Александрович Курносков первым сел в специально защищенную свинцом смотровую кабину, поднимавшуюся на тросе подъемного крана над Укрытием, и оценил обстановку для корректировки

строительства. И вот, кажется, 5 октября строительство объекта «Укрытие» было закончено и по этому поводу был проведен торжественный митинг. Митинг открыл и вел наш заместитель Министра (МСМ) Усанов В. Н. Все шло хорошо и торжественно. И надо же было случиться беде. Военный вертолет совершал очередной облет над площадкой 4-го блока. Уже смеркалось, и вертолет, задев лопастью за трос огромного немецкого крана «Демаг», упал и загорелся. Весь экипаж погиб.

Надо сказать, что в эту осень не обошлось и без тяжелых автомобильных аварий. А. К. Круглова – начальника ГНТУ Минатома, ответственного представителя от нашего Министерства – сменил заместитель директора ВНИИНМ В. С. Шмидт. Однажды вечером, когда колонна машин Правительственной комиссии возвращалась из Чернобыля к месту своего расквартирования, в автомобиль, в котором ехал Шмидт, врезалась тяжелая грузовая машина, и он получил настолько серьезную травму головы, что скончался после нахождения несколько месяцев в коме.

В течение октября–декабря 1986 г. нами были обследованы 46 населенных пунктов в зоне реэвакуации ЧАЭС. В каждом населенном пункте отбирали не менее 20 проб с площади 100 м^2 по схеме «конверт» (5 точек) на глубину 1,5 см, диаметр пробоотборника 100 мм. Неравномерность плотности загрязнения составляла 30–120 %. В восьми населенных пунктах был проведен отбор проб аэрозолей, для чего прокачивалось около 100 тыс. м^3 воздуха. Рассчитывали коэффициент ветрового подъема ^{137}Cs , составивший величину порядка 10^{-8} м^{-1} , что примерно в 10^4 раз меньше, чем в начальный период после аварии. По сравнению с начальным периодом исследований (конец мая 1986 г.) отмечалось заглубление в почву как топливных частиц, так и отдельных радионуклидов, например ^{137}Cs . Если в начальный период 75% активности содержалось в слое 1 см, то теперь эта доля была распределена в 2-сантиметровом слое.

Октябрь 1986 г. выдался в Чернобыле почти что жарким, обследуя зону, мы порой снимали с себя рубашки, настолько было тепло, было много грибов, их собирали и проверяли на гамма-спектрометре. В ту пору лаборатория Радиевого института в чернобыльской типографии пользовалась большой популярностью и нам приносили и грибы, и ягоды для анализов. Однажды принесли почки барана и вдруг на спектрометре увидели не встречавшийся ранее пик рядом с пиком ^{137}Cs . Пришлось долго просматривать таблицу радиоактивных изотопов, пока мне не пришло в голову, что это, скорее всего, один из радионуклидов серебра. Последующие измерения и определение периода полураспада убедили физиков, что это все же радионуклид серебра. Стало быть, почки барана избирательно концентрировали в себе серебро, которое в составе радиоактивных выпадений осело в зоне аварии.

К началу зимы из зоны реэвакуации все население было эвакуировано, встречались брошенные кошки, которым было чем питаться, собак мы уже не встречали. Их поначалу безжалостно отстреливали по всей зоне, начали стрелять и кошек, но потом власти сообразили, что без кошек расплодятся мыши и крысы. Хотя у нас в типографии мышей было вполне достаточно. В одном из населенных пунктов, кажется в Буряковке, мы несколько раз встречали зимой двух лошадок – одна была белая, а другая гнедая. Сена им хватало, но они были пугливы и к нам не приближались. Так вот и ходили они вдвоем, не понимая, что же случилось.

Осенью в зоне ЧАЭС появились представители ВНИИФТРИ (институт метеорологии в г. Менделеево Московской области). В октябре одной из проблем оказалась проблема загрязнения зоны плутонием, которая трудно поддавалась решению ввиду длительности радиохимических анализов. Представители Института прикладной геофизики (Москва) собрали рабочее совещание как раз на эту тему. Из об-

суждения выяснилось, что наибольшее количество данных было получено Радиевым институтом, а именно в лаборатории 31. Все искали какое-нибудь решение, позволяющее быстро получать результат. И вот сотрудник ВНИИФТРИ предположил определять плотность загрязнения в населенных пунктах, измеряя плотность загрязнения лавочек (скамеек) около каждого дома в сельской местности. Да, после просушивания поверхности скамейки с помощью горящего спирта альфа-радиометр давал показания потока альфа-частиц, но это был далеко не абсолютный метод, и нам никак не удалось в этом убедить автора метода. Сотрудники Семипалатинского полигона, находившиеся там в этот период, не могут до сих пор вспоминать этот метод «лавочек» без улыбок.

С наступлением зимы 1987 г. наши исследования вместе с сотрудниками ИАЭ переместились на рабочую площадку «Укрытия». Нам необходимо было измерять содержание аэрозолей, и в особенности плутония, в воздухе на площадке. В лаборатории В. А. Князев – большой изобретатель и умелец – быстро смастерил воздухоудку небольшой производительности (50 м³/ч), вполне транспортабельную, и они вместе с Б. О. Шагиным установили ее на площадке, подключились к сети и при экспозиции 1 сут мы стали выдавать надежные данные по концентрации радиоактивных аэрозолей на площадке. Концентрацию плутония рассчитывали по полученному нами соотношению Pu/¹⁴⁴Ce на момент измерения. Эти работы выполнялись нами в течение двух лет, причем отбор воздуха мы проводили в различных точках площадки и помещениях блока.

Настал период обследования шахты реактора. В нее было пробурено несколько скважин, и наша лаборатория проводила исследования газового состава, а также определяла расход воздуха. В. Б. Гевирц предложил несколько методик с использованием различных реперных газов и радиоактивных газовых меток.

Конечно, по прошествии 20 лет трудно вспомнить все, что было с нами в период командировки в Чернобыль. Большинство сотрудников лаборатории 31 прошли через испытания в Чернобыле, и для них это было, в общем-то, привычно, так как они бывали на Семипалатинском полигоне и на площадках, где проводились мирные подземные ядерные взрывы. А для населения и многочисленных прикомандированных военнослужащих, резервистов, а также сотрудников других министерств и ведомств это все-таки была ядерная война, хотя и без катастрофических разрушений, аналогичных атомным бомбардировкам в Японии, но зато с устойчивым огромным очагом радиоактивного заражения.

Наше пребывание там не обошлось без потерь для сотрудников отдела 30. Мы помним наших боевых товарищей С. М. Шпиллера и А. М. Шатилова, умерших в Чернобыле в период командировки.

Сотрудники нашего отдела продолжали работать в командировках в Чернобыле до конца 1991 года.

The Chernobyl. The First Days Stretched for Years

Yu. V. Dubasov

Memoirs of the Chernobyl NPP accident elimination participant describe the work of employees of Radiochemical Research Department of the Khlopin Radium Institute since the first days of May 1986. Main attention is focused on radioactive contamination of the 30-km zone around the Chernobyl NPP and settlements from homecoming zone. Working conditions and life in the first period, and also solution of problems permitting no delay, are described.

III.2. Чернобыль – май 1986 года

А. А. Римский-Корсаков

По личным впечатлениям члена бригады Радиевого института, работавшего в Чернобыле в течение мая 1986 г., описаны начальные этапы работ по оценке загрязнений и диагностики поврежденного 4-го блока ЧАЭС. Автор также пытается оценить эффективность (или неэффективность) общего подхода и политики «смягчения последствий», примененных в 1986 г. ко всей аварийной территории.

Я – профессионал. Я имею в виду, что по своему образованию и по профессии я – физик-экспериментатор, и поэтому многое, что сегодня подается средствами массовой информации как область смертельного риска, как что-то катастрофическое (работа в условиях радиоактивного загрязнения, обращение с делящимися материалами и т.д.), для меня и моих коллег по работе – самое обычное дело, как для вас – переход улицы, где (в принципе) вас могут задавить, если вы вовремя не поглядите на светофор. Мы (профессионалы) тоже боимся неизвестного, непонятного – например, нового штамма гриппа – но совершенно спокойно относимся к понятным и десятки раз проверенным ситуациям, когда наши приборы показывают (например) уровень мощности дозы в сотни раз выше естественного фона, или когда дозиметристы не позволяют идти домой, поскольку датчики в проходной срабатывают при нашем приближении, показывая радиоактивное загрязнение одежды (или кожи), и приходится мыться очень противной и едкой смесью, чтобы тебя выпустили на «свежий воздух». Мои сослуживцы – такие же, как и я, обыкновенные люди, многие годы работают в этих «ужасных» условиях и, могу вас уверить, из тысяч таких профессионалов практически никто не страдает лучевой болезнью, никто не произвел на свет сколько-нибудь больных детей – насколько мне известно, по крайней мере, и весьма удивится, если его сосед по работе станет жаловаться на воздействие излучения. Такие жалобы (среди профессионалов) будут восприняты, скорее всего, как свидетельство неграмотности при работе и несоответствия должности – примерно так, как жалоба электрика на то, что его ударило током при монтаже электрической розетки. Вот, собственно, что я хотел сказать в качестве предисловия – чтобы было понятно, что я не вижу абсолютно никакой «романтики» в нашей «героической» работе в мае 1986 года на Чернобыльской АЭС. Скорее, легче будет понять наше возмущение «лихостью» операторов и несовершенством системы защиты реактора РБМК, которые вместе взятые и привели к чернобыльской катастрофе, возмущение неподготовленностью аварийных служб и администрации к крупной аварийной ситуации и – к нашему стыду – чувство бессилия, когда мы видели тысячи непрофессионалов, вовлеченных в эти события и вынужденных расплачиваться за некомпетентность своих начальников – расплачиваться своим здоровьем и будущим, и притом совершенно понапрасну, не ведая, что творят, не умея принять элементарных мер предосторожности, а часто и воображая, что их жертва оправдана.

До памятного мая 1986 года мне приходилось работать на ядерных реакторах и я хорошо представлял себе, как они управляются и что можно, а что ни при каких обстоятельствах делать нельзя – сведения эти я почерпнул от настоящих профессионалов – сменных инженеров экспериментального реактора в Гатчине, когда мы – «лихие» по молодости физики-экспериментаторы – прибегали в пультовую и пытались уговорить сменного инженера (это вроде вахтенного начальника на мостике корабля) резко изменить режим аппарата – дескать, «поддай нейтронов, совсем ма-

лость до Нобелевского измерения не хватает», или «братцы, а нельзя на полчаса заглушить аппарат, мы там забыли одну штучку вставить..» и т.д.

В таких случаях Кир Александрович Коноплев (ныне главный инженер ПИЯФ им. Б. П. Константинова), вздыхая, давал нам понять, что реактор – не электроплитка, которая может быть включена или выключена поворотом ручки, что динамика его определяется накоплением и распадом продуктов реакции, что существует «иодная яма» и что вообще-то непонятно, как нам удалось окончить курс Политехнического института при полном невежестве в этих вопросах. Хочешь-не хочешь, а приходилось читать книжки и разбираться, что к чему. Позже (лет на пятнадцать) я и сам рассчитывал параметры критических систем с делящимися материалами и лучше понял, каково было Киру Александровичу слушать наши бредовые пожелания. Тем более, что (ныне покойный) Давид Моисеевич Каминкер – тогдашний директор ЛИЯФ – строжайше предписывал всем службам института (включая реакторные смены) делать все возможное для физиков-экспериментаторов – «если физики будут на вас жаловаться, то я буду вас наказывать, поскольку реактор – для физиков». Но надо отдать должное сменным инженерам ЛИЯФ – они-то знали, что кроме пожеланий начальства есть еще и законы природы и шутить с ними не стоит.

В апреле 1986 года в Чернобыле (как показала авария) пожелания начальства во что бы то ни стало провести плохо подготовленный опыт явно возобладали над здравым смыслом сменных инженеров, что и явилось одной из причин катастрофы.

Когда в печати появилось короткое сообщение об аварии, у нас в Радиовом институте практически никто не придавал ему серьезного значения – скорее, это восприняли как признак модной тогда «гласности». Впоследствии я, впрочем, узнал, что наш директор Л. Н. Лазарев уже был «в курсе», но, как и принято в Средмаше, не говорил тем, кому не следовало (и правильно делал). На вопрос одного из своих сотрудников, где эта Чернобыльская АЭС и что там у них случилось, я, не задумываясь, ответил, что понятия не имею, но что в реакторном хозяйстве есть, например, узел дожигания водорода, а где водород – там может быть и гремучий газ, а где гремучий газ, там вполне может (у разгильдяев, конечно) и взорваться. Интересно, что эта версия долго приводилась начальством ЧАЭС, даже когда все поняли масштаб происшедшего. Прошло два дня – и все мы сообразили, что дело не шуточное, особенно, когда на гамма-спектрометр поставили буквально несколько капель дождя, прошедшего в Ленинграде во время первомайской демонстрации. Конечно, для нас в Ленинграде этот дождь никакой опасности не представлял, просто приборы у нас весьма чувствительные, однако мы понимали, что на пути длиной в полторы тысячи километров радиоактивный выброс был разбавлен примерно в миллиард раз, и стало быть, вблизи АЭС загрязнение территории нешуточное. Оптимистические религии в газетах о «полной безопасности и спокойствии» в Киеве звучали в этом свете совсем неубедительно.

Выспрашивать у начальства, что происходит «на объекте», у нас не принято – раз темнят, значит, так надо. К этому приучали всех сотрудников Минсредмаша многие годы, да по существу это было неременным условием работы в отрасли. По тогдашним законам, разглашение данных о крупных радиационных авариях на территории СССР наказывалось в уголовном порядке, а с перечнем секретов нас знакомили регулярно и брали подписку о неразглашении, так что нам бы и в голову не пришло публично бить тревогу. В то же время люди – всюду люди, и ветераны разных аварий в кулуарах строили довольно подробные предположения, что происходит в

Чернобыле. Многим из них (включая рассказчика) вскоре пришлось лично убедиться, что действительность, как говорится, «превзошла самые смелые ожидания».

Мы, конечно, перечитали публикации об аварии на графитовом реакторе в Уиндскейле в Англии в октябре 1957 года. Там тоже горел графит активной зоны, и его оказалось совсем не просто потушить. Мы перечитали и подробнейшие отчеты об аварии на АЭС «Три Майл Айленд» в США в марте 1979 года, где зона расплавилась при потере охлаждающей воды. Ни в том, ни в другом случае выброс радиоактивности нельзя было даже сравнивать с Чернобыльским – ясно было, что «отечественные» масштабы в тысячи раз крупнее «заморских» и вполне сопоставимы с загрязнением (к счастью, не с разрушениями) от мощного ядерного испытания. Уже с 28 апреля (на третий день аварии) институт вел круглосуточный контроль выпадений в Ленинградском регионе, и мы даже в праздничные дни – Первомай и Пасху (4 мая) – не раз приходили на работу узнать, что нового принесли нам ветры – они как раз дули с запада и юго-запада. Ничего утешительного приборы не показывали.

Второго мая я зашел в институт, и замдиректора Сергей Семенович Коваленко привел меня в дирекцию. Директор – Леонард Николаевич Лазарев – то и дело связывался по ВЧ-связи с московским начальством, и вообще царил обстановка некоторого возбуждения. Формировали группу для работы в Чернобыле – и мне сразу стало ясно, почему именно моей группе надо ехать – мы незадолго до этого собрали довольно легкий и надежный гамма-спектрометр для экспедиционных работ и вообще имели необходимый опыт для подобной экспедиции. Мне рассказали, что борьба с пожаром пока неэффективна, что зона (по-видимому) расплавилась и что есть опасность разрушения перекрытий под ней и проникновения этой расплавленной радиоактивной массы (почти 200 тонн высокоактивного топлива) в водонесущие слои под зданием – а оттуда вся вода напрямик пойдет в Киевское водохранилище и вниз по Днепру.

Тут уж действительно дело будет плохо. Мне сказали, что приказывать мне ехать не станут – «подумай...».

Мне также сказали, что руководить работой «наших» там будет Лев Дмитриевич Рябев – в то время замминистра отрасли, о котором я слышал много хорошего (и который мне лично понравился своим неординарным подходом и особенно чувством юмора, когда до этого был у меня в лаборатории по совсем другому случаю). Это, если честно, и склонило меня немедленно согласиться. Далекое не все равно, кто тобой командует – а что будут именно командовать, мне тоже было понятно, этого явно требовали как традиции нашего «ведомства», так и аварийная обстановка. Конечно, гораздо солиднее было бы написать, что я проникся чувством долга и «смело решил принести себя в жертву ради человечества» или что-нибудь в таком роде – но, откровенно говоря, никаких жертв приносить я не собирался, а работа обещала быть интересной. К тому же я только что защитил докторскую диссертацию и не успел начать никакой серьезной работы. Так что сомнений у меня не возникло. Команда собралась большая – большей частью экспедиционные группы, постоянно работавшие на полигонах отрасли и привычные к работам по оценке и исследованию радиационной обстановки на местности, под руководством Юрия Васильевича Дубасова и (ныне покойного) Юрия Георгиевича Петрова. Из физиков со мною отправились всего двое – Владимир Васильевич Карасев (ему мы испортили день рождения – 5 мая) и Валерий Павлович Майоров. Петров и его водитель Георгий Федорович Панов взяли меня с собой в «передовую» машину – УАЗик, а остальная экспедиция двигалась за нами на менее быстроходных средствах передвижения – автобусе

и грузовиках с аппаратурой и снаряжением. Отправились рано утром 5 мая, в понедельник.

Оба мои попутчика – «фанатики» – сменяя друг друга за рулем, безостановочно гнали УАЗик днем и ночью, тогда как я – не умеющий водить машину – попеременно спал то на правом сиденье, то на теплой кошме сзади. По дороге мы следили за дозиметром – было интересно выяснить, что же фактически происходило на территории страны – ведь никаких данных в печати не было (формально эта информация считалась секретной в соответствии с «Перечнем...»). Я недавно отыскал два помятых листа бумаги, где криво-косо (УАЗик – машина трясучая) мы записывали показания приборов.

Примерно через сутки – утром 6 мая – мы миновали нынешнюю границу 30-километровой зоны эвакуации – Дитятки – и направились в Чернобыль, куда (по слухам) переместился штаб Правительственной комиссии после эвакуации Припяти. Навстречу двигались повозки с людьми и их пожитками, сельхозтехника, скот – шла эвакуация 30-километровой зоны. Площадь в Иванкове была полна людей – с детьми, со стариками, они грелись у импровизированных костров (ночью был заморозок), бродили по улицам, толпились у зданий райкома и исполкома, вид у них был потерянный. В одночасье они потеряли родные дома и все, чем были заняты еще вчера – работу, заботы, опору в жизни. Им сказали, что через три дня они вернутся домой, и большинство в это продолжало верить. Мы их не переубеждали, хотя нам было ясно, что тремя днями тут никак не обойдется. До сих пор не сказано, кто назвал такую цифру и было ли это сознательной «ложью во спасение» или результатом безграмотного применения известной формулы «Т в степени минус одна целая и две десятых» некомпетентными людьми. Дело в том, что формула эта правильно описывает распад продуктов мгновенного деления урана при взрыве бомбы, но совершенно неприменима для описания распада продуктов, накопившихся в реакторе за год работы.

Применив эту формулу к Чернобыльскому загрязнению, кто-то вполне мог получить «прогноз», что радиоактивность спадет за три дня в тысячу раз. Однако смесь продуктов из реактора распадается куда медленнее, и даже к концу мая активность уменьшилась всего в несколько раз, а далее спад активности пошел еще медленнее. Естественно, никакого сюрприза для нас в этом не было, однако некоторые наши «коллеги» весь май требовали у нас «правильную» формулу и удивлялись – «неужели в учебнике неверно?». Так ли было, или просто решили «надеть людям розовые очки», чтобы глаже прошла эвакуация, я и по сей день не знаю. Если бы этот вопрос пришлось решать мне в то трудное время, не знаю, как бы я поступил. Скорее всего, отвечал бы людям уклончивее – «дескать, разберемся и скажем точно, когда вы вернетесь домой». А по существу – та же «ложь во спасение», ведь я-то с самого начала, еще в Ленинграде, проанализировал состав выброса и посчитал, что к лету распад даст уменьшение активности раз в 5–7. Иногда нам «проще» (и привычнее) жить в неведении – так многих из нас воспитывали с детства. А уж поверить, что кто-то тебе будет благодарен за (неприятную) правду, мы совсем не готовы.

Ну вот, приезжаем мы в Чернобыль утром 6 мая. Много военной техники, люди концентрируются у площади, где – как мы все привыкли искать начальство – находятся райком и исполком. Там, где исполком (здание побольше) – штабы армейских частей, где райком – (здание поменьше) – Правительственная комиссия. Идем в райком и еще у входа встречаем Л. Д. Рябева, «докладываем», что прибыли в его распоряжение. Приводит он нас в какую-то комнатенку и разворачивает план площадки станции с надписанными карандашом совершенно неслыханными цифрами

мощности дозы – 200, 500, а кое-где и 2000 Р/ч – и говорит: «Вот, здесь и произошла эта ...(пауза) ... неприятность». Я, хотя и давно уже был готов к неожиданностям, был несколько ошарашен, и позволил себе даже перебить столь высокое начальство – «Две тысячи рентген в час в здании?» – говорю, а он отвечает – «Нет, на улице...». Да, такого мы не ожидали. Это прямо указывало, что на промплощадке станции буквально разбросано высокоактивное топливо из реактора. Как впоследствии я видел сам, пожарная машина с лестницей, выдвинутой на крышу машинного зала, была поставлена (в темноте) почти прямо над разрушенной сборкой топлива, лежавшей на бетонке «во дворе» станции. Стоило им поставить машину на 10–20 м правее (или левее), они бы имели реальные шансы остаться в живых. В принципе ведь было безразлично, где остановить машину – здание имеет длину в полкилометра, и уж где лезть наверх, чтобы тушить горящую кровлю, они вполне могли выбрать, если бы... Если бы в пожарной машине был дозиметр армейского образца. Тем более, что пожарные были не просто пожарные, а спецчасть для ликвидации пожаров на АЭС. На протяжении дальнейшей работы я не раз убеждался, что армейские дозиметры (например, в вертолетах или в бронетранспортерах) работают надежно, хотя до этого экипаж ими никогда не пользовался, да и вряд ли кто ожидал, что они понадобятся. А тут – пожарная спецчасть на АЭС, и никаких средств контроля мощности дозы! Не знаю, поставили ли им хоть что-нибудь сегодня. Боюсь, что случись сегодня то, что было в 1986 году, у них как не было приборов, так и нет. Хорошо, если я ошибаюсь. Однако я забегаю вперед, пора вернуться к Рябеvu и первым впечатлениям от его анализа обстановки.

Реактор разрушен и горит, аппаратура контроля не действует, доступ в помещения вблизи реактора частично заблокирован обломками, да и мощности дозы такие, что подойти невозможно. Сверху над реактором крыши нет, и шахта завалена песком и другими материалами с вертолетов. Топливо, по-видимому, расплавилось, вытекло в подреакторные помещения, но (пока) не проникло в бассейн-барботер, где много воды. Правительственной комиссии нужно немедленно получить однозначный ответ на следующие вопросы:

- сколько и какой именно радиоактивности выбрасывает горящий реактор сегодня и далее, каждый день;
- какова температура в наиболее горячей части разрушенного реактора (выдержит ли бетон, который разрушается при температурах выше 400–500°C);
- какая часть радиоактивности уже выброшена из реактора и лежит на земле – на площадке станции и в 30-километровой зоне (за пределами зоны этим вопросом занимаются другие организации во главе с Госкомгидрометом).

Эти вопросы уже поставлены перед группой Института атомной энергии (ИАЭ) – и непосредственно занимается ими Евгений Петрович Рязанцев, с которым мы тут же познакомились. Выяснилось, что в его распоряжении всего один–два человека из ИАЭ и нечто вроде термопары на длинных проводах. Эту термопару они намерены опустить в реактор с вертолета. Евгений Петрович – человек безусловно квалифицированный (доктор наук, замдиректора ИАЭ и в прошлом председатель ученого совета отрасли), сам явно не переоценивал «эвристической силы» такого метода измерения температуры в реакторе, однако ничего другого в его распоряжении в тот момент не имелось. Мы поговорили с ним полчаса и решили применить более серьезные средства пробоотбора и измерения, которые двигались в нашем «обозе» и должны были догнать нас назавтра.

Евгений Петрович, как выяснилось, приехал на ЧАЭС с первых же дней аварии в составе Правительственной комиссии и был в курсе всех проблем отнюдь не понаслышке. Он быстро ввел нас в курс дела и рассказал, как здесь нужно действовать, кто есть кто, где кого найти и какие здесь, в Чернобыле, порядки. Рязанцев объяснил, что от нашего ответа на поставленные Правительственной комиссией вопросы зависит принятие неотложных решений, в том числе меры тушения пожара, эвакуация населения за пределами зоны аварии (в том числе детей из Киева), строительство подземного бетонного «щита» под зданием реактора, меры на случай дальнейших разрушений здания и возникновения нового очага цепной реакции, если топливо попадет в воду и так далее. Так что данные нужны срочно, и не какие-то домыслы, а убедительная проверенная информация.

Для решения этой задачи мы можем привлекать людей и боевую технику размещенных в Чернобыле военных (авиации и химвойск), а также свою (привезенную) аппаратуру, а если где-то в Союзе или за рубежом есть то, что нам надо – «скажите точно, где и что – вам привезут». Мы с такой «щедростью» встретились впервые и не стали требовать никаких «подарков» – ведь мы ехали работать и, конечно, взяли с собой неплохой комплект измерительной техники.

Позволю себе здесь небольшое отступление. В зоне аварии в последующие дни я не раз был свидетелем того, как в нашем штабе появлялись группы от различных организаций, прибывшие «на подвиг» и ничего, кроме героического намерения спасти человечество, с собой не захватившие. Они немедленно начинали предлагать совершенно немыслимые операции (например, взорвать горы в Новороссийске, перевезти этот «чудодейственный» щебень в Чернобыль и перегородить им реку Припять – тогда «ни капли радиоактивности не попадет в Киевское водохранилище», или построить дирижабль, который надуть радиоактивным дымом из реактора и тем самым собрать радиоактивность, и так далее). Для осуществления этих (или подобных) затей им требовались разные дорогие игрушки (которых они раньше в глаза не видели, но хотели получить немедленно) – вроде японского самоходного робота ценой во многие миллионы, который был-таки куплен, торжественно проследовал через площадь у штаба и бесславно застрял среди отечественных буераков на территории станции.

Между прочим, состояние промплощадки станции без всякой аварии было такое, что проехать куда-либо было непросто. Когда через несколько дней мне пришлось подлетать к станции с пилотом-«новичком», который впервые увидел площадку ЧАЭС, он не без юмора спросил, «Какой тут у них реактор взорвался? Поглядеть, так все они развалились...» Я вынужден был признать, что зрелище действительно такое, как будто на площадке прошла небольшая война. Конечно, «ликвидаторы аварии» тоже потрудились по части разгрома, и на площадке тут и там были видны брошенная техника, рваные клочья парашютов, «промахнувшиеся» мешки песка и Бог знает, чего еще – но остатки строительного мусора, бетонных блоков и ржавого железа явно лежали там уже давно, со времен «ударного» строительства станции, а с воздуха их было видно куда лучше, чем с парадного входа в здание, дальше которого мало какое начальство обычно заглядывает.

Но тут я забегаю вперед. В тот момент я вообще никакой станции не видал и понятия не имел, как она выглядит. Было ясно, что пробираться к разрушенному блоку внутри здания – это верная дорога на тот свет, да к тому же если бы и удалось подойти к зоне – как определить ее температуру? Ведь градусника туда не сунешь, да и куда именно ставить такой гипотетический градусник? Самая горячая часть зо-

ны похоронена где-то в глубине разрушенного здания, и все, что может нести информацию о ней – поток дыма и газов, выходящих из нее наружу и несущий высоко-радиоактивную «грязь» в атмосферу.

Мы решили попытаться опустить на тросе с вертолета в дымовой шлейф горящего реактора наши приборы и взять пробы выбрасываемой радиоактивной струи – помимо количественной оценки мощности выброса это могло помочь оценить состояние и температуру разрушенной активной зоны реактора, на этот счет у меня были кое-какие идеи. В тот же день поехали с Рязанцевым на импровизированный аэродром на окраине Чернобыля, откуда вертолетчики летали к станции, и договорились с ними о полетах на завтра с нашей техникой. Тем временем военные прилаживали термопару Рязанцева к толстому стальному тросу метров триста длиной. На тросе через каждые 30–40 м привязывали тяжеленную свинцовую болванку – как мне объяснили, чтобы он висел в полете прямо, как палка, а не болтался из стороны в сторону. Громадный вертолет Ми-26 должен был нести это сооружение к реактору.

Второй такой же трос начали готовить и для нашего завтрашнего полета, все делалось быстро и по-деловому, и я понял, что здесь работают профессионалы высокого класса, особенно когда тут же трос Рязанцева закрепили на Ми-26 и подняли в воздух для пробы. Машина буквально застыла на трехсотметровой высоте над полем, трос перестал колебаться и точно опустился в обозначенный на траве круг. Было трудно поверить своим глазам, настолько уверенно и точно работал летчик. Я спросил, кто пилотирует Ми-26 – ведь наверняка такой «номер» может проделать только летчик высшего класса, да и то после многих тренировок. Мне сказали, что за штурвалом Николай Андреевич Волкозуб, что он здесь с первых дней аварии и уже много раз летал над зданием станции, где нужна ювелирная техника пилотирования, поскольку рядом с реактором 150-метровая труба и приходится работать рядом с ней. Я почувствовал некую дрожь в коленках (как любой непрофессионал при встрече с непривычной опасностью), но виду не подал – дескать, подумаешь, труба. Волкозуб бережно «уложил» трос вдоль поля, сбросил замок и приземлил вертолет. Мы подошли ближе к Ми-26 и встретили Рязанцева, который шел с летчиками навстречу.

Волкозуб оказался усталым человеком в затрепанной кожаной куртке, среднего роста и совсем не «героического» обличья. Видно было, что ему мало пришлось спать последние дни и что такие «номера» требуют от летчика громадного напряжения. Он весьма скептически осмотрел тоненькие провода термопары и стал обсуждать с Рязанцевым, что будет делать техник со своим прибором, если вдруг придется отцепить и сбросить трос – как бы он (техник) не улетел в люк вместе с проводами, прибором, Рязанцевым и прочими предметами. Перспектива эта явно его беспокоила больше, чем соседство высокой трубы в считанных метрах от винта вертолета. Я понял, что с таким человеком можно работать спокойно – он досконально продумает все варианты ситуаций до того, как они возникнут, и не допустит никакого «геройства», которое может обернуться плохо. Кажется, у Галлая в книге «Испытано в небе» есть фраза: «Если летчик-испытатель перед вылетом считает, что он идет на подвиг, значит, он к полету не готов». Стоя в сторонке и слушая этот разговор, я убедился, что Николай Андреевич явно принадлежит к профессионалам в самом лучшем смысле этого слова, и дрожь в моих коленках пошла на убыль.

Пора было думать о встрече нашего «обоза» и особенно о его размещении. В Чернобыле ночевать было не полезно (около 15 мР/ч – то есть в тысячу раз выше природного фона), да и места для размещения 30 человек не нашлось бы – частные

дома были закрыты, а немногие общественные здания заняты штабами разных мастей, которые работали только днем, а ночью «эвакуировались» на 30–60 км.

Пришлось встречать «обоз» утром в Иванкове и заворачивать его обратно, на базу отдыха «Строитель», которую в этот день «добыл» для нашей и своей групп Игорь Сергеевич Крашенинников, замдиректора СНИИП.

А первую ночь мы ночевали в пионерлагере «Сказочный», где размещались реакторные смены и другой персонал со станции. При въезде на контрольном дозиметрическом пункте нас раздели и (что хуже) разули, и послали на временный склад искать себе экипировку. С тех пор раздевали нас столько раз, что мы на это практически перестали обращать внимание, однако обувь – дело совсем иное. У меня 45-й размер, и найти мне обувь по ноге – проблема. С тех пор я, как мог, прятал свои (пускай «грязные») ботинки так, чтобы дозиметрия до них не добралась, или применял самые разные приемы, чтобы миновать контроль (вплоть до прилета в лагерь на вертолете). В «Сказочном» уже многие щеголяли в пластиковых бахилах на босу ногу или в полиэтиленовых мешках для отходов, надетых на домашние тапочки. Лагерь являл собой странное зрелище – по асфальтовым дорожкам текли ручьи мыльной пены и в них плавали детские игрушки, а по ночам весь лагерь надсадно кашлял. По поводу этого кашля я с тех пор слышал много разных толкований, вплоть до утверждения, что он «от радиации».

Это, конечно, выдумки, однако кашель был у всех и весьма противный. Скорее всего, причиной ему были тонны различных заморских химикатов, которые лили и сбрасывали с вертолетов в очаг пожара для пылеподавления. Цветные бочки изпод этих чудодейственных средств в большом количестве валялись на летном поле в Чернобыле, а запах горелой резины в районе станции усиливался при каждом «пылеподавляющем» налете, и от него першило в горле. Мы между собой называли его «гидасповскими горелыми галошами», поскольку эти средства выбирал и привозил тогдашний директор ГИПХ, а впоследствии ленинградский политический деятель Б. В. Гидаспов. Есть и другая правдоподобная версия причины кашля – иодные таблетки, которые щедро раздавали медики в нашем штабе и которые многие истово поглощали «на всякий случай».

Что касается таблеток, то я решил сначала измерить концентрацию ^{131}I в воздухе, а потом уж решать, надо ли ими травиться (ведь даже на упаковке было написано, что это не сильный, но яд). Видел я и коробки одноразовых шприцов «антирад» для уколов тем, кто получил дозы более 400 бэр. Похоже, что ими тоже кололись многие без надобности – а это яд не слабый, как тоже написано на коробке. Так что причины для кашля были и без всякой радиации.

На другой день мы приспособили прибор для сбора аэрозоля на фильтр к концу троса и стали ждать вылета. Вертолет Волкозуба с утра полетел с термопарой Рязанцева к реактору и вскоре вернулся без троса – его сбросили на безлюдную отмель у станции, чтобы не возвращать на летное поле «грязь». Рязанцев вылез из машины возбужденный и довольный – Волкозуб умудрился «воткнуть» термопару точно в кучу песка на крышке реактора и «висел» так, пока прибор не дал точных показаний. Когда провода отсоединили (о чем особенно беспокоился Николай Андреевич), трос отнесли в сторону и сбросили. Все прошло как по маслу, и летчики шумно выражали восхищение мастерством пилота. Прицепили и наш трос, а чтобы мы видели точно, где отобрана проба, нас посадили во второй Ми-26, который использовался в таких полетах для корректировки курса и высоты. Только тут я сообщил, что пилот Ми-26 не может видеть конца 300-метрового троса, подвешенного

под фюзеляжем его машины, и делает этот «фокус» практически вслепую, только по командам наблюдателей.

Мы заняли места во втором Ми-26 (благо его кабина с великолепным обзором вмещает 6 человек) и взлетели. Впереди шла машина с тросом, который был отлично виден – мы приспособили к его концу яркий оранжевый лоскут от парашюта, а за ней мы. В моем шлемофоне были ясно слышны голоса корректировщиков и голос Волкозуба, односложно подтверждавший время от времени, что принял их сигналы. Впереди развернулась панорама ЧАЭС, которую я тогда видел впервые. Темп движения замедлился, мы все высматривали цель – дым из реактора. Вот и разрушенный блок, дым – желтоватый, подымается ленивой струей из горы песка и мусора на месте реакторного зала. Наш трос приближается к этому месту, летя между торчащими обломками арматуры, каких-то конструкций, справа надвигается высоченная труба станции. Вдруг что-то неуловимо изменило темп движения троса – в наушниках совершенно спокойный голос Волкозуба «зацеп...». Пауза, затем «сброс...» и мы видим ленивое падение нитки нашего троса куда-то в гору обломков. Воцарилось молчание. Машина Волкозуба быстро идет вверх и ложится в вираж над рекой и прудом-охладителем, весело сияющим на солнце. Мы следуем за ней и вскоре приземляемся в Чернобыле. Мы встретили летчиков в смущении – ведь наша некомпетентность и неподготовленность чуть не привели к аварии. Нельзя было требовать от летчика, даже высшего класса, почти невозможного – пронести трос сквозь этот лес торчащей арматуры и ничего не задеть. Еще больше смутило меня то, что Николай Андреевич был искренне расстроен потерей нашего прибора и беспокоился, где взять другой. Мы заверяли его, что это не проблема, что найдем другие средства отобрать пробу – но, кажется, безуспешно. Николая Андреевича я больше не видел, его скоро сменили, так и не пришлось мне выразить ему восхищение его работой и мужеством.

Приехали мы в штаб, и отправился я предстать пред светлые очи начальства с докладом о наших подвигах. Рябев выслушал мою реляцию без комментариев и мрачно напомнил, что сутки прошли – а результатов никаких, что наши воздушные приключения ему не очень интересны и что он ожидал большего... Короче – идите, лейтенант, и без «языка» не возвращайтесь, как говорится. Он был, конечно, прав. Я отправился в штаб химвойск напротив, и тут мне повезло – меня познакомили с подполковником химвойск Арутюновым – он привез включаемые по проводам воздухозаборники, которые можно подвесить к вертолету. Мы срочно согласовали вылет с командующим группой ВВС Владимиром Васильевичем Трибштоком (он и потом нам всегда помогал в работе без всяких проволочек и формальностей). Подполковник поехал за своими баллонами, а мы отправились на летное поле и стали собирать импровизированную подвеску для них к более легкому вертолету – Ми-8т – на нейлоновом 30-метровом фале. Баллоны были откачаны заранее, а доступ воздуха внутрь был перекрыт клапаном, который открывался подрывом патрона по длинному проводу от машинки – как у партизан в кино, когда они пускают под откос вражий эшелон. Технику эту мы проверили на летном поле и убедились в ее работоспособности. Познакомился я и с экипажем Ми-8т, с которым предстояло работать. Это были молодые летчики из Прикаспийского округа, командир – Игорь Игнатьев (да простит он мне, отчество я не спросил). Памятуя утренний вылет, я решил не делать глупостей и избежать подхода фала к развалинам блока – ведь шлейф дыма тянулся на сотни метров от реактора и можно было отобрать из него пробу, не «спускаясь» в развалины и не рискуя зацепиться, а то и загреметь туда вместе с фалом, подполковником, экипажем и вертолетом доблестного Прикаспийского округа. Такой подход к

проблеме и пилот, и экипаж (которые уже слышали об утренней истории с тросом) встретили положительно – их тоже не слишком вдохновляла перспектива сложить головы за наши малопонятные пробы. Мы уселись на траве и стали подробно прорабатывать все возможные варианты действий в полете и сговорились, какими жестами будем сообщать друг другу о ситуации – не выяснять же нам отношения в воздухе над реактором. Тут я вспомнил, что у партизан в кино обычно машинка в самый нужный момент не срабатывает – в результате герой (или его любимая радистка) обычно бросается под поезд и зубами скручивает провода. Нас такой вариант не устраивал, тем более, что ни увидеть, ни услышать срабатывания пиропатронов на нашем фале невозможно – и мы рискуем убедиться, что летали зря, только после возвращения на аэродром. Подполковник заверил, что его приборчик покажет, сработали детонаторы или нет. Если не сработали, можно повторить заход и снова проверить... Впоследствии эту «железную логику» нам еще пришлось вспомнить, а сейчас пора было отправляться.

Наш оранжевый капроновый фал выглядел на зеленой траве очень нарядно – вокруг него уже похаживали разные «ликвидаторы аварии» и явно интересовались его дальнейшей судьбой. Я успел расслышать только две–три реплики типа: «Хор-рошая вещь – машину буксировать...» или – «Ребята – а вы куда его потом денете? Ведь все равно спишете?» и понял, что с этим фалом у нас будут проблемы. После полета он будет «светить» и в вертолет его класть нехорошо, а оставишь на поле – так утром вряд ли найдешь. Сговорились после полета спрятать фал на дальнем конце летного поля. Фал закрепили на замок под «пузом» машины, а провода завели в маленький лючок в полу кабины. Арутюнов поместился в задней части кабины у лючка, проверил – контакт вроде есть. Я сел напротив боковой двери – и Игоря вижу, и подполковника. Взлетели.

К «счастью» как раз перед нами реактор снова «бомбили» мешками с дробью (после этого дым обычно валил с удвоенной силой), так что еще за два километра от реактора Игорь ловко «оседлал» струю дыма и наши воздухозаборники болтались прямо в ней. Я дал сигнал, и подполковник крутанул машинку, а затем стал переключать что-то и глядеть на прибор. Секунды шли быстро (два километра до здания – минута), а машина все снижалась вдоль струи дыма к развалинам, проклятая труба опять надвигалась. Игорь на меня не оглядывался, а штурман прямо ел меня глазами – ну, что? Подполковник, наконец, кивнул – сработало. Я просигналил – готово – и только тогда машина отвернула влево. Под нами метрах в пятидесяти проплывал разрушенный блок, я поглядел на дозиметр в правом верхнем углу кабины – 350 Р/ч, стрелка быстро шла вниз – мы набирали высоту и уходили от разрушенного блока. На аэродроме Игорь «уложил» фал в самом дальнем углу поля и посадил вертолет, не выключая двигатели. Я рысью кинулся к баллонам за своими драгоценными фильтрами к пробоотборникам на конце фала.

Надо было, конечно, снять «грязные» перчатки и не смущать экипаж, а я об этом не подумал. Подбегаю обратно, фал отцеплен и можно взлетать – механик протягивает мне руку, хочет помочь влезть в дверцу. Я ему руку дать не могу (у меня перчатки грязные), а он этого, конечно, не понимает. Борис Жабров из нашей команды тянет ко мне «клюшку» дозиметра и показывает – ничего страшного. Лезу в кабину и вижу, что операция с перчатками и дозиметром произвела впечатление – летчики весьма подозрительно глядят на мои мешки и явно не прочь от меня поскорее избавиться. Перелетаем в «наш» край поля, там стоит наш УАЗик – складываю туда мешки с фильтрами и возвращаюсь к вертолету. Теперь прием более «сердечный»,

садимся на травку и рисуем схему своих воздушных эволюций – она мне нужна для расчета разбавления струи дыма и концентрации выброса. Конечно, начались вопросы про полученную экипажем дозу – все трое видели стрелку у цифры «350 Р/ч» и теперь, по-видимому, считали, что были на волосок от гибели. Еле удалось им объяснить, что они были в этих условиях не более полминуты – а значит, получили не более трех рентген. Это несколько их утешило. В свою очередь я признался, как потерпелся страху, что фал зацепится за торчащую арматуру, и мы упадем. Тут уж они стали смеяться – оказалось, что от конца фала до развалин было не менее сорока метров, ведь он не висит прямо вниз, а отклоняется назад встречным потоком. Мы разговорились и быстро пришли к выводу, что подвиги частенько приходится совершать тому, кто толком не готов выполнить свое дело – или, что еще чаще – тому, кого некомпетентные начальники послали выполнять невозможное или неподготовленное задание. Мы обещали друг другу категорически избегать ситуаций, требующих подвигов, и они полетели домой в Чернигов обедать, а я отправился в штаб, доложить о своих достижениях.

У Рябева мой доклад не вызвал особого ликования – нужны были цифры, а не обещания. Все же я выговорил себе перерыв на обед и отправился в столовую, прихватив «своим» четыре бутылки даровой пепси-колы, ящики с которой имелись в штабе в изобилии. Кормили тоже даром – в солдатской столовой метрах в трехстах от штаба, без затей, но в неограниченном количестве. Даже когда через несколько дней открыли «фирменную» столовку по талонам, многие продолжали ходить в солдатскую – «от пуза на халяву». Пообедали мы плотно – предстоял длинный 60-километровый путь в лагерь «Строитель», чтобы успеть сегодня измерить спектры продуктов выброса на фильтрах и сделать расчеты. Мои коллеги – Петров с Пановым, пока я летал с вертолетчиками, успели исколесить окрестности и набрать кучу проб почвы и аэрозоля, так что работы предстояло много.

Если уж говорить об опасностях, то надо признать, что дорога Чернобыль–Иванков в 1986 году для всех работавших в зоне была самой большой реальной опасностью. Узкая лента асфальта, почти непрерывный поток колонн тяжелой техники, усталые и злые водители, темнота и слепящие прожектора военных машин – все эти обстоятельства привели к множеству аварий. Число погибших на этой дороге за 1986–1987 годы было больше полутора сотен человек – никакая радиация столько жертв не произвела. По дороге было несколько пунктов проверки и мытья, каждая остановка отнимала по полчаса, мы бродили возле машин по лужам мыльной воды, мерзли, кормили комаров и злились, а время шло. После остановки шоферы, естественно, гнали во всю – психологическая реакция, желание наверстать время – и частенько кончалось это плохо.

Наконец, мы в «Строителе». Наши коллеги уже развернули аппаратуру в деревянных коттеджах базы отдыха и начали измерения. Пока еще спать некогда – надо исследовать взятые нами пробы, обработать результаты измерений и ответить, наконец, на вопросы Рябева.

Вскоре данные со спектрометра передо мной и можно приняться за расчеты, возникают обычные споры, проверки и перепроверки – и вот, наконец, конечный результат: выброс значительно меньше ожидаемого, однако его состав указывает на довольно высокую температуру топлива в зоне, не менее 500–600°C. Завтра мы это уточним – если удастся взять в штабе кое-какие дополнительные данные у реакторщиков. А если не удастся – придется звонить в Ленинград, в институт.

Так или иначе, сегодня можно ложиться спать, уже час ночи, а подъем завтра в шесть.

Наутро я проснулся от электронного верещания под самым ухом – это сработал будильник, подаренный еще в Ленинграде Володе Карасеву нашей лабораторией (на «испорченный» отъездом день рождения). Его звук с тех пор стойко ассоциируется у меня с Чернобылем – по утрам жутко хотелось спать, ведь мы работали допоздна, а дорога в зону занимала часа полтора, да еще позавтракать не мешало. На веранде за ночь «грязные» ботинки покрывались инеем, и надевать их не хотелось. Единственное обстоятельство, которое привлекало на улицу, это сводка последних известий по-русски, слышная на площадке у ворот лагеря.

В то утро мы услышали, что наши советские ученые сумели определить температуру в реакторе – 300 градусов, и что это хорошо, и что дальше будет еще лучше. Всем было ясно, что это ерунда (как потом выяснилось, корреспондент узнал о данных Рязанцева – 30 градусов на поверхности кучи песка, но решил, что ослышался, и добавил нолик для правдоподобия), однако посыпались шуточки типа «пока ты тут прохлаждался, в Москве уже все измерили ...» или «ну, ребята, теперь на наши 600 градусов не меньше двух букв (то есть «сов.секретно») налепят, черновики не выкидывайте, сдавать придется...». Шутки шуточками, но ведь действительно – тот, кто первый давал прессе неверные данные, в дальнейшем автоматически становился «цензором» всех дальнейших сведений, особенно сведений верных – не может же Центральное радио ошибаться! В данной ситуации Рязанцев был ни при чем – ошибся журналист, однако были и другие случаи, когда, мягко говоря, «неточные» заявления ответственных лиц по радио и телевидению надолго блокировали даже возможность обсуждения правильных данных об аварии.

Недаром умудренный Лев Дмитриевич Рябев строго-настрога запретил нам не только говорить с журналистами, но даже попадать в объективы их камер. Последнее требование выполнить было довольно трудно, поскольку журналистов становилось в зоне все больше, снимали они что попало и мы трое – Петров, Дубасов и я – угодили на снимок в майском «Огоньке». К счастью, качество снимка было такое, что мы и сами еле себя там опознали, а строгому Льву Дмитриевичу и тем более было некогда разглядывать «Огонек».

Я не сомневался в своих результатах, но уверенности, как они будут восприняты, после утренней сводки по радио у меня не было. Надо признать, что мои опасения были совершенно напрасны – Евгений Петрович Рязанцев выслушал нас внимательно и сразу повел к Рябеву, который тоже отнесся к нашим данным серьезно. Конечно, были и вопросы – я развернул спектры, красиво нарисованные вчера компьютером, таблицы данных, и стал подробно объяснять, за что можно ручаться, а что следует уточнить по справочникам. Меня сразу отвели в комнату Велихова, где я с удивлением увидел целую кипу американских отчетов, привезенных Евгением Павловичем как будто специально для нас – там было практически все, чего мне не хватало для расчета температуры зоны. Я примостился в углу и стал лихорадочно списывать нужные мне данные, краем глаза наблюдая постоянно входящих и выходящих великих мира сего – генералов, академиков, министров и прочих, виденных мною раньше лишь на почтительной дистанции, и испытывая сильное желание смыться, прихватив с собою всю кипу отчетов. Попросить их у Велихова, занятого разговором по ВЧ, я не решался. Когда в комнате снова появился Рязанцев, я прибегнул к его помощи – и оказалось, что Велихов ничего не имеет против, похоже, что других претендентов на эту информацию нет, и вообще можно так прямо и об-

ращаться к нему (если по делу). Ну и ну! Подобная «академическая» простота была для меня, честно говоря, в новинку. Впоследствии я убедился, что Велихову совершенно не свойственна генеральская важность – а тогда решил, что он по ошибке принял меня за какого-нибудь высокого чина из «своего круга» (ведь все мы были в комбинезонах). Я выкатился из кабинета, прижимая к животу кипу отчетов и чуть не сбив с ног почтенного маршала при всех регалиях, входившего в двери. Оставалось найти угол, где примоститься с калькулятором – тогда я еще не захватил в штабе постоянного «места под солнцем». Я пристроился в актовом зале на втором этаже и вскоре нашел все нужные мне справочные данные в американском прогнозе последствий аварии реактора с полным разрушением зоны, как будто специально подготовленном для нашей «неприятности». В отечественных работах эта тема считалась в то время «не актуальной», и такой подборки данных в одной работе найти бы не удалось. Все мои вчерашние расчеты подтвердились – в реакторе не менее 600 градусов, а выброс явно падает. Я пошел к Рябеву уже твердым шагом и дал окончательные цифры.

Лев Дмитриевич задал еще несколько вопросов, из которых я понял, что мои данные действительно нужны, и будут нужны каждый день, пока топливо не остынет и опасность разрушений в подреакторных помещениях не минует. Было ясно, что анализ продуктов выброса содержит гораздо больше информации, чем мы пока что из него извлекли, нужно налаживать систематический анализ. Мы не стали откладывать, и отправились к военным сговариваться о регулярном пробоотборе из дымового шлейфа с вертолета.

Здесь уже требовалась некоторая «дипломатия» – ведь нам требовался ежедневный вылет вертолета и ежедневная подготовка баллонов, а это дело не простое, да и квалифицированные экипажи были наперечет – а каждый вылет добавлял летчикам по три рентгена и приближал момент их вывода из зоны (по достижении дозы в 25 рентген). С другой стороны, у штаба химвойск не было спектрометрической аппаратуры в районе Чернобыля, и наши данные тем самым становились единственным средством быстро проанализировать ситуацию. Так что формула «ваши вертолеты и баллоны – наш анализ выброса» устраивала обе «высокие договаривающиеся стороны». Соглашение на уровне высокого начальства было достигнуто быстро. Нам предоставлялся ежедневно утренний вылет на Ми-8т, на котором до этого обычно летал к реактору Велихов (или другой член Комиссии) для визуального осмотра состояния реактора и для замера мощности дозы. Впоследствии эта процедура стала стандартной, так что наше участие в ней не требовалось (нам просто привозили фильтры), однако первые несколько дней летал с ними и я.

В связи с этими полетами хочу рассказать еще одну байку. Полетели мы с баллонами в том же составе, что и первый раз – экипаж Игоря Игнатьева, я и Арутюнов со своей партизанской машинкой. Прицелились в дымовой шлейф, пора подрывать клапаны. Крутанул Арутюнов машинку, да повидимому слабовато. Проверяет – не сработало. А мы уже почти у трубы – пора отворачивать. Я показываю штурману – надо повторить. Ладно, развернулись, заходим снова. Опять крутит Арутюнов машинку – опять не работает. Показываю штурману – надо повторить. Заходим в третий раз – тут уж Арутюнов так закрутил ручку, что аж страшно на него глядеть. Переключил, проверяет. Слава тебе, Господи! Сработало. Я сигналю – готово! Перелезаю в пилотскую кабину, теперь можно и поглядеть на реактор. Игорь весь мокрый, ставит управление на автомат (мы уже идем к дому) и, наклонившись к моему уху, хрипит: «Скажи своему подполковнику, что он ж....!». Вот дисциплина – он ведь

только майор, нельзя ведь таковые слова подполковнику – а душу отвести надо. Прилетели в Чернобыль, прихожу в штаб – встречаю Юрия Васильевича Дубасова, который, оказывается, наблюдал наши эволюции вместе с Рябевым прямо с площадки станции. Рябев его спрашивает – «что это они, третий заход уже делают, зачем это надо?». Находчивый Юрий Васильевич и говорит: «Римский у нас очень добросовестный, он по три пробы берет, для представительности...» Так вот и рождаются легенды о героях. Получилось не хуже радистки, которая в кино провода зубами скручивает.

Мало-помалу пробоотбор аэрозоля с воздуха налачился – и у нас появились надежные данные о температуре топливных масс где-то внутри разрушенного блока. Правительственная комиссия внимательно следила за остыванием реактора – от этого зависело, продолжать ли строительство подземного «щита» под зданием. Пока что было ясно, что отказываться от «щита» нельзя – расплавленные массы топлива все еще продолжали разрушать бетон подреакторных помещений.

Еще более важные и нужные данные собрали наши экспедиционные группы под руководством Юрия Васильевича Дубасова и Юрия Георгиевича Петрова. Они обследовали громадную площадь 30-километровой зоны и районы наибольшего загрязнения в Припяти, «рыжий» лес и промплощадку ЧАЭС и определили количество выпавшей радиоактивности, выяснили ее состав – в результате стало возможно прогнозировать сроки возвращения населения в эвакуированные поселки и сказать, куда при жизни нашего поколения людей возвращать нельзя. Особенно важно было узнать механизм разрушения строительных материалов под действием раскаленного топлива, и Лев Дмитриевич Рябев постоянно возвращал нас к этому вопросу – ведь не поняв этого механизма, нельзя было предсказать дальнейшего хода событий. Юрию Васильевичу Дубасову приходилось и раньше исследовать похожие вопросы, поэтому они вместе с Рябевым чуть ли не с лупой осматривали территорию промплощадки в поисках остатков топлива, вплавившегося в бетон. Один такой «образец» Лев Дмитриевич собственноручно выковырил из бетонной дорожки маленьким перочинным ножиком, и Дубасов с большими трудностями привез его в лагерь – только закрыв эту «крошку» свинцовыми кирпичами, удалось ехать с ней в машине, а при попытке поднести ее к нашим приборам никакие измерения становились невозможными. Похоже, это действительно было топливо прямо из реактора. Так или иначе, прогнозы поведения топлива в зоне наши специалисты давали регулярно, и (как теперь стало ясно) в целом их прогнозы оправдались, хотя о многом в то время можно было только строить гипотезы. Мы понимали, что не имеем права принимать желаемое за действительное, и при каждой оценке обязательно указывали величину погрешности – степень неопределенности, с которой эта оценка сделана. Не всегда такой способ представления данных устраивал «высокое начальство» – ведь человеку, принимающему решение и несущему за это ответственность, всегда хочется опираться на непререкаемый авторитет науки, и даже слово «погрешность» в наших докладах не раз вызывало у них раздражение – с непривычки. Тогда приходилось объяснять, что погрешность – это не то же, что ошибка, что никакое измерение не имеет научного смысла, если не указана его погрешность, и так далее. К счастью, наш непосредственный шеф – Л. Д. Рябев – не нуждался в подобных объяснениях, но были и другие начальники, с которыми мы не сразу находили общий язык. Конечно, мы и сами в какой-то мере давали к этому повод, поскольку привыкли к чисто научной аудитории, и поначалу не утруждали себя «разжевыванием» очевидных нам (и нам подобным) вещей. Типичная история такого рода получилась у меня с Львом

Алексеевичем Ворониным, который стал председателем Правительственной комиссии после 15 мая (до него председателем был Иван Степанович Силаев).

Вызывают меня первый раз к Воронину, который только что приехал и только что сменил Силаева, с очередной таблицей данных о вчерашнем выбросе радиоактивности из реактора. Таблица у меня готова, все там расписано – черта столько-то плюс-минус столько-то, иода столько-то плюс-минус столько-то и так далее, сверху дата и время пробоотбора. Вхожу в кабинет – сидит Воронин за столом, курит «Мальборо». Эх, думаю, понравится ему моя табличка, наберусь наглости и поклоню у него закурить. Докладываю – вот, мол, точные данные. Молчит Воронин, а потом и говорит – «это что у тебя, то ли плюс, то ли минус?» Так точно, говорю, плюс-минус – это погрешность измерения... Помрачнел Лев Алексеевич. Я, говорит, сейчас туда – тут он ткнул пальцем в потолок – докладывать буду, а меня спросят, что это у тебя, плюс или минус? Ты пиши так, чтобы вопросов не было. Я сообразил, что действительно усложняю работу правительства, говорю «это значит от такого значения до такого значения...». Надо отдать Воронину должное, он понял сразу, но говорит – садись, давай договоримся, как надо работать. Вот ты ученый? Ученый. А настоящий ученый так не пишет.

Вот у тебя дата и табличка, а дальше пусто. Ну и что мне с твоей табличкой делать? Что из нее следует? Настоящий ученый пишет так: «Сегодня, такого-то числа, я исследовал то-то и то-то. Наблюдал то-то и то-то, результат такой – от столько и возможно до столько. А внизу крупно – ВЫВОД: я заключил, что то-то имеет такие-то свойства, или если то-то, то обязательно будет то-то. Точка. И вывод настоящий ученый обведет красной рамкой!». Надо признать (и я не стал спорить), что Лев Алексеевич по большому счету был прав, так что я удалился в задумчивости, так и не раздобыв «Мальборо», но зато в какой-то степени поумнев. Конечно, выразил свои требования Воронин «не по-академически», но ясно. Признаюсь, я эту байку с тех пор уже не одному своему аспиранту рассказываю в назидание. Ты, говорю, ученый? Ученый. Табличку нарисовал? Нарисовал. А где вывод – нету. В уме? А какой он, вывод, у тебя в уме? Вот, Лев Алексеевич Воронин, хоть и не ученый, а научного оформления результатов требовал неукоснительно, и нам надлежит его совету последовать.

Мы проработали в Чернобыле уже почти две недели, когда стал сменяться почти весь состав Правительственной комиссии – Силаева заменил Воронин, уехали Рязанцев, Гидаспов, Легасов, стал реже появляться Велихов. К моему удовольствию не уехал Рябев (хотя ему на замену прислали другого замминистра отрасли – Захаренкова). Новые люди всегда заводят (или хотят завести) новые порядки, и в этой связи надо рассказать историю про сухой закон и радиацию – ведь по сей день приходится слышать разные байки о чудодейственном действии спирта на организм при облучении и про повальное пьянство атомщиков (читай Медведева). В моей истории немалую роль сыграл Борис Георгиевич Пологих – один из ведущих специалистов по судовым реакторам из Курчатовского института, присланный на замену Велихову (как он сам пошутил, чтобы велиховскую койку не заняли). В то время я уже завоевал себе стол в штабе Правительственной комиссии в небольшой комнатке на втором этаже. Напротив моего стоял еще один стол – Велихова, но отнюдь не тяга к обществу столь большого начальства привлекла меня туда, да и стол мой был вообще-то не мой, а В. А. Легасова (во всяком случае, за моей спиной на вешалке в полиэтиленовом мешке для отходов красовался щегольской синий костюм с запиской «Легасов»). Но Легасов уехал, а привезенный на его стол персональный компьютер стоял почти без дела, только Велихов время от времени делал на нем свои расчеты.

Этого моя душа, равнодушная к компьютерам, вынести не могла, и я набрался наглости попроситься у Велихова посчитать на этой машине свою задачку с рассеянием струи дыма в атмосфере. К великой моей радости, меня не только не выгнали, но Евгений Павлович даже научил меня пользоваться операционной системой MS-DOS и разрешил сидеть и считать, сколько нужно. Так что, когда вместо него за столом напротив появился Борис Георгиевич, то я уже смело утверждал, что меня тут посадил сам Велихов и велел мне «блюсти» его компьютер. Борис Георгиевич мне сразу понравился (хоть мы с ним люди несколько разных поколений), и мы с ним прекрасно уживались в «велиховской» комнате в те немногие часы, когда я был свободен от поездок и полетов. Однако речь об истинных «бойцовских» качествах этого (с виду вовсе не героического) человека еще впереди.

Может показаться, что я уклоняюсь от темы о пьянстве и радиации, хотя в действительности это не так. Просто без живого портрета Бориса Георгиевича последующая история много потеряет, а внешне он являл собою разительный контраст с «большими начальниками» из Правительственной комиссии – дородными, громогласными и склонными к крепким выражениям министрами, замминистрами и генералами. Небольшого роста, сухощавый, с тихим голосом, в толстых очках, на первый взгляд – типичный «безответный интеллигент», кабинетный ученый, да и только. В разговоре в первый же день он упомянул о вреде пьянства, но я не придавал этому глубокого значения – ведь государственная кампания по борьбе с алкоголем была в самом разгаре и мало ли что говорили тогда при встрече с незнакомым собеседником.

Итак, приехало много новых членов Правительственной комиссии и тоже дородных, громогласных и тоже «больших начальников». Люди эти по роду своей деятельности большей частью никогда с радиацией дела не имели и, естественно, чувствовали себя не в своей тарелке. Многие из них от кого-то когда-то слышали, что водка помогает «от излучения» – даже в песне Высоцкого истопник знает, что «Столичная очень хороша от стронция». А надо сказать, что в начале мая Силаев ввел в зоне Чернобыля «сухой закон», не без оснований полагая, что в обстановке бедствия и эвакуации многим захочется выпить, и что последствия могут оказаться очень серьезными. Но к середине мая обстановка в зоне вошла в некоторую колею, в ней ежедневно находилось несколько десятков тысяч в общем-то здоровых мужиков, многие из которых, естественно, каждый вечер не прочь были бы перед сном грядущим принять «для здоровья». Не были исключением, конечно, и начальники – ведь они тоже были вдали от дома, тоже уставали и нервничали – а тут еще и прямое указание истопника из песни Высоцкого. Словом, на одном из первых же заседаний новой Правительственной комиссии под председательством Льва Алексеевича Воронина кто-то явно подсказал ему спросить у «ученой братии», как насчет сухого закона – не пора ли его отменить.

Я не был, естественно, членом Комиссии, но в тот день докладывал на заседании результаты наших вертолетных измерений – и поэтому был в зале заседаний и явился свидетелем последующих событий. За большим столом сидели начальники – а на велиховском месте между ними Борис Георгиевич, тихий и незаметный на их фоне. Не помню кто, но явно тоже член Комиссии – не без энтузиазма заявил, что наука не отрицает некоторого, пусть небольшого, компенсирующего действия этилового спирта на организм при облучении. Присутствующие оживились, закивали одобрительно. Воронин явно был доволен ответом и, хотя и осторожно, предположил возможность разрешить ввоз спиртного в зону – дескать, конечно, только при соблюдении надлежащей меры в употреблении. Министры и генералы повеселели, раздава-

лись реплики типа «рюмка коньяку не повредит...», «мы порядок знаем...», «разумное решение, пускай ученые напишут завтра обоснование...» и так далее. И тут я заметил, что Борис Георгиевич поднялся со своего места и, видимо, просит слова.

Наконец все утихло и, похоже, считали вопрос решенным. Тут Воронин заметил, наконец, стоящего Бориса Георгиевича и говорит – слушаем Вас, вы видимо хотите что-то добавить? Я, говорит тот, такой-то и такой-то, и (тут в его голосе появляется металл) являюсь председателем Общества трезвости Института атомной энергии! И желаю заявить, что никакого пьянства в зоне не допущу – и что никакой «меры» в подобном деле быть не может! И что если подобное решение будет принято, то я его буду оспаривать! При этом он показал красноречивым жестом на телефоны на столе Воронина – а куда эти телефоны звонят, всем присутствующим было понятно.... Ну и ну! Такого пассажи никто не ожидал. Будто тень Егора Кузьмича Лигачева пролетела по залу.

Скисли министры, замминистры и генералы, да и зампредсовмина спасовал перед никому не ведомым трезвенником из Курчатовского института. Ладно, говорит Воронин, сейчас перерыв, продолжим через пять минут. Министры и генералы стали, теснясь, выходить из дверей воронинского кабинета, бормоча вполголоса разные слова типа «откуда этот-то взялся на нашу голову...», «Велихов бы такого нам не сказал...» и тому подобное – однако открытого сопротивления оказать не посмели. Так и не был отменен в зоне сухой закон.

Надо сказать, что и я был не в восторге, хотя отдал должное решимости Пологих перед лицом такого высокого сборища. Мне, естественно, не пришло бы в голову выпить перед работой, связанной с сильным излучением. Хорошо известно, что «компенсирующее действие» спирта незначительно – а нетвердая рука и неверный шаг никак не способствуют быстрому и аккуратному выполнению любой работы. Однако чисто психологически после нервного дня и неприятных впечатлений бывает нужна разрядка, и не будем скрывать – у нас «с собою было взято» еще из института, так что вечером в лагере «при соблюдении меры» случалось и выпить немного того самого казенного «этилового» перед сном грядущим. Пьяных я среди наших сотрудников ни разу при этом не видал, но декларация Пологих меня обеспокоила – «дыхнет» на него ктонибудь из наших, и будет скандал, хлопот не оберешься. К счастью, койка Велихова (в которую поместили Пологих) была в иванковской гостинице, с остальной высокой комиссией, и нас грешных он «перед сном грядущим» вообще не видал.

Что же касается работы, то не верьте Медведеву – ни один профессионал (да и вообще ни один здравомыслящий специалист) в пьяном виде с радиоактивностью никогда работать не станет. Малейшая невнимательность (не до того дотронулся «чистой» рукой, не туда положил «грязный» пинцет и так далее) чревата хлопотами – заставят мыться пару лишних часов, отберут одежду и обувь, домой попадешь только к полуночи, злой и усталый. Поэтому работают профессионалы только трезвые как стеклышко, а в нерабочее время они такие же люди, как и все – могут и выпить, кто выпивает, а могут и заседать в Обществе трезвости, кто принципиально против выпивки.

Я отнюдь не убежденный трезвенник, но твердая и (по старым временам) смелая позиция Пологих, честно говоря, произвела на меня впечатление. Хорошо, когда человек стоит на своей нравственной позиции независимо от давления окружающих – это позволяет другим уверенно опереться на него в любой сложной ситуации, ведь частенько у нас не хватает мужества противостоять «истеблишменту» (по-нашему –

привычному лицемерию) только из-за боязни остаться в одиночестве против всеобщего «конформизма» (по-нашему – поджимания хвоста перед начальством).

В июле того же 1986 года, когда мы готовили в Курчатовском институте в Москве так называемый «доклад Легасова» для Международного агентства по атомной энергии, я встретил во дворе ИАЭ Пологих и спросил, почему он не «в команде» пишущих отчет. Борис Георгиевич совершенно без обиды, но и не без юмора заявил, что он «не годится в абсолютно честные люди». Я переспросил, что имеется в виду, а он говорит – вот, есть просто честные люди – они пишут то, что было, а там (тут он показал на главное здание) требуются не просто честные, а абсолютно честные люди, которые пишут не просто правду, а только правду, всю правду, без утайки, при условии, что эта правда – три с половиной процента (имелась в виду доля активности, выброшенная из реактора). В тот момент вопрос о количестве выброшенной активности действительно имел (и по сей день имеет) политический характер, и я был рад, что меня этот вопрос лично не касался – не было необходимости умалчивать что-либо из моих результатов. Но намек Бориса Георгиевича я понял, хотя виду и не подал. Мое уважение к нему только усилилось – ведь он не был согласен в принципе участвовать в экспертизе с предрешенным (даже правильным) результатом, а я – слабый человек, продукт нашей эпохи и железной ведомственной дисциплины, вполне был удовлетворен тем фактом, что от меня никто никаких сделок с «научной совестью» не требовал. Не исключено, что сам факт существования таких «упрямых правдолюбцев» не позволяет нам (обычным людям) кривить душой под давлением обстоятельств, и что осторожная объективность «доклада» – тоже результат бескомпромиссной позиции физически отсутствовавшего, но морально витавшего в здании «духа» Бориса Георгиевича и других таких же «чудаков».

Но вернемся в Чернобыль в середине мая 1986 года. Всем нам, «державшим руку на пульсе» аварийного четвертого блока, стало ясно, что опасная (активная) фаза аварии закончилась. Упала температура зоны, отпала, наконец, необходимость строительства бетонной «подушки» под блоком, расплавленные остатки зоны потихоньку застывали где-то в недрах разрушенного здания, погас пожар, выбросы радиоактивных газов почти прекратились. Предстояла громадная работа по ликвидации разбросанных по территории станции высокорadioактивных остатков топлива, по строительству над кратером аварии «саркофага», по сносу и захоронению так называемого «рыжего» леса, по предотвращению стока в Припять радиоактивной «грязи» с площадки станции, но все эти работы уже можно было разворачивать и проводить по плану, владея обстановкой и зная, что к чему. Приехали наши земляки – проектанты из ВНИПИЭТа во главе с Владимиром Александровичем Курносковым – и принялись обмерять еще страшно «грязные» и смертельно опасные развалины четвертого блока, выискивая немногие уцелевшие надежные опоры для будущего «саркофага». Начались работы по захоронению загрязненной почвы – тут пригодился опыт «профессионалов» с Урала, еще тридцать лет назад проводивших подобные работы после аварии на комбинате «Маяк», заработали их старенькие, но надежные радиоуправляемые бульдозеры на тракторах ДТ-54 (нынче таких и не делают), с каждым днем в Чернобыле становилось все шумнее и многолюднее. Тут впервые изменился и «материальный» подход к работе в зоне, по-простому говоря – заработки «ликвидаторов».

Этот вопрос – заработки «в зоне» – (на мой взгляд) сыграл настолько важную (и, я бы сказал, трагическую) роль во всей последующей истории «зоны», что я позволю себе остановиться на нем подробно и даже попытаюсь сделать некоторые вы-

воды, хотя вопрос этот далек от моей профессиональной компетенции и хотя далеко не все мои товарищи по Чернобылю скорее всего согласятся со мной. Начну с первого («активного») периода аварии, который я застал в начале мая 1986 г.

Отправляясь в командировку, мы получили аванс – около 200 рублей, по тем временам вполне солидную сумму, и ни о каких заработках, естественно, и не помышляли, да и не до этого было. Никакие «традиции отрасли» не предполагали дополнительных приплат за работу в условиях аварии – бывало, что премировали и даже награждали особо отличившихся, но расценок на такие работы не было. До 12 мая мы про такое и не слыхивали, только однажды в лагере «Сказочный» я видел вывешенный на доску приказ о премировании двух сотрудников станции за проникновение в затопленное подреакторное помещение для открытия задвижек и сброса воды. Дело это – по всем меркам отчаянное – можно было сделать только ценой тяжелого облучения, и мне было даже горько читать, что за такое самопожертвование кому-то выдали по (не помню) сколько-то рублей.

Кажется, 12 мая мы прочли в газете постановление Правительства, положившее начало «коммерческому» интересу «ликвидаторов» – там устанавливалась двойная, тройная и пятерная оплата соответственно для разных участков работ, наибольшая – на территории аварийного блока. Мы тоже люди, и не стану кривить душой, отрицательных эмоций мы от постановления этого не испытали, а многие (включая автора) прикидывали, трясаясь на жестком сиденье бронетранспортера или вертолета, что время то идет – а деньжата-то набегают да набегают, то-то повеселимся, когда домой приедем. Но сделать эту «экспедицию» источником постоянного дохода мы еще не додумались.

Следующий намек, что мы «упускаем деньги», я получил от «смежников» – группы воздушной разведки одного из подмосковных институтов, которые приехали позже нас и приходили просить «мой» вертолет для взятия «своих» проб воздуха. Я наивно предложил отдать им (после измерений) свои фильтры – зачем летать самим (и облучать лишней раз экипаж, который сегодня уже «свое» получил)? Ответа я не добился, они лишь стояли на своем, ссылались на начальство – и я согласился, при условии, что они отдадут (потом) свои фильтры мне. Так и я, и экипаж не получали лишней нагрузки, да и время не теряли. Ладно, слетали они быстро, и вижу – просят командира вертолета подписать какие-то бумаги прямо на летном поле, сели в свой джип и умчались. Подхожу к командиру, спрашиваю – ты чего это подписал, схему полета что-ли? Зачем? Он смеется – да нет, говорит, я им по две сотни подарил. Вот твои ребята даром что каждый день летают, а такого не придумали – погляди!

И подает мне аккуратно отпечатанный в Москве бланк-справку, сколько податель оной провел в воздухе часов, а внизу – расчет, сколько за это денег причитается. Я прикинул – не так много выходит, если честно писать... А летчик говорит – они особо просили указать, что летали все время над четвертым блоком, там ведь впятеро! Не растерялись...

Через дня три вижу – втаскивают в штаб тяжеленный сейф, рядом двое в странной форме – инкассаторы, что ли? С наганами в кобурах, в железных очках, вида строгого. Заняли комнату на первом этаже, дверь железом обили, на окне – решетка. В дверях окошечко проделали, замок повесили. Неужели – касса?

Стали там подходить люди (в основном из отъезжающих домой) и получать (по записочкам от членов Правительственной комиссии) премиальные, суммы в общем-то небольшие. Интерес у «ликвидаторов» к этому вопросу повысился, и теперь уже в разговоре «сколько получил» стало означать не только число рентген, но и

(иногда) число рублей. Перед отъездом и я получил в этом окошечке 200 рублей и был совершенно счастлив, ведь я за месяц ни рубля не истратил на казенных-то харчах, а тут еще сразу и премия! Для профессионала дело совсем непривычное, нас «на поле боя» никогда не баловали.

Но это были, конечно, еще цветочки. В зоне уже прочно обосновались десятки разных организаций, разворачивались громадные строительные работы, и было ясно, что премиальными в окошечке дело не обойдется. Многомиллионное финансирование полилось рекой в аварийную зону, деньги государство отпускало безотказно – а определить, насколько реальна потребность в таком безоглядном финансировании, политикам было, конечно, трудно. Я готов поверить в три цифры, неоднократно обсуждавшиеся в нашей прессе: стоимость разрушенного реактора – миллиард рублей, убытки от аварии – десять миллиардов, а убытки от «ликвидации аварии» – двести миллиардов. Чем объяснить такой напор, такое красноречие, такую заинтересованность самых разных организаций, которые имели весьма смутное представление о ситуации, в расширении работ в зоне аварии? Чем объяснить страстное желание многих инстанций попасть в «зону бедствия» (ведь объявила же себя вся Украина, включая крымские здравницы, зоной бедствия)? Чем объяснить, что специалисты очень редко протестовали в полный голос против масштабов работ в зоне? Почему в 1991 году, когда в развалинах Четвертого блока, под «саркофагом» продолжали исследования три десятка «фанатиков» во главе с Александром Александровичем Боровым, в Чернобыле, на безопасном удалении от станции, работали (и получали по «прейскуранту 1986 года») уже десятки тысяч человек, которые и «саркофаг»-то видели только в кино? Откуда взялись и для чего стали нужны многочисленные канцелярии, режимные службы, управления и тресты, без которых мы прекрасно обходились в мае 1986 г.? Неужели для того, чтобы неделю оформлять мне пропуск на проход в «саркофаг» – куда в 1986 году не требовалось никаких пропусков? Откуда в этой зоне бедствия в 1991 году появилось столько дородных «ликвидаторов» и особенно «ликвидаторш», щеголяющих в новеньких «афганках» и увешанных какими-то самодельными то ли значками, то ли орденами местного производства? Что они там «ликвидировали», кого и от чего «спасали» через пять лет после аварии? Почему там кипела не слишком срочная, но зато хорошо обоснованная местными организациями деятельность? К сожалению, ответ на этот вопрос очевиден – здесь платили гораздо лучше, чем «за зоной», а условия работы уже давно практически стали безопасными.

В Чернобыле к 1991 году мощность дозы (почти всюду) составляла уже не более 50–100 мкР/ч (столько же, сколько возле гранитных колонн Исаакиевского собора у нас в городе, или несколько меньше, чем на некоторых курортах южной Франции). Вся еда стала привозная, «чистая», обильная. Разве что «сухой закон» не был отменен, и милиция на КПП в Дитятках строго досматривала приезжих и конфисковывала бутылки. Эти бутылки потом все равно «почему-то» попадали в Чернобыль – но цена была уже двойная. Тем самым даже соблюдалась некая справедливость – зарплата высокая, вот и плати вдвое. За этим небольшим исключением и работа, и жизнь в Чернобыле к 1991 году, если говорить откровенно, стали весьма прибыльны.

Да что там Чернобыль – по всей стране в сотнях столов заказов шла бурная деятельность по распределению благ «героям Чернобыля» по удостоверениям, и сколько народу кормилось при этих распределителях! Грешен, и я время от времени

ходил в такую «кормушку» и мне ставили в специальной карточке птичку – крупу получил, кофе получил и так далее.

А «Союз Чернобыль» – с каким энтузиазмом его организаторы проводили розыгрыши каких-то талонов и заявок на «дефицит»! Беспристрастные историки будущего наверняка подсчитают, что никакая катастрофа в истории человечества не принесла столько благ ее жертвам и «ликвидаторам», как чернобыльская.

Можно подумать, что я хочу принизить действительно тяжелую и опасную работу «первого поколения» чернобыльцев – пожарных, персонала АЭС, летчиков, строителей, которым действительно было трудно, а иногда и невозможно не рисковать. Они выполняли свой долг, и десятки этих людей пожертвовали жизнью, чтобы предотвратить тяжелейшие последствия аварии. О них я не говорю, честь им и слава! Они свое дело сделали, и никто из них в то время ни о каких заработках и льготах не помышлял, не до этого было. Но – удивительное дело – чем дальше отходила в прошлое авария, тем грандиознее становился размах «ликвидационных» работ и одновременно тем скромнее результаты этой деятельности (чего не скажешь о размерах зарплат, льгот и компенсаций). На Украине уже действует целое министерство по чернобыльским делам, в России размножились подобные же Госкомитеты и Комиссии, и конца краю этому не было.

А начало этому разорению было положено именно в мае 1986 года, когда Постановлением Правительства решили платить двойные, тройные и пятерные заработки всем, работающим в зоне. За этим последовали и другие законы – о разных льготах, компенсациях, причем чуть ли не поголовно всем жителям громадных регионов. Давно бы пора отменить эти постановления – да теперь это сделать решится не каждый. Представляю, какое возмущение вызовет любой политик, который только обмолвится об этом, как будут негодовать сотни тысяч «героев», какие архинаучные доказательства необходимости своих работ представят угревшиеся в «зоне» институты и тресты. А разные всенародные движения, так те просто могут физически в порошок стереть за такое неуважение к национальному бедствию... Опасная это тема, и чувствую, что пора ее оставить профессионалам от экономики и политики.

Вернемся в Чернобыль в середине мая 1986 года. Наши «аварийные» работы подходили к концу, начинались размеренные, хотя и напряженные будни (субботы и воскресенья в «зоне» не отличались от обычных дней). Я с энтузиазмом (но без прежней спешки) занимался съемкой с воздуха распределения разбросанного по крышам станции и на ее площадке радиоактивного топлива. Мы «исколесили» воздушное пространство над АЭС вдоль и поперек, и даже летать мне надоело (хотя я с детства мечтал летать и до сих пор испытываю удовольствие от полета). В промежутках между измерениями я вел разные расчеты на велиховском компьютере, отбиваясь от вдруг появившихся в зоне корреспондентов – их как мед привлекала надпись на двери «Вице-президент АН СССР Велихов Е. П.», которая раньше вселяла робость в незваных гостей, но на корреспондентов явно не действовала. Вообще в зоне стало болеелюдно, появились не только корреспонденты, но даже художники, желавшие нас увековечить.

Среди начальства стало заметно некоторое возбуждение, словно близилось нечто торжественно-историческое, некий заключительный аккорд симфонии. Лихорадочно наводили глянец военные – а у них всегда заранее известно о любом надвигающемся появлении высокого командования. Строители расширили асфальт перед штабом Комиссии, участились визиты разных чиновников генеральского ранга, от редактора газеты «Красная Звезда» до профсоюзных лидеров союзного масштаба,

прилетал Ганс Бликс из МАГАТЭ, возник Центр Украинской академии наук, приезжал наш министр Славский, и все они желали лично осмотреть с воздуха «масштабы бедствия». Бедные пилоты вертолетов не знали, как отвертеться от этих бессмысленных воздушных экскурсий – а по чину не могли отказать даже самому незначительному генералу. Командир группы ВВС – Владимир Васильевич Трибшток – тоже был бессилен против таких важных лиц. Как он ни предлагал увидеть подробнейшие великолепные аэрофотоснимки развалин, занимавшие полстены в его штабе, никого из приезжих это не устраивало, им явно надо было где-то доложить, что они видели «собственными глазами». Работа наша замедлилась. Появились паузы – так что я даже успел научить велиховский компьютер играть старинную французскую песенку, которую предлагал записать любому назойливому корреспонденту. Мои сотрудники в такие перерывы тоже бродили без дела перед штабом, и хотя им было строжайше запрещено «попадать в анналы истории», случались и казусы. Одна такая «история» чуть не вышла с Валерием Павловичем Майоровым, специалистом по ядерному топливу из нашего института.

В тот день он приехал с нами в Чернобыль из лагеря «Строитель», чтобы сделать кое-какие расчеты, и тоже скучал перед штабом, когда на площадь въехал торжественный кортеж машин весьма «правительственного» вида и все военные в пределах видимости вытянулись по струнке. Видимо, в воздухе пронеслось нечто телепатическое – многие, в том числе и я, в этот момент бессознательно выглянули в окна. Признаюсь, у меня даже мелькнула мысль – неужели «сам» прибыл? Неужели сподобились? Но тут я заметил отсутствие штатских встречающих у крыльца штаба и догадался, что прибыло не наше «цивильное» начальство, а военное. Действительно, из правительственного ЗИЛа показался – во всем великолепии – маршал в полном парадном мундире, десяток генералов окружил его и направился к штабу военных – напротив. В коридоре за моей дверью чей-то голос сказал «министр», и я понял, что нас посетил сам министр обороны Советского Союза маршал Соколов. Его мундир особенно сильно контрастировал с мешковатыми ха-бэшными комбинезонами окружающих его «местных» чинов, так что сразу было видно, кто тут кто, даже без пояснений знатоков военных знаков различия. Публика наша стала выползать из штаба на площадь, ведь русскому человеку свойственно желание «поглядеть на начальство» вблизи. Тут и произошел казус.

Видимо, специально для демонстрации достижений химвойск перед штабом стоял бронетранспортер, судя по всему, «грязный», как все эти машины, которые постоянно работали на площадке станции. Маршал и генералы подошли к нему, и тут я заметил среди их зеленых комбинезонов один белый – с буквами «ЧАЭС» на спине – и узнал спину Валеры Майорова. Что-то заставило меня выскочить из комнаты и выйти на площадь.

Генералы показывали Соколову новый способ «очистки» машин от радиоактивности с помощью липкой ленты, прилепляя ее к броне и отдирая обратно. Рядом стоял дозиметрист, показывая Соколову результаты очистки брони – «до» и «после». Я подошел ближе. Соколов пытался сам отлепить ленту от брони, но сноровки у него явно не хватало, пальцы не могли подцепить край ленты, а подавать советы министру обороны СССР никто из генералов не решался. И тут, ко всеобщему ужасу, вмешался Валерий – он твердой рукой подвинул маршала в сторону и одним махом отодрал здоровенный кусок ленты, заявив: «Вот как это делается!»

Наступила грозная пауза – каждый из присутствующих генералов готов был, наверное, ввести в действие немалые силы для наведения порядка. К счастью, Соко-

лов одобрил Валерину ловкость, публично указав своей свите: «Вот так и делать!». Наши ребята незаметно оттащили Валеру в сторону, от греха подальше – а он, человек «глубоко штатский», так и не мог понять всего кощунства своего поведения, спрашивая «Какой министр? Это генерал какой-то заезжий...» Инцидент был исчерпан, в «анналы» мы не угодили, Валерий благополучно уехал в лагерь, а назавтра в штабе химвойск я отрекся от Валеры, как апостол Петр от Спасителя – не знаю такого, да и все, он, наверно, из персонала ЧАЭС....

Армейская дисциплина невозможна без знаков различия, недаром мой знаковый вертолетчик Петр Петрович Григорук, попавший в Чернобыль с афганской войны, рассказывал: «У нас то же самое было, переодели всех в афганки – и начали солдаты генералов толкать, не нарочно – а все равно недопустимо, и начальство это сообразило. Глядишь, через месяц снова форма наладилась – без этого армии конец...». Действительно, к середине мая военные (не летчики, которые базировались в Чернигове) в большинстве своем были одеты кто во что – комбинезоны «с чужого плеча», без знаков различия, и в группу генералов вполне мог затесаться любой штатский, да еще начать давать им в простоте своей советы по военной части, а уж это никуда не годится.

Шла последняя неделя мая. Прибыли наши сменщики и входили в курс дела – я сдавал дела Павлу Ивановичу Федотову (из нашего института), уже работала спектрометрическая лаборатория в освоенном мною подвале Чернобыльской типографии, пробы уже не надо было возить за 50 км в лагерь, уже были измерены и нанесены на план «россыпи» топлива на площадке и на крышах зданий АЭС, начинались работы по уборке и дезактивации станции и «рыжего» леса – нам пора было собираться домой. Я записал «свою» команду на рейс Киев–Москва на 31 мая, нас брали бесплатно на личный Як-40 министра энергетики, который каждый день челноком циркулировал по маршруту Жуляны–Быково. Это было особенно кстати, так как в Киеве (да и в московских аэропортах) уже шел строгий радиационный контроль и нам вряд ли удалось бы просочиться в наших не слишком «чистых» спецовках. У нас были припасены свежие комплекты – но и они могли «не устроить» придирчивых дозиметристов. Наша институтская служба дозиметрии прислала инструкцию, по которой нам не велено было по прибытии в Ленинград идти домой, а следовало явиться в институт для «дезактивации». По этому поводу ходило уже много шуточек – дескать, надо иметь две семьи, «чистую» и «грязную», приехал, сначала в «грязную», обтерся, а там и в «чистую» иди.

Наконец 31 мая мы вертолетом прямо со своего летного поля за полчаса перелетели в Жуляны. Еще в воздухе разделись догола и влезли в «относительно чистые» ха-бэ, а свои комбинезоны упрятали в полиэтиленовые мешки, а мешки в чемодан. В Жулянах вылезли на летном поле и решили в город не соваться, чтобы не забрали, а ждать свой Як-40 прямо на поле. Володя Карасев в связи со своей обаятельной внешностью, был отправлен на разведку через служебный ход и вскоре доложил, что в зале для депутатов ждет самолета Рябев и обещает взять нас на борт. Действительно, скоро прилетел Як-40, появился Рябев, и не прошло и часа, как мы оказались в обстановке «невиданной роскоши» – мягкие кресла, у каждого столик, две стюардессы, холодильник, набитый напитками, ковры ...

После обшарпанных бронетранспортеров и наших трясучих УАЗиков это был мир сказочной роскоши. Внизу в синей дымке разворачивалась сумрачная панорама Киева, и на ее фоне ясно сияли золотые купола Лавры – эта красота тоже не шла ни в какое сравнение с примелькавшимися нам за месяц развалинами ЧАЭС. Самолет на-

брал высоту, белые облака скрыли многострадальный район Припяти и Чернобыля. Девушки щебетали с Володей, который угощал их твердокопченой колбасой, купленной в армейской автолавке, носили нам какой-то «дефицитный» лимонад и варили кофе. В переднем салоне Рябев беседовал с каким-то министром, а мы никак не могли привыкнуть к мысли, что наша «экспедиция» кончилась, что кругом идет нормальная жизнь и что мы уже не в «зоне». Только когда самолет сел и (опять благодаря спецрейсу) мы прямо с летного поля уехали на встречавшем нас РАФике ГЕОХИ, миновав последний дозиметрический кордон, когда записка Рябева как волшебный талисман мгновенно сделала нас обладателями двух билетов на «Красную стрелу» и мы, оставив чемоданы на вокзале, сидели на скамейке в Сокольниках – только тогда мы, наконец, почувствовали себя обычными, нормальными субботними отпускниками. Играла музыка, гуляли парочки, резвились детишки, а кругом цвели цветы и продавали пиво ... Господи, вот это жизнь! Завтра утром мы будем дома.

Шла суббота 31 мая 1986 года. Завтра уже июнь. Наш Чернобыльский май закончился.

По прошествии 15 лет я перечел то, что написал в 1986 и 1991 годах, и почувствовал, что не выполнил завета Льва Алексеевича Воронина, о котором написал выше. Где же выводы из моих наблюдений? Где то, что «настоящий ученый пишет в конце страницы и обводит рамочкой»? На какие вопросы я не ответил?

Конечно, сегодня я (да и все мы) уже совсем не те, какими были в памятном мае 1986 года. Мы прошли большой путь, мы живем практически в другой стране, и сами мы стали другими. Наверное, 15 лет назад мы и не могли увидеть многого, что сегодня стало очевидным. Но и сегодня нам важно понять и осознать, в чем мы были правы, а в чем ошибались. Масштаб происшедшего в нашей стране в связи с чернобыльской аварией таков, что сделать из этой истории выводы необходимо. Так что попробую сам задать себе вопросы – и сам на них попытаюсь ответить. А если читатель найдет в моих ответах новое и важное для всех нас, он сам «обведет эти ответы рамочкой» (во всяком случае, мне бы этого очень хотелось, не скрою).

Итак, вопрос первый, и особенно любимый в России: кто виноват в аварии? Скажу сразу, что ничего нового я сообщить не собираюсь, все это обсуждалось много раз, и вывод известен – плохая система защиты реактора и преступное недомыслие персонала. Более того, скажу, что этот вопрос будут задавать еще много раз – после любой крупной техногенной аварии, которые, к сожалению, неизбежны на пути технического прогресса. Человеческий фактор продолжает играть роковую роль в любой современной человеческой деятельности – не далее, как месяц назад «ошибка пилотирования», допущенная экипажем совершенно исправного Ту-154 при заходе на посадку, унесла более ста человеческих жизней, и такое случается нередко – как у нас в России, так и во всем мире. Такова, к сожалению, цена за скорость, удобство передвижения и комфорт, и эта цена явно устраивает человечество, иначе оно давно бы перестало летать на самолетах, а передвигалось бы пешком.

Вопрос второй, на мой взгляд более важный – как произошло, что авария, унесшая жизни около сорока человек и причинившая убытков на десять миллиардов рублей, превратилась в некую всемирную катастрофу, жертвы которой в нынешней литературе уже исчисляются десятками тысяч, а убытки от «ликвидации» действи-

тельно давно превысили сотни миллиардов (полновесных, а не нынешних) рублей? На этот вопрос ответ будет не такой простой и не такой короткий, как на первый. Я думаю, что произошло это по нескольким причинам:

- из работ по ликвидации аварии, которые надо было закончить за год (если не за пару месяцев), мы сделали «всемирную кормушку» и растянули их на десятилетия;
- мы разбудили в людях желание «заработать» на этой аварии и при этом шли от принципа «всем поровну»;
- мы поощряли средства массовой информации, которые раздували «масштабы бедствия», поскольку этот психоз обосновывал масштабы финансирования и масштабы льгот, щедрой рукой распределяемых правительством направо и налево;
- мы позволили недалеким политикам превратить техническую катастрофу в катастрофу политическую, и тем самым внести немалый вклад в разрушение экономики страны.

Список этот можно расширять и продолжать, однако читатель, наверное, уже хочет меня перебить и спросить:

«А как же надо было действовать?». Это, конечно, тот самый третий вопрос, который я задавал себе эти 15 лет. Что бы я ни ответил, мой ответ будет (не без оснований) поставлен под сомнение. Действительно, историки давно согласились, что любые «а если бы...» в истории неуместны и неубедительны. И все же история дает нам примеры ситуаций, когда в аналогичных условиях принимались другие решения, и рассказывает, что из этих других решений вышло. Поэтому я приведу примеры из современной истории, когда последствия крупных техногенных катастроф ликвидировали не так, как мы сделали в 1986–1991 годах в Чернобыле, и расскажу, что из этого получилось.

Пример первый – долгосрочные последствия атомных бомбардировок Хиросимы и Нагасаки. Там тоже были потрачены немалые средства на помощь населению, однако никаких «раздач поровну» не было. Все средства были брошены на строительство и работу многочисленных современных клиник, где население регулярно и тщательно обследовали (и делают это по сей день). Результат превзошел все ожидания – в этих городах сегодня средняя продолжительность жизни выше, чем в остальной Японии, поскольку у жителей этих городов малейшие признаки заболеваний обнаруживаются на самых ранних стадиях болезни, когда врачебные меры наиболее эффективны. Конечно, делалось это на американские деньги и не бескорыстно – американские радиологи собрали бесценный материал для работы, а заодно и разработчики оружия уточнили поражающие факторы своих бомб. Однако конечный результат налицо – здоровье населения заметно улучшилось. Для сравнения, у нас не построено и десятой доли тех медицинских центров, что в Японии, базу данных по воздействию излучения по сей день не создали. Вместо этого платили населению пораженных районов по 40 рублей так называемых «гробовых» в месяц, а когда деньги кончились, в качестве льготы «чернобыльцам» разрешили беспоглиный ввоз автомашин из-за рубежа (?!), что привело к спекуляции и обогащению жуликов всех мастей, а здоровья «чернобыльцам» не прибавило.

Пример второй – последствия ужасной катастрофы на химическом заводе в Бхопале (Индия), когда в одночасье погибло около пяти тысяч человек. Это масштаб,

с Чернобылем не сравнимый! И что же – в прессе до сих пор никто ни разу не предложил остановить химическую промышленность, ни «Гринпис», ни прочие «зеленые» не пикетируют подобные заводы нигде в мире... Кто-то понял, что такие требования – безумие, что без лекарств и удобрений мы станем жить много хуже, и что улучшать безопасность подобных производств можно без истерики и без паники. В результате Бхопал не вошел в историю XX века, как вошел Чернобыль, поднятый на щит нашими СМИ. А ведь объективно дело в Бхопале было куда страшнее, чем у нас в Чернобыле. Я не знаю, как удалось избежать тогда «химиофобии» в таких масштабах, в каких сейчас бушует «радиофобия» в нашей отчизне, но вижу, что это возможно.

Здесь читатель наверняка захочет меня прервать и спросить: «А что же вы, господа ученые, не сказали вовремя, что надо делать, а чего делать не надо? Почему не выступали? Почему молчали?». Это и есть тот самый третий важный вопрос, который я задавал себе все эти годы. Проще всего было бы ответить так: «мы, мол, говорили, но нас не слушали...». Но, к сожалению, это не вся правда. Однако вопрос задан прямой, и отвечать на него надо прямо. Постараюсь это сделать.

Мы, специалисты-атомщики, тоже люди, мы выросли в той же стране, что и вы, читатели, и, как и вы, мы все разные.

Наиболее квалифицированные специалисты по реакторам после аварии 1986 года сосредоточили свои усилия на чисто научно-техническом вопросе: как сделать реактор РБМК-1000 (и другие типы реакторов) совершенно безопасными в эксплуатации, чтобы такая авария, как чернобыльская, не могла повториться. Задачу эту они решили, и решили хорошо, а в «идеологические» вопросы они не вдавались, считая их вне своей компетенции. А зря.

Руководители атомной отрасли должны были посмотреть в проблему поглубже, понять, куда ведет отрасль и всю страну бездумное растранивание средств и раздувание радиофобии, и принять все меры, чтобы положить этому конец. Многие из них, действительно, пытались это сделать (насколько мне известно), но безуспешно. Так получилось, что именно в это время в стране шла «перестройка», царил настрой «разоблачений», «развенчания авторитетов» и, конечно, «возмещения ущерба». В этой обстановке разумные доводы плохо воспринимались как народом, так и политиками, а СМИ вторили «общественному мнению» и радостно набрасывались на любую «жареную» информацию. Так или иначе, руководителям атомной отрасли не удалось призвать политиков к разуму в этом вопросе.

Руководители «среднего управленческого звена» – директора институтов, комбинатов и другие подобные специалисты – тоже хорошо понимали, куда ведет расширение работ по «ликвидации последствий», но по существу приложили руку к этой затее. Они добивались, как правило, не личных льгот и почестей, а «выбивали средства» для своих институтов и комбинатов и использовали «чернобыльский психоз» в качестве аргумента. В оправдание себе они говорили: «Все равно эти деньги раздадут, надо заботиться, чтобы они попали к нам, а не к смежникам», и в обстановке общего спада экономики это звучало понятно и убедительно. Что греха таить, я сам, хоть и редко, но руководствовался теми же аргументами, а, стало быть, тоже частично виновен в этом.

Наконец, простые, честные специалисты – «профессионалы», воспитанные нашим обществом и нашими порядками, вообще не задавали себе таких вопросов. Платят – хорошо. Больше платят – еще лучше. Да разве мы не заслужили? Разве мы

не герои? Что? Страну разорили? Это не мы. Это... (далее следует перечень разных нехороших людей и организаций, от Горбачева до Чубайса, и от ЦРУ до пресловутой МММ).

Требовать от них другой реакции и других мыслей было бы просто несправедливо. Они такие же люди, как и я, и как многие из вас, уважаемые читатели. Они родились в той же стране, учились в той же школе, и честно работали всю жизнь, а решать высокие проблемы их не только не учили, но даже предупреждали, что для этого есть высокое начальство, и что ему (начальству) виднее. Так что обвинять их в наших ошибках никак нельзя.

Список «трудных вопросов» и выводов можно было бы продолжить, но не будем увлекаться и ограничимся сказанным. А главное, постараемся извлечь для себя урок из Чернобыльской аварии и особенно из истории «ликвидации ее последствий». Боюсь, что это не последняя подобная история и что опыт этот еще нам и нашим потомкам пригодится.

С памятного мая 1986 года прошло 23 года. Работая в Чернобыле, я встретил и узнал немало хороших и даже замечательных людей. Все мы, что и говорить, состарились, а иных уж между нами и нет. Одних я часто вижу, о других не знаю практически ничего – так что если они прочтут эти страницы, пользуюсь случаем передать им привет и поклон. Спасибо им за все.

Chernobyl—May 1986

A. Rimsky-Korsakov

The article presents personal impressions of a member of KRI team who worked in Chernobyl during May 1986, describing the initial stages of contamination assessment and diagnostics of the damaged 4th Unit reactor. The author also tries to evaluate the efficiency (or inefficiency) of general approach and policy of “accident mitigation,” applied to the whole Chernobyl 1986 accident.

Заклучение

В 1992 г. в связи с отсутствием финансирования комплексная бригада Радиевого института прекратила систематические исследования в объекте «Укрытие» и в пределах 30-километровой зоны. Руководство Украины, запросив финансовую поддержку Европейских стран, отказалось от помощи российских специалистов. С тяжелым чувством неостребованности и незавершенности ранее важнейшей для всей страны работы заканчивалась деятельность «ликвидаторов» института.

Работы по полной ликвидации последствий аварии на ЧАЭС не завершены до настоящего времени. Разрушенный энергоблок закрыт бетонными конструкциями. Объект «Укрытие» не превращен еще в экологически безопасную систему. В нем находится значительная часть высокоактивных материалов – радиоактивных отходов, требующих окончательной изоляции. Значительная часть земель Белоруссии, России и Украины выведена из пользования на неопределенное время, поскольку в составе выпадений присутствуют долгоживущие актиниды – ^{239}Pu , ^{241}Am и др. «Чернобыльский след» остался в природных геохимических, гидрологических и биологических системах.

Всего в ликвидации последствий аварии приняло участие 160 сотрудников института: химиков, физиков, геохимиков, водителей, дозиметристов и других специалистов. 78 сотрудникам Правительственная комиссия объявила благодарность за активное участие в работах по ликвидации последствий аварии на 4-м блоке ЧАЭС. Этим сотрудникам были вручены Почетные грамоты. Благодарность министра была объявлена А. С. Кривохатскому. Три человека получили правительственные награды: Ю. Г. Петрова наградили орденом Трудового Красного знамени, Ю. В. Дубасова – орденом «Знак Почета», А. А. Римского-Корсакова – медалью «За трудовую доблесть».

В представленном сборнике собраны материалы, связанные с оперативными работами и систематическими исследованиями сотрудников института на 4-м энергоблоке, на промплощадке, в 30-километровой зоне и по западному следу выпадений, в водной системе р. Припять–Киевское водохранилище–р. Днепр, в Киеве, в Ленинграде и Ленинградской области и в Северо-Западном регионе страны.

Результаты исследований вошли в более 100 отчетов института, опубликованы в десятках статей, приведены в юбилейном сборнике, посвященном 75-летию со дня основания Радиевого института и выпущенном в 1997 г.

Результаты проведенных измерений и расчетов послужили основанием для принятия важных решений Правительственной комиссии. Среди этих решений:

- отказ от сооружения подземного щита под 4-м энергоблоком в 1986 г. благодаря определению температуры в разрушенном реакторе с помощью вертолетных данных о составе выбросов;
- отказ от эвакуации населения Киева благодаря определению концентрации плутония в почвах Киева;
- решения об эвакуации и реэвакуации населения более 50 населенных пунктов в 30-километровой зоне и др.

К сожалению, по разным причинам в данный выпуск вошли не все материалы, связанные с работами института по чернобыльской тематике. Редколлегия не удалось получить статьи о комплексных исследованиях проб почвы и воды, проведенных в конце 1986 г. в аварийном районе и посвященных оценке радиационной обстановки в нескольких десятках поселков. По результатам этих исследований Правительственная комиссия решала вопрос о необходимости эвакуации населения

из этих населенных пунктов. В 1987 г. подобные исследования были продолжены в поселках Брагинского и Наровлянского районов БССР.

Не были подготовлены статьи об анализах нескольких сотен высокоактивных проб, доставленных специальными рейсами в лаборатории института из объекта «Укрытие», с промплощадки и 30-километровой зоны.

Отсутствуют в данном томе статьи о результатах работ, проведенных сотрудниками научно-экспериментального комплекса в Гатчине в 1989 г., по исследованию большого количества образцов продуктов взаимодействия топлива с конструкционными материалами. В этих работах впервые были изучены радионуклидный, радиохимический и химический состав образцов по вертикальному и горизонтальному направлениям распространения расплава топлива. Было показано, что основными компонентами исследованных образцов являются эвтектика керамики $(U,Zr)O_2$ и продукты разложения серпентинита: миннесотаит, диопсид, оливин-форстерит.

Не включены также результаты первых работ, выполненных сотрудниками РИ в 1990 г., по исследованию бассейна-барботера (ББ), в том числе результаты исследования физико-химических характеристик ТСМ и оценки общего количества ТСМ в ББ.

Справедливости ради следует отметить, что впоследствии многочисленные исследования указанных вопросов, выполненные сотрудниками других организаций, смогли расширить и дополнить эти первые результаты. Эти работы опубликованы и являются широкодоступными.

Также не нашли отражения в этом выпуске Трудов работы сотрудников института, систематически осуществлявших в 1986 г. дозиметрический контроль продуктов питания, рынков, овощных баз, транспорта, жилых и общественных помещений, территорий города, пионерских лагерей, домов отдыха и других объектов.

Проведенные комплексные оперативные и систематические исследования вошли в историю института как «чернобыльский» этап, в ходе которого проявился накопленный многогранный научный и человеческий потенциал института.

«Чернобыльский» этап работ в истории Радиевого института подтвердил высокий профессиональный уровень его сотрудников, организованность и умение эффективно работать в экстремальных аварийных условиях.

Некоторые фотоматериалы к статьям



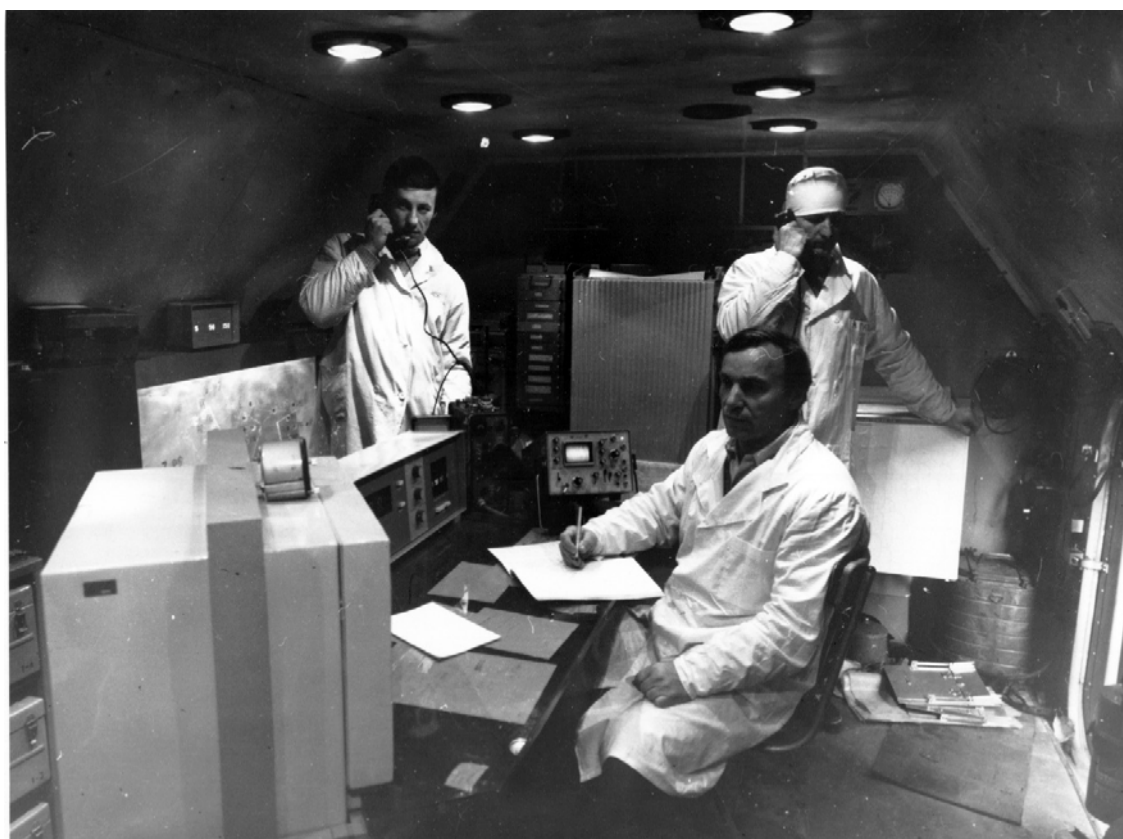
Въезд в 10-километровую зону
(М. Н. Москалев, Ю. Г. Петров, Н. Н. Ильин, Ю. В. Дубасов, В. Г. Савоненков).



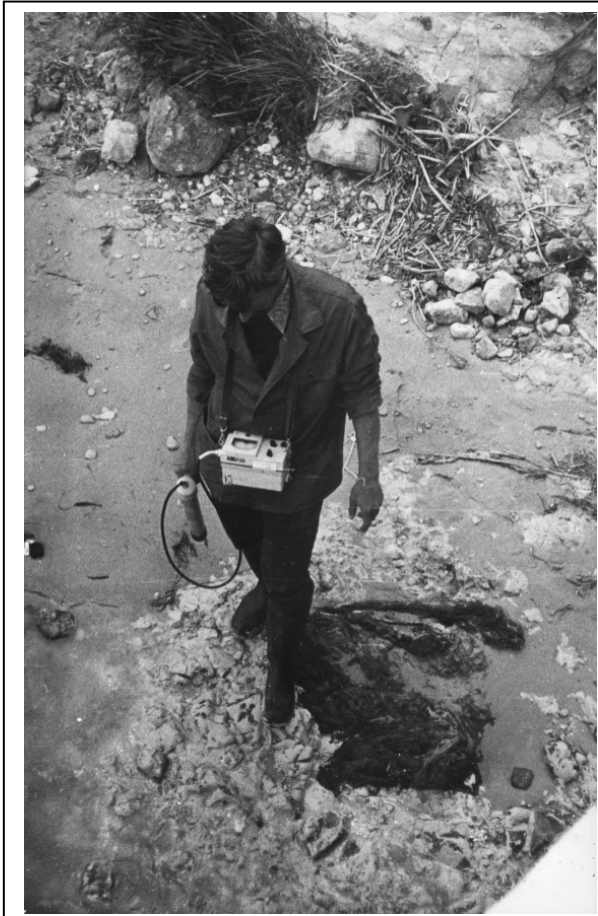
На полигоне
(В. А. Голубев, С. М. Никифоров, Н. В. Сковородкин, М. Н. Москалев,
Ю. В. Дубасов, Б. О. Шагин).



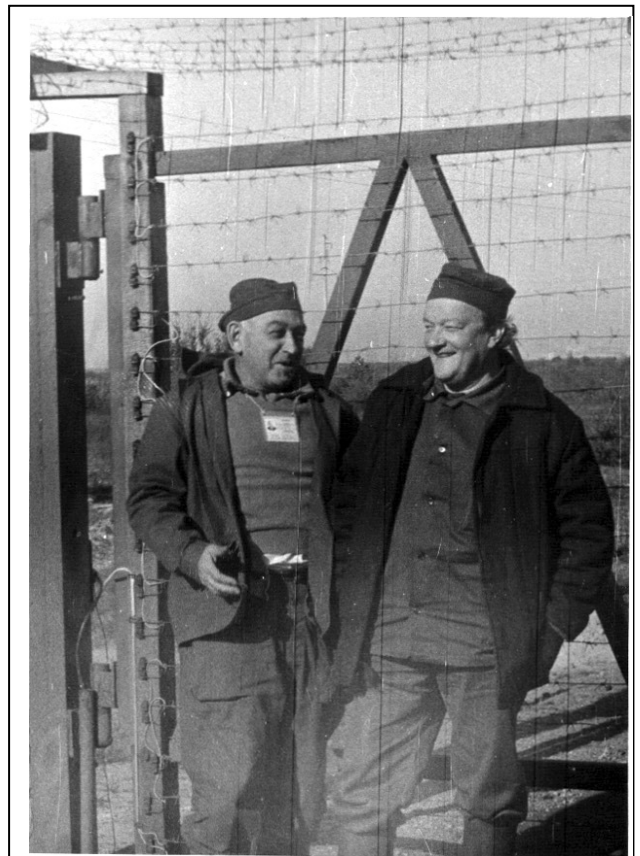
Дистанционно-управляемый детектор для оценки количества ядерного топлива в помещениях объекта «Укрытие».



Рабочий момент внутри измерительного комплекса «Тунец»,
(А. Э. Булохов, И. И. Тютюгин, А. П. Простяков).



Выбор точки пробоотбора
(А. В. Степанов).



Чувство юмора никогда не изменяло
В. Г. Савоненкову и Ю. Г. Петрову.

**Список
работников ФГУП «НПО «Радиевый институт им. В. Г. Хлопина»»,
принимавших участие в ликвидации последствий аварии
на Чернобыльской АЭС**

№ п/п	Фамилия, имя, отчество
1.	Авдеев Валерий Анатольевич
2.	Аксенов Владимир Николаевич
3.	Александров Борис Михайлович
4.	Александров Юрий Викторович
5.	Алексеев Вадим Александрович
6.	Алтунин Алексей Владимирович
7.	Аляпышев Олег Александрович
8.	Андерсон Евгений Борисович
9.	Астрелин Александр Иванович
10.	Бабенко Андрей Викторович
11.	Бабенко Юрий Анатольевич
12.	Балушкин Евгений Васильевич
13.	Баранов Юрий Иванович
14.	Бахмуткин Семен Владимирович
15.	Беляев Евгений Нилович
16.	Бирюков Евгений Игнатьевич
17.	Бичаева Ольга Юрьевна
18.	Блинов Алексей Борисович
19.	Блохин Владимир Михайлович
20.	Богачев Сергей Иванович
21.	Богданов Леонид Борисович
22.	Бойков Георгий Сергеевич
23.	Борисов Александр Алексеевич
24.	Булохов Александр Эдуардович
25.	Бураков Борис Евгеньевич
26.	Быков Валерий Николаевич
27.	Бычков Олег Михайлович
28.	Васильев Владимир Иванович
29.	Васильев Михаил Владимирович
30.	Васильев Сергей Константинович
31.	Васин Александр Борисович
32.	Вишневецкий Александр Степанович
33.	Воронков Александр Алексеевич
34.	Вяткин Владимир Ефимович
35.	Гаврилин Сергей Стефанович
36.	Гавриш Юрий Иванович
37.	Галкин Борис Яковлевич
38.	Гарифьянов Геннадий Гарифьянович
39.	Гевирц Владимир Борисович

40.	Гедеонов Лев Иванович
41.	Гойман Евгений Константинович
42.	Голубев Валерий Антонович
43.	Гонин Борис Алексеевич
44.	Громов Алексей Владимирович
45.	Громов Ярослав Алексеевич
46.	Гунин Юрий Иванович
47.	Гуревич Давид Маркович
48.	Дмитриев Владимир Дмитриевич
49.	Драпчинский Леонард Вячеславович
50.	Дубасов Юрий Васильевич
51.	Евдокимов Александр Викторович
52.	Евдокимов Иван Васильевич
53.	Елистратов Михаил Семенович
54.	Ермилов Виктор Константинович
55.	Ершов Дмитрий Анатольевич
56.	Жабров Борис Федорович
57.	Зайцев Евгений Анатольевич
58.	Захаренков Василий Федотович
59.	Иванов Сергей Анатольевич
60.	Изосимов Игорь Николаевич
61.	Ильин Леонид Иванович
62.	Ильин Николай Николаевич
63.	Исупов Владимир Константинович
64.	Карасев Владимир Васильевич
65.	Кашкин Борис Николаевич
66.	Киселев Виктор Игоревич
67.	Князев Виктор Александрович
68.	Ковалевич Виктор Алексеевич
69.	Коваленко Сергей Семенович
70.	Кожевников Анатолий Александрович
71.	Козлов Андрей Евгеньевич
72.	Козунов Андрей Владимирович
73.	Колесов Олег Александрович
74.	Коренков Андрей Геннадиевич
75.	Корнеев Николай Николаевич
76.	Костров Виктор Николаевич
77.	Кочергин Сергей Алексеевич
78.	Кочергин Станислав Михайлович
79.	Кривоногов Станислав Михайлович
80.	Кривохатский Анатолий Сергеевич
81.	Креницын Алексей Павлович
82.	Крылов Владимир Николаевич
83.	Куприенков Владимир Владимирович
84.	Кучерюк Владимир Иванович
85.	Лазарев Леонард Николаевич

86.	Лапин Владимир Васильевич
87.	Маврин Владий Иванович
88.	Майоров Валерий Павлович
89.	Малахов Павел Борисович
90.	Матвиенко Владимир Иванович
91.	Мельников Валерий Александрович
92.	Мионов Владимир Константинович
93.	Мирончук Петр Степанович
94.	Мордвинов Виктор Викторович
95.	Москалев Михаил Николаевич
96.	Мысик Сергей Григорьевич
97.	Найденев Евгений Геннадьевич
98.	Недбаевская Нина Афанасьевна
99.	Никифоров Сергей Михайлович
100.	Николаев Вадим Аркадьевич
101.	Николаев Владимир Борисович
102.	Николаева Лариса Дмитриевна
103.	Носков Геннадий Андреевич
104.	Пазухин Эдвард Михайлович
105.	Панов Георгий Федорович
106.	Пашкевич Михаил Викторович
107.	Петров Борис Федорович
108.	Петров Юрий Георгиевич
109.	Плескачевский Леонид Андреевич
110.	Прокофьев Станислав Иванович
111.	Простяков Александр Павлович
112.	Прусаков Александр Гордеевич
113.	Римский-Корсаков Александр Андреевич
114.	Рогозин Юрий Михайлович
115.	Ролдугин Николай Николаевич
116.	Рыжов Николай Николаевич
117.	Савоненков Владимир Григорьевич
118.	Савченков Юрий Сергеевич
119.	Сакулин Сергей Юрьевич
120.	Свиденко Борис Григорьевич
121.	Селифонов Владимир Николаевич
122.	Сенчилло Владимир Харитонович
123.	Сименев Алексей Алексеевич
124.	Синицына Галина Сергеевна
125.	Синченко Виктор Григорьевич
126.	Сковородкин Николай Витальевич
127.	Смирнов Андрей Владимирович
128.	Смирнов Сергей Николаевич
129.	Смирнова Елена Александровна
130.	Соколов Игорь Александрович
131.	Солдатов Алексей Анатольевич

132.	Стацевич Василий Петрович
133.	Степанов Андрей Владимирович
134.	Стефанов Владимир Дмитриевич
135.	Татур Михаил Андреевич
136.	Тишков Виктор Павлович
137.	Топорков Валерий Павлович
138.	Трифонов Виктор Анатольевич
139.	Тюрин Григорий Петрович
140.	Тютюгин Игорь Ильич
141.	Ушаков Игорь Георгиевич
142.	Федотов Павел Иванович
143.	Филатенков Анатолий Артемович
144.	Фокин Антон Борисович
145.	Фридкин Александр Михайлович
146.	Цветков Олег Сергеевич
147.	Цирлин Владимир Абрамович
148.	Черепанов Александр Александрович
149.	Чернобузов Вилор Иванович
150.	Чернышев Валентин Иванович
151.	Чуваев Сергей Владимирович
152.	Шабалев Станислав Игоревич
153.	Шагин Борис Олегович
154.	Шамсутдинов Вадим Андреевич
155.	Шатилов Александр Михайлович
156.	Шахетов Геннадий Владимирович
157.	Шпиллер Сергей Миронович
158.	Юнусов Ильсур Мансурович
159.	Юрченко Григорий Тимофеевич
160.	Ярмийчук Сергей Валериевич

Содержание

Предисловие	3
I. Оперативные мероприятия	5
I.1. Хронология оперативных мероприятий, проведенных Радиевым институтом в 1986 г.	5
I.2. Исследование выброса аварийного реактора 4-го блока Чернобыльской АЭС, <i>А. А. Римский-Корсаков, П. И. Федотов, Ю. В. Дубасов, Е. И. Бирюков, В. П. Майоров, В. В. Карасев</i>	10
I.3. Комплекс работ лаборатории радиометрии Радиевского института в Чернобыле: июнь–ноябрь 1986 г., <i>С. К. Васильев, Б. Ф. Петров, Л. А. Плескачевский</i>	23
I.4. Радиоактивное загрязнение речной системы Припять–Киевское водохранилище–Днепр в 1986 году как следствие аварии на Чернобыльской АЭС, <i>В. П. Тишков, А. В. Степанов, О. С. Цветков</i>	46
I.5. Обследование чернобыльских объектов трековыми методами, <i>В. А. Николаев</i>	64
I.6. Определение загрязненности почв Киева изотопами плутония в июне–июле 1986 года, <i>С. М. Гращенко, В. Н. Струков</i>	76
I.7. Оценка величины мгновенного энерговыделения при аварии реактора на ЧАЭС, <i>А. С. Пахомов, Ю. В. Дубасов</i>	79
II. Этап систематических научно-исследовательских работ (1987–1992 гг.)	87
II.1. Радиогеохимическое исследование топливосодержащих новообразований, возникших в результате аварии на Чернобыльской АЭС, <i>В. Г. Савоненков, Е. Б. Андерсон, Е. А. Смирнова, С. И. Шабалев</i>	87
II.2. Выщелачивание радионуклидов из почвы и частиц радиоактивных выпадений 30-километровой зоны ЧАЭС (1987–1991 гг.), <i>Е. А. Смирнова, Ю. В. Дубасов, В. Г. Савоненков</i>	118
II.3. Выщелачивание радионуклидов из техногенных новообразований, отобранных в подреакторных помещениях 4-го блока ЧАЭС <i>В. Г. Савоненков, Е. А. Смирнова, Ю. М. Rogozin</i>	125
II.4. Результаты комплексных исследований, проведенных на контрольных полигонах Радиевского института им. В. Г. Хлопина в 30-километровой зоне ЧАЭС (1986–1991 гг.), <i>Е. А. Смирнова, Ю. В. Дубасов, Ю. М. Rogozin, В. Г. Савоненков</i>	131
II.5. Радиационная обстановка в Северо-Западном регионе Советского Союза и восточной части Балтийского моря в результате аварии на ЧАЭС, <i>В. П. Тишков, А. В. Степанов, В. М. Гаврилов</i>	145
II.6. Радиоактивное загрязнение Балтийского моря после аварии на ЧАЭС, <i>А. В. Степанов, В. П. Тишков, Ю. А. Пантелеев, В. М. Гаврилов</i>	156

II.7. Ретроспективная оценка эффективности мероприятий по повышению радиационной безопасности объекта «Укрытие», <i>А. П. Криницын</i>	171
II.8. Преобразование объекта «Укрытие» в экологически безопасную систему и обращение с радиоактивными отходами зоны отчуждения ЧАЭС, <i>М. К. Абдулахатов</i>	179
III. Воспоминания участников	202
III.1. Чернобыль. Первые дни, растянувшиеся на годы, <i>Ю. В. Дубасов</i>	202
III.2. Чернобыль – май 1986 года, <i>А. А. Римский-Корсаков</i>	210
Заключение	237
Некоторые фотоматериалы к статьям.....	239
<u>Список работников ФГУП «НПО “Радиевый институт им. В. Г. Хлопина”», принимавших участие в ликвидации последствий аварии на Чернобыльской АЭС</u>	242



**ТРУДЫ
РАДИЕВОГО ИНСТИТУТА
им. В. Г. ХЛОПИНА**

ТОМ XIV

Журнал основан в 1930 году

Учредитель – Радиевый институт им. В. Г. Хлопина
<http://www.khlopin.ru>

Адрес редакции: ФГУП «НПО «Радиевый институт им. В. Г. Хлопина»»
194021, С.-Петербург, 2-й Муринский пр., 28
E-mail: gonti@khlopin.ru, radium@khlopin.ru
Тел.: (812) 297-56-74, факс: (812) 297-57-81

Регистрационное свидетельство № 1027801577980, С.-Петербург

Лицензия на издательскую деятельность ИД № 01502

Ответственный за выпуск: Л. Г. Царицына
Компьютерное исполнение: В. Г. Богданов
Редактор: Г. В. Сидоренко
Корректор: Г. С. Александрова

Адреса электронной почты и телефоны авторов статей можно найти на сайте института

Заказ №	Подписано к печати	Печать офсетная	Формат бумаги 60×84 1/8
Усл. печ. л.	. Уч.-изд. л.	Цена договорная	Тираж 250 экз.

Отпечатано в типографии ПИЯФ РАН
188300, Гатчина Ленинградской обл., Орлова роща