

**МИНИСТЕРСТВО РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ
ГУП НПО “РАДИЕВЫЙ ИНСТИТУТ им. В.Г. ХЛОПИНА”**

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

ТОМ X



**Санкт-Петербург
2003**

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

В.Н. Романовский

РЕДКОЛЛЕГИЯ

Богданов В.Г. (ответственный секретарь), Бутомо С.В. (зам. гл. редактора),
Зильберман Б.Я., Каминский Ю.Л. (зам. гл. редактора), Куделин Б.К.,
Савоненков В.Г., Суглобов Д.Н., Эйсмонт В.П.

ISBN 5-902231-01-9

© ГУП НПО «Радиовый институт
им. В.Г. Хлопина», 2003

Предисловие

В этом году, после длительного перерыва, Радиевый институт им. В.Г. Хлопина возобновляет публикацию «Трудов Радиевого института». Продолжение выпуска трудов, решение о котором мы приняли к 80-летию института, несомненно, является хорошим поводом, чтобы вспомнить славную историю института за эти годы.

В начале 20-х годов в нашей стране, где материальное положение было исключительно тяжелым, светлые умы России уже видели впереди развитие науки и техники на основе новейшего открытия – явления радиоактивности. Вернадский и Хлопин пришли к моменту основания Радиевого института не с пустыми руками, к этому времени ими уже были получены первые российские препараты радия и налажено его фактически промышленное производство. Они торопились исследовать все возможные стороны нового открытия – физику, химию, геологию радиоактивности, ее роль в живой и неживой природе, в истории и в будущем нашей Вселенной. Новое правительство страны тоже смотрело в будущее и верно угадало одно из самых перспективных направлений тогдашней науки. Институт получил помещения, финансирование и поддержку властей и начал работать. Пришли замечательные молодые талантливые люди и, в общем-то, на весьма скромную зарплату стали с энтузиазмом решать интереснейшие задачи. В Радиевом институте в предвоенные годы был выполнен ряд блестящих работ; весь мир знает имена Вернадского, Хлопина, Гамова, Мысовского, Курчатова, Жданова, Петржака, Алиханова, Вернова, Капицы, Виноградова, Лейпунского, Лукирского, Гринберга, Никольского, Вдовенко, Гуревича, Желепова, Мещерякова, Никитина, Старика, Герлинга и многих других ученых, работавших в РИ. Здесь был создан Государственный фонд радия, построен первый в Европе циклотрон, открыто спонтанное деление урана. Даже во время Великой Отечественной войны институт не переставал работать над “урановой проблемой” и к началу атомного века пришел готовым к ее решению. Создание ядерного оружия в нашей стране поставило множество задач, которые с честью и в кратчайшие сроки были решены в Радиевом институте. Были открыты и разведаны нуж-

ные стране урановые месторождения, получены и изучены первые препараты плутония, освоена промышленная технология его выделения, созданы источники для запалов первого советского ядерного оружия, разработаны радиохимические методы “диагностики” ядерных взрывов, заложены основы научной дозиметрии ионизирующих излучений, созданы и внедрены промышленные процессы для переработки облученного урана, поставлены на вооружение многие образцы оборонной техники – всего здесь и не перечислить. Страна получила ядерный щит, без которого она вряд ли могла выжить в послевоенном мире, и в этом достижении, вместе с прославленными ядерными центрами страны, немалая заслуга РИ.

В 60-80-е годы институт, конечно, продолжал работать на оборону, но принимал и самое деятельное участие в создании мирной атомной энергетики, в первую очередь, как разработчик радиохимических технологий для переработки ядерного горючего. Наш вклад есть и в ныне работающем заводе РТ-1, а в разработке технологии для вновь создаваемого завода РТ-2 Радиевый институт с самого начала был научным руководителем. Одновременно институт занял ведущую позицию в исследованиях радиоактивности внешней среды – сперва на ядерных полигонах, в окрестностях атомных предприятий, а затем – в местах серьезных ядерных аварий (южно-уральская авария, Чернобыль). Наши ученые успешно решали задачи использования ядерных взрывов в мирных целях, изучали радиоактивность морей и океанов, атмосферы и околоземного космического пространства.

К началу 90-х годов институт начал активно развивать международные связи, принимать участие во многих международных программах, завоевал признание мировой научной общественности как центр высокопрофессиональной экспертизы по ядерной метрологии, по разработке радиохимических технологий, по созданию оригинальной высокоточной аппаратуры и методов измерения ионизирующих излучений. Сегодня это приносит нам не только известность, но и рынок заказов, без которых в нынешней обстановке мы не смогли бы существовать.

Пришли перемены 90-х годов, и, как вся наша страна, мы оказались в другом мире, с другими критериями жизни, с другими задачами и требованиями, к которым пришлось приспособливаться, “перестраиваясь на ходу”. Это, конечно, было не просто, и сотрудники НПО РИ прошли через трудности перестройки с честью, не дав нашему институту рухнуть или превратиться в конгломерат разношерстных малых предприятий, сохранив научный потенциал института и не разбазарив его уникальную техническую базу, найдя заказчиков вне привычного военно-промышленного комплекса, освоив новые области рынка высоких технологий (таких, как ядерная медицина, уникальные детекторы излучения, переработка ВАО, производство и сбыт радионуклидной продукции). Это было не просто. Чего стоит только тот факт, что за последние годы институт расплатился с громадными долгами по энергоносителям, накопленными за годы “перестройки”, выдержал бешеную инфляцию начала 90-х годов, грабительский “дефолт”, научился добывать более 70% средств к существованию вне родного Минатома и не проводил ни одного массового увольнения, избежал угроз банкротства, не потерял разрешений и лицензий на работы с РАВ и ДМ, не закрыл ни одного научного направления; продолжала работать аспирантура, шли защиты кандидатских и докторских диссертаций – словно рядом с нами не закрывались и не пустели такие “киты” ВПК, как «Светлана» и другие. Этот трудный этап мы прошли успешно, экзамен на прочность выдержали, а без преданности институту и самоотверженности этого сделать было бы невозможно.

Что же дальше? Что будет с институтом в XXI веке? Конечно, не будет просто. В “рыночной экономике” жить будет сложно, но мы быстро учимся. У нас есть трудности, но эти трудности надо будет преодолеть, и чем скорее, тем лучше. Что я имею в виду:

- надо выводить нашу молодежь на ключевые посты в институте. Да, нам уже немало лет, а сегодняшняя жизнь требует много энергии, подвижности. Надо выводить к руководству институтом молодежь. Говорят, что ее мало – да, меньше чем в 50-е или 60-е годы, но она есть, и очень хорошая, думающая, талантливая. Мы провели аттестацию и анкетирование молодых научных кадров РИ, и среди них есть очень достойные кандидаты на любые посты в РИ – включая и директорский. Я думаю, что за 2-3 года эти люди займут достойные места в руководстве института, и мы – нынешнее руководство – уступим им место без сожаления, а наоборот – с надеждой и с всесторонней помощью.
- надо от слов и статей переходить к производству хотя бы небольших партий дорогой (уникальной) высокотехнологичной продукции и продаже лицензий на работу по нашим патентам – ведь мы НПО, а не просто РИ. Изотопы, радиофармпрепараты, аппаратура, стандартные образцы, юридические права на интеллектуальную собственность – в современном мире это хороший товар, он дает и средства, и рабочие места, и прибыль. А мы пока выпускаем такого товара мало. Надо больше.
- в науке надо фантазировать. Изучать мелкие детали явлений, открытых нашими предшественниками, недостаточно, чтобы работать на переднем крае науки. Надо смелее браться за нерешенные проблемы, учитывая принципиальные закономерности природы, искать их и пытаться их понять. Таких работ у нас мало, а без них у института не будет прежнего авторитета.

Взгляд на 80-летнюю историю Радиевого института внушает уверенность, что вместе мы и наши коллеги будем и дальше успешно развивать атомную науку и технику на благо нашей Родины.

А.А. Римский-Корсаков,
Генеральный директор ГУП НПО
“Радиевый институт им. В.Г. Хлопина”

Ядерная физика в Радиевом институте: наука и практика последних лет

Н.П. Кочеров, О.В. Ложкин, В.П. Эйсмонт

В докладе приводятся основные результаты работ института по ядерной физике за последние несколько лет. Рассматриваются фундаментальные и прикладные направления, традиционно сочетающиеся в деятельности института с момента его основания. Отмечаются достижения в экспериментальных и теоретических исследованиях высокоэнергетических адрон-ядерных и ядро-ядерных столкновений, в изучении механизма процесса деления, особенно его динамических аспектов, в решении теоретических вопросов ядерной астрофизики, поиске “скрытой” материи. Подчеркивается, что на базе упомянутых и других “академических” наук выросла научно-прикладная и прикладная тематика, выполненная или выполняемая в рамках почти двух десятков проектов МНТЦ. В этой связи указывается на большую группу проектов в области ядерных данных для перспективных ядерных технологий, в том числе управляемых ускорителями систем, рассчитанных на трансмутацию долгоживущих радиоактивных отходов. Приводятся также примеры работ по сбоям электронных систем в космосе, неразрушающему контролю ядерного топлива, дистанционному обнаружению взрывчатых веществ, образованию нанокластерных пучков и лазерному возбуждению актиноидов. Таким образом, показывается, что нет “кризиса жанра” в физических лабораториях института, есть “кризис финансов”, который частично преодолевается международными проектами.

Развитие ядерной физики продолжается в традиционном для института сочетании фундаментальных и прикладных исследований, исторически приведших физику института от начал радиоактивности к физическим основам ядерной энергетики. На этом пути остались вехи создания первого в Европе циклотрона, открытия спонтанного деления и других пионерских работ по делению ядер, открытия образования ^8He , работ по определению кпд ядерных зарядов. Не было и нет никакого смысла изменять общий вектор этого движения, необходимо лишь следить за тем, чтобы его направление постоянно совпадало с современными задачами как теоретической, так и практической науки.

Фундаментальные работы последних лет охватывали высокоэнергетические ядерные процессы и физику деления ядер.

По первому направлению продолжались экспериментальные и теоретические исследования явлений ядерной фрагментации и мультифрагментации при промежуточных и высоких энергиях в широких областях масс ядер и энергий частиц. Впервые были измерены и проанализированы изотопные эффекты при образовании изотопов легких элементов в реакциях изотопов олова с азотом при энергиях около 15 и 30 МэВ/н. Большое внимание было уделено явлению изоскейлинга, то есть факторизации изотопных отношений выходов фрагментов в реакциях на изотопах ядермишеней, впервые обнаруженной в наших работах. Показано, что наблюдаемый изоскейлинг является следствием статистической природы фрагментов, образуемых в изучаемых реакциях.

Продолжались исследования ядро-ядерных взаимодействий при релятивистских энергиях, которые связаны с уникальной возможностью исследовать экспериментально высоковозбужденные ядерные системы с барионными плотностями вплоть до 3-х плотностей насыщения ядерной материи и с температурами до сотни МэВ. Ин-

формация о ядерном уравнении состояния при высоких барионных плотностях и о свойствах адронов в сверхплотной материи необходима для понимания таких астрофизических явлений, как динамика сверхновых и стабильность нейтронных звезд. Знание свойств адронов в плотной ядерной материи необходимо для решения фундаментальной проблемы физики сильных взаимодействий, связанной с природой механизма динамического нарушения киральной симметрии и генерирования адронных масс. С целью получения информации о свойствах адронов в ядерной среде было проведено экспериментальное исследование функций возбуждения пионов в области энергий от абсолютного порога рождения пионов до энергии 500 МэВ в реакциях под действием протонов и ядер на ускорителе-накопителе Уппсальского университета Швеции «CELSIUS» – впервые в режиме постепенного увеличения энергии ускоренных частиц, обеспечившего детальное измерение тонкой структуры функции возбуждения пионообразования. Статистически значимых резонансов в функции возбуждения, которые могли бы свидетельствовать о значительной роли нуклонных или дельта-изобар или гипотетических дельта-боллов, предсказываемых современной теорией элементарных частиц, не было обнаружено. Дальнейшее развитие получила гидродинамическая модель взаимодействия высокоэнергетических тяжелых ядер. Для описания ядерной материи использованы релятивистские уравнения. Показано, что образование тяжелых мезонов и их распространение в ядерном веществе чувствительно как к уравнению состояния ядерного вещества, так и к изменению свойств среды.

Наши сотрудники участвовали в разработке и изготовлении 3π-устройства, создаваемого для экспериментов на внутреннем пучке тяжелых ядер упомянутого ускорителя-накопителя для осуществления программы исследований высоковозбужденной ядерной материи и ее критических состояний, проявляющихся в явлении ядерной мультифрагментации. Это многодетекторное устройство в виде цилиндра из 18 колец содержит 540 телескопов для регистрации частиц на основе ультратонких Si-детекторов (10-12 микрон) и других детекторов (см. рис. 1).

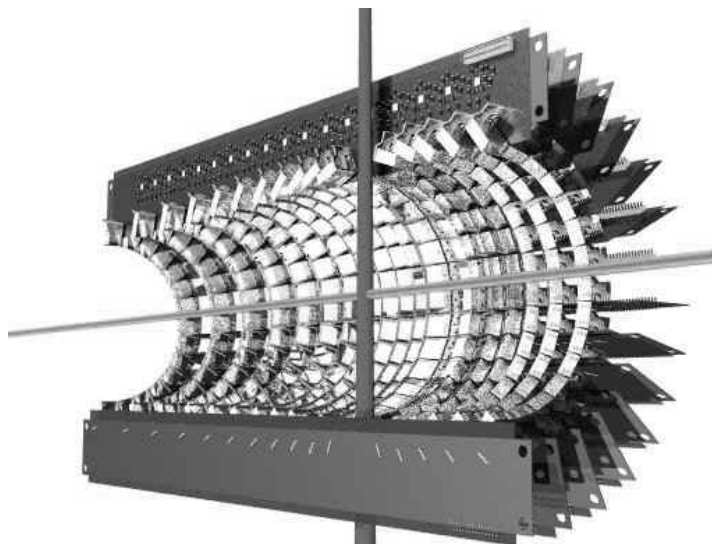


Рис. 1. 3π-многодетекторное устройство на основе Si-детекторов – CHICSi (CELSIUS Heavy Ion Collaboration).

Почти все описанные исследования выполнялись в рамках различных международных коллабораций.

К этому направлению примыкают работы по теоретическим вопросам ядерной астрофизики – предложению дополнительного (нейтринного) механизма образования ${}^3\text{He}$ и выводу о необходимости введения в звездную модель второго всплеска нуклеосинтеза в окрестностях рождавшейся Солнечной системы, позволяющего объяснить присутствие в метеоритах радионуклидов с периодами полураспада меньше 100 млн. лет.

Второе направление, физика деления ядер, развивалось, в основном, как изучение динамики деления, ставшей коренным вопросом этой области физики. Так же как и в физике высоких энергий, прогресс стал возможным благодаря интенсивному сотрудничеству с зарубежными научными центрами. В Ускорительной лаборатории университета Ювяскюля (Финляндия) на специальном канале ускорителя тяжелых ионов размещена установка HENDES, предназначенная для высокоэффективной регистрации нейтронов в корреляционных измерениях на пучках заряженных частиц. К работе по установке, начатой в стенах института, присоединились Институт атомной энергии им. И.В. Курчатова и Лаборатория ядерных реакций им. Г.Н. Флерова ОИЯИ. В настоящее время установка существенно модернизирована благодаря вкладу финской стороны, и на ней проводятся исследования в комбинации с другими установками Лаборатории ядерных реакций и европейских лабораторий. Общий вид установки представлен на рис. 2. Она представляет собой камеру ядерных реакций, начиненную различными детекторами для регистрации осколков деления и заряженных частиц и окруженную длинными позиционно-чувствительными нейтронными детекторами.

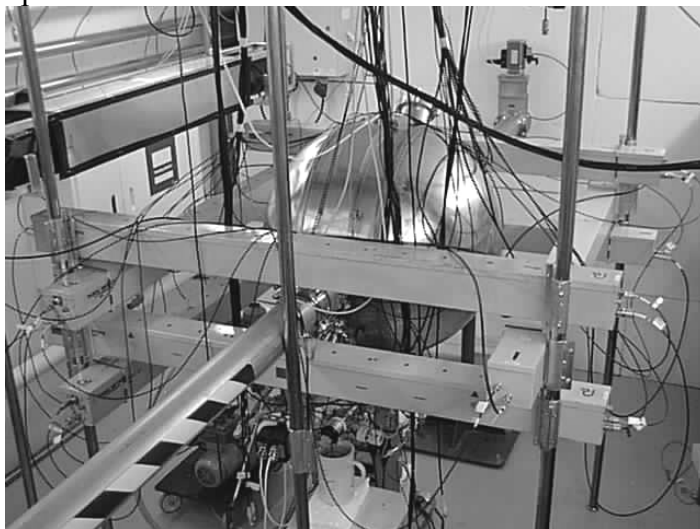


Рис. 2. HENDES (High Efficiency Neutron Detection System) – установка для исследования деления ядер на пучках легких и тяжелых ионов, базирующаяся на циклотроне К-130 университета г. Ювяскюля, Финляндия.

На основе проведенных корреляционных измерений спектров нейтронов и альфа-частиц в совпадении с осколками деления для ряда реакций с тяжелыми ионами, например, ${}^{58}\text{Ni}$ и ${}^{40}\text{Ar}$ с энергией 5-6 МэВ/нуклон с мишенями из ${}^{124}\text{Sn}$ и ${}^{180}\text{Hf}$, была получена новая информация о ядерном трении и временах деления нагретых ядер, существенная для понимания динамики реакции слияния и деления.

Были проведены измерения массово-энергетических распределений осколков деления в реакциях с тяжелыми ионами, а также протонами и дейтронами и анализ с

учетом многомодального механизма формирования продуктов деления. Были получены данные о проявлении делительной моды, связанной с дважды магическим ядром ^{78}Ni . Одной из главных задач исследований являются измерения выходов осколков деления тяжелых ядер для масс меньше 70 а.е.м. для понимания механизма суперасимметричного деления и его перехода к явлению кластерной радиоактивности, названному нами f-распадом. Для решения фундаментальных проблем ядерной гидродинамики и проблем синтеза тяжелых элементов представляет большой интерес исследование ядерных реакций, ведущих к образованию ядерных систем с зарядом $Z > 100$. В настоящее время изучается реакция $^{64}\text{Ni} + ^{242}\text{Pu}$, в которой возможно образование ядра с $Z=122$. Эксперименты и интерпретация их результатов идут параллельно с развитием теоретических моделей и программного обеспечения.

К разряду наших фундаментальных исследований следует отнести и применение для исследования свойств атомных ядер техники спектроскопии полного поглощения гамма-лучей в сочетании с гамма-спектроскопией высокого разрешения, которое впервые было осуществлено совместно с Лабораторией ядерных проблем ОИЯИ, в результате чего была выявлена и интерпретирована тонкая структура M1 резонанса Гамова-Теллера в ядре ^{147}Gd .

Ряд наших физиков участвует в международных проектах INTAS, а также в программе фундаментальных исследований «Ядерная физика» Миннауки.

Ведутся и поисковые работы. В подземной лаборатории в шахте города Оулу (Финляндия) работает созданная в институте установка для изучения множественности рождения нейтронов под действием космических лучей (рис. 3). В перспективе – возможно решение загадки “скрытой” материи.



Рис. 3. Установка для изучения множественности рождения нейтронов под действием космических лучей.

Конечно, общий кризис отечественной науки не обошел и нас. И больше всего пострадала академическая наука. Но некоторые ее аспекты получили второе дыхание, когда обозначился их возможный практический выход. Здесь мы перейдем к проектам МНТЦ, сводка которых представлена на рис. 4.

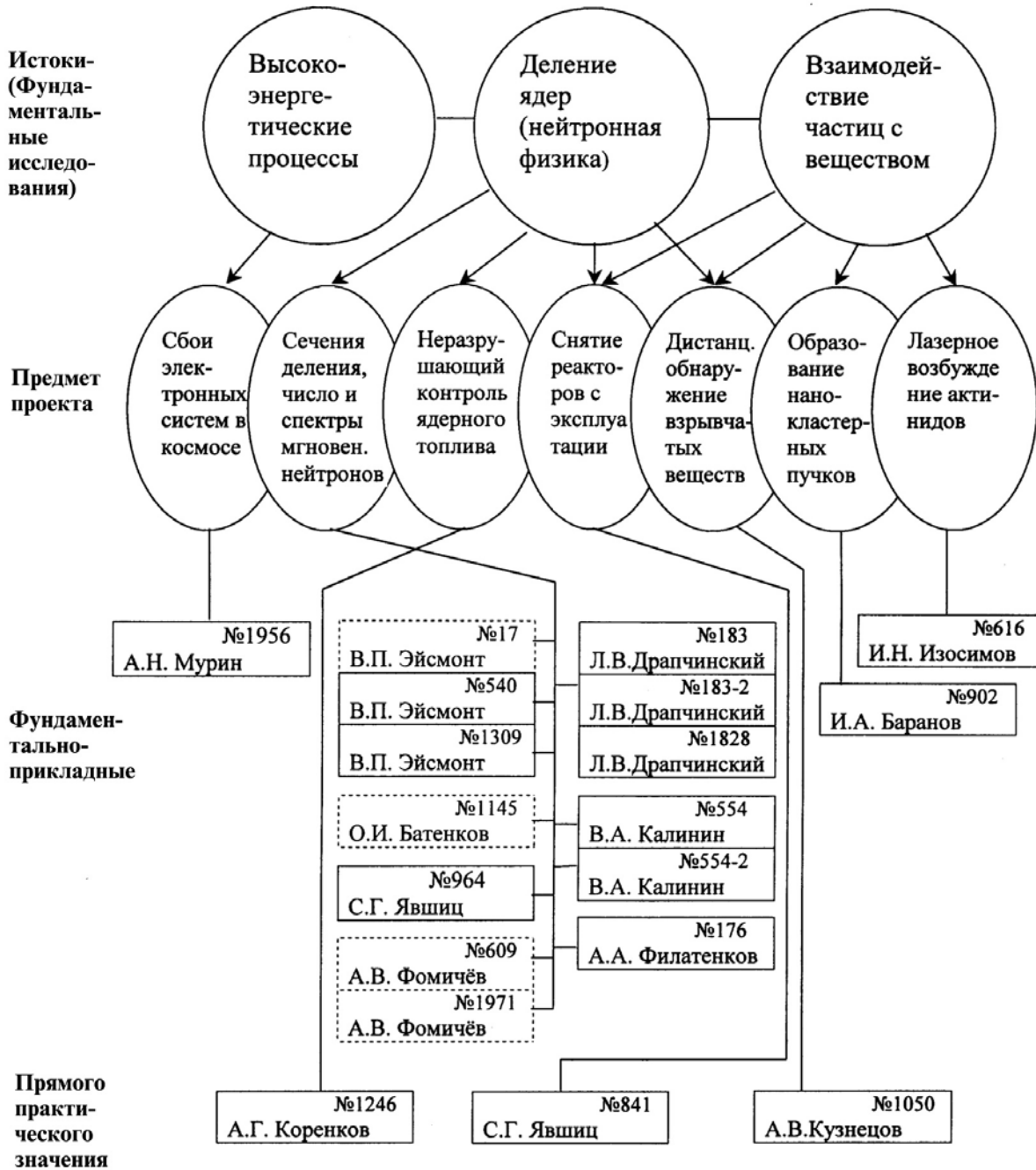


Рис. 4. Сводка проектов МНТЦ, выполненных или выполняемых физиками института, и их связь с фундаментальными исследованиями (штриховые прямоугольники – подпроекты).

Примером может служить изучение деления ядер на ускорителях протонов высокой (теперь говорят, промежуточной) энергии. Начатое физиками института 50 лет назад на только что построенном Дубненском синхроциклотроне, оно казалось чистой наукой. А теперь стало частью крупной международной программы по изучению возможностей использования сильноточных ускорителей как внешнего источника нейтронов для подкритического реактора и создания таким образом внутренне безопасной и экологически чистой ядерной энергетики. Внешний источник может быть мгновенно убран выключением ускорителя, а его наличие обеспечивает дожигание ядерных отходов. Около 8 лет назад мы подключились к решению этой задачи – сначала как участники большого отечественного проекта МНТЦ (№ 17), а теперь занимаемся ею в рамках собственных проектов. Определяются сечения деления ядер протонами и нейтронами промежуточной энергии, необходимые для расчета характеристик мишеней ускорителей, служащих источниками внешних нейтронов, о которых только что говорилось. Для измерений используется, в частности, ионизационная камера с сетками Фриша, установленная на пучке нейтронов ускорителя Уппсальского университета (Швеция), показанная на рис. 5.

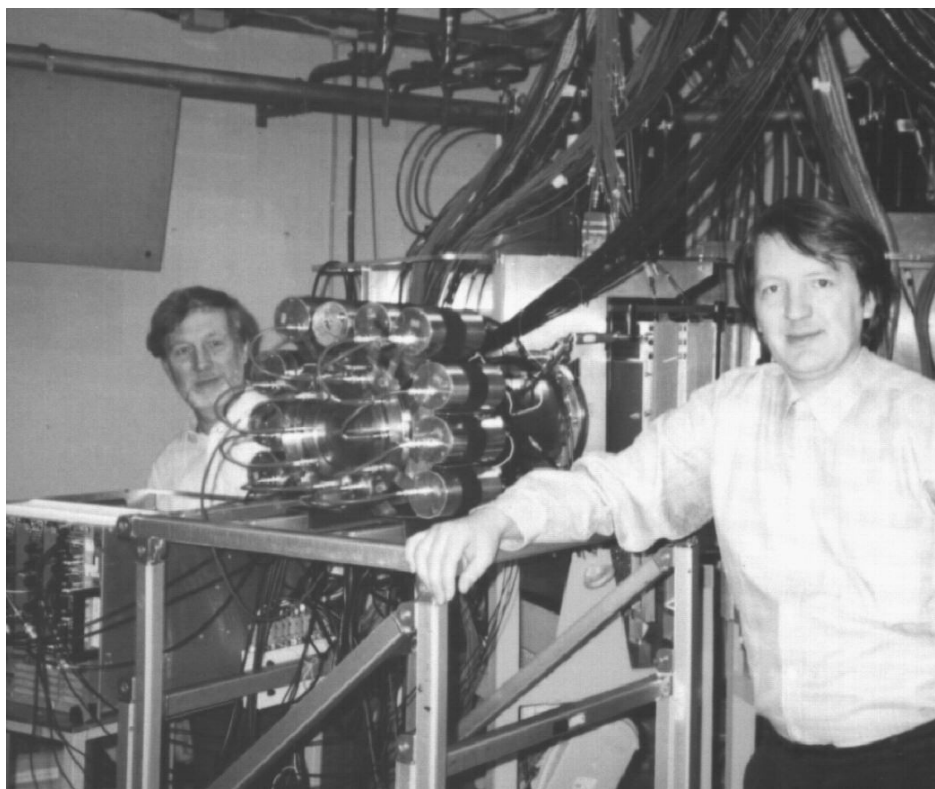


Рис. 5. Многосекционная ионизационная камера с сетками Фриша на пучке нейтронов ускорителя в г. Уппсала (Швеция).

В принципе, дожигание отходов, в качестве которых выступают главным образом минорные актиноиды, может быть осуществлено и в быстрых высокопоточных реакторах. Во всех случаях необходимо знать характеристики деления актиноидов, в частности число и спектр мгновенных нейтронов при спонтанном и вынужденном делении. Измерение этих характеристик для изотопов Th, U, Pu, Am и Cm – предмет еще ряда наших проектов МНТЦ, в выполнении которых участвуют также

специалисты Петербургского института ядерной физики, Института экспериментальной физики в Сарове, Физико-энергетического института в Обнинске. В ряде случаев мы выступаем соисполнителями таких проектов. Они обозначены на рисунке штриховыми линиями. Как правило, эксперименты выполняются на экспериментальных установках, созданных в нашем институте и размещенных на пучках ускорителей зарубежных институтов, а также на реакторе и ускорителе Петербургского института ядерной физики. Однако используется также и наш нейтронный генератор НГ-400, на котором измеряются спектры мгновенных нейтронов деления трансуранных элементов (рис. 6).

Наряду с экспериментами такого рода проводятся теоретические расчеты.



Рис. 6. Подготовка установки для прецизионных измерений спектров мгновенных нейтронов ^{241}Am на нейтронном генераторе НГ-400.

Работы этого блока (блока ядерных данных), включающего 13 из 19 наших проектов, чаще всего выполняются совместно с другими отечественными и зарубежными специалистами. Уже много лет получаемые в них результаты систематически и широко представлялись на международные совещания по ядерным данным, проходившие в последние годы в Германии, США, Италии и Японии. Так, в 2001 г. десятью нашими сотрудниками было представлено десять докладов. Наши данные по сечениям деления протонами и нейтронами промежуточной энергии составляют основу современной экспериментальной базы данных в этой области. Результаты этих работ, включая данные по мгновенным нейтронам, получают высокую оценку специалистов, и институт имеет здесь большой международный авторитет. Здесь мы сохраняем свое коллективное, хотелось бы подчеркнуть – коллективное лицо, ибо, к сожалению, во многих случаях проекты МНТЦ направлены на решение хотя и важных, но узких конкретных задач, что не способствует сохранению единого и непрерывного фронта исследований – в постоянном взаимодействии всех групп и лабора-

торий. Последнее больше бы соответствовало интересам развития фундаментальной и прикладной науки в институте, но требует разумного бюджетного финансирования. И все же роль проектов в сохранении науки в институте велика. Решение современных задач требует и современной экспериментальной экипировки, и современных теоретических подходов, и высокой квалификации исполнителей. Необходимость удовлетворения этим требованиям, обеспечиваемая проектами МНТЦ, позволяет поддерживать интеллектуальный уровень физического коллектива.

Другой пример практического служения чистой физике – наши исследования высокоэнергетических процессов, вылившиеся в работы по определению вероятности ядерных реакций, приводящих к сбоям электронных систем в космосе.

Хорошо известно, что критические точки развития науки часто лежат на стыке разных дисциплин. Одна из таких точек возникла в институте, когда традиционное для нас изучение взаимодействия ядерных частиц и излучения с веществом коснулось физики твердого тела, его поверхности. В 90-х годах в институте был обнаружен так называемый макрокластерный эффект – оказалось, что одна ядерная частица, осколок деления ядер, сталкиваясь с поверхностью твердого тела, способна поднять с нее до миллиона атомов. Для изучения этого эффекта и получения нанокластерных пучков была создана оригинальная высоковакуумная установка с тандемным времяпролетным масс-спектрометром, позволяющим определять массы и заряды поднимаемых с поверхности нанокластеров (рис. 7).

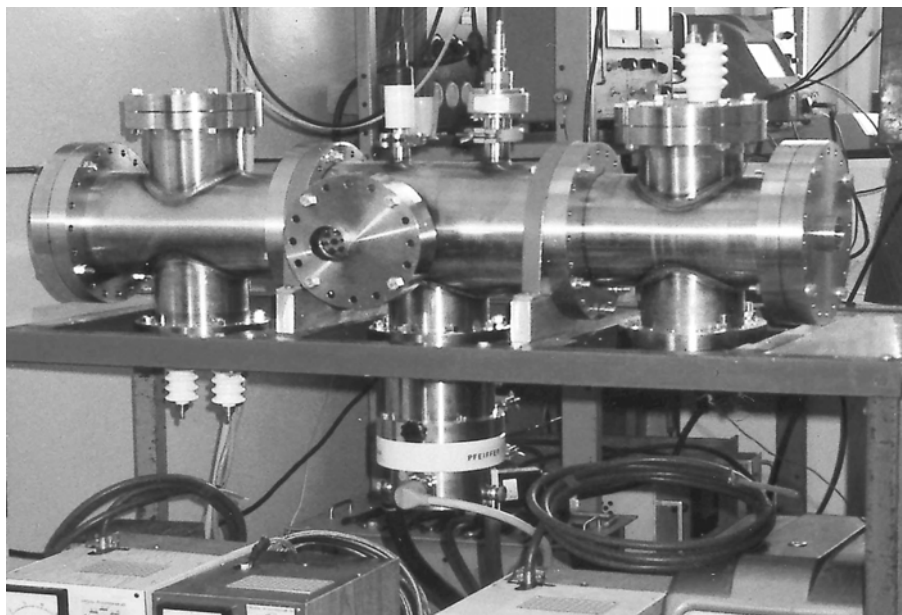


Рис. 7. Десорбционный источник металлических и полупроводниковых нанокластерных ионов (2-30 нм) с использованием многозарядных ионов – осколков деления ^{252}Cf .

В таком приборе очень нуждается сегодня микромолекулярная биология, изучающая тяжелые молекулы живого вещества в интересах здоровья человека. Изучение этого эффекта и создание прибора проводилось также в рамках проекта МНТЦ. За короткий срок работа получила известность и признание за рубежом.

Еще один пример из этой области наших исследований – проект, в котором впервые обнаружен принципиально новый механизм возбуждения хемилюминесцен-

ции, инициируемой лазерной накачкой актиноидных комплексов. Это позволяет применять эффекты хемилюминесценции для оптического детектирования следовых количеств актиноидных элементов в растворах.

Наряду с упомянутыми фундаментально-прикладными проектами имеются проекты прямого практического значения, конечно же, также имеющие глубокие корни в традиционно изучаемых в институте физических проблемах. Это проекты по радиационным вопросам снятия реакторов с эксплуатации и дистанционному обнаружению взрывчатых веществ с помощью мобильной установки, использующей миниатюрную ионизационную камеру с изотопным источником нейтронов, в грунте, стенах и ручном багаже. На рис. 8 показаны отдельные элементы и полевые испытания этой установки.



Рис. 8. Прототип мобильного устройства для обнаружения взрывчатых веществ в лаборатории и во время проведения полевых испытаний.

Это и проект по неразрушающему контролю выгорания и изотопного состава в сборках реактора РБМК-1000. Практически важные работы последнего направления выполняются также по прямым договорам с ЛАЭС и ГХК.

На рисунке 9 показан лабораторный стенд для отработки методов неразрушающего анализа, на котором ведутся измерения с использованием имитатора сборки реактора РБМК.



Рис. 9. Лабораторный стенд для отработки методов неразрушающего анализа.

Продолжались разработки и усовершенствования детекторов ядерных излучений (твердотельных и полупроводниковых) и мишеней для ядерно-физических измерений. Внесен значительный вклад в развитие методов и аппаратуры для дозиметрии нейтронов и радона с помощью твердотельных детекторов, в том числе с целью перехода предприятий отрасли на НРБ-99.

Наибольший вклад в описанные здесь работы внесли: И.А. Баранов, О.И. Батенков, Б.А. Бибичев, В.Л. Варенцов, Д.Н. Вахтин, Б.Ф. Герасименко, В.Д. Дмитриев, Л.В. Драпчинский, А.Т. Дьяченко, М.Д. Зубков, И.Н. Изосимов, В.А. Калинин, А.Г. Коренков, О.И. Косточкин, Н.П. Кочеров, Я.М. Крамаровский, А.В. Кузнецов, Н.К. Кузьменко, С.И. Лашаев, О.В. Ложкин, А.Н. Мурин, В.А. Николаев, А.К. Новиков, В.В. Обнорский, А.И. Обухов, В.А. Плющев, А.А. Римский-Корсаков, В.А. Рубчеля, А.Н. Смирнов, С.М. Соловьев, В.А. Тренкин, Г.А. Тутин, П.И. Федотов, А.А. Филатенков, С.В. Хлебников, В.П. Чечев, С.В. Чуваев, В.И. Шпаков, В.П. Эйсмонт, С.Г. Явшиц.

Настоящий обзор должен свидетельствовать, что мы живы. У нас нет кризиса жанра, есть кризис финансовый, который лишь частично смягчен международными проектами.

Авторы благодарят за предоставление материалов для доклада И.А. Баранова, О.И. Батенкова, Л.В. Драпчинского, И.Н. Изосимова, А.Г. Коренкова, Н.Н. Кудрявцева, А.В. Кузнецова, Ю.А. Мурина, В.А. Николаева, В.А. Рубченко, С.М. Соловьева, Г.А. Тутина, П.И. Федотова, Н.П. Филатова, С.В. Хлебникова и В.П. Чечева.

Nuclear Physics in KRI: Recent Research and Applications

N.P. Kocherov, O.V. Lozhkin, V.P. Eismont

The paper contains the main results of the Institute's work in the field of nuclear physics during the last several years. Both fundamental and applied research which traditionally coexist in the institute's programme from the time of its foundation are described. The results of experimental and theoretical investigations of high energy hadron-nuclear and nuclear-nuclear collisions, nuclear fission studies and, especially, of its dynamic aspects, theoretical studies in nuclear astrophysics and search for dark matter are discussed. It is shown that on the basis of these 'academic' studies applied research has grown and about twenty ISTC projects are under way or were successfully completed. A group of projects in the field of nuclear data for accelerator driven transmutation systems is highlighted. Examples of works on malfunctioning of electronic devices due to cosmic radiation, nondestructive analysis of nuclear fuel, remote detection of explosives, actinide laser excitation and nano-clusters are given. It is shown that there is no crisis in scientific activity, but there is a financial one, which we partially overcome with the help of international projects.

Развитие работ по производству медицинских изотопов в Радиевом институте им. В.Г.Хлопина

Л.М. Солин, М.П. Зыков, Б.И. Шестаков, В.И. Безносюк

В статье представлены результаты наиболее важных исследований последних лет в области производства радиоизотопов для медицины. Показаны возможности и перспективы использования изотопов радия, рения-188, стронция-90, рутения-106, йода-125. Особое место занимают вопросы получения радиофармпрепаратов с использованием изотопов технеция-99m, йода-123 и галлия-67 для медицинских учреждений Санкт-Петербурга.

Введение

Развитие в Радиевом институте фундаментальных работ в области ядерной физики и радиохимии не могло не найти своего продолжения в применении научных достижений в различных сферах, в том числе и в медицине. В институте в течение многих лет проводятся разработки технологий получения самых разных медицинских изотопов. В настоящее время на Западе ядерная медицина переживает подъем. В США в развитие этой области медицины ежегодно вкладываются сотни миллионов долларов. Действительно, ядерная медицина позволяет не только осуществлять уникальную диагностику, но и излечивать тяжелые заболевания. В США каждый четвертый пациент, обращающийся за медицинской помощью, проходит процедуры ядерной медицины. К сожалению, в последнее десятилетие в России финансирование работ по применению и использованию радиоизотопов весьма и весьма скромное. Тем не менее, в Радиевом институте существуют энтузиасты, которые принимают участие в развитии необходимого людям направления медицины. В данной статье представлены результаты наиболее значимых работ последних лет.

Ядерная медицина – это область медицины, использующая для диагностики или терапии радиоизотопы в виде радиофармпрепаратов или специальным образом приготовленных закрытых источников. Радиофармпрепараты представляют собой вещества, меченные радиоизотопами и приготовленные в соответствии с правилами для медицинских препаратов. Попадая в организм человека, они достигают конкретного органа (или ткани). Далее диагностические радиофармпрепараты испускают гамма-кванты и тем самым позволяют с использованием гамма-камер или других детекторов регистрировать изменения, происходящие в данном органе. Терапевтические же радиофармпрепараты испускают излучение с коротким пробегом, разрушающим ткань, в которую попадает радиофармпрепарат. Таким образом происходит, например, лечение опухолевых заболеваний. Закрытые источники могут быть помещены непосредственно в опухоль или рядом с ней, что также дает терапевтический эффект. Медицинские радиоизотопы получают, главным образом, в больших потоках нейтронов на реакторе или при облучении подходящих нуклидов заряженными частицами от циклотрона.

Наличие опытных кадров радиохимиков и физиков, собственный циклотрон Радиевского института МГЦ-20, а также реакторы ПИЯФ (Гатчина) и ЛАЭС (Сосновый Бор) представляют собой базу для получения широкого спектра медицинских изотопов.

Радий

Совершенно естественно, что радий для Радиевого института не мог не стать предметом рассмотрения в аспекте медицинского применения. Радий в различных формах и способах использовался в лечении более 160 болезней. Он оказался первым радионуклидом, с которого исторически начиналось формирование нового научного направления на стыке медицины и ядерной физики.

Радий в природе существует только в виде радиоизотопа радия-226 с периодом полураспада 1600 лет. Однако этот изотоп может быть использован для получения большого числа медицинских изотопов при облучении как нейтронами, так и заряженными частицами. Доступность радия-226 обусловлена обязательством, взятым Радиевым институтом по спасению российского радия из Государственного Радиевого Фонда. Во ВНИПИЭТ при участии Радиевого института в настоящее время разрабатывается цех (цепочка камер и боксов) для работ с отечественным радием.

Среди радиоизотопов для терапии в онкологии наиболее перспективными рассматриваются альфа-излучающие, поскольку альфа-частицы имеют короткий пробег и вся энергия выделяется в малой области опухоли, оказывая максимальный разрушающий эффект и не затрагивая здоровых тканей. В этом смысле интересен радий-223. Считается, что он обладает уникальной комбинацией низкой стоимости и высокого терапевтического действия. Радий-223 получается при облучении радия-226. В настоящее время Радиевый институт совместно с ГосНИИ особо чистых био-препаратов разворачивает исследования по поиску и выбору соединений, образующих устойчивую связь с ^{223}Ra . Параллельно в Радиевом институте проводятся исследовательские работы по разработке генератора радия-223 с использованием опыта работ по получению радия-226 методами распределительной хроматографии и анионного обмена.

Рений-188

Рений-188 относят к числу так называемых “волшебных пуль”. Этот радионуклид имеет очень хорошие характеристики для терапии: период полураспада 17 часов, бета-излучение с пробегом в ткани около 0,5 см, а наличие гамма-излучения с энергией 155 кэВ позволяет с использованием гамма-камер осуществлять “слежение” за радиофармпрепаратом. Весьма существенно, что помимо терапевтического действия радиофармпрепараты с рением-188 значительно уменьшают болевые синдромы при метастазах в скелете.

Рений-188 получают с использованием генератора, где в качестве исходного радиоизотопа применяется ^{188}W с периодом полураспада 69 дней. Вольфрам-188 образуется при облучении нейтронами изотопа вольфрама-186. Работы по созданию централизованного генератора ^{188}Re на основе центробежного экстрактора в Радиевом институте были начаты в 1999 г. совместно с НИКИМТ. Исследования, проведенные на высокоактивных растворах, показали хорошие перспективы создания экстракционного генератора ^{188}Re : выход рения составляет более 85%; радиохимическая чистота более 99%.

Стронций-90 и рутений-106

Изотопы стронция-90 и рутения-106 используются, главным образом, для производства офтальмоаппликаторов, применяемых при лечении тяжелых опухоле-

вых заболеваний глазной системы человека. Стронций-90, кроме того, может использоваться в качестве исходного сырья в генераторах иттрия-90. Последний применяется в лечении онкологических заболеваний.

Производство изотопов стронция-90 и рутения-106 осуществляется из технологических растворов (рафинатов), образующихся в процессе переработки облученного топлива АЭС.

Стронций-90 получают в результате выделения его из рафинатов и последующей глубокой очистки. Селективное извлечение стронция из технологических растворов проводится методом экстракции по технологической схеме, предполагающей использование 32 малогабаритных центробежных экстракторов МЦЭ 12-30.

Глубокая очистка стронция производится методом нитратного осаждения. Выход стронция составляет 95%.

Технология выделения рутения-106 основана на методе дистилляции высоколетучего высшего окисла рутения. Этот метод обеспечивает высокий выход радиохимически чистого рутения. Степень извлечения рутения близка к 100%.

Разработан и испытан новый метод получения рутения-106 с высокой удельной активностью. Метод основан на выделении рутения из облученной плутониевой мишени. Выход рутения-106 при делении плутония на порядок превышает соответствующую величину для урана-235.

Йод-125

Йод-125 широко используется в двух направлениях – терапии мягким излучением и диагностике *in vitro*. Особенно стоит отметить использование йода-125 в лечении рака простаты с минимальными осложнениями по сравнению с хирургическим лечением. Йод-125 применяется с успехом в радиоиммунологическом анализе (РИА) при диагностике заболеваний щитовидной железы. С помощью радиоиммунологического анализа можно определить содержание в крови любых веществ, связанных с функцией щитовидной железы и, тем самым, получить четкую информацию о ее состоянии. По содержанию определенного типа гормонов можно идентифицировать наличие злокачественной опухоли.

Для производства йода-125 применяется технология, основанная на облучении нейтронами обогащенного ксенона-124, вымораживании йода-125 на охлажденной поверхности и переводе йода-125 в щелочной раствор.

Последние три радиоизотопа (стронций-90, рутений-106 и йод-123) производятся с очень высокими потребительскими характеристиками, однако они реализуются только в виде экспортной продукции.

Технеций-99m, йод-123, галлий-67

Радиоизотопы технеция-99m, йода-123 и галлия-67 применяются для диагностики очень широкого спектра заболеваний.

Наиболее подходящие для медицинской диагностики радионуклиды – это технеций-99m и йод-123. Они имеют энергии гамма-излучения, удобные для регистрации (140 и 159 кэВ), малые периоды полураспада; у них отсутствуют бета- и жесткое гамма-излучения, что уменьшает дозовые нагрузки на персонал изотопных лабораторий и пациентов, причем данные радиоизотопы могут использоваться для проведения исследований беременных и новорожденных. Технеций-99m применяется примерно в 60-80% исследований. Йод-123 рядом авторов рассматривается как идеальный радио-

изотоп для диагностики, благодаря способности легко связываться с протеинами с йодированными фармпрепаратами. Однако высокая стоимость радионуклида ограничивает его применение.

Для получения технеция-99m в Радиевом институте в 1993 году был запущен централизованный экстракционный генератор, основу которого составляет центробежный экстрактор, изготовленный в ИФХ РАН. Исходным изотопом является ^{99}Mo с периодом полураспада 66 часов. ^{99}Mo образуется из молибдена-98 в потоке нейтронов от реактора.

Иод-123 в Радиевом институте получают при облучении обогащенного теллура-123 протонами от циклотрона МГЦ-20 производства НИИЭФА им. Д.В.Ефремова. Образованный в мишени иод-123 извлекается методом сухой дистилляции в форме, удобной для мечения многих соединений.

Для получения галлия-67 мишень оксида обогащенного цинка-67 облучается протонами. Облученный оксид цинка растворяется в соляной кислоте, и галлий-67 извлекается с использованием ионообменной колонки с высокой эффективностью.

Радиофармпрепараты

Среди перечисленных ранее медицинских изотопов до реального и регулярного применения в практическом здравоохранении были доведены только 3 радиоизотопа – технеций-99m, иод-123 и галлий-67. Радиофармпрепараты, меченные этими радиоизотопами, используются в 20 медицинских учреждениях Санкт-Петербурга. Радиофармпрепараты отличает высокое качество: радионуклидная чистота более 99,5%, радиохимическая чистота выше 95%.

Технеций-99m в виде пертехнетата натрия поступает в изотопные лаборатории города, где с использованием специальных наборов получают препараты для проведения различных видов диагностики.

С 1990 года иод-123 применяется для получения в Радиевом институте радиофармпрепаратов иодида натрия, а затем *орто*-йодгиппурата натрия.

Иодид натрия получают при взаимодействии паров иода-123 с раствором щелочи. Раствор иодида натрия, меченного ^{123}I , является сырьем для других радиофармпрепаратов.

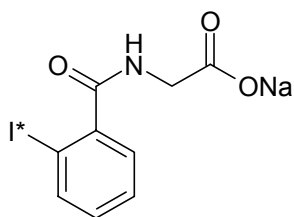
Для получения *о*-йодгиппурата натрия, меченного ^{123}I , используется реакция изотопного обмена между иодидом натрия (с активным иодом) и *орто*-йодгиппуровой кислотой с последующей нейтрализацией.

В последние годы впервые в России были разработаны технологии получения *м*-йодбензилгуанидина и йодофена, меченных иодом-123.

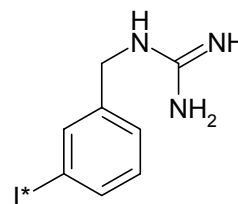
Метод получения *м*-йодбензилгуанидина – твердофазный изотопный обмен в присутствии сульфат-ионов между иодидом натрия (с активным иодом) и сульфатом *м*-йодбензилгуанидина.

При получении *йодофена*, меченного *йодом-123*, применяется каталитический изотопный обмен. Раствор иодида натрия, меченного ^{123}I , и 15-(*п*-йодфенил)-3-метилпентадекановая кислота используются как стартовые материалы. Изотопный обмен происходит в присутствии медного катализатора.

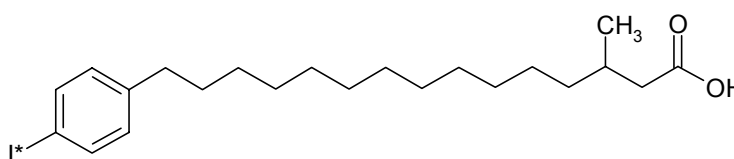
Химическая реакция образования комплексонов используется для получения цитрата галлия-67. Раствор хлорида галлия-67 в соляной кислоте и цитрат натрия используются в качестве стартовых материалов.



о-йодгиппурат натрия



m-йодбензилгуанидин

15-(*p*-йодфенил)-3-метилпентадекановая кислота
(йодофен)

Заключение

В Радиевом институте за последние годы выполнен значительный объем работ по совершенствованию технологий получения медицинских радиоизотопов и разработке новых радиофармпрепаратов. Без сомнения, Радиевый институт является ведущим предприятием на Северо-Западе России в этой области. Использование самых разнообразных ядерных реакций, различных методов экстракции и очистки для получения медицинских изотопов, а также разнообразие технологий синтеза радиофармпрепаратов показывают большой потенциал института. Использование этого потенциала на благо здоровья возможно только в тесном сотрудничестве с радиологами города для совершенствования лечебно-профилактической базы, а также создания в соответствии с медицинскими стандартами производств, изготавливающих радиоизотопы для диагностики и терапии.

Development of medical isotope production methods at the V.G.Khlopin Radium Institute

L.M. Solin, M.P. Zykov, B.I. Shestakov, V.I. Beznosuk

The article contains the results of major research undertaken in the last few years in the field of radioisotope production for medicine. It demonstrates the opportunities and perspectives of using radium, rhenium-188, strontium-90, ruthenium-106 and iodine-125 isotopes. Special attention is given to the issues of radiopharmaceuticals production using technetium-99m, iodine-123 and gallium-67 for medical institutions.

Исследования экстракции в Радиевом институте им. В.Г. Хлопина

Б.Я. Зильберман, В.Н. Романовский

Исследования экстракции актиноидов в Радиевом институте им. В.Г. Хлопина начались в 1946 году с целью получения оружейного плутония при помощи диэтилового эфира. Однако лишь с 1976 года экстракционные методы начали применяться в промышленном масштабе для переработки облученного урана с использованием растворов ТБФ в хлорированных углеводородах в качестве разбавителей. В дальнейшем процессы экстракции были модифицированы для целей переработки ОЯТ АЭС в комбинации с разделением всех долгоживущих радионуклидов. В то же время для переработки отходов, накопленных от военно-промышленной деятельности, была предложена экстракция с использованием ХДК в сочетании с фосфорорганическими экстрагентами – последовательно или совместно. Также отмечены другие применения экстракционных методов.

В 2002 г. исполнилось 80 лет со дня основания Радиевого института (РИ), который вошел в систему АН СССР в 1938 г. Его первым директором был академик В.И. Вернадский, а заместителем директора – В.Г. Хлопин, в 1938 г. ставший академиком и директором института. Возглавляемое им радиохимическое направление было ведущим с момента возникновения института, а основным предметом исследований являлись процессы осаждения и соосаждения естественных, а затем и искусственных радиоэлементов. С 1961 г. институт вошел в состав нынешнего Минатома РФ. Данное сообщение базируется, в первую очередь, на материалах, опубликованных в юбилейных сборниках к 50- и 75-летию Радиевого института [1, 2] с дополнением сведениями о работах последних лет. Развитие работ по экстракции в РИ систематизировано ниже в форме таблицы, охватывающей хронологию, основную тематику и ведущих специалистов, большинство которых защитили докторские диссертации по различным аспектам экстракции актиноидов.

Исследования экстракции актиноидов были начаты в РИ в 1946 г. под руководством чл.-корр. АН СССР Б.А. Никитина (см. рис. 1) в связи с возникновением задачи производства плутония для ядерного оружия параллельно с исследованием осадительных процессов для этих целей, и они стали первыми в России (СССР) исследованиями экстракции элементов, имеющими прикладную направленность. Такой характер экстракционных исследований остается определяющим в Радиевом институте им. В.Г. Хлопина и по сей день, хотя круг вопросов по мере решения оборонных задач постепенно менялся, и к настоящему времени доминируют технология комплексной переработки ОЯТ АЭС, утилизация отходов военно-технической деятельности и производство радиофармпрепаратов, а также некоторые аспекты производства чистых веществ. Невозможность постоянно работать с облученными материалами побуждала заполнять время сопряженными фундаментальными исследованиями, которые традиционно проводились на высоком научном уровне, определяемом необходимостью понимания механизма и кинетики экстракционных процессов с целью их оптимизации и установления естественных границ применимости технологии. Тем самым создавалась школа самостоятельных и разносторонних научных работников.

Первые исследования касались экстракции U и индикаторных количеств Np и Pu, наработанных на циклотроне РИ. Извлечение проводилось из азотной кисло-

ты с добавлением высаливателя при использовании диэтилового эфира в качестве экстрагента.



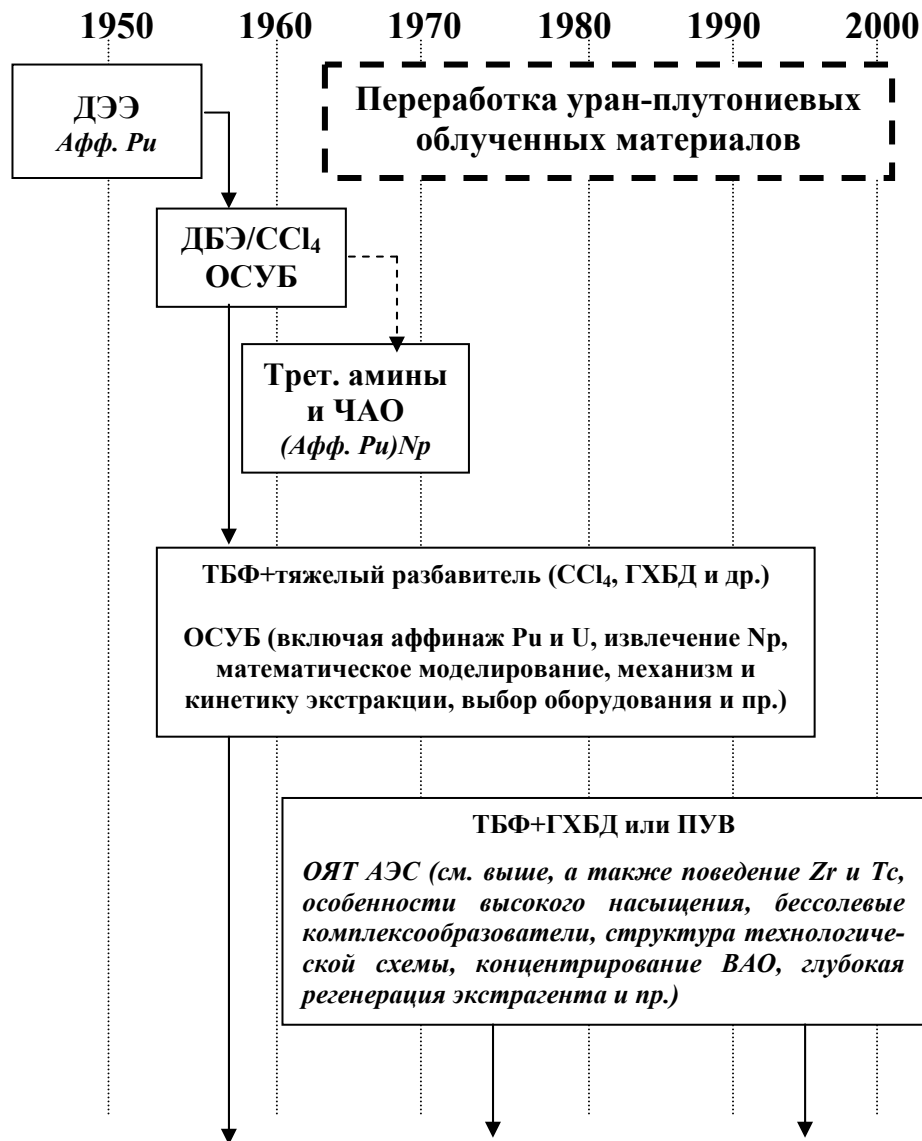
Рис. 1. Чл.-корр. АН СССР
Борис Александрович Никитин
(1905-1951)



Рис. 2. Проф. Михаил Федорович
Пушленков (1904-1994)

Однако очень скоро выяснилась бесперспективность извлечения всего количества урана из облученных блоков с помощью этого экстрагента в силу его большой растворимости, и предпочтение надолго было отдано ацетатному осаждению. Вместе с тем, представления о роли воды в механизме процесса и структуре образующегося гидрато-сольвата стали классическими. Дальнейшие исследования были сосредоточены на экстракционном аффинаже плутония с проведением процесса в центробежных экстракторах, разработанных немецким специалистом Фольмером. Они были доведены до опытно-промышленной стадии, выявившей несовершенство конструкции привода аппаратов и взрывоопасность процесса вследствие разложения диэтилового эфира с образованием алкилперекисей.

После смерти Б.А. Никитина исследования по экстракции были продолжены под руководством В.М. Вдовенко (1906-1978), ранее принимавшего активное участие в этих разработках, который стал директором РИ и членом-корреспондентом АН СССР. Работы этой группы были направлены на продолжение исследований по комплексной экстракции актиноидов из раствора облученных урановых блоков менее растворимым и более устойчивым дибутиловым эфиром. Для снижения пожароопасности к экстрагенту добавляли 15 об.% CCl_4 . Исследования прошли опытно-промышленную проверку на реальном продукте, однако были остановлены из-за слишком высокой концентрации высаливателя.



Б.А. Никитин

*М.П. Ковальская,
В.М. Вдовенко*

В.М. Вдовенко

*М.П. Ковальская, Т.В. Ковалева,
М.Ф. Пушленков, Л.Н. Лазарев,
С.М. Куликов, А.А. Липовский*

В.М. Вдовенко
А.А. Липовский

*А.А. Чайхорский, Б.Я. Галкин,
М.Г. Кузина, С.А. Никитина*

М.Ф. Пушленков
В.Г. Шумков
Б.Я. Зильберман
Е.В. Комаров
Л.Б. Шпунт

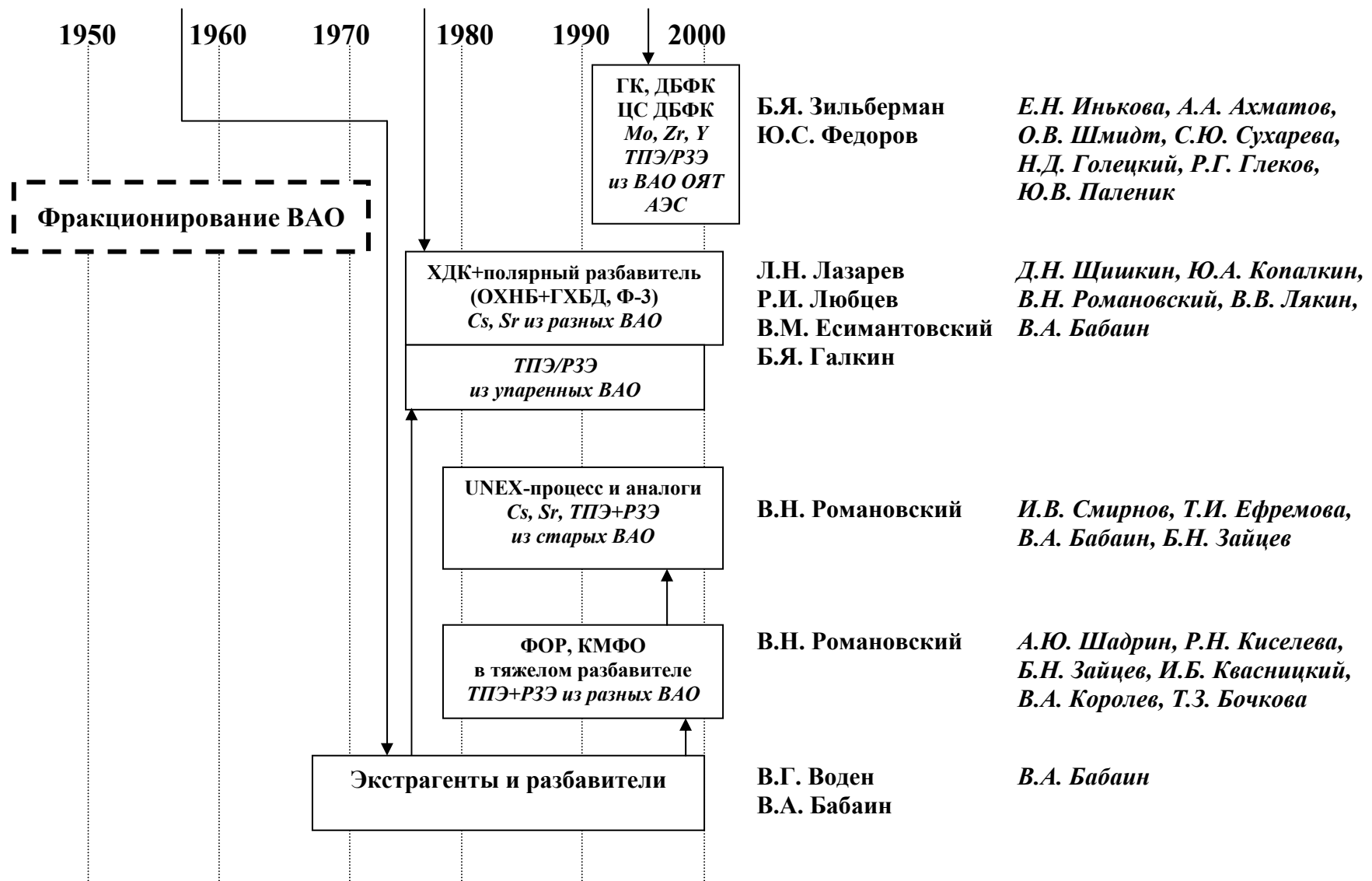
*В.Г. Воден, В.А. Старченко,
О.Н. Шувалов, Н.Н. Щепетильников,
Г.П. Никитина, М.Е. Обухова,
В.В. Лякин, Н.С. Тихонов,
С.М. Куликов, Л.В. Сытник,
Е.Н. Мишин, В.А. Игнатов*

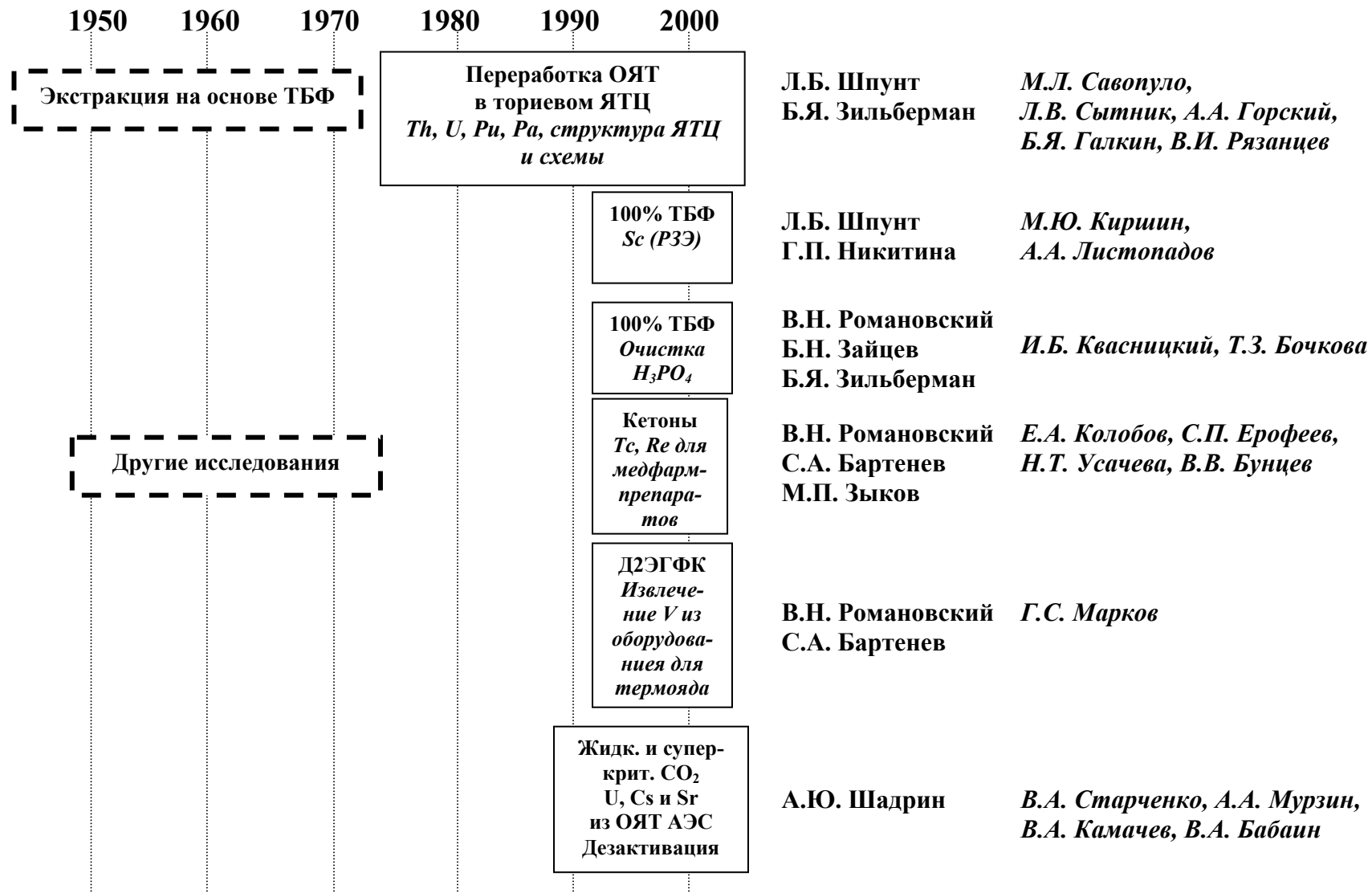
Л.Н. Лазарев
Б.Я. Галкин

*В.Н. Романовский,
А.Н. Тимофеев, В.И. Рязанцев,
В.Г. Васильев, А.П. Криницын,
В.М. Мосяж, Е.Н. Мишин,*

Б.Я. Зильберман
Ю.С. Федоров

*Ю.С. Федоров, Л.В. Сытник,
Л.Я. Поверкова, И.В. Блажева,
В.Ф. Сапрыкин, Д.Н. Кухарев,
М.Н. Макарычев-Михайлов*





Дальнейшие работы этого коллектива разделились на два самостоятельных направления. В рамках одного из них, фактически руководимого д.х.н. А.А. Липовским (1925-1985), первоначально была продолжена линия по разработке методов аффинажа Pu, на этот раз путем его экстракции третичными аминами. Такие же работы параллельно проводились во ВНИИНМ под руководством д.х.н. В.С. Шмидта (1929-1987). Однако этот подход повсеместно в плане прикладной экстракции уступил в радиохимии дорогу трибутилфосфату (ТБФ) как унифицированному экстрагенту, а в практической привязке к осадительной технологии – сорбции Pu, а затем и Np на сильноосновных анионитах, успешно разработанной в РИ и внедренной по инициативе академика Б.П. Никольского (1900-1990) и д.х.н. В.И. Парамоновой (1903-1984), а также академика Б.Н. Ласкорина (1915-1997) из ВНИИХТ. Поэтому исследования группы А.А. Липовского скоро приобрели чисто научный характер с направленностью на исследование структуры сольватов. В частности, спектрометрическими методами была выявлена роль комплексных соединений и водородной связи в аминной экстракции. Однако в 1972 г. с отходом В.М. Вдовенко от дел эти исследования были прекращены.

Другое направление, связанное с испытаниями ядерного оружия, привело к разработке технологии экстракционного выделения вторичных ядерных материалов из продуктов специальных подземных ядерных взрывов, проводимых с целью производства электрической энергии (д.х.н. А.С. Кривохатский и д.х.н. Е.А. Смирнова), однако это направление не получило технического развития и в сводной таблице не отражено.

Третье направление, возглавляемое М.Ф. Пушленковым (рис. 2), начинавшим работы по экстракции под непосредственным руководством Б.А. Никитина, было ориентировано на применение ТБФ для переработки облученного урана и очистки плутония. Эти предложения, первоначально воспринятые окружающими как экзотические, были высказаны в конце 1952 г., еще до I Конференции по мирному использованию атомной энергии, состоявшейся в Женеве в 1954 г. Однако вскоре после нее для проведения такого рода исследований в РИ была организована самостоятельная лаборатория, успешно работающая и поныне, которую д.т.н., проф. М.Ф. Пушленков возглавлял до конца 1985 г., создав школу разносторонних специалистов в области теории и практики экстракции.

Характерной особенностью этого направления было использование негорючего разбавителя ТБФ, в качестве которого был выбран четыреххлористый углерод. Уже в 1958 г. была завершена разработка и совместно с ПО «Маяк» проведены испытания на реальном продукте технологической схемы переработки облученных урановых блоков, включая аффинаж плутония, с проведением процесса в смесителях-отстойниках. Были также выработаны методы регенерации оборотного экстрагента, начаты оригинальные исследования механизма экстракционного процесса, разработка математической модели процесса с проведением расчетов каскада на уникальных в то время ЭВМ, поиски новых экстрагентов и разбавителей, исследования кинетики экстракции актиноидов и продуктов деления, испытания экстракционной аппаратуры. Были проведены первые отечественные исследования экстракционного поведения нептуния. Результаты этих исследований были в несколько трансформированном виде опубликованы в материалах III Женевской конференции (1964 г). Соавторами М.Ф. Пушленкова в этой публикации были В.Г. Шумков (1931-1995), В.И. Землянухин (ПО «Маяк»), Б.Я. Зильберман, В.Г. Воден (1927-1999), О.Н. Шувалов (1931-1995), Н.Н. Щепетильников, являвшиеся руководителями основных научно-

прикладных направлений лаборатории. Работы теоретического плана, направленные на исследование механизма и термодинамики экстракционного процесса, роли синергетных и ассоциированных реагентов и др., возглавлялись д.х.н. Е.В. Комаровым. Приобрели самостоятельное значение также и работы по синтезу фтор-хлорзамещенных экстрагентов и, особенно, разбавителей под непосредственным руководством В.Г. Водена. К сожалению, он вынужден был преждевременно оставить работу, и практические результаты были получены уже позже В.А. Бабаиным.

Работы прикладного плана увенчались успешным переводом на экстракционные методы в 1976-1982 гг. производств по переработке облученных урановых блоков на ПО «Маяк» и Горно-химическом комбинате (Красноярск-26). В качестве экстрагента использовали смесь ТБФ с гексахлорбутадиеном (ГХБД), удачно предложенным Б.Н. Ласкориним с сотрудниками. Характерной особенностью этого внедрения было формирование комплексных научно-производственных бригад, первая из которых была создана на ПО «Маяк» по инициативе директора радиохимического перерабатывающего завода М.В. Гладышева и которые объединили усилия конкурирующих научных организаций и исследовательских подразделений самих предприятий. В разработке аналогичной технологии для Сибхимкомбината (Томск-7) с реализацией ее в пульсационных колоннах видную роль сыграл Л.Б. Шпунт (1936-1998). Особо следует отметить разработку и внедрение на ПО «Маяк» одноциклической экстракционно-сорбционной схемы с раздельной рекстракцией U, Pu и Np непосредственно в I цикле. Основные принципы построения такой схемы актуальны и по сей день (уже применительно к переработке ОЯТ АЭС), хотя наработка оружейного плутония на ПО «Маяк» была закрыта в 1986 г. в связи с начавшимся ограничением вооружений. С этого момента основным направлением работы лаборатории становятся начавшиеся ранее исследования по технологии переработки ОЯТ АЭС, а возглавил лабораторию д.т.н. Б.Я. Зильберман.

Для проведения исследований по технологии переработки ОЯТ АЭС в 1970 г. под началом ученика В.М. Вдовенко д.т.н. Л.Н. Лазарева начинается освоение “горячего” корпуса в Гатчине; непосредственным руководителем работ по отработке экстракционной технологии на реальных растворах становится Б.Я. Галкин. Уже в 1972 г. на экстракционном стенде в возглавляемой им лаборатории совместно с сотрудниками М.Ф. Пушленкова были получены основополагающие данные по извлечению Np из растворов ОЯТ, использованные в технологии завода РТ-1 (ПО «Маяк»). Были получены также данные о необходимом качестве углеводородного разбавителя ТБФ. С переходом Л.Н. Лазарева в конце 1972 г. на должность директора РИ (гл. науч. сотр. с 1989 г.) создается специальное отделение (ныне Отделение прикладной радиохимии), которым бессменно руководит Р.И. Любцев и в рамках которого были сконцентрированы все исследования по научному обоснованию, совершенствованию и внедрению технологии обращения с облученными блоками и топливом АЭС, а также жидкими отходами от их переработки, включая их упаривание и регенерацию азотной кислоты ректификацией.

Дальнейшие пути упомянутых двух коллективов в области технологии переработки ОЯТ АЭС на довольно длительный срок разошлись, поскольку лаборатория М.Ф. Пушленкова сосредоточилась на реализации технологии переработки облученных урановых блоков. По завершении этих работ в 1983 г. комплексная бригада исследователей на ПО «Маяк», в состав которой входила и группа сотрудников лаборатории М.Ф. Пушленкова, вернулась к разработке и испытаниям на реальном растворе одноциклической технологии переработки ОЯТ АЭС применительно к существ-

вовавшим в то время задачам расширения производства на заводе РТ-1. В рамках этих исследований под руководством Б.Я. Зильбермана были получены данные по раздельной реэкстракции Pu и Np в присутствии Tc и разработан метод селективной восстановительной реэкстракции последнего, выявлено поведение дочерних продуктов распада актиноидов (в первую очередь ^{228}Th) как определяющего фактора загрязнения Np и U при хранении их готовых форм, исследованы методы получения Np(III) в азотнокислых растворах и его восстановительные свойства. Одновременно Л.В. Сытником была предложена ацетогидроксамовая кислота (АГК) для комплексующей реэкстракции Pu и Np. Была также выявлена аномально высокая экстрагируемость Pu и Np, а также Zr при насыщении экстракта ураном (Ю.С. Федоров) и проанализировано их возможное накопление при запредельном насыщении.

В это же время исследования в Гатчинском НЭК были преимущественно направлены на разработку технологии переработки ОЯТ ВВЭР-1000 для проектируемого завода РТ-2 на ГХК. В рамках этих исследований, включая многочисленные эксперименты на реальном продукте, были углублены представления о поведении Np и предложен первоначальный вариант схемы I цикла с реэкстракцией Np до реэкстракции Pu (Б.Я. Галкин, А.Н. Тимофеев), серьезно исследовано экстракционное поведение Tc и разработана технологическая схема его производства, реализованная на ПО «Маяк» (Г.А. Акопов, А.П. Криницын), получены данные стендовой проверки экстракционных операций в вибрационных колоннах (Е.Н. Мишин), предложен способ улавливания иода-129 экстракцией в 100% ТБФ (В.К. Исупов, А.Б. Колядин).

В этот же период времени под руководством Л.Н. Лазарева, Р.И. Любцева и Б.Я. Галкина была начата работа по адаптации методики для выделения Cs и Sr экстрагентом на основе хлорированного дикарболлида кобальта (ХДК) при добавлении полиэтиленгликоля (ПЭГ), предложенной учеными из Чехословакии, к задачам промышленного их выделения из рафината I цикла переработки ОЯТ АЭС. Она была успешно реализована на ПО «Маяк», где для этих целей была отремонтирована уже существовавшая опытно-промышленная экстракционная установка. Она проработала более 10 лет и затем была реконструирована под увеличенную производительность. Первоначально в качестве разбавителя использовалась смесь ГХБД с орто-хлорнитробензолом. В дальнейшем она была заменена мета-нитротрифторметилбензолом (МНБТФ или Ф-3). Были проведены также исследования, а затем и опытные операции по извлечению ТПЭ и РЗЭ из такого рода растворов при понижении их кислотности, а затем и их разделению. Достигнутая глубина выделения радионуклидов позволила постепенно расширить функции процесса от наработки больших партий соответствующих радионуклидов до переработки высокоактивных отходов (ВАО) различного происхождения с целью локализации долгоживущих радионуклидов. К концу 2001 г. на установке УЭ-35 ПО «Маяк» было переработано 1200 м^3 ВАО и выделено 50 млн. кюри цезия и стронция. Выделенный концентрат радионуклидов направляется на отверждение, что позволяет удвоить удельную активность стеклоблоков, тем самым удешевив локализацию отходов и их хранение. Одновременно сокращается объем ВАО и высвобождаются емкости, в которых они хранились.

Авария на Чернобыльской АЭС, а затем и распад СССР самым пагубным образом сказались на развитии атомной энергетики и, соответственно, на планах переработки ОЯТ. Одновременно резко ужесточились экологические требования к такого рода производствам. Эти обстоятельства потребовали консолидации усилий всех участников работы в РИ вокруг новой концепции переработки ОЯТ, выдвинутой

Л.Н. Лазаревым и развитой в дальнейшем Б.Я. Зильберманом, В.М. Есимантовским и Ю.С. Федоровым. В этой концепции переработка ОЯТ рассматривается как равноправное фракционирование всех долгоживущих радионуклидов (то есть элементов, имеющих изотопы с периодом полураспада более 100 лет), а извлечение U и Pu является получением утилизируемой фракции, в отличие от других фракций, подлежащих локализации (хранению и захоронению) в соответствии с категорией радиотоксичности. Координация исследований в этом направлении, проводимых с участием многих организаций, энергично осуществлялась Р.И. Любцевым применительно к задачам модернизации проекта завода РТ-2, поскольку его строительство к 1991 г. было законсервировано.

Основой модернизированного технологического процесса I цикла стали проведенные в предшествующие годы исследования по полному извлечению U, Pu, Np, Tc и Zr разбавленным трибутилфосфатом в головном экстракторе и разделению Pu с Np от U с Tc при использовании АГК (проф. Б.Я. Зильберман и д.х.н. Ю.С. Федоров). Однако такая структура I цикла была достаточно громоздка, что привело к необходимости проведения исследований по ее дальнейшему совершенствованию, поскольку строительство завода РТ-2 было вновь отложено. При этом принималось во внимание решение уже на технологическом уровне задач нераспространения опасных ядерных материалов путем получения Pu в смеси с частью урана в пропорции, необходимой для получения топлива быстрых реакторов или (что в технологическом плане то же самое) мастер-смеси МОХ-топлива для реакторов типа ВВЭР. Анализ показал, что для решения этой задачи требуется предварительная глубокая очистка U и Pu от Tc и Np, что изменяет структуру экстракционного цикла.

В рамках изложенного выше подхода была также обоснована необходимость извлечения Mo из высокоактивного рафината для предотвращения выпадения молибденовой кислоты и/или молибдата циркония при его упаривании, для чего предлагалась распределяемая между фазами добавка комплексона кислотного характера, которая затем могла быть удалена на стадии карбонатной промывки (принцип совместимости с ТБФ). Сначала для этих целей была предложена и испытана смесь гидроксамовых кислот C₆ – C₉ (ИМ-50), а затем дибутилфосфорная кислота (ДБФК) – точнее, их растворы в 30% ТБФ. Исследование свойств последней показало, что по мере накопления следов Zr в растворе ДБФК в 30% ТБФ экстракционные свойства экстрагента усиливаются, и он приобретает способность извлекать ТПЭ и РЗЭ из достаточно кислой среды (1-2,5 моль/л HNO₃), что может быть использовано в целях их извлечения и достаточно глубокого разделения. В химическом аспекте была выявлена особая роль ТБФ в этой системе как сольватирующего агента. Такой технологический подход в сочетании с вышеупомянутым I циклом новой структуры получил название “процесс Суперпурекс”.

Для фракционирования долгоживущих радионуклидов, содержащихся в высокоактивном рафинате (Cs и Sr, а также ТПЭ совместно с РЗЭ), в проекте завода РТ-2 был предложен двухцикличный процесс на основе ХДК с разными уровнями кислотности, что обеспечивалось межцикловым упариванием высокоактивного рафината (после извлечения Mo) с последующим разбавлением кубового остатка (В.М. Есимантовский, Б.Я. Зильберман, В.Ф. Сапрыкин). Это решение послужило толчком к составлению полного материального баланса технологического процесса с учетом прямых и обратных связей между разделительными (экстракционными) циклами и стадиями концентрирования растворов с последующим получением твер-

дого конечного продукта, принимая во внимание возврат компонентов рабочей среды и поведение продуктов разложения различных реагентов.

Интенсивная работа по фракционированию долгоживущих радионуклидов с использованием ХДК породила комплекс исследований по ликвидации ВАО, накопленных в результате предшествующей наработки Рц в военно-технических целях. Работы в этом направлении возглавил д.т.н. В.Н. Романовский с прицелом на переработку как отечественных, так и зарубежных “исторических” отходов. Этот вид отходов характеризуется относительно низким уровнем содержания долгоживущих радионуклидов, что позволяет, с одной стороны, при глубоком их извлечении очистить засоленный водный раствор до уровня низко- или среднеактивных радиоактивных отходов, а с другой - не требует большой емкости экстрагента.

Выяснилось, что в данном случае задача не может быть решена использованием одного экстрагента (ХДК) из-за гидролиза и выпадения в осадок ряда элементов при частичной нейтрализации исходного продукта и его засоления при подготовке к экстракции ТПЭ и РЗЭ, вследствие чего требуется применение другого экстрагента, который мог бы извлекать последние из кислой засоленной среды, содержащей также продукты коррозии нержавеющей стали. Для этих целей рассматривались различные экстрагенты в “тяжелом” разбавителе. Так, Б.Н. Зайцевым был предложен разнорадикальный фосфиноксид (ФОР) в ГХБД или 30% ТБФ с ГХБД, А.Ю. Шадрин и В.А. Бабаин в содружестве с ГЕОХИ и ПО «Маяк» показали возможность использования более дешевых карбомаилфосфиноксидов (КМФО) при растворении их в Ф-3. И.В. Смирновым с сотрудниками была предложена смесь ХДК с фосфорилированным ПЭГом, что позволило сделать шаг вперед к совместному выделению Cs, Sr, РЗЭ и ТПЭ за одну операцию и провести их совместную реэкстракцию. Радикальным решением этой задачи явился «UNEX-процесс», предложенный В.Н. Романовским с сотрудниками в содружестве с Айдахской национальной лабораторией (США), в рамках которого была совмещена экстракция целевых радионуклидов с помощью ХДК и КМФО в Ф-3 или трифторметилфенилсульфоне.

К экстракционным разработкам, выполненным в той или иной привязке к уран-плутониевому ОЯТ и соответствующему топливному циклу, примыкает целый ряд менее значительных работ, базирующихся на применении ТБФ. К их числу относятся исследования по переработке ториевых облученных материалов с выделением урана-233 в привязке как к задачам “малой атомной энергетики” для космических объектов, так и для ториевого ЯТЦ. Основной особенностью последнего вопроса является решение задачи рециклирования тория с учетом высокого содержания тория-228 как дочернего продукта урана-232 (Б.Я. Зильберман, Л.В. Сытник). Большой практический интерес представляют исследования по очистке фосфорной кислоты из апатитового сырья экстракцией в 100% ТБФ с глубокой очисткой от серной кислоты путем введения в промывной раствор иона щелочного катиона (Б.Н. Зайцев, Б.Я. Зильберман и др.). Также с помощью 100% ТБФ было предложено выделять скандий с очисткой от РЗЭ (Г.П. Никитина, Л.Б. Шпунт).

Из экстракционных методов, не связанных с применением ТБФ, следует особо отметить получение ^{99m}Tc и ^{188}Re кетонами для производства радиофармпрепаратов (В.Н. Романовский, С.А. Бартенев, М.П. Зыков). Представляют интерес работа тех же авторов по переработке облученных ванадиевых корпусов термоядерных реакторов экстракцией ванадия с помощью Д2ЭГФК, а также интенсивно развивающиеся исследования по экстракции различных элементов растворами летучих комплексонов в жидком CO_2 (А.Ю. Шадрин).

Подводя итоги сказанному, можно смело утверждать, что экстракционные методы в радиохимической технологии далеко не исчерпали своих возможностей, что определяет необходимость их дальнейшего поступательного развития с учетом главного аспекта – минимизации объема хранимых или захораниваемых радиоактивных отходов, и в первую очередь, долгоживущих радионуклидов.

Литература

1. Радиевый институт им В.Г. Хлопина. К 50-летию со дня основания. / Под ред. Б.П. Никольского. Л.: Наука, 1972. – 244 с.
2. Радиевый институт им В.Г. Хлопина. К 75-летию со дня основания. / Под ред. Е.И. Ильенко. СПб.: РИ, 1997. - 340 с.

Investigations on solvent extraction in Khlopin Radium Institute

V.Ya. Zil'berman, V.N. Romanovsky

Investigations on solvent extraction started in Khlopin Radium Institute in 1946 for needs of weapon plutonium production using diethyl ether. Only since 1976 extraction methods were used for reprocessing of irradiated uranium in large commercial scale with the use of TBP diluted with chlorinated hydrocarbons. The extraction processes were later modified for NPP spent fuel reprocessing in combination with partitioning of all long-lived radionuclides. At the same time extraction of the last ones was developed for treatment of historical waste, generated during weapon programme, using ChCoD in combination with organo-phosphorus solvents, in sequence or in combination. Other applications of extraction methods are noticed as well.

Радиохимические исследования последствий ядерных взрывов, тяжелых радиационных аварий и захоронения радиоактивных отходов

Ю.В. Дубасов

В статье рассматриваются выполненные за последние 15 лет работы, посвященные радиоэкологическому обследованию территорий Семипалатинского и Центрального полигонов РФ. В 1989-1993 гг. проводилось радиологическое обследование вокруг Семипалатинского полигона, включая населенные пункты, которые в период проведения атмосферных ядерных испытаний оказались в зоне образования радиоактивных следов. Современные уровни загрязнения превышают уровни глобальных выпадений не более чем в 10 раз, эффективная доза облучения не превышает 1 мЗв/год, и поэтому не требуется какого-либо вмешательства. В ходе осуществления мониторинга Центрального полигона РФ установлено, что концентрация радионуклидов в ручьях и реках, впадающих в пролив Маточкин Шар, ниже допустимых уровней. Приводятся результаты расчета скорости миграции долгоживущих трансурановых радионуклидов в гранитоидном массиве. Представлена информация о разработанном и изготовленном сотрудниками отдела полностью автоматическом комплексе для измерения концентрации радиоактивных изотопов ксенона в атмосфере "АРИКС-01" и его модификациях, позволяющем осуществлять мониторинг радионуклидов ксенона, начиная с фоновых концентраций.

В начале 1947 г. в Радиевом институте АН СССР (РИАН) было получено Постановление Совета Народных Комиссаров СССР за подписью И.В. Сталина с Задачей на разработку радиохимического метода определения коэффициента полезного действия (кпд) при атомных взрывах. Ответственным исполнителем работы в этом постановлении был назван Г.М. Толмачев. Осенью 1999 г. в стране был отмечен 50-летний юбилей испытания первой советской атомной бомбы.

Участие Радиевского института и его сотрудников в ядерных испытаниях продолжалось почти 40 лет. В этих работах участвовали сотрудники химического, физического и геохимического отделов. С 1973 г., когда, наряду с другими отделами, был организован отдел радиохимических исследований при спецвзрывах, возглавляемый профессором А. С. Кривохатским, почти все исследования в указанном направлении были сконцентрированы в этом отделе. Материалы об испытаниях ядерных зарядов и мирных ядерных взрывах, в которых участвовали сотрудники нашего института, изложены в [1]. В настоящем сообщении представлены некоторые результаты работ отдела за последние 15 лет.

Спецификой отдела были полевые работы в экспедиционных условиях. Благодаря усилиям А.С. Кривохатского, В.И. Кацапова и Ю.Г. Петрова, была создана радиометрическая автомобильная колонна, оснащенная всем необходимым оборудованием и экипированная для автономной работы в полевых условиях в любое время года.

Именно поэтому сотрудники отдела в количестве около 20 человек в первых числах мая 1986 г. выехали в район Чернобыльской АЭС, развернули спектрометрическую и аэрозольную лаборатории, начали проводить геохимические исследования миграции радионуклидов. Эти работы, как на самой ЧАЭС, так и в зоне радиоактивного загрязнения, продолжались до 1992 г.

С момента прекращения всех ядерных взрывов и испытаний, сотрудники отдела начали проводить радиохимические исследования последствий ядерных взрывов. Это не значит, что такие исследования не велись в период, когда создавался ядерный щит. Нет, они проводились и довольно основательно в соответствии с установленными в тот период нормативными санитарно-гигиеническими нормами. Это теперь разного рода журналисты усиленно продолжают поддерживать огонь радиофобии, боясь, что он погаснет.

Вот совсем недавно в журнале “Нефть России” появился пасквиль “Контуженная держава” [2]. Там сказано, что “...за 10 лет мускулы державы обвисли, она перестала тешиться ядерными игрушками и вступила на путь капиталистического развития. Народ стал думать, где добыть хлеб насущный и перестал обращать внимание на опасности и катастрофы, хотя их становилось все больше. Это побудило журналистов в погоне за рейтингом все сильнее сгущать краски и искать кошмарные подробности даже там, где их на самом деле не было”.

Эта цитата как нельзя лучше объясняет шумиху, которая то и дело возникает вокруг атомной отрасли.

Еще до полного прекращения ядерных испытаний, в 1989 г., вышел ряд правительственных постановлений о проведении комплексных радиоэкологических исследований для изучения обстановки в районах Семипалатинского и Новоземельского полигонов. Радиевый институт им. В. Г. Хлопина был назначен головным исполнителем. Предстояло оценить радиоэкологические последствия ядерных испытаний на территории СССР.

За это время, начиная с 1989 г., было проведено детальное обследование территории как самого Семипалатинского полигона, так и его окрестностей за пределами периметра. Было обследовано 5 населенных пунктов (Долонь, Кайнар, Караул, Мостик и Саржал). В населенных пунктах измерялось содержание радионуклидов в почве, питьевой воде, воздухе и сельхозпродукции. Контроль за радиоактивностью аэрозолей осуществлялся в 10 населенных пунктах непрерывно в течение полутора лет. Результаты исследований были представлены на международной конференции в Антверпене по реабилитации загрязненных территорий в 1993 г. и затем опубликованы [3, 4]. Было показано, что современные уровни загрязнения превышают уровни глобальных выпадений не более, чем в 10 раз, эффективная доза облучения не превышает 1 мЗв/год и поэтому не требуется какого-либо вмешательства.

В последующем наши исследования были подтверждены работами экспертов МАГАТЭ в 1994-1995 гг., а также исследованиями многих экспертов ФРГ и Австрии [5-7].

С 1994 по 2000 гг. сотрудники отдела провели большой цикл исследований на Опытном поле бывшего Семипалатинского полигона, где было испытано более 130 ядерных зарядов в атмосфере, в том числе 30 наземных ядерных взрывов. Были выполнены также исследования на площадках горного массива Дегелен, где в период с 1961 по 1989 гг. было проведено 209 испытаний в горизонтальных горных выработках – штольнях. Мощности ядерных зарядов, испытанных в штольнях, составили от 0,001 до 125 кт. Исследования проводились в рамках выполнения контрактов с Агентством по уменьшению угрозы США (DTRA) и при поддержке Минатома России. Параллельно с нами в исследованиях участвовали сотрудники организованного в 1992 г. Национального ядерного центра Республики Казахстан, дислоцированного в основном на территории бывшего Семипалатинского полигона, в г. Курчатове.

В период с 1996 по 2000 гг. на Семипалатинском полигоне проводилось запечатывание всех имеющихся 180 штолен в рамках программы США (так называемой Программы Нана-Лугара). Нами была изучена радиационная обстановка на приустьевых площадках и припортальных участках более чем 60 штолен до и после их запечатывания. Следует отметить, что после запечатывания радиационная обстановка в большинстве случаев улучшилась. В этот же период проводился радионуклидный мониторинг водных потоков из 9 штолен, которые продолжают испускать воду даже после запечатывания.

В таблицах 1 и 2 представлены некоторые результаты наблюдений последних лет за водными потоками бывшего Семипалатинского полигона [8].

Таблица 1

Результаты определения содержания ^3H , ^{90}Sr , ^{137}Cs и $^{239+240}\text{Pu}$ в пробах воды, отобранных в мае-июне 1999 г. и октябре 2000 г. из ручьев после запечатывания штолен

Ручей из штольни	Расход воды в ручье, л/мин	^3H , кБк/л	^{137}Cs , Бк/л	^{90}Sr , Бк/л	$^{239+240}\text{Pu}$, Бк/л
Май - июнь 1999 г.					
А-1Ш	100/-	170±17	340±50	35,1± 1,4	0,035 ±0,004
504	6,0/500*	260±26	680±80	64±2,5	0,003±0,001
503	25/500	150±15	108±18	190±13	7,37±0,52
511	35/600	270±27	161±27	1,24±0,16	0,0010±0,0005
609	15/600	15±1,5	260±31	373±26	0,19±0,02
176	180600	420±42	340±51	87±6,0	0,0076±0,0023
165	15/300	290±29	613±73	283±20	0,004±0,001
104	240/230	240±24	656±78	250±17	0,037±0,004
177	350/270	870±87	687±82	1,63±0,09	0,191±0,020
Октябрь 2000 г.					
503	80	177 ± 18	93±19	160±11	7,20±0,72
165	30	321 ± 32	794 ± 160	311±12	0,003±0,001
104	300	224 ± 22	385 ± 77	262 ± 10	0,025±0,005
177	180	863 ± 86	687±82	1,63±0,09	0,125±0,019
Уровень вмешательства		7,7	11	5	0,56

* *Примечание.* В знаменателе даны результаты измерения расхода воды при обследовании в 1998 г.

Из данных таблицы 1 следует, что концентрация таких долгоживущих радионуклидов как ^3H , ^{90}Sr и ^{137}Cs , значительно превышает допустимый уровень – уровень вмешательства. И только по плутонию этот уровень превышен всего лишь в ручье из штольни 503. Ручьи из указанных 9 штолен в конечном счете вливаются в естественные ручьи Узунбулак, Карабулак, Байтлес и другие.

Таблица 2

Результаты определения содержания ^{90}Sr , ^{137}Cs и $^{239+240}\text{Pu}$ в пробах воды, отобранных в мае-июне 1999 г. и октябре 2000 г. из естественных ручьев в долинах массива Дегелен, Бк/л

Место и дата отбора проб	^{137}Cs	^{90}Sr	$^{239+240}\text{Pu}$
Узун-Булак, 31.05.99/19.10.00	0,68/0,34	0,77/0,67	0,0033/0,0023
Узун-Булак, 09.06.99/25.10.00	0,86/-	0,97/0,82	0,0021/<0,003
Узун-Булак, нижнее течение, в месте пересечения с кольцевой дорогой	0,60/-	0,32/-	0,0031/-
Кара-Булак, 6 км от площадки "Г", 31.05.99 /23.10.00	0,094/5,9	0,10/2,4	0,010/0,0043
Верхний Бейтлес, в месте пересечения с кольцевой дорогой	0,23	0,094	0,0046
Бейтлес, в месте пересечения с кольцевой дорогой, 31.05.99/18.10.00	0,13/1,2	1,0/0,35	0,0047/0,0017
Артезианская скважина 385 в долине южной части массива Дегелен, 31.05.99 /20.10.00	0,93/0,15	1,04/0,73	0,0012/0,0017

Из данных таблицы 2 следует, что концентрация таких долгоживущих радионуклидов как ^{90}Sr , ^{137}Cs и $^{239+240}\text{Pu}$ существенно ниже величин уровня вмешательства. И только концентрация трития в этих ручьях в 10-20 раз превышает допустимый уровень. Следовательно, здесь мы имеем некий эффект разбавления, а также сорбции радионуклидов водными взвесями.

Штольневые ручьи несут основную угрозу окружающей среде в весенний паводковый период, когда они разливаются по долинам горного массива Дегелен, а затем донные отложения высыхают и остаются в долинах, обуславливая, таким образом, повышение радиационного фона. По нашему мнению, большая часть территории этих долин должна иметь статус санитарно-защитной зоны, исключая посещение зоны населением.

Радиационный мониторинг Центрального полигона на Новой Земле сотрудники нашего отдела проводят с 1991 г. В отличие от Семипалатинского полигона, на Центральном полигоне радиационная обстановка более благоприятная. Там, на берегу губы Черной, где в 1957 г. был проведен наземный ядерный взрыв мощностью 40 кт, сохраняется остаточное загрязнение [9]. В этой зоне нами организована контрольная площадка для изучения сноса радионуклидов с береговой части в море. Обстановка стабилизировалась, и за последние 10 лет существенных изменений не отмечено, что свидетельствует об отсутствии заметного сноса радионуклидов в море. Ведется также мониторинг водных потоков, стекающих с гор Моисеева и Лазарева, где проводились подземные ядерные испытания в горизонтальных штольнях. Эти ручьи и реки впадают в пролив Маточкин Шар, соединяющий Баренцево и Карское моря. Из данных таблицы 3 следует, что через 15 лет произошло снижение концентрации указанных радионуклидов и их содержание на много порядков ниже допустимых норм [10].

Из данных таблиц 3 и 4 видно, что концентрация ^{90}Sr и ^{137}Cs в питьевой воде полигона на Новой Земле на протяжении многих лет остается на несколько порядков ниже допустимых норм. В таблице 5 даны результаты наблюдений за концентрацией трития в водных источниках Центрального полигона на протяжении последних лет.

Таблица 3

Концентрация радионуклидов стронция и ^{137}Cs в питьевой воде поселков архипелага Новая Земля, Бк/л

Место отбора	1977 г. [10]		1992 г.	
	$^{89+90}\text{Sr}$	^{137}Cs	^{90}Sr	^{137}Cs
Поселок Белушья Губа, водопровод	0,16	0,09	0,009	0,015
Поселок на Паньковой Земле	0,15	0,044	–	–
Поселок Северный, водопровод	0,15	0,12	0,005	0,011
Насосная станция водопровода для поселков Белушья Губа и Рогачево	–	–	0,004	0,026
Озеро Гагачье	–	–	0,01	0,022
Система озер, западнее пос. Рогачево	–	–	0,006	0,026
Допустимая концентрация согласно НРБ-76/87	15	555	15	555

Таблица 4

Концентрации ^{137}Cs в некоторых водных пробах архипелага Новая Земля, отобранных в 2000-2001 гг., Бк/л

Место отбора пробы	^{137}Cs
2000 г.	
Губа Черная	0,093
Река Шумилиха	0,10
2001 г.	
Река Шумилиха	0,04
Поселок Северный, питьевая вода	0,14
Озеро Наливное	0,10
Уровень вмешательства согласно НРБ-99	11

Было замечено, что концентрация трития в воде меняется в зависимости от сезона и гидрологических условий. И хотя в настоящее время уровень концентраций не превышает установленных допустимых норм, тем не менее, требуется проведение более детальных наблюдений, как в пресных источниках, так и в проливе Маточкин Шар.

В 1999 г. с участием сотрудников отдела выпущено 2-е издание книги по ядерным испытаниям на Новой Земле [9], в настоящее время книга переведена на английский язык и готовится к выпуску в МАГАТЭ.

Таблица 5

Концентрация трития в воде ручьев и реки Шумилихи в районе поселка “Северный”
на острове Южный архипелага Новая Земля, кБк/л

Место отбора проб	1976*	1977*	1978*	1979*	1992	1997	2000
Западный склон г. Черной	9,25	3,0	–	–	–	–	–
Северный склон г. Черной	–	–	4,8	–	–	–	–
Ручей на северном склоне г. Лазарева	0,30	–	0,37	–	0,44	–	–
Ручей Журавлевка - правый приток реки Шумилихи	–	–	17,0	10,7	–	10,0	–
Река Шумилиха, до впадения в нее р. Журавлевки	–	–	0,18	0,22	–	–	–
Шумилиха, в среднем течении	–	–	–	–	0,48	–	–
Устье реки Шумилихи	–	0,96	–	–	0,59	1,1	5,8
Ручей, впадающий в оз. Питьево-1	–	–	–	–	–	2,8	4,9
Поселок Северный, питьевая вода	–	–	–	–	–	2,8	1,2
Ручей Безымянный	–	–	–	–	–	<0,1	1,0
Пролив Маточкин Шар, южная Прибрежная зона, в 3 км на СВ от устья р. Шумилихи	–	–	–	–	–	<0,1	1,2
Допустимая концентрация–НРБ-76/87, НРБ-99	–	–	–	–	15	–	7,7

* *Примечание.* По данным работы [11].

В августе-сентябре 1993 г. группа сотрудников Радиевого института им. В.Г. Хлопина, Военно-Морского флота РФ и РИЦ “Курчатовский институт” на исследовательском судне “В. Каврайский” проводила радиационное обследование мест захоронения радиоактивных отходов в Карском море и заливах архипелага Новая земля.

Были обследованы заливы Абросимова, Степового, Цивольки, Ога, Седова, Течений, Благополучия, губа Черная, а также Новоземельская впадина. В результате проведенных исследований в местах морских захоронений радиоактивных отходов аномалий с высокими параметрами радиационной обстановки не обнаружено [12].

В 1996-1999 гг. сотрудниками нашего отдела проводились полевые и лабораторные исследования в районе Тоцка, где в 1954 г. проходили общевоинские учения с применением атомного оружия. Получены экспериментальные результаты, которые позволили оценить современное состояние радиационной обстановки ближней зоны возможного влияния воздушного ядерного взрыва. Обследована территория эпицентра в радиусе 0,5 км и площадь следа ближних выпадений шириной 40 км и протяженностью 110 км по направлению переноса. Изучено распределение радионуклидов по глубине почвенных разрезов и по площади. В эпицентральной зоне в настоящее время в заметных концентрациях сохраняются только наведенные ней-

тронами ядерного взрыва радионуклиды, ^{60}Co и ^{152}Eu . Наши исследования позволили сделать вывод, что следа выпадений продуктов деления как такового после взрыва не было. Максимальные превышения над региональными (областными) значениями глобального фона для зоны ближнего следа могут составлять по ^{137}Cs , ^{90}Sr и $^{239+240}\text{Pu}$ не более 1,5-2 раз. Тот факт, что изотопный состав плутония не отличается от изотопного состава плутония в глобальных выпадениях, указывает на отсутствие выпадений в ближней зоне продуктов деления ядерного взрыва. По всем выявленным параметрам обследованная территория предполагаемого следа ближних выпадений Тоцкого воздушного ядерного взрыва 1954 года в настоящее время не относится к зонам радиоактивного загрязнения.

За последние годы проводились исследования современной радиационной обстановки на объектах, где в 1960-1980-е годы осуществлены мирные подземные ядерные взрывы различного назначения. Такими объектами исследований для нашего института являлись площадки “Вега” (Астраханская область), “Сапфир” и “Магистраль” (Оренбургская область), объекты “Кратон-3” и “Кристалл” в Якутии (очередное радиационное обследование объектов “Кратон-3” и “Кристалл” закончено в 2001 г.). Показано, что на объекте “Кратон-3”, где в 1978 г. произошел частичный выброс радионуклидов, сохраняется зона радиационного контроля, хотя там население и не проживало. В настоящее время готовятся дополнительные рекультивационные мероприятия.

По инициативе профессора А.С. Кривоухатского в 1975 году в отделе были начаты работы по научному обоснованию возможности использования практически сухих подземных емкостей большого объема в залежах каменной соли на площадке Азгир (Республика Казахстан), созданных с помощью подземных ядерных взрывов, для целей захоронения радиоактивных отходов АЭС низкого и среднего уровня активности.

Совместно с ВНИПИПТ, ВНИИАЭС на основании проведенных исследований была показана принципиальная возможность надежной изоляции радионуклидов средней продолжительности жизни в глубоких залежах каменной соли. Был поставлен вопрос о создании на площадке Азгир демонстрационного пункта захоронения средне- и низкоактивных отходов АЭС. Была показана экономическая целесообразность создания указанного пункта и его техническая осуществимость. Однако из-за распада СССР исследования по этому пункту захоронения были прекращены. Тем не менее, в Казахстане эта идея не отвергается, и какие-то работы в этом направлении продолжают.

Совместно с ВНИПИЭТ и Невским производственным геологическим управлением были подготовлены предложения по созданию на базе Ленспецкомбината регионального могильника радиоактивных отходов Северо-Западного региона в мощных залежах кембрийских глин в Ленинградской области. Из-за противодействия местных органов власти данное направление не получило дальнейшего развития.

В 1986 году мы участвовали в выборе приемлемых участков для удаления радиоактивных материалов, возникающих при дезактивационных работах на ЧАЭС. В результате было создано слабозаглубленное хранилище твердых РАО “Бураковка” с гидроизолирующим экраном из уплотненной местной глины. Исследования в районе захоронений на участках “Рыжий лес” и “Промстройбаза” показали, что за 6-летний период миграция основных радионуклидов в направлении фильтрации грунтовых вод не превысила единиц метров.

В связи с необходимостью корректировки проекта создания завода РТ-2 на ГХК (Красноярск-26), при которой предусматривалось захоронение отвержденных высокоактивных отходов, сотрудники нашего отдела приняли участие в обосновании возможности захоронения таких отходов в глубокие хранилища в скальных породах. Были разработаны основные критерии по выбору участка для создания хранилища глубокого заложения. В результате комплексных работ были намечены для дальнейших исследований две площадки в пределах Нижнеканского гранитоидного массива (“Каменный” и “Итатский”).

С позиций многобарьерной концепции были рассмотрены удерживающие свойства компонентов инженерных барьеров – матрицы отходов, материалов упаковок и гидроизолирующих песчано-глинистых экранов, естественного барьера – породы горного массива. На основании этих данных была проведена оценка возможной скорости миграции некоторых долгоживущих радионуклидов с подземными водами в ослабленных зонах горного массива. Оценка показала, что скорость миграции радионуклидов в породах может составить величины, не превышающие значений, приведенных в таблице 6.

Таблица 6

Сравнительная оценка удерживающих свойств монолитных гранитоидов Нижнеканского массива и пород ослабленной зоны относительно долгоживущих радионуклидов

Нуклид	$K_d, \text{см}^3/\text{г}$	Скорость миграции, м/год	
		Монолитная порода	Ослабленные зоны
		Пористость = $5 \cdot 10^{-3}$ $K_\phi = 3 \cdot 10^{-7}$ м/сут. Гидравлический градиент = 0,01 Действительная линейная скорость миграции воды $\sim 2 \cdot 10^{-4}$ м/год	Пористость = $5 \cdot 10^{-2}$ $K_\phi = 3 \cdot 10^{-5}$ м/сут. Гидравлический градиент = 0,01 Действительная линейная скорость миграции воды $\sim 2 \cdot 10^{-2}$ м/год
Цезий	$(5-9) \cdot 10^2$	$(4-8) \cdot 10^{-10}$	$(0,8-1,3) \cdot 10^{-7}$
Плутоний	$(7-9) \cdot 10^2$	$(6-8) \cdot 10^{-10}$	$(0,8-1) \cdot 10^{-7}$
Америций	$(1,3-3,4) \cdot 10^3$	$(1-3) \cdot 10^{-10}$	$(2-5) \cdot 10^{-8}$
Нептуний (V)	4 – 28	$(0,1-1) \cdot 10^{-8}$	$(0,2-2) \cdot 10^{-5}$

Примечание: Скорость миграции нептуния (V) $2 \cdot 10^{-5}$ м/год соответствует времени его миграции на 1 м за 50 000 лет.

K_d – коэффициент распределения, K_ϕ – коэффициент фильтрации.

Для оценки пригодности пород Нижнеканского массива для создания подземного хранилища кондиционированных высокоактивных отходов сотрудниками отдела в настоящее время проводятся исследования барьерных свойств основных типов гранитоидов.

В лабораторных условиях определены основные параметры, характеризующие удерживающие свойства пород, такие как пористость, проницаемость, сорбционные свойства относительно плутония, америция, нептуния. Полученные результаты использованы для подготовки исходных данных для оценки воздействия на окружающую среду (ОВОС), на основании которой готовятся документы для оформ-

ления «Декларации о намерениях» по созданию подземной лаборатории и могильника глубокого заложения в Нижнеканском гранитоидном массиве для высокоактивных кондиционированных отходов.

Как видим, с 1975 года прошло много лет, а вопрос захоронения отходов в геологические формации остается нерешенным, противники атомной энергетики говорят об огромной опасности подземных захоронений, полагая при этом, что хранение на поверхности представляет меньшую угрозу. А между тем, на земном шаре проведено около 1500 подземных ядерных взрывов, радиоактивные продукты которых уже в течение 40 лет локализованы под землей и не наносят ущерба ни населению, ни окружающей среде. Поэтому следует обратиться к имеющейся информации по поведению радионуклидов, локализованных в расплаве горных пород в зоне подземного ядерного взрыва. Имеются предпроектные наработки по захоронению высокоактивных радиоактивных отходов в очаге подземного ядерного взрыва. Можно организовать наблюдение за миграцией радионуклидов из зоны подземного ядерного взрыва в силикатной горной породе, и такое наблюдение можно рассматривать как вариант подземной лаборатории для исследования поведения захороненных радионуклидов. О создании таких лабораторий ведется много разговоров, которые пока не могут превратиться в реальность из-за высокой стоимости. А захоронения продуктов ядерных взрывов в различных горных породах существуют уже более 30 лет и являются прекрасным натурным материалом для долговременных исследований.

Для контроля за прекращением ядерных испытаний разработан и изготовлен полностью автоматический комплекс для измерения концентрации радионуклидов ксенона в атмосфере АРИКС-01. Комплекс в течение 2 лет проходил сравнительные испытания в Германии и в 2003 году будет установлен на станции международного радионуклидного мониторинга в Бразилии. АРИКС-01 имеет высокую чувствительность определения ^{133}Xe в атмосфере, достигающую величины $0,3 \text{ мБк/м}^3$, и передает информацию в Центр обработки данных автоматически по каналам связи (см. рис. 1). В настоящее время изготовлена следующая модернизированная модель установки АРИКС-02.

Были также разработаны и изготовлены автоматизированные спектрометрические установки сбора и анализа радиоактивных аэрозолей.

Разработан и изготовлен высокочувствительный β - γ -спектрометр, работающий как в режиме β - γ -совпадений, так и антисовпадений. Спектрометр позволяет измерять удельную активность β -излучающих и γ -излучающих радионуклидов в различных средах.

Измеряемая проба распределяется по подложке большой площади ($\sim 120 \text{ см}^2$), что обеспечивает высокую чувствительность измерений даже при анализе такой сильнопоглощающей среды, как ртуть. Возможно измерение жидких проб с использованием жидкостного сцинтиллятора. Минимально-детектируемая удельная активность (Бк/кг) составляет, например, для ^{90}Sr – 5, для ^{35}S – 200 и для ^{203}Hg – 200.

Спектрометр позволяет анализировать пробы, содержащие смесь указанных радионуклидов. γ -детектор с кристаллом NaI(Tl) $100 \times 150 \text{ мм}$ и β -детектор большой площади размещены в пассивной защите. Анализатор совмещен с ПК, на котором установлено оригинальное ПМО для обработки сцинтилляционных γ - и β -спектров.

Спектрометр предназначен для проведения низкофоновых измерений проб внешней среды или различных технологических проб без предварительной радиохимической подготовки (см. рис. 2).



Рис. 1. Автоматический анализатор радиоактивных изотопов ксенона АРИКС-01.

Совместно с другими организациями разработан и изготовлен бортовой спектрометр для работы в магистральных трубопроводах большого диаметра для внутритрубной диагностики технического состояния.

С участием сотрудников отдела за последние годы выпущено 4 монографии, посвященные ядерным испытаниям и мирным ядерным взрывам в СССР. Результаты исследований по этим направлениям докладывались на российских и международных конференциях.

Создана и испытана База данных по учету источников ионизирующего излучения на предприятиях Ленинградской области, позволяющая правительству Ленинградской области получать информацию о движении опасных материалов, их учету и хранению и принимать соответствующие управленческие решения. Выполнен большой цикл экспериментальных работ по радиоэкологии природных радионуклидов, сопутствующих добыче и переработке углеводородного сырья. На основе этих исследований разработаны методики первичного радиационного обследования нефтегазовых месторождений и методики дозиметрического контроля узлов оборудования на предприятиях “Газпрома”.

Исследования, некоторые результаты которых представлены здесь, были получены в лабораториях отдела, которыми руководят Ю.В. Дубасов (начальник отдела), Ю.С. Попов, Ю.М. Рогозин и А. А. Каменцев.



Рис. 2. Сцинтилляционный спектрометр β - γ -совпадений МКС-Р-1 СПРУТ.

Список литературы

1. Ушатский В.Н., Дубасов Ю.В. Участие в ядерно-взрывных программах / Радиевый институт им. В.Г. Хлопина. К 75-летию со дня основания. Под общей редакцией Е.И. Ильенко, С.-Петербург, 1997, с. 63-80.
2. Сомов А. // Нефть России, 2002, № 8, с. 55-73.
3. Дубасов Ю.В., Кривохатский А.С., Филонов Н.П. // Бюллетень ЦОИ по атомной энергии, 1993, № 9, с. 5-10.
4. Dubasov Yu., Krivokhatskii A., Kharitonov K. / Proc.Intern.Symp. "Remediation and Restoration of Radioactive-contaminated Sites in Europe", Antwerpen, 11 -15 October 1993, vol. 1, p. 369-381, 1994.
5. Stegnar P. Present Radiological Situation at the Semipalatinsk Test Site. NATO Advanced Research Workshop, Barnaul, Russia, 5-9 September, 1994.
6. Voigt G., Semiochkina N. Initial evaluation of radioecological situation at the Semipalatinsk Test Site in the Republic of Kazakhstan. GSF-Institut for Strahlenschutz, Germany, № 8,1998, 77 p.
7. Gastberger M. et al. // Radiochimica Acta, 2001, vol. 89, № 6, p. 371-375.
8. Dubasov Yu. Proc.Intern.Conf. on Radioactivity in the Environment, Monaco, 1-5 September 2002, p. 290-295.

9. Ядерные взрывы в СССР. Северный испытательный полигон. Справочная информация. 2-е издание, С-Петербург, 1999.
10. Dubasov Yu, Malakhov P., S. Pakhomov. Proc. the 5 Intern. Conf. On Environmental Radioactivity in the Arctic and Antarctic, 16-20 June 2002, St.-Petersburg, Russia, p. 209- 212
11. Иванов А.Б. и др. Северный полигон на Новой Земле. Радиологические последствия ядерных испытаний, М., Государственный институт прикладной экологии, 1997.
12. Dubasov Yu. Proc. The 4 International Conference on Environmental Radioactivity in the Arctic, 20-23 September 1999, Edinburgh, Scotland, p. 225-226.

Radiochemical investigations of consequences of nuclear explosions, severe radiation accidents and radioactive waste disposal

Yu.V. Dubasov

Work carried out by laboratory teams of the Department for last 15 years are under consideration in this paper. Aim of these works was radioecological survey of both the Semipalatinsk Test Site and the RF Central Test Site territories. In 1989-1993 radioecological survey was carried out around the Semipalatinsk Test Site including the settlements which found themselves in a zone of radioactive traces formation in course of atmospheric nuclear tests.

Existing contamination levels are not more than 10 times as large as global fall-outs levels, effective irradiation dose does not exceed 1 mSv/year, and therefore no intervention is needed. In course of the RF Central Test Site monitoring it was ascertained, that radionuclides concentration in streams and rivers falling into the Matochkin Shar Strait is lower than the permissible levels are. Long-lived transuranium radionuclides migration rate calculation results in granitoid massif are also given. Information is presented on full-automatic system for xenon radioactive isotopes concentration measurement in an atmospheric – “ARIX-01” – and its modifications elaborated and manufactured by employees of our Department. This system makes it possible to perform xenon radionuclides monitoring beginning from background concentrations.

Деятельность сектора фундаментальной радиохимии на современном этапе

Д.Н. Суглобов

В данном сообщении представлена краткая информация о направлениях работ, проводимых в настоящее время в секторе фундаментальной радиохимии:

- изучение химии актиноидов (гидролиз, комплексообразование) в растворах с использованием кинетики кислородного обмена;
- изучение химии актиноидов и лантаноидов в расплавах щелочногалогенидных солей;
- модельное исследование миграции радионуклидов и тяжелых металлов в почвах;
- синтез и изучение трикарбонилтехнеция (рения) с целью получения новых радиофармпрепаратов;
- выпуск макетов русской и английской версий журнала «Радиохимия».

Человек устроен так, что в своей хозяйственной деятельности он обязательно должен вникнуть во внутреннюю суть используемых процессов. В противном случае ему не удастся серьезно продвигаться в созидательной работе. Учитывая это обстоятельство, в 1973 г. дирекция Радиового института организовала лабораторию фундаментальной радиохимии, которая впоследствии была преобразована в сектор. За почти тридцатилетний срок в секторе было проведено много интересных и полезных исследований. Их уровень и масштаб были зафиксированы Государственной премией в 1986 г. за работы в области химии актиноидов и премией Академии наук СССР имени В.Г. Хлопина в 1996 г. за развитие химии летучих металлорганических соединений f-элементов и технеция, хотя, конечно, научная тематика исследований, проводимых в секторе, была более широкой.

Естественно, в этом сообщении можно было бы рассказать о том, что было, но, несомненно, интереснее знать, чем занимается, чем живет коллектив сектора в нынешнее время, в эпоху, весьма неблагоприятную для развития отечественной науки.

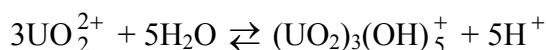
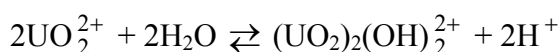
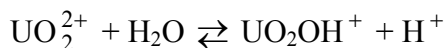
За годы перестройки тематика Сектора стала носить более прикладной характер. К положительным моментам можно отнести возникновение более тесных связей с другими лабораториями института и с другими научными центрами, о чем будет сказано ниже. Тем не менее, стиль проводимых нами исследований остался прежним: мы в несколько большей степени, чем другие лаборатории, погружаемся в суть той химии, которая лежит в основе решаемых задач, имея к этому вкус и в большей степени владея соответствующими структурно-аналитическими методиками.

В тематике Сектора сохранились даже направления, как говорится, чисто академического характера, хотя, на наш взгляд, они важны и для практики. И свой рассказ о научной деятельности сектора мы начнем с этих работ.

Одной из них, которая выполняется группой Л.Г. Маширова и находится в завершающей стадии, является изучение гидролиза уранила. На этой работе я остановлюсь чуть подробнее для того, чтобы проиллюстрировать характер наших исследований. Гидролиз урана (VI) в воде – исключительно важная реакция в химии, геохимии, биохимии и технологии урана. Он тщательно изучался. Но среди использованных методов только рН-метрия позволила предложить схемы гидролиза, тогда как данные других методов, как правило, интерпретировались уже исходя из этих схем. Суть такого подхода состоит в том, чтобы точно описать кривую потенциометриче-

ского титрования соли уранила щелочью минимальным набором констант равновесия реакций образования гидроксокомплексов, состав которых выбирается из “естественных” предположений о том, что эти реакции должны быть простыми

Однако указанная задача не решается однозначно. Кривая титрования может быть описана одинаково хорошо разными наборами констант, что и делают авторы разных работ. В настоящее время достигнута негласная договоренность, что разумна следующая схема гидролиза:



с последовательным появлением комплексов 1:1, 2:2 и 3:5. Некоторые добавляют комплекс 4:7.

Для того чтобы добиться большей определенности в установлении стехиометрии реакции гидролиза, мы предложили новый, кинетический, подход. Он состоит в том, что нужно определить порядки реакции гидролиза по компонентам (то есть по урану и гидроксилу). А порядки реакции – это и есть ее стехиометрические коэффициенты, то есть в данном случае число ионов уранила и гидроксила, вступающих в реакцию. Определение стехиометрических коэффициентов, несомненно, сделает картину гидролиза более однозначной, поскольку резко снизит произвол в выборе механизма реакции.

Для определения порядка реакции по компоненту необходимо найти зависимость ее скорости от концентрации данного компонента при фиксированных концентрациях других компонентов. В условиях термодинамического равновесия мы определяли скорость прямой реакции гидролиза уранила как скорость потери изотопной метки, кислорода-18 в группе уранила в процессе кислородного обмена уранила с водой в темноте, который, как мы установили, протекает только в момент образования гидроксокомплексов.

Из зависимости порядка реакции гидролиза уранила по урану от pH раствора следует, что в области pH~1,5, где гидролиз только начинается, порядок по урану близок к двум, то есть в элементарной реакции участвуют два иона уранила. При подщелачивании раствора этот порядок возрастает до трех и затем вновь падает до двух. По гидроксилу порядок возрастает, соответственно, от двух до трех и даже до четырех. В результате обнаруживается чрезвычайно интересный механизм гидролиза уранила, согласно которому первый гидроксокомплекс появляется в результате отщепления протона от координированной молекулы воды лишь при тесном сближении двух ионов уранила, когда в условиях довольно плотной протонной атмосферы (кислая среда) на протоны воды воздействует объединенный заряд двух катионов металла. Далее сходным образом при столкновении уранила с моногидроксодимером отщепляется следующий протон с образованием тримерного гидроксокомплекса либо дигидроксодимера.

В менее кислой области (pH 2-3) для отщепления протона уже не требуется совместного воздействия зарядов двух уранилов. Идет прямое присоединение гидроксила к дигидроксодимеру, далее гидроксила к тригидроксодимеру, и в этой точке образования нейтрального тетрагидроксодимера начинает активно протекать слипание комплексов с выпадением осадка гидроокиси.

Как можно видеть, предложенный нами механизм гидролиза существенно отличается от механизма на основе потенциометрических измерений.

Другим направлением фундаментальных исследований сектора является анализ состояния ионов f-элементов в солевых галогенидных расплавах. Расплавы солей считаются перспективной средой для переработки ОЯТ. Обладая уникальной методикой измерения электронных спектров поглощения расплавов, специалисты группы Ю.А. Барбанеля на основе собственных теоретических разработок смогли отнести наблюдаемые полосы поглощения к определенным переходам f-электронов, определить валентное состояние металла и структуру комплексов в расплавах, выявить закономерности влияния солевого состава на их структуру. Последним замечательным результатом явилось обнаружение в расплавах знаменитых катион-катионных комплексов, образуемых диоксокатионом нептуния (V) с катионами металлов (в данном случае с уранилом). Такие комплексы, в которых в качестве донорного лиганда выступает кислород нептуноильной группы, были известны в водных и органических растворах и в кристаллах. Оказалось, что они настолько прочны, что могут существовать и в расплавах при высоких температурах и огромном избытке конкурирующего лиганда – галогенид-иона. Сейчас перед нами стоит задача изучить это явление подробно.

Фундаментальным можно назвать исследование комплексообразования в перспективной экстракционной системе с экстрагентом – циркониевой солью дибутилфосфорной кислоты в 30% ТБФ, проводимое группой Л. Г. Маширова по заказу и совместно с лабораторией Б.Я. Зильбермана. Это тот самый случай, когда для оптимизации сложной системы необходимо понять, какая химия в ней разыгрывается.

Что касается задач, решение которых нацелено на достижение конкретных практических результатов, то одна из них относится к самой актуальной и одновременно самой сложной проблеме ядерной медицины – как доставить в нужный адрес в организме человека радиоизотоп для визуализации или облучения того или иного органа или ткани. В наших исследованиях эта проблема рассматривается на примере радиоизотопов технеция и рения, которые производятся в Радиевом институте. Теоретически общий подход к созданию радиофармпрепаратов на основе катионов металлов ясен: нужно создать связывающий металл прочный координационный узел и через линкер соединить его с избирательно биологически активной молекулой. Последняя, концентрируясь на больной ткани, доставит туда и радионуклид. Однако практическая реализация схемы очень трудна. Даже если и удастся синтезировать указанный сложный комплекс, это не гарантирует успех, поскольку металлсодержащий довесок может денатурировать биомолекулу, то есть лишить ее избирательной функции. Поэтому для достижения цели требуются глубокие знания о поведении радиоэлементов в живых организмах, совместная работа радиохимиков, органиков-синтетиков, биохимиков и медиков и, конечно, везение.

Имея опыт в химии карбониллов технеция и рения, в качестве исходных форм изотопов мы использовали водорастворимые трикарбонилы этих элементов в одновалентном состоянии, которые считают перспективными прекурсорами радиофармпрепаратов за их компактную структуру, малый заряд и низкое координационное число 3, поскольку карбонильные группы не замещаются обычными элетронодонорными лигандами. Работа ведется группой А.А. Лумпова в коллаборации с сектором В.Н. Романовского, Институтом биофизики, ЦНИРРИ, Университетом Иллинойса и Институтом Пауля Шерера в Швейцарии.

На данном этапе разрабатываются координационные узлы для связывания трикарбонила, которые должны отвечать многим требованиям, главным из которых является высокая прочность связывания, превышающая прочность связи трикарбонила с гистидиновым остатком – сильнейшим лигандом белковой молекулы. Пред-

ложены и практически испробованы в качестве хелатных лигандов производные диэтилдитиокарбамата и трипиразолиламинокарбоксилата и выполнен синтез одного из конечных комплексов. Намечены его биохимические испытания.

Интересно, что и сам по себе трикарбонилтехнеций может рассматриваться в качестве перспективного диагностического препарата. В разных модификациях он пригоден для визуализации сердца, легких и новообразований в организме животного.

Другой задачей с конечной практической целью является реабилитация почв, зараженных радионуклидами и тяжелыми металлами. Это направление разрабатывает группа Е.К. Легина. Проведенный нами анализ геохимической и почвоведческой литературы показал, что, во-первых, радионуклиды и ионы тяжелых металлов в почвах концентрируются в так называемых гель-пленках, состоящих из гидроксидов, гидроксофульватов и гуматов железа и алюминия, которые обволакивают микрочастицы глины и песка, а во-вторых, в природе, по крайней мере, в средних широтах, повсеместно с большей или меньшей интенсивностью протекает так называемое оглеение почв. Этот процесс состоит в том, что когда в почве возникают анаэробные условия (обычно вследствие заполнения почвенных пор водой), становятся активными анаэробные бактерии, деятельность которых приводит к резкому снижению редокс-потенциала почвы, что влечет за собой частичное восстановление железа в гель-пленках и, как следствие, перевод его и сорбированных на нем микроэлементов в растворимое или коллоидизированное состояние. Два этих фундаментальных явления лежат в основе самоочищения почв и делают небезнадежной задачу их реабилитации.

Наша цель состоит в том, чтобы познать закономерности самоочищения и, используя их, научиться ускорять (или замедлять) последнее путем проведения соответствующих обычно недорогих сельскохозяйственных мероприятий (создание оптимального гидрологического режима, усиление активности анаэробов и т.п.). На данном пути мы создали методику, позволяющую в лабораторных условиях моделировать процесс самоочищения образца почвы в условиях, приближенных к конкретному региону. Измеряемыми величинами являются абсолютные значения коэффициентов ремобилизации и процент вымывания радионуклида. Первые серии экспериментов были выполнены на образцах с острова Атамановский на Енисее в районе ГХК, в которых контролировалось содержание около 20 элементов, включая уран, плутоний, кобальт, торий. Обнаружены корреляции между выносом железа и выносом большинства микроэлементов, что подтверждает предложенную концепцию самоочищения почв. Процедура реабилитации мыслится как вымывание вредных элементов из верхнего хозяйственного слоя почвы и их рассеяние в нижних горизонтах, либо как вынос из горизонта с почвенными водами и концентрирование в дренажных каналах на соответствующих сорбентах. Эти работы ведутся в сотрудничестве с отделом радиоэкологии института. В дальнейших исследованиях предполагается активное участие комбината "Маяк".

На стадии выхода на конечную продукцию – изготовление мишеней для ЛЯР ОИЯИ – находится также работа по получению актиноидсодержащих пленок на титановых фольгах методом термолиза паров летучих соединений металлов. Наконец, следует назвать еще один интеллектуальный продукт, который наш сектор постоянно производит уже много лет подряд. Имеется в виду выпуск журнала "Радиохимия". Этот журнал был основан в 1959 г. В.М. Вдовенко на базе Радиевого института. Его учредителями являются Академия наук и Радиевый институт, а главными действующими лицами – главный редактор, академик Б.Ф.Мясоедов и ученый секретарь журнала, Г.В. Сидоренко. Последний вместе с экспертами редактирует по-

ступающие статьи, организует перевод на английский и одновременно выпускает макеты журнала на русском и английском языках. За границей журнал известен как "Radiochemistry". Сейчас можно получить и электронную версию журнала. Качество журнала считают хорошим.

Из всего сказанного видно, что в своей деятельности подразделение старается соответствовать названию "сектор фундаментальной радиохимии" и что творческий потенциал коллектива продолжает оставаться высоким. Мы надеемся на то, что высокоактуальные направления фундаментальной радиохимии по ядерной медицине и радиозологии в будущем будут финансироваться из госбюджета.

Recent Activity of the Sector of Basic Radiochemistry

D.N. Suglobov

In this paper a short information on the recent activity of the Sector of Basic Radiochemistry is presented. At present the following works are performed:

- the study of actinyl ion chemistry (hydrolysis, etc.) in aqueous solutions using the actinyl oxygen exchange kinetics;
- the study of actinide and lanthanide chemistry in alkali halide melts;
- the model study of radionuclide migration in soils;
- synthesis and study of Tc- and Re-containing radiopharmaceuticals based on metal(I) tricarbonyl core;
- issue of the "Radiokhimiya" scientific journal in Russian and English versions.

Прецизионное определение плутония методами спектрофотометрии с внутренней стандартизацией и абсолютного альфа-счета с жидким сцинтиллятором

А.В. Степанов, С.А. Никитина, В.Т. Карасев, Д.А. Степанов, М.В. Пенькин,
А.Б. Богородицкий, Е.В. Певцова

С целью повышения точности спектрофотометрического определения плутония в растворах после его предварительного окисления до Pu (VI), измерение светопоглощения раствора при его освещении нефильтрованным ("белым") светом предлагается проводить одновременно на двух участках спектра, один из которых включает в себя аналитическую полосу шестивалентного плутония при 830 нм, а второй представляет собой прозрачное окно в области 720 нм, в котором пропускание анализируемого раствора близко к 100%. В этом случае аналитическим сигналом будет являться отношение значений интенсивности света на аналитической полосе и в прозрачном окне, играющего роль внутреннего стандарта. Благодаря этому случайную составляющую относительной погрешности метода удастся снизить до уровня менее 0,1%.

Рассмотрены также и способы усовершенствования метода абсолютного альфа-счета, благодаря которым полная относительная погрешность определения концентрации плутония в растворах была снижена до 0,3%.

Прецизионное определение плутония в различных ядерных материалах имеет важное практическое значение. Во-первых, эта проблема возникла сразу же после пуска первых заводов по переработке облученного урана с целью получения оружейного плутония. Старшему поколению сотрудников Радиевого института памятли балансовые операции по определению плутония во всех звеньях технологической цепочки. Такое же большое практическое и в определенной степени политическое значение проблема точного определения плутония приобрела после заключения в 1970 году Договора о нераспространении ядерного оружия. Контрольные функции в соответствии с этим Договором, как известно, были возложены на МАГАТЭ. Эти функции в своей основе сводятся к проведению независимых контрольных оценок массы плутония (и других ядерных материалов) на инспектируемых установках с целью своевременного обнаружения потенциального переключения значимых количеств плутония с мирного на военное использование. Таким образом, смысл проблемы гарантий на первых этапах заключался в сведении материального баланса делящихся материалов. Здесь велика роль прецизионных аналитических методов определения плутония. Насколько точными должны быть эти методы, видно из следующего примера. Предположим, что в некоторой стране инспектируется завод по переработке отработавшего топлива производительностью 1000 т облученного урана в год с 1% содержанием плутония, что составляет его массу 10 т. Принимая во внимание, что минимально значимое количество плутония, из которого можно было бы изготовить взрывное устройство, составляет 8 кг, нетрудно видеть, что баланс по плутонию должен быть сведен с такой же абсолютной погрешностью, или с относительной погрешностью 0,08% для того, чтобы не вызвать тревоги мирового сообщества. Однако, помимо необходимости достижения столь рекордной точности аналитических методов, возникла еще одна проблема, связанная с необходимостью анализа огромного количества инспекционных проб. Решение было найдено в 1976 году с организацией Всемирной сети аналитических лабораторий МАГАТЭ. При этом были вы-

двинуты очень жесткие требования к качеству анализов на плутоний, проводимых в этих лабораториях. Для отбора таких лабораторий была проведена серия межлабораторных экспериментов, по результатам которых было выбрано 20 наиболее искусственных лабораторий из различных стран мира. В их число вошел и Радиевый институт. При этом большой вклад в их успешное проведение внесли начальник аналитического отдела А.А. Липовский, являвшийся научным руководителем работ, при существенной поддержке директора института Л.Н. Лазарева, начальников других отделов и лабораторий, обладавших опытом аналитической работы с актиноидными элементами, и многих специалистов института. Благодаря их усилиям, в институте за короткое время был создан и внедрен в практику ряд прецизионных методов определения плутония: кулонометрия с контролируемым потенциалом и кулонометрическое титрование (Л.С. Буляница), альфа-спектрометрический метод с изотопным разбавлением (Ю.С. Егоров, Ю.В. Хольнов, С.М. Соловьев), абсолютный альфа-счет, основанный на $4\pi\alpha$ -х совпадениях (А.М. Гейдельман), метод дифференциальной спектрофотометрии (А.А. Липовский, С.А. Никитина, Т.А. Демьянова), масс-спектрометрические методы с изотопным разбавлением (Л.М. Крижанский, Б.Н. Беляев). Был отработан и метод прецизионного определения урана – потенциометрическое титрование с помощью полуавтоматического титратора (А.В. Степанов, М.В. Рыжинский, Л.Ф. Солнцева). Получили развитие и методы выделения и очистки плутония – ионнообменная хроматография, электрофорез (Л.Д. Преображенская, Т.П. Макарова). Указанный выше комплекс методов позволил Радиевому институту на протяжении 25 лет достаточно успешно осуществлять функции сначала Советской, а затем Российской национальной лаборатории Аналитической сети МАГАТЭ, единственной от нашей страны. В эти функции входили анализы инспекционных образцов ядерных материалов, изготовление и аттестационный анализ специальных стандартных образцов, необходимых для калибровки аппаратуры и контроля качества анализов, а также участие представителей института в совещаниях рабочих групп, на которых решались различные методические и организационные вопросы, связанные с инспекционной деятельностью МАГАТЭ.

Приходится, однако, с сожалением отметить, что за последнее десятилетие – эпоху перестройки – парк аналитических приборов института практически не обновлялся, что составляет резкий контраст с ситуацией в зарубежных лабораториях Аналитической Сети МАГАТЭ. Радиевый институт продолжал и продолжает держаться на уровне других лабораторий в значительной степени лишь благодаря искусству и мастерству своих сотрудников.

Между тем жизнь выдвигает новые задачи, связанные с проблемой учета и контроля плутония, имеющегося в России и странах СНГ после распада Советского Союза. В настоящее время создана специальная программа, которая в значительной степени финансируется Соединенными Штатами. Одним из аспектов этой программы является создание стандартных образцов плутония, аттестованных как на изотопный состав, так и на его общую массу в образце. Такие стандартные образцы будут распространяться среди российских предприятий, имеющих дело с плутонием, для обеспечения единства измерений его изотопного состава и общей массы на этих предприятиях. В создании таких стандартных образцов принимает участие и Радиевый институт. Очевидно, что такие стандартные образцы должны быть аттестованы с очень высокой точностью. За неимением средств на приобретение современного масс-спектрометра и прецизионного кулонометра с контролируемым потенциалом, крайне необходимых для участия в этих работах, в Радиевом институте в последнее

время были предприняты попытки модернизации имеющихся методов и приборов для того, чтобы не остаться в стороне от решения новых задач. С этой целью один из масс-спектрометров аналитического отдела был оборудован многоканальной детектирующей системой и в значительной степени были усовершенствованы методы спектрофотометрии и абсолютного счета с помощью счетчика с жидким сцинтиллятором. Суть усовершенствований последних двух методов и будет изложена в настоящем сообщении.

Прецизионный спектрофотометрический метод определения плутония с использованием принципа внутренней стандартизации

Один из способов повышения точности спектрофотометрических измерений заключается в использовании принципа внутренней стандартизации, в соответствии с которым измерение светопоглощения анализируемого раствора при его освещении нефльтрованным (“белым”) светом необходимо проводить на двух участках спектра, один из которых включает в себя аналитическую полосу определяемого элемента, а второй представляет собой прозрачное окно, в котором пропускание анализируемого раствора принимается за 100%. В этом случае аналитическим сигналом будет являться не абсолютное значение интенсивности прошедшего через анализируемый раствор света на длине волны поглощения, а отношение значений интенсивности на аналитической полосе и в прозрачном окне. Поскольку изменчивость величин интенсивностей на обоих спектральных участках, вызванная нестабильностью источника света, дрейфом коэффициента усиления усилительного тракта, плохой воспроизводимостью геометрического положения кюветы и т.п., будет в значительной степени закоррелированной, то можно ожидать снижения относительной погрешности определения отношения интенсивностей по сравнению с погрешностями их прямых измерений. Если относительные средние квадратические отклонения результатов прямых измерений интенсивностей света на обоих спектральных участках приблизительно одинаковы, то относительное среднее квадратическое отклонение (ОСКО) результата измерения R может быть определено:

$$\delta_R^2 = 2 \cdot \delta^2 \cdot (1 - r), \quad (1)$$

где δ – относительное среднее квадратическое отклонение результатов прямых измерений интенсивности;

δ_R – относительное среднее квадратическое отклонение отношений интенсивностей R ;

r – коэффициент корреляции.

Из (1) видно, что уменьшение ОСКО результата измерения аналитического сигнала R может произойти лишь при значениях коэффициента корреляции $r > 0,5$.

При определении плутония принцип внутренней стандартизации может быть реализован, если этот элемент находится в шестивалентном состоянии. В этом состоянии плутоний в азотнокислых растворах имеет весьма интенсивную полосу поглощения при 830,2 нм с молярным показателем поглощения $>500 \text{ л} \cdot \text{моль}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$ и практически прозрачные участки спектра в области 700-800 нм.

Для проведения измерений концентрации плутония с использованием принципа внутренней стандартизации в Радиевом институте был сконструирован двухканальный спектрофотометрический анализатор. В этом приборе нефльтрованный (“белый”) свет от лампы накаливания со стабилизированным питанием пропускается через кювету с анализируемым раствором с последующим разделением на два пучка и практически одновременным определением интенсивностей аналитической поло-

сы поглощения, полосы сравнения (внутреннего стандарта), соответствующей 100% пропускания для анализируемого раствора и фона регистрирующей системы с помощью одного и того же детектора и усилительного тракта. Этим достигается достаточно хорошая корреляция между сигналами. Аналитическая полоса с максимумом поглощения при 830,2 нм выделяется монохроматором, полоса сравнения – узкополосным светофильтром с максимумом пропускания при 720 нм, а фон измеряется при полностью закрытом источнике света. Переключение каналов измерения осуществляется с помощью специального переключающего устройства. Продолжительность работы каждого канала составляет 0,6 с, полный цикл измерения равен 2,2 с. Измерение интенсивностей производится методом счета однофотонных импульсов. Результатом измерений в одном цикле (аналитическим сигналом) является отношение исправленных на мертвое время прибора интенсивностей света R , рассчитываемое по уравнению:

$$R = \frac{(J_c - J_b)}{(J_a - J_b)} + \frac{k}{(1-k)} \cdot \frac{(J_c - J_a)}{(J_a - J_b)}, \quad (2)$$

где J_a – интенсивность света в аналитической полосе, c^{-1} ;

J_c – интенсивность света в полосе сравнения, c^{-1} ;

J_b – интенсивность фона, c^{-1} ;

k – отношение молярного показателя поглощения определяемого элемента на полосе сравнения к соответствующей величине на аналитической полосе.

Количество циклов измерений может выбираться в пределах от 1 до 250. Результаты измерений при этом суммируются, усредняются и обрабатываются компьютером.

В описываемом приборе имеется встроенная программа определения концентрации элемента методом сравнения оптических плотностей двух стандартных и определяемого растворов. Расчет концентрации плутония производится по формуле:

$$C_x = C_1 + \frac{(C_1 - C_2) \cdot (D_x - D_1)}{(D_1 - D_2)} = C_1 + \frac{(C_1 - C_2) \cdot (\log R_x - \log R_1)}{(\log R_1 - \log R_2)}, \quad (3)$$

где D_x , D_1 , D_2 – оптические плотности анализируемого и двух стандартных растворов соответственно;

R_x , R_1 , R_2 – отношение интенсивностей для тех же растворов;

C_1 , C_2 – концентрация определяемого элемента в стандартных растворах, $C_1 < C_x < C_2$.

Процедура определения концентрации элемента в образце с помощью описываемого прибора в автоматическом режиме заключается в следующем: вводятся код образца и значения концентрации элемента в стандартных растворах C_1 и C_2 ; последовательно помещаются в кювету и измеряются стандартные образцы № 1 и № 2 и раствор с искомой концентрацией элемента C_x . По завершении этих операций программа выводит на дисплей, в печать и в архив введенные в программу исходные данные, интегральные значения числа однофотонных импульсов в каждом канале и значение найденной концентрации элемента C_x , рассчитанное по уравнению (3). При этом по умолчанию программа использует значение мертвого времени установки, равное 380 нс. Значение k может быть введено в программу до начала экспериментов.

Для количественного окисления плутония до шестивалентного состояния использовался раствор двойной соли четырехвалентного церия и аммония в 1 М азотной кислоте.

С целью проверки правильности разработанного спектрофотометрического метода применительно к плутонию было проведено сравнение результатов определения массовой доли общего плутония в растворе, содержащем смесь изотопов со средней молярной массой 241,6603 г/моль, описываемым спектрофотометрическим методом двух стандартов и методом масс-спектрометрии с изотопным разбавлением. Результаты сравнения представлены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты определения массовой доли плутония (С)
в растворе стандартного образца NBL CRM-144

Величина	Спектрофотометрический метод (двухканальный анализатор)	Метод масс-спектрометрии с изотопным разбавлением
\bar{C}	$8,8373 \cdot 10^{-4}$	$8,8419 \cdot 10^{-4}$
СКО	$0,0093 \cdot 10^{-4}$	$0,0212 \cdot 10^{-4}$
ОСКО, %	0,11	0,24
Число измерений, n	8	4

Сравнение данных, полученных обоими методами, показывает отсутствие значимых различий в найденных значениях массовой доли плутония в анализируемом растворе.

В заключение краткого описания спектрофотометрического метода с внутренней стандартизацией можно отметить основные источники систематической погрешности метода. Их несколько:

1. Погрешность аттестации используемого стандартного образца.
2. Погрешность взвешивания стандартных и измеряемых растворов.
3. Погрешность, связанная с нелинейностью функции отклика регистрирующей системы на изменение аналитического параметра – концентрации плутония. Основной причиной этой нелинейности является неточное определение мертвого времени установки.
4. Температурная нестабильность стандартных и измеряемых растворов.

На последнем источнике погрешности следует остановиться несколько подробнее. Исследование зависимости оптической плотности раствора Pu (VI) от его температуры в весьма узком температурном диапазоне – от 20 до 30 °С – показало, что температурный коэффициент оптической плотности для раствора шестивалентного плутония составляет 0,39% на градус. Между прочим, этот коэффициент для раствора трехвалентного неодима на полосе 794 нм составляет еще большую величину – 0,8%. Все это говорит о том, что отмечаемые эффекты связаны не с чисто физическим расширением водных растворов, коэффициент которого составляет лишь 0,03% на градус, а с уменьшением заселенности нижних основных уровней, дающих начало регистрируемым полосам поглощения плутония и неодима. Это обстоятельство заставило принять достаточно жесткие меры по стабилизации температурных условий измерения концентрации плутония. Во-первых, в помещении, где располагается двухканальный спектрофотометр, был установлен автоматический кондиционер, способный поддерживать в течение длительного времени постоянную температуру в помещении с точностью порядка 0,2 °С, а во-вторых, температура держателя для оптической кюветы термостатировалась с точностью не хуже 0,1 °С с помощью ультратермостата. Обе эти меры позволили свести температурную относительную

систематическую погрешность до 0,04%. Учитывая, что относительная случайная погрешность измерения отношения интенсивностей света на аналитической и стандартной полосах может быть доведена до уровня менее 0,1%, а относительная погрешность аттестации стандартного образца плутония не превышать 0,08%, полная относительная погрешность результата определения концентрации плутония в растворе может быть оценена величиной 0,12%.

Прецизионное определение массовой доли Pu в растворе методом измерения абсолютной альфа-активности с помощью счетчика с жидким сцинтиллятором

Нетрудно видеть, что рассмотренный выше метод спектрофотометрии с внутренней стандартизацией является компаративным, то есть требующим постоянной калибровки по стандартным образцам очень высокого уровня.

Для решения задач, связанных с учетом содержания Pu в различных ядерных материалах, важное значение имеют прецизионные разрушающие методы, не связанные с необходимостью использования стандартных образцов плутония для калибровки измерительной аппаратуры. Эти методы основаны на таких физических законах, которые позволяют непосредственно связать величину аналитического сигнала с массой вещества с помощью точно установленных коэффициентов, например числа Фарадея в кулонометрии. К числу последних в известной степени принадлежит и метод абсолютного альфа-счета с помощью жидкого сцинтиллятора, поскольку значения периодов полураспада радиоактивных изотопов плутония табулированы с достаточно высокой точностью [1].

Жидкие сцинтилляторы (далее ЖС) представляют собой растворы люминесцирующих веществ в органических растворителях. Поскольку различие в физических и химических свойствах растворителя мало влияют на интенсивность и длительность световых вспышек, то выбор растворителя в основном определяется его способностью растворять анализируемую пробу. С этой точки зрения наиболее удобными являются ЖС на основе диоксана, допускающие введение довольно больших количеств анализируемых водных растворов.

Жидкие сцинтилляторы нашли широкое применение для определения бета-активности изотопов преимущественно с низкой энергией β -частиц (^3H , ^{14}C , ^{35}S и т.п.), пробег которых практически полностью укладывается в используемом объеме ЖС. Кроме того, счетчики с ЖС используются для детектирования нейтронов, γ -квантов и нейтрино. Применение ЖС для абсолютных измерений активности альфа-излучающих препаратов наталкивается на трудности троякого рода. Первое затруднение заключается в сравнительно низкой конверсионной эффективности ЖС для альфа-частиц по сравнению с аналогичной величиной для β -частиц. Например, для α -частиц с энергией 5,49 МэВ (^{241}Am) конверсионная эффективность составляет лишь 8% от конверсионной эффективности для электронов. Естественно, это обстоятельство затрудняет проведение абсолютных измерений α -активности растворов в присутствии β -активных нуклидов, граничная энергия излучения которых превышает 50 кэВ. Применение в этом случае электронных устройств, производящих селекцию импульсов по форме их заднего фронта, лишь частично решает эту проблему. Трудность второго рода связана со склонностью к адсорбции альфа-излучающих изотопов актиноидных элементов на поверхности кювет, содержащих ЖС. Это приводит к потере значительного числа световых вспышек, достигающей нескольких процентов от общей альфа-активности измеряемого препарата. И, наконец, необхо-

димо принимать во внимание падение эффективности регистрации альфа-частиц счетчиком с ЖС за счет краевого эффекта. Возникновение этого эффекта связано с тем, что часть альфа-частиц, образующихся во внешнем слое сцинтиллятора, прилегающем к стенкам кюветы или его открытой поверхности, вылетает за пределы объема сцинтиллятора, давая при этом световую вспышку небольшой амплитуды, которая может не регистрироваться счетным устройством с высоким порогом срабатывания. В немногочисленных работах, посвященных использованию ЖС для абсолютного альфа-счета, поправка на краевой эффект находилась только расчетным путем, исходя из геометрии кюветы и величины пробега альфа-частиц в ЖС, примерно равного $4 \cdot 10^{-3}$ см. Однако значение поправки, найденное расчетным путем, ненадежно, поскольку краевой эффект определяется не только геометрией кюветы, но и порогом дискриминации импульсов, поступающих на счетное устройство, приложенным к ФЭУ напряжением, а также количеством внесенного водного раствора, вызывающего уменьшение амплитуды световых вспышек в сцинтилляторе.

В Радиевом институте была предпринята попытка устранить отмеченные недостатки метода альфа-счета в жидком сцинтилляторе для того, чтобы сделать этот метод определения плутония прецизионным в достаточной степени. Для той цели было сделано следующее.

1. В состав жидкого сцинтиллятора стали вносить, помимо комплексующих добавок, неизотопные носители – Zr или Hf, что позволило практически полностью устранить адсорбцию плутония на стенках кювет.
2. Был найден способ экспериментального определения поправки на краевой эффект. Для этого был применен хорошо известный в аналитике принцип добавок, заключающийся в том, что после измерения скорости счета световых вспышек от измеряемого препарата в ЖС вносилась прозрачная полированная кварцевая пластинка с известной величиной поверхности. Эта пластинка создавала дополнительный краевой эффект, величина которого представляла собой разность между скоростью счета световых вспышек в ЖС без пластинки и скоростью счета, даваемой ЖС с внесенным в него кварцевым стеклом. Исходя из соотношения площадей поверхности внесенного стекла и ЖС, помещенного в измерительную кювету, относительная величина поправки на краевой эффект была найдена равной $(0,03 \pm 0,03)\%$, что соответствует эффективности регистрации α -частиц плутония равной $(99,97 \pm 0,03)\%$. Эта величина была внесена в программу расчета истинной скорости альфа-счета, то есть активности навески анализируемого раствора, помещенного в кювету с ЖС.
3. Было изучено влияние основных гасящих добавок при измерении абсолютной альфа-активности растворов плутония и найдены верхние допустимые пределы содержания воды и концентрированной азотной кислоты в растворе ЖС.
4. Была разработана методика определения мертвого времени счетной установки. Полученная величина была также внесена в программу расчета истинной скорости альфа-счета.

Установка для регистрации световых вспышек была собрана по общепринятой схеме. Регистрация вспышек осуществлялась низкошумящим ФЭУ-97. Оптический контакт кюветы с входным окном ФЭУ обеспечивался несколькими каплями вазелинового масла. Электрический сигнал от ФЭУ поступал в блок усилителя и формирователя, дававший на выходе стандартные по амплитуде и длительности им-

пульсы, которые передавались далее на специализированную интерфейсную плату, установленную в системном блоке компьютера. С помощью этой платы осуществлялось взаимодействие отдельных блоков прибора.

Для управления работой счетной установки была создана специальная программа, позволявшая с учетом необходимых поправок определять истинную скорость счета альфа-частиц, испускаемых препаратами плутония.

При выборе рабочего напряжения, подаваемого на ФЭУ-97, было учтено то обстоятельство, что практически во всех препаратах плутония содержится бета-активный изотоп ^{241}Pu с граничной энергией бета-частиц 0,022 МэВ. Для дискриминации световых вспышек, даваемых этими частицами, рабочее напряжение на ФЭУ должно быть достаточно низким, для того чтобы обеспечить сравнительно высокий порог чувствительности счетной установки. В то же время, выбранное рабочее напряжение должно находиться на плато счетчика. Для того чтобы выполнить эти достаточно противоречивые требования, порог чувствительности счетчика был установлен экспериментально по началу счета препарата трития. Для этой цели была определена зависимость скорости счета чистого ЖС (фона) от приложенного к ФЭУ напряжения, а затем была найдена та же зависимость для ЖС с добавкой 0,2 мл обогащенной тритием воды с удельной активностью 50 кБк/мл. Граничные энергии бета-частиц трития (0,019 МэВ) и плутония-241 практически совпадают, что позволяет рассматривать бета-излучение трития аналогичным излучению плутония-241. В описываемой установке рабочее напряжение на ФЭУ было выбрано равным 1500 В. При этом рабочем напряжении импульсы от бета-частиц трития лежали ниже порога регистрации, а фон счетной установки не превышал 6 имп./с.

Масса плутония, содержащаяся в навеске раствора плутония, внесенной в кювету с ЖС, определялась по формулам (4) и (5):

$$m = A / (a \cdot p) \quad (4)$$

$$a = \sum L_i \frac{\lambda_i \cdot N \cdot 10^{-6}}{M_i} + a_{^{241}\text{Am}}, \quad (5)$$

где m – масса плутония в навеске раствора, мкг;

$a_{^{241}\text{Am}}$ – удельная активность дочернего ^{241}Am в плутонии, Бк/мкг Pu.

A – активность навески раствора, Бк;

p – масса навески, г;

a – удельная активность препарата плутония, Бк/мкг;

N – число Авогадро;

λ_i – постоянная распада i -ого изотопа плутония, с^{-1} ;

M_i – молярная масса i -ого изотопа плутония, г/моль;

L_i – массовая доля i -ого изотопа плутония в изотопном составе плутония;

Из формулы (5) видно, что для определения величины a – удельной активности препарата плутония – необходимы данные о массовом изотопном составе препарата плутония, определяемом на основе изотопных отношений $^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$, $^{241}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ и $^{242}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$, найденных масс-спектрометрическим методом, и изотопного отношения $^{238}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$, измеренного методом альфа-спектрометрии. Включение последней в схему анализа вызвано необходимостью точного определения массовой доли ^{238}Pu в изотопном составе плутония, поскольку масс-спектрометрическое определение этой величины недостаточно надежно, во-первых, из-за возможного загрязнения плутония ураном-238, и, во-вторых, из-за малой точности определения изотопного отношения $^{238}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ при низком содержании ^{238}Pu .

Метод абсолютного альфа-счета в ЖС был применен для определения массовой доли плутония в растворе моноизотопного препарата плутония-239, использованного для приготовления изотопной метки для ИДМС. Полученные результаты сравнивались с результатами, полученными методом спектрофотометрии с внутренней стандартизацией.

Метод ЖС

Массовая доля плутония в растворе – 1,4200 мг/г

Полная погрешность – $\pm 0,0040$ мг/г

Компоненты полной относительной погрешности:

- | | |
|--|---------|
| – неопределенность табличных значений периодов полураспада ^{238}Pu и ^{239}Pu [1] | – 0,20% |
| – систематическая погрешность взвешивания | – 0,12% |
| – случайная погрешность измерения скорости счета | – 0,08% |

Метод спектрофотометрии с внутренней стандартизацией

Массовая доля плутония в растворе – 1,4208 мг/г

Полная погрешность – $\pm 0,0014$ мг/г

Таким образом, метод измерения абсолютной альфа-активности плутония в ЖС дает возможность определять концентрацию плутония в растворах с относительной погрешностью не хуже 0,3%.

Список литературы

1. Decay Data of the Transactinium Nuclides. Techn. Reports. Ser. No 261, Vienna, IAEA, 1986.

Precise determination of plutonium by spectrophotometry with internal standardization and absolute alpha-counting with liquid scintillator

A.V. Stepanov, S.A. Nikitina, V.T. Karasev, D.A. Stepanov, M.V. Penkin,
A.B. Bogoroditski, E.V. Pevtsova

In order to achieve more precise spectrophotometric determination of plutonium in solutions after its oxidation to Pu(VI), it is suggested to measure the absorption of the solution simultaneously in two spectrum bands. One of them is the analytical band of hexavalent plutonium at 830 nm and another is a transparent window at 720 nm with 100% transmittance. In this case the ratio between intensities at 720 and 830 nm will be an analytical signal with intensity at 720 nm as the internal standard. This allows the precision of the analytical signal to be substantially improved up to 0.1%. Some improvements of the absolute alpha-counting with use of liquid scintillator are considered too. The relative uncertainty of the method was improved up to 0.3%.

Пределы изменения фундаментальных физических констант из радионуклидных данных и модели первичного нуклеосинтеза

В.П. Чечев

В статье рассмотрено современное состояние проблемы возможного изменения со временем констант связи фундаментальных взаимодействий и на основе недавней экспериментальной и наблюдательной информации получены новые пределы их изменения. Анализ распада долгоживущих радионуклидов позволяет дать ограничения на возможность изменения константы радиоактивного распада с космологическим временем. Особенно чувствителен к изменению физических констант распад ^{187}Re за счет его малой энергии распада. Использование отдельных оценок периода полураспада ^{187}Re по двум методам наблюдения его распада – накоплению ^{187}Os в метеоритах и лабораторным измерениям удельной активности – приводит к выводу, что скорость распада ^{187}Re не увеличилась более, чем на 10% за $4 \cdot 10^9$ лет и не уменьшилась более, чем на 4% за тот же период времени. Это дает жесткий предел возможного изменения постоянной тонкой структуры: $|d\alpha/\alpha dt| \leq 1,3 \cdot 10^{-15} \text{ год}^{-1}$ и значительно более слабый верхний предел для изменения константы связи слабого взаимодействия: $|d\alpha_w/\alpha_w dt| \leq 1,3 \cdot 10^{-11} \text{ год}^{-1}$. Рассмотрение выхода гелия в модели первичного нуклеосинтеза дает более сильное ограничение на изменение константы связи слабого взаимодействия: $|d\alpha_w/\alpha_w dt| \leq 4 \cdot 10^{-12} \text{ год}^{-1}$.

Проблема возможного непостоянства во времени фундаментальных физических констант обсуждалась в большом количестве работ, начиная со знаменитой статьи Дирака в Nature 1937 г. [1]. Эта проблема стала актуальной в 70-е годы, когда были выдвинуты новые гипотезы, развивавшие идею Дирака о связи космологического расширения Вселенной с микрофизическими константами. Обзоры этих гипотез, как и всей проблемы в целом, включая определение пределов возможного изменения констант из экспериментальных и наблюдательных данных, даны автором этой статьи в совместных с Я.М. Крамаровским работах 1972-1978 гг. [2-6].

В настоящее время проблема космологического изменения констант снова стала актуальной в связи с развитием теории великого объединения (GUT) и моделей “суперструн”, в рамках которых эффективные константы связи сильного, слабого и электромагнитного взаимодействия изменяются с энергией взаимодействия. Так как в ранней Вселенной с уменьшением космологического времени увеличивается энергия взаимодействия, можно ожидать, что низкоэнергетические пределы констант связи трех взаимодействий α_s , α_w , $\alpha = e^2/\hbar c$, (или, по крайней мере, некоторые из них) изменяются с космологическим временем. Кроме теоретических оснований, следует учесть также, что появились новые наблюдательные и лабораторные пределы изменения фундаментальных констант [7, 8].

В связи с этим ниже рассмотрены новые ограничения на изменение со временем констант связи трех фундаментальных взаимодействий, которые получаются из радионуклидных данных и стандартной модели первичного нуклеосинтеза.

1. Радионуклидные данные: распад $^{187}\text{Re} \rightarrow ^{187}\text{Os}$

На существенное значение данных по природным долгоживущим радионуклидам для оценки пределов космологического непостоянства константы электромагнитного взаимодействия $\alpha = e^2/\hbar c$ впервые указал Дайсон [9]. Эта константа определяет кулоновскую энергию ядер и ее изменение чувствительно сказывается на изменении константы радиоактивного распада λ , которое, в свою очередь, должно привести к расхождению между результатами измерений периода полураспада долгоживущего радионуклида в лаборатории (по его излучению в настоящее время) и в старых геологических породах по накоплению дочернего продукта.

Наиболее чувствительным к изменению α , как показал Дайсон (см. [9] и §§ 4, 5 гл. V нашей монографии [2]), является распад ^{187}Re за счет его малой энергии распада, которая представляет собой разность двух больших величин (разности кулоновских энергий ^{187}Re и ^{187}Os и разности энергетических членов, учитывающих в формуле Вейцекера эффект симметрии и разность масс нейтрона и протона). При изменении α эта разность может быть малой только для узкого интервала значений, обеспечивая высокую чувствительность константы распада λ к изменению α : $(d\lambda/\lambda dt) = 2 \cdot 10^4 (d\alpha/\alpha dt)$.

Второе преимущество ^{187}Re связано с его достоинствами как материала для геохимических и космохимических исследований: содержание его в природной смеси изотопов рения достаточно велико (62,6%), продукт его распада – ^{187}Os – не летуч и встречается преимущественно в железных метеоритах, удобных для исследования.

В связи с опубликованием новых данных по измерению периода полураспада ^{187}Re [10, 11] в настоящей работе уточнены пределы возможного изменения $d\lambda/\lambda dt$ из распада ^{187}Re . С этой целью была сделана отдельная оценка значений периода полураспада ^{187}Re для двух наборов данных, состоящих, соответственно, из трех результатов измерений, выполненных методом изотопного анализа молибденовых руд и метеоритов, и пяти результатов лабораторных измерений с помощью пропорционального счетчика, жидкого сцинтиллятора, криогенной микрокалориметрии и масс-спектрометрического анализа нарастания ^{187}Os . Первый набор включает значения 4,3(5) [12], 4,28(21) [13], 4,5(2) [14]. Второй набор включает значения 4,7(5) [15], 3,5(4) [16], 4,5(3) [10], 4,12(11) [11], 4,23(13) [17]. (Все величины – в 10^{10} лет).

Полученные оцененные значения $T_{1/2}$ (^{187}Re) для двух наборов данных – $4,42(14) \cdot 10^{10}$ лет и $4,18(11) \cdot 10^{10}$ лет, соответственно. Из сравнения этих данных $\Delta T_{1/2} = 0,24(18) \cdot 10^{10}$ лет. Отсюда можно заключить, что скорость распада ^{187}Re не увеличилась более, чем на 10% за $4 \cdot 10^9$ лет (возраст руд и метеоритов), то есть $|d\lambda/\lambda dt| \leq 2,5 \cdot 10^{-11} \text{ год}^{-1}$ при $d\lambda/dt > 0$, и не уменьшилась более, чем на 4%, за тот же период времени, то есть $|d\lambda/\lambda dt| \leq 1 \cdot 10^{-11} \text{ год}^{-1}$ при $d\lambda/dt < 0$. Если изменение λ обусловлено временным изменением постоянной тонкой структуры α , верхний предел скорости ее изменения получается как $|d\alpha/\alpha dt| \leq 1,3 \cdot 10^{-15} \text{ год}^{-1}$.

Эта оценка дает ограничение на изменение α того же порядка, что и первоначальные оценки $|d\alpha/\alpha dt|$ из анализа ядерных процессов в природном реакторе Окло [7] и из исследований тонкой структуры абсорбционных спектров квазаров [8] ($\sim 10^{-15} \text{ год}^{-1}$). В 1996 г. Дамюр и Дайсон, используя новые данные по измерениям изотопических сдвигов в ядрах, ревизовали первоначальные оценки по реактору Окло, получив более “жесткое” ограничение: $|d\alpha/\alpha dt| < 6,7 \cdot 10^{-17} \text{ год}^{-1}$ [18]. Анализ продуктов деления в реакторе Окло, сделанный японскими исследователями, еще больше понижает этот предел: $|d\alpha/\alpha dt| < 1 \cdot 10^{-17} \text{ год}^{-1}$ [19].

Нужно, однако, отметить, что оценки $|\mathrm{d}\alpha/\mathrm{d}t|$ по реактору Окло, в отличие от оценок из распада $^{187}\mathrm{Re}$ и спектров квазаров, включают некоторые теоретические предположения о поведении заряженной компоненты ядра, то есть модельно зависимы. Кроме того, оценки изменения α из данных по распаду $^{187}\mathrm{Re}$ и спектрам квазаров по сравнению с оценками по реактору Окло относятся к значительно более протяженным отрезкам космохронологической шкалы: для реактора Окло исследуемый отрезок времени составляет $2 \cdot 10^8$ лет, в то время как для $^{187}\mathrm{Re}$ это $4 \cdot 10^9$ лет, а для квазаров – $(5 \div 10) \cdot 10^9$ лет.

Совокупность всех упомянутых оценок позволяет исключить гипотезы о заметном изменении α с космологическим временем: $\alpha \propto t^n$, $|n| < 10^{-6}$. Поэтому совершенно неожиданной оказалась недавняя публикация [20], в которой приведены наблюдательные доказательства (из спектров квазаров с красным смещением $0,5 < Z < 3,5$) меньших значений α в период времени от 0,23 до 0,87 от возраста Вселенной (8-10 млрд. лет назад ($\Delta\alpha/\alpha \approx -10^{-5}$)). Результаты этой работы требуют дополнительного анализа и проверки.

Достаточно “жесткий” предел из анализа спектров квазаров и данных по природному реактору Окло имеет место и для зависимости от времени константы сильного взаимодействия: $\alpha_s \propto t^n$, $|n| < 10^{-4}$ [8].

Таким образом, единственной из трех констант фундаментальных взаимодействий, на изменение которой нет таких жестких ограничений, является константа слабого взаимодействия α_w . Поэтому интересно посмотреть, считая $\alpha = \text{const}$ и $\alpha_s = \text{const}$, какие пределы изменения этой константы получаются из распада $^{187}\mathrm{Re}$.

Вероятность β -распада пропорциональна α_w^2 . Отсюда верхний предел изменения α_w по результатам расчета изменения $T_{1/2}$ ($^{187}\mathrm{Re}$) за $4 \cdot 10^9$ лет получается как $|\mathrm{d}\alpha_w/\alpha_w \mathrm{d}t| \leq 1,3 \cdot 10^{-11} \text{ год}^{-1}$. Эта оценка того же порядка, что и оценка по реактору Окло [7]. Она допускает слабое изменение α_w с космологическим временем.

2. Модель первичного нуклеосинтеза: выход $^4\mathrm{He}$

Более сильные пределы возможного изменения со временем α_w можно получить из наблюдаемой распространенности $^4\mathrm{He}$ на основе модели первичного нуклеосинтеза.

Основная доля наблюдаемого обилия $^4\mathrm{He}$ – первичного происхождения, лишь около 1/15 его (по массе) образуется в звездах. В настоящее время выход первичного $^4\mathrm{He}$ (массовую долю Y) можно оценить достаточно надежно и использовать его для уточнения наших ранних оценок пределов возможного изменения α_w с космологическим временем [21, 22].

Длительность реакций слабого взаимодействия в равновесной горячей Вселенной является функцией температуры: $\tau = bT^{-5}$, а темп расширения Вселенной описывается зависимостью $t = aT^{-2}$, где t – время от начала расширения. Следовательно, размораживание равновесия в момент времени $t_f = \tau$ происходит при температуре $T_f = (b/a)^{1/3}$, где a и b не зависят от температуры (для стандартной модели $T_f \sim 1$ МэВ). Отметим, что параметр b , связанный со скоростью слабого взаимодействия (и, в том числе, с временем жизни нейтрона τ_n) определяет температуру “развязки” равновесия реакций слабого взаимодействия и “заковки” отношения n/p , то есть в конечном счете определяет количество произведенного $^4\mathrm{He}$ – основного продукта первичного нуклеосинтеза.

Если все нейтроны превращаются в ${}^4\text{He}$, получится $2n_n/(n_n+n_p) \times 100\% {}^4\text{He}$ (по массе), где $n_n/(n_n+n_p)$ – относительная концентрация нейтронов в момент заковки. Расчетное значение выхода первичного ${}^4\text{He}$ зависит, таким образом, от температуры Вселенной в момент заковки $t_f = \tau$. Если длительность протекания реакций слабого взаимодействия (τ) в эпоху космологического нуклеосинтеза отличалась от современного значения (то есть константа слабого взаимодействия в тот период была другой), то момент заковки и температура Вселенной T_f в стандартной модели изменяются в ту или иную сторону, приводя к изменению выхода первичного гелия.

Предполагая, что в период космологического нуклеосинтеза существуют только известные типы элементарных частиц, используем для оценки возможного изменения константы слабого взаимодействия α_w указанные выше зависимости $\tau = bT^{-5}$, $t = aT^{-2}$ и также отношение числа нейтронов к числу протонов в термодинамическом равновесии $n_n/n_p = \exp(-\Delta mc^2/T)$ [23, 24]. Если τ в момент нуклеосинтеза отличалась от современного значения в K раз, то в момент заковки ($t_f = \tau$) температура $T_f \propto K^{1/3}$ и относительная концентрация нейтронов $n_n/n_p = \exp(-K^{-1/3} \cdot \Delta mc^2/T_0)$. Значение T_0 (0,8 МэВ) определяется при $K=1$ (стандартная модель) из наблюдаемой распространенности гелия, а коэффициент K – из пределов этой распространенности.

Наиболее достоверные данные о первичном выходе ${}^4\text{He}$ (Y) получены в обедненных металлами внегалактических областях ионизированного водорода, где гелий наблюдают через рекомбинацию ионов He^+ . Эти данные приводят к значению $Y=0,225(5)$ с оценкой на уровне 2σ пределов $0,21 \leq Y \leq 0,24$ (см. анализ [24] и нашу обзорную статью в УФН [23]). Принимая указанные предельные значения Y для определения K , получим: $0,87 \leq K \leq 1,14$.

Отсюда, учитывая зависимость $\tau \propto \alpha_w^{-2}$, приходим к выводу, что в эпоху первичного (космологического) нуклеосинтеза константа слабого взаимодействия α_w не могла быть меньше современного значения на 6,9% и больше его на 6,6%. Для возраста Вселенной $16 \cdot 10^9$ лет получим следующее ограничение на изменение α_w со временем: $|\text{d}\alpha_w/\alpha_w \text{d}t| \leq 4 \cdot 10^{-12} \text{ год}^{-1}$ (при $\text{d}\alpha_w/\text{d}t > 0$ и при $\text{d}\alpha_w/\text{d}t < 0$). Это более сильное ограничение по сравнению с пределами из распада ${}^{187}\text{Re}$. Кроме того, оно относится к более протяженному промежутку времени по сравнению с возрастом метеоритов.

В заключение отметим, что оценка выхода гелия в первичном нуклеосинтезе позволяет сделать ограничения и на другие космологические гипотезы [25-28]. В частности, в связи с отличием измеренных аннигиляционных характеристик ортопозитрония от теоретических расчетов, Карлсон и Глэшоу [28] использовали оценку выхода гелия в первичном нуклеосинтезе в качестве ограничения на возможность существования зеркального мира в тепловом равновесии с нашей Вселенной. Наличие зеркального мира увеличивает вдвое число сортов частиц в стандартной модели первичного нуклеосинтеза и тем самым увеличивает расчетный выход гелия за наблюдаемые пределы его распространенности. Это происходит за счет уменьшения константы “ a ” в соотношении $t = aT^{-2}$, описывающем темп расширения Вселенной.

В [27] мы обратили внимание на то, что выход гелия в первичном нуклеосинтезе зависит от температуры “развязки” равновесия реакций слабого взаимодействия $T_f = (b/a)^{1/3}$, то есть зависит также от константы b , характеризующей скорость слабых взаимодействий. При пропорциональном изменении этих констант, очевидно, выводы модели первичного нуклеосинтеза не изменятся: $a' = ka$, $b' = kb$. Выяснилось, таким образом, что ограничение по выходу гелия для зеркального мира “не работа-

ет”, если $k=b'/b \leq 0,8$, что соответствует увеличению константы слабого взаимодействия α_w в эпоху первичного нуклеосинтеза на 10% [27]. Такое увеличение эквивалентно однородному уменьшению α_w со временем (при возрасте Вселенной 16 млрд. лет) со скоростью $|\frac{d\alpha_w}{\alpha_w dt}| \geq 6 \cdot 10^{-12} \text{ год}^{-1}$, которая допускается установленными выше пределами из радионуклидных данных.

Нужно отметить, однако, что существуют и другие тесты наличия или отсутствия зеркального мира, так же как другие решения проблемы ортопозитрония, но этот анализ уже выходит за рамки темы данной статьи.

Список литературы

1. Dirac P.A.M. The cosmological constants // Nature. 1937. V. 139. P. 323.
2. Чечев В.П., Крамаровский Я.М. Радиоактивность и эволюция Вселенной. М.: Наука, 1978.
3. Чечев В.П., Крамаровский Я.М. Переменность фундаментальных констант и ядерная космохронология // Препринт Радиевого института им. В.Г. Хлопина, РИ-107. 1979.
4. Чечев В.П., Крамаровский Я.М. Радиоактивные хронометры нуклеосинтеза с изменяющейся константой распада // Препринт Радиевого института им. В.Г. Хлопина, РИ-129. 1980.
5. Chechev V.P., Gurevich L.E., Kramarovskiy Ya.M. Dirac's principle and variability of fundamental constants // Phys. Lett.B. 1972. V. 423. P. 61-63.
6. Chechev V.P., Kramarovskiy Ya.M. Are the fundamental constants constant? // Contemporary Physics. 1972. V. 13. P. 61-73.
7. Sisterna P.D., Vucetich H. Time variation of fundamental constants: Bounds from geophysical and astronomical data. // Phys. Rev. 1990. V. D41. P. 1034-1046.
8. Варшалович Д.А., Иванчик А.В., Потехин А.Ю. Менялись ли в процессе космологической эволюции фундаментальные физические константы? // Известия РАН, сер. физ. 1998.Т. 62. С. 1714-1716.
9. Dyson F.J. Time variation of the charge of the proton // Phys. Rev. Lett. 1967. V. 19. P. 1291-1293.
10. Ashktorab K., Janecke J.W., Becchetti F.D., Roberts D.A. Beta-decay of ^{187}Re and cosmochronology // Phys. Rev. 1993. V. C47. P. 2954-2960.
11. Galeazzi M., Fontanelli F., Gatti F., Vitale S. End-point energy and half-life of the ^{187}Re β -decay // Phys. Rev. 2001. V. C63. P. 014302-1 - 7.
12. Hirt B., Tilton G.R., Herr W., Hoffmeister W.: The Half-Life of ^{187}Re . In: Earth Science and Meteoritics. (Eds: Geiss, J; Goldberg, ED) North- Holland Publishing Co, Amsterdam, 273 (1963).
13. Luck J.-M., Birck J.-L., Allegre C.-J. ^{187}Re - ^{187}Os Systematics in Meteorites: Early chronology of the solar system and age of the galaxy // Nature. 1980. V. 283. P. 256.
14. Luck J.-M., Allegre C.J. ^{187}Re - ^{187}Os Systematics in Meteorites and Cosmochemical Consequences // Nature. 1983. V. 302, P. 130.
15. Payne J.A., Ph.D.thesis, University of Glasgow, 1965. Цитируется в [10].
16. Naldrett S.N. Half-Life of Rhenium: Geologic and cosmologic ages // Can. J. Phys. 1984. V. 62. P. 15.
17. Lindner M., Leich D.A., Russ G.P., Borg R.J. Direct determination of the half-life of ^{187}Re // Geochim. Cosmochim. Acta. 1989. V. 53. P. 1597-1606.
18. Damour T., Dyson F.J. The Oklo bound on the time variation of the fine-structure constant revisited // Nucl. Phys. B. 1996. V. 480. P. 37-54.

19. Fujii Y., Iwamoto A., Fukahori T. et al. Nuclear data in Oklo and time variability of fundamental coupling constants // J. of Nuclear Science and Technology. Suppl. 2, V. 1. August 2002. P. 592-594.
20. Webb J.K., Murphy M.T. et al. // Phys. Rev. Lett. 2001. V. 87. P. 091301-1-4.
21. Крамаровский Я.М., Чечев В.П. Пределы изменения константы слабого взаимодействия по результатам измерений распространенности ^4He . // Изв. АН СССР, сер. физ. 1988. Т. 52. С. 862-863.
22. Чечев В.П., Крамаровский Я.М. Первичный гелий как тест существования зеркальной Вселенной и ограничения на изменение константы слабого взаимодействия // Тезисы докладов 41-го совещания по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра (Минск, 16-19 апреля 1991). Л.: Наука, ЛО. 1991. С. 504.
23. Крамаровский Я.М., Чечев В.П. Загадки самых легких элементов: наблюдения, предсказания, гипотезы // Успехи физических наук. 1999. Т. 169. С. 643-652.
24. Smith M.S., Kawano L.N., Malany R.A. // Astrophys. J. Suppl. 1993. V. 85. P. 219.
25. Розенталь И.Л. Элементарные частицы и структура Вселенной. М.: Наука, 1984.
26. Chechev V.P., Kramarovskiy Ya.M., Levin B.M. Orthopositronium as a test of the mirror universe // Gravitation and Cosmology. 1999. V. 5. P. 87-91.
27. Крамаровский Я.М., Левин Б.М., Чечев В.П. Ортопозитроний, зеркальная Вселенная и первичный нуклеосинтез // Ядерная физика. 1992. Т. 55. С. 441-443.
28. Carlson E.D., Glashow S.L. Nucleosynthesis versus the mirror universe // Phys.Lett., 1987. V. 193B. P. 168-1970.

Limits on variability of the fundamental physical constants from radionuclide data and primary nucleosynthesis model

V.P. Chechev

This article reviews recent work on the possible time variability of coupling constants of the fundamental interactions, such as the fine structure constant $\alpha \equiv e^2/\hbar c$ and the corresponding quantities for the strong and weak interactions. New limits on their time variations have been obtained. Use of separate evaluations for the ^{187}Re half-life by two measurement methods- an analysis of the Re-Os isotopic composition in meteorites and a direct measurement of ^{187}Re specific activity in laboratory – leads to a conclusion that the ^{187}Re decay constant has not increased more than by 10% for $4 \cdot 10^9$ yr and it has not decreased more than by 4% for the same period. This gives a strict limit on the possible change of the fine structure constant: $|\text{d}\alpha/\alpha\text{d}t| \leq 1,3 \cdot 10^{-15} \text{ yr}^{-1}$ and much weaker limit on the variation of the weak interaction coupling constant: $|\text{d}\alpha_w/\alpha_w\text{d}t| \leq 1,3 \cdot 10^{-11} \text{ yr}^{-1}$. An analysis of the helium yield within the framework of the primary nucleosynthesis model leads to stronger limitation of the variability of the latter constant: $|\text{d}\alpha_w/\alpha_w\text{d}t| \leq 4 \cdot 10^{-12} \text{ yr}^{-1}$.

Вариант модификации сил тяготения

А.А. Римский-Корсаков

Рассматриваются приводящие к парадоксам следствия Модифицированной Ньютоновской Динамики (MOND) [1]. Показано, что причиной парадоксов в MOND является пропорциональность малых ускорений не тяготеющей массе, а корню квадратному из этой массы. Предлагается другая модификация сил тяготения, где силы всегда пропорциональны тяготеющей массе, но иначе зависят от расстояния. Следствия из новой модификации тяготения позволяют, как и следствия MOND, отказаться от гипотезы “темной материи” в картине Вселенной, но не содержат противоречий динамики MOND.

Введение

Гипотезы о небольших отклонениях зависимости сил тяготения от общепринятых Ньютоновских возникли в последние десятилетия как альтернатива гипотезе о невидимых гало “темной материи”, окружающих галактики. Наиболее широко обсуждается сегодня в астрофизической периодике [2, 3, 4] так называемая Модифицированная Ньютоновская Динамика (MOND), предложенная М. Милгромом еще в 1983 году [1], и вызывающая в последнее время много комментариев, поскольку ее формулы позволяют получить правильное распределение скоростей звезд на окраинах галактик, хорошо соответствуют так называемому закону Туллии – Фишера и дисперсиям скоростей в скоплениях галактик, что не удается сделать на основе “обычных” моделей гравитации.

Отсутствие (пока что) экспериментальных доказательств существования частиц “темной материи” усиливает интерес к гипотезам типа MOND, не нуждающимся в “темной материи”.

В то же время гипотеза MOND приводит к ряду парадоксальных (и, как будет показано ниже, – абсурдных) выводов, которые мешают воспользоваться ее результатами и вызывают ее обоснованную критику, – например [5].

Целью настоящей работы является разобрать парадоксы гипотезы MOND и предложить другую модификацию тяготения, свободную от трудностей MOND, но сохраняющую ее привлекательную сторону – отказ от невидимой и неуловимой “темной материи” в картине Вселенной.

1. Идея модификации тяготения на больших расстояниях

Основной идеей MOND является изменение зависимости гравитационного ускорения от расстояния R по сравнению с Ньютоновской формулой: $a \sim 1/R^2$. По существу, чтобы избавиться от притяжения “темной материи”, достаточно изменить ход величины a на больших расстояниях (превышающих десятков килопарсек), и движение звезд на окраинах галактик станет возможно объяснить тяготением обычной видимой (барионной) материи. На рис.1 показаны две зависимости a от R – Ньютоновская (сплошная линия) и “модифицированная” – то есть позволяющая обойтись без “темной материи” в галактиках (пунктир). Желательно задать “модифицированную” кривую так, чтобы в пределах больших R она спадала как $1/R$, а при малых R вела себя практически неотличимо от $1/R^2$ – тогда практически все привлекательные выводы MOND будут следствиями такой “модификации”.

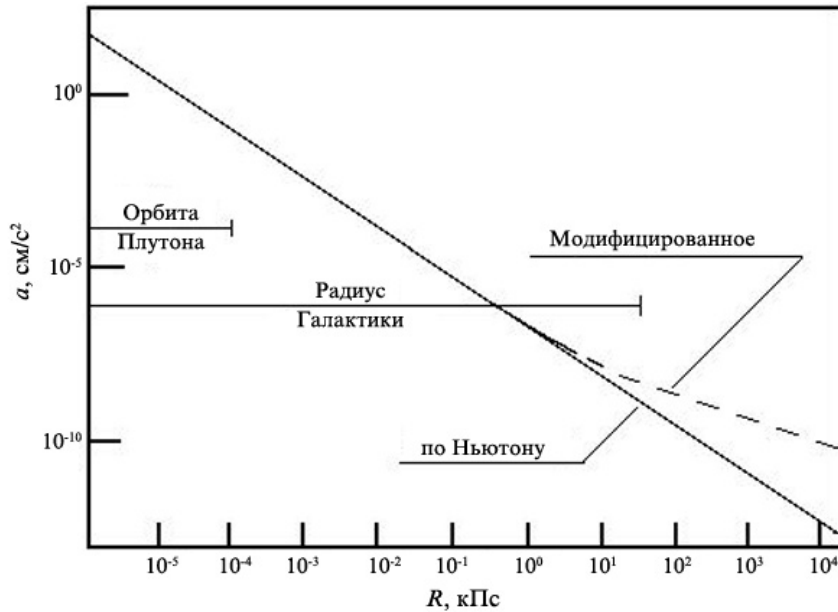


Рис. 1. Гравитационное ускорение от массы $2 \cdot 10^{44}$ г (масса Галактики) в зависимости от расстояния R .
Сплошная кривая – по Ньютону, пунктирная – “модифицированное”.

Из рис. 1 видно, что требуется от “модифицированной” динамики, чтобы достичь желаемого результата – при этом можно выбирать разные варианты формул “модифицированного” ускорения – все они дадут возможность объяснять движения звезд и галактик, не прибегая к “темной материи”.

2. Формулы MOND и их противоречия

Каким образом автор MOND модифицирует Ньютонское ускорение? Он вводит некую интерполяционную формулу, которая при малых ускорениях (и, значит, при больших R) заставляет ускорение a стремиться к

$$a = (a_o \cdot g_n)^{1/2}, \quad (1)$$

где Ньютонское ускорение $g_n = G \cdot M/R^2$, а a_o – некое очень маленькое постоянное ускорение, порядка $1,25 \cdot 10^{-8}$ см/с². В результате модифицированная кривая рис. 1 при R более 10 кПс следует все ближе к зависимости $1/R$ (вместо $1/R^2$), и скорости обращения звезд на окраине галактик не уменьшаются с расстоянием R , а остаются постоянными. Кроме этого результата, позволяющего не использовать гипотезу о гало “темной материи”, удастся объяснить и ряд других астрофизических наблюдений, таких как зависимость Туллии – Фишера и дисперсию скоростей в скоплениях галактик. Казалось бы, все хорошо.

Однако в самой асимптотической формуле $a = (a_o \cdot g_n)^{1/2}$ содержится парадокс, который ведет к абсурду. Действительно, величина g_n стоит в формуле ускорения под корнем, так что ускорение асимптотически становится пропорциональным не самой массе, создающей поле тяготения, а корню квадратному из этой массы. Тогда ускорения от суммы нескольких масс становятся не пропорциональны ускорению от суммарной массы, то есть ускорения и силы перестают быть аддитивными и однозначными, и можно получить любое ускорение, складывая по-разному ускорения от разных частей тяготеющей массы. Действительно, рассмотрим ускорение тяготения a на расстоянии R от некоей массы M .

В соответствии с асимптотической формулой MOND (при большом R) оно стремится к величине $a_1 = (a_0 \cdot g_n)^{1/2} = (a_0 \cdot G \cdot M/R^2)^{1/2} = \text{const} \cdot M^{1/2}$.

Теперь удвоим массу M . Естественно, ускорение тоже должно удвоиться. Однако ускорение от $2M$ будет $a_2 = \text{const} \cdot 2^{1/2} \cdot M^{1/2}$ – удвоения не получается. Очевидно, что ускорения в MOND не складываются! Такая ситуация вообще не позволяет рассматривать никакие системы из многих тел (как то звезды, галактики и т.д.) и совершенно обесценивает формулы MOND. Есть много других парадоксов, вытекающих из формулы $a = (a_0 \cdot g_n)^{1/2}$. В частности, система из двух тел неравной массы в MOND должна двигаться под действием внутренних сил (действие не равно противодействию) – обстоятельство, замеченное Кинни в работе [5].

Возникает вопрос: нельзя ли сохранить положительные результаты MOND, вытекающие из зависимости $a(R)$, показанной на рис. 1, но отказаться от абсурдной формулы $a = (a_0 \cdot g_n)^{1/2}$, заменив ее более логичной? Конечно, это будет уже не MOND, но зато ряд результатов, предсказываемых MOND, останется в силе. Ниже попытаемся предложить такую гипотезу и обсудить ее.

3. Предлагаемый вариант модификации тяготения

Зависимость $a(R)$, показанную на рис. 1, легко получить, добавив к Ньютоновской формуле гравитационного ускорения еще одно слагаемое, пропорциональное не $1/R^2$, а $1/R$. Получим:

$$a = (G \cdot M/R^2) + (K \cdot M/R). \quad (2)$$

Здесь G – гравитационная постоянная, равная $6,673 \cdot 10^{-8} \text{ см}^3/\text{г} \cdot \text{с}^2$, а K – тоже некая постоянная, выбранная так, чтобы ускорение начало сколько-нибудь заметно отличаться от Ньютоновского только на расстоянии около 10 кПс (см. рис. 1). Для этого надо взять $K = 1,7 \cdot 10^{-30} \text{ см}^2/\text{г} \cdot \text{с}^2$. Теперь из формулы (2) видно, что ускорение всегда пропорционально тяготеющей массе M , а следовательно, ускорения от суммы масс аддитивны, парадоксов не возникает, хотя описание движения на больших расстояниях остается таким же, как в MOND. В качестве примера применения формулы (2) рассмотрим рис. 2.

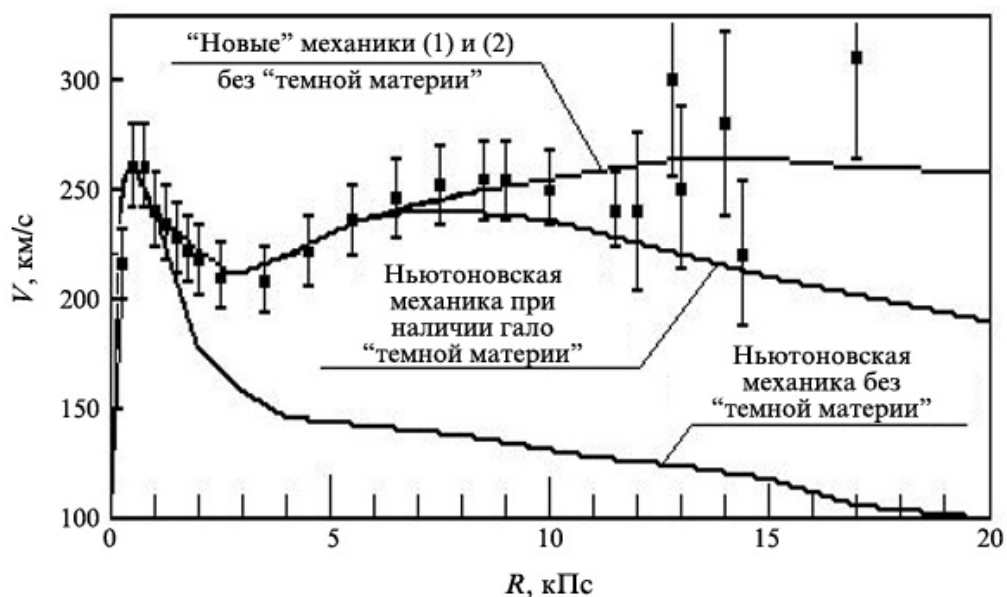


Рис. 2. Скорости звезд в нашей Галактике – варианты описания разными формулами.

Экспериментальные значения (точки) на рис. 2 взяты из обзора [7]. Как видно из рис. 2, обе формулы – MOND (1) и наша (2) – хорошо описывают движение звезд на периферии Млечного Пути, не привлекая гипотезы о гало “темной материи”, которую обычно принято использовать в современных моделях Галактики [6, 7]. Справедливости ради следует сказать, что силы, спадающие как $1/R$, были предложены еще Кинни [5], однако он не связывал их с тяготеющими массами, и в той же работе отказался от своего предложения.

4. Возможные подтверждения и возражения

Естественно, возникает ряд вопросов, связанных с отсутствием наблюдения астрономами следствий формулы (2) в Солнечной системе. Здесь можно сказать, что величина поправок (2) для орбиты Луны всего $4 \cdot 10^{-11}$, тогда как элементы орбиты Луны известны с погрешностями около 10^{-8} . Даже на орбите Плутона поправка составляет (из-за малости K) всего 10^{-6} , тогда как период его обращения и элементы орбиты известны с не лучшей точностью, так что действие второго члена (2) в Солнечной системе пока и не могло быть замечено. Хотелось бы использовать формулу (2) для объяснения аномалии в движении аппарата “Пионер-10”, однако эта аномалия куда больше ожидаемой, так что скорее всего она вызвана чисто техническими причинами.

В масштабе Галактики сравнение, показанное на рис. 2, является хорошим экспериментальным подтверждением формулы (2). Что касается еще больших масштабов, то количественное объяснение [4] закона Туллии – Фишера формулой (1) дает надежду на подтверждение и формулы (2) теми же данными.

Конечно, экспериментальное обнаружение небарионных носителей массы “темной материи” и доказательство их достаточной плотности (хотя бы в пределах Солнечной системы) послужит серьезным аргументом против предлагаемой гипотезы (2) – однако пока такие носители не обнаружены, несмотря на большие усилия экспериментаторов. Может статься, что “темную материю” ждет судьба физического эфира XIX века. В этой ситуации гипотезы типа MOND или (2) являются хорошей альтернативой.

Наиболее трудный вопрос к предлагаемой формуле (2) – необходимость истолкования ее физического (а не феноменологического) смысла. Если толковать ее буквально, то кажется, что она сводится к “несохранению числа силовых линий гравитационного поля” по мере удаления от тяготеющей массы. В качестве предварительной гипотезы можно предположить, что искажение пространства тяготеющей массой приводит к уменьшению площади сферы, окружающей эту тяготеющую массу, так что число линий, пересекающих сферу, остается постоянным, но их плотность на сфере спадает медленнее, чем следует по геометрическому закону $1/R^2$ в “плоском” пространстве. В этом случае можно ожидать “усиления” тяготения на границе распределенного скопления масс (Галактики). Однако это объяснение пока не более чем гипотеза, и должно быть еще обосновано расчетами.

У формулы (2) есть интересное следствие – в таком гравитационном поле невозможен уход спутника в бесконечность, независимо от начальной скорости. Это делает нашу Вселенную связанной независимо от ее плотности и, по-видимому, исключает бесконечное космологическое расширение.

Есть еще одно следствие (2), позволяющее объяснить наблюдаемое несоблюдение теоремы вириала в скоплениях галактик – дело в том, что теорема вириала применима только к потенциалу вида $1/R$ (то есть силам вида $1/R^2$) и неприменима к

любым другим центральным полям, в том числе вида (2) [8]. Если наша гипотеза верна, требовать соблюдения теоремы вириала и не нужно.

Добавим, что в формуле (2) можно при желании добавить еще одно слагаемое – член вида L/R^0 (не зависящий от R), который сыграет роль космологической постоянной, то есть постоянного отталкивания или притяжения. Однако пока для объяснения имеющихся данных такой член не очень нужен.

В заключение автор выражает искреннюю благодарность за предварительное обсуждение идей данной работы и за полезную критику Ю.Н. Гнедину, Ю.Н. Демкову, В.К. Дубровичу, Т.Е. Альберту, Т.Е. Варду и С.Т. Беляеву, хотя это ни в коей мере не возлагает на них ответственность за возможные ошибки или необидительную аргументацию автора.

Список литературы

1. Milgrom M. A Modification of the Newtonian Dynamics as Possible Alternative to Hidden Mass Hypothesis / *Astrophysical Journal*, 1983, 270, p. 365-370.
2. Milgrom M. // The Modified Dynamics – A Status Review, Proceedings of Second International Workshop on Dark Matter / (DARK98), eds. H.V.Klapdor-Kleingrothaus and L.Baudis, 1998 (astro-ph/9810302).
3. Sanders, Robert H. and McGaugh, Stacy S. Modified Newtonian Dynamics as an Alternative to Dark Matter / *Annual Reviews of Astronomy and Astrophysics*, 2002, p. 40.
4. Milgrom M. Does Dark Matter Really Exist? / *Scientific American*, August 2002, p. 30.
5. Kinney, William H. and Brisudova, Martina An Attempt to Do Without Dark Matter / Proceedings of 15-th Florida Workshop in Nonlinear Dynamics.
6. Ostriker J.P., Caldwell J.A.R. in: Large-scale Characteristics of the Galaxy / Symposium of International Astronomical Union, 1979, No. 84, p. 441.
7. Rubin V.C., in: Large-scale Characteristics of the Galaxy / Symposium of International Astronomical Union, 1979, No. 84, p. 441.
8. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. // Теоретическая физика, т.1, Механика, М.: Наука, 1973, с. 35.

Version of modified gravitation forces

A.A. Rimsky-Korsakov

Results of MODified Newtonian Dynamics (MOND) [1] leading to paradoxes are discussed. It is shown that the cause of MOND paradoxes lies in the fact that small accelerations are proportional not to the gravitating mass, but to the square root of that mass. Another modification of gravitation forces is proposed, where forces are always proportional to the gravitating mass, but depend on the distance in a different way. Results of such new modification of gravitation permit, same as results of MOND, to get rid of “dark matter” hypothesis in the description of Universe, but are free from MOND controversies.

К вопросу о “суточных вариациях” скорости бета-распада

М.Н. Чубаров, А.В. Кузнецов, А.А. Римский-Корсаков

Работа заключалась в проверке результатов работы Ю.А. Баурова и соавторов [1], где описаны результаты длительных измерений интенсивности гамма-излучения стандартных источников ^{60}Co и ^{137}Cs типа ОСГИ, в процессе которых были обнаружены суточные вариации (до 0,7%) скорости счета гамма-квантов. Повторение нами этих опытов позволило выявить возможную тривиальную причину вариаций – температурные изменения геометрии измерений, вызванные суточными изменениями температуры в лаборатории. При стабильной температуре вариации отсутствуют.

Введение

В статье Ю.А. Баурова и др. “Experimental Investigations of Changes in β -Decay Rate of ^{60}Co and ^{137}Cs ” [1] описаны результаты длительных измерений интенсивности гамма-излучения стандартных источников ^{60}Co и ^{137}Cs типа ОСГИ, в процессе которых были обнаружены суточные вариации скорости счета гамма-квантов, сопровождающих бета-распад указанных выше радионуклидов. Величины этих вариаций составляют 0,7% для ^{60}Co (измерения ИЯФ) и 0,2% для ^{137}Cs (измерения ОИЯИ). Полученные экспериментальные результаты предлагается объяснить тем, что «существует новое анизотропное взаимодействие, вызванное космологическим векторным потенциалом, новой фундаментальной постоянной...» и т.д. Естественно, столь необычный результат требовал экспериментальной проверки, чему и была посвящена данная работа.

Эксперимент

Некоторые особенности проведения экспериментов, описанных в статье, дают основание для более простого объяснения их результатов. В первую очередь обращает на себя внимание то, что в обоих экспериментах источники излучения устанавливались на малом расстоянии от детекторов (6 и 7 мм). В этих условиях даже очень небольшое изменение этого расстояния приводит к значительному изменению телесного угла, под которым источник “видит” детектор. На рис. 1 показано экспериментально измеренное изменение скорости счета гамма-квантов источника ^{137}Cs типа ОСГИ сцинтилляционным детектором БДЭГ2-23 с диаметром и высотой кристалла NaI(Tl), равными 63 мм, от расстояния источник – кристалл, которое изменялось с помощью прокладок пленки из лавсана толщиной 30 мкм. Исходное расстояние, при котором источник лежит на крышке кристалла, равно примерно 5 мм, принято за ноль. Результаты этих измерений (так же как и соответствующие расчеты) показывают, что уже при изменении расстояния от 5 мм до 5,03 мм скорость счета в такой геометрии изменяется на 0,5% – величину, сравнимую с величиной эффекта, который наблюдался авторами статьи.

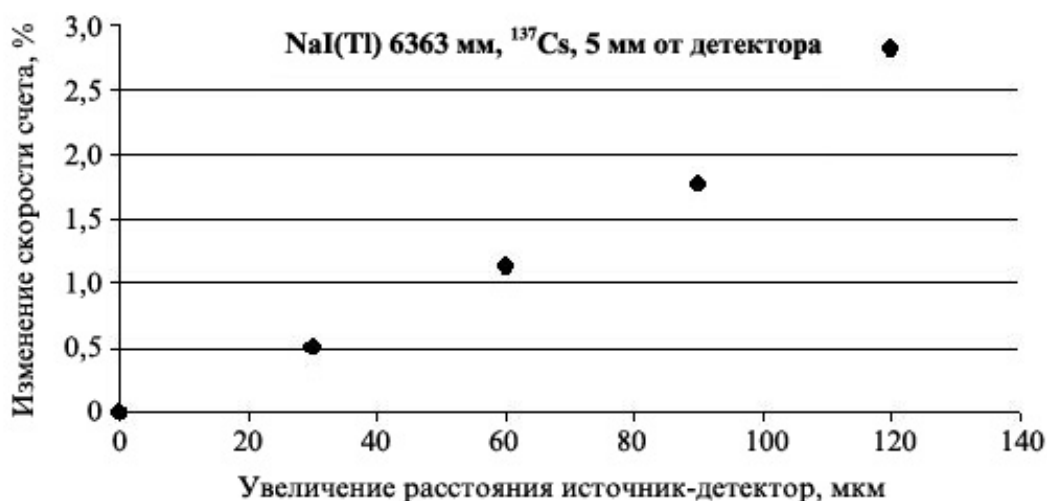


Рис. 1. Влияние геометрии измерений на скорость счета детектора.

Таким образом, естественной причиной обнаруженного авторами эффекта может служить, например, небольшое периодическое изменение расстояния источник – детектор за счет теплового расширения элементов конструкции установки, вызванного суточными колебаниями температуры в рабочем помещении.

Для проверки такого предположения нами были проведены длительные измерения интенсивности гамма-излучения источника ^{137}Cs типа ОСГИ. Измерения велись в обычном лабораторном помещении, с окнами на улицу, источник устанавливался на расстоянии 5 мм от торца сцинтилляционного детектора, то есть примерно в 10 мм от поверхности кристалла.

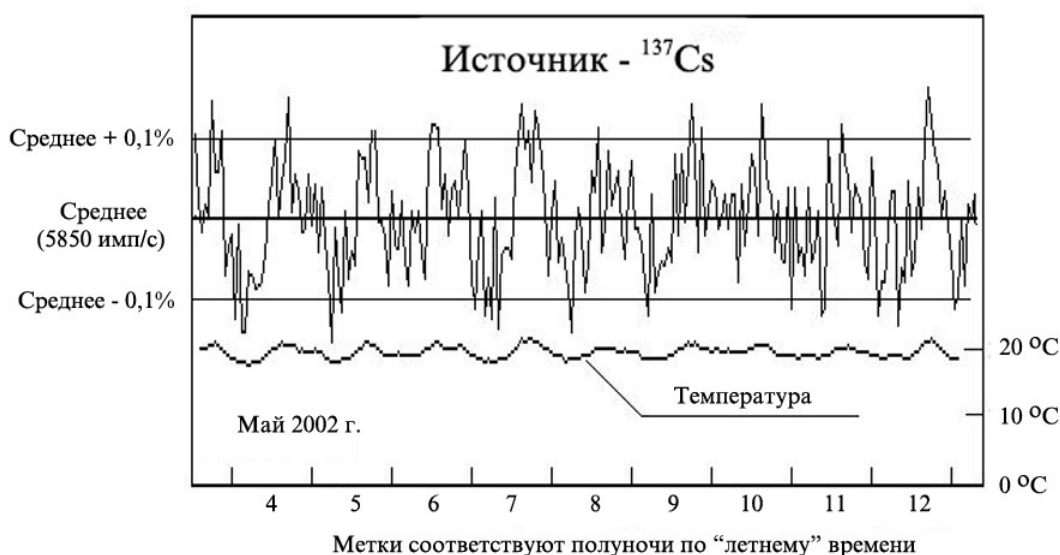


Рис. 2. Суточные вариации в помещении с изменяющейся температурой.

Измерение интенсивности счета гамма-квантов проводилось одновременно с измерением температуры в месте расположения детектора и источника. Температура измерялась с помощью вмонтированной в детектор термопары. Результаты измерений представлены на рис. 2. Отчетливо наблюдаются суточные вариации интенсивности порядка 0,2% при полной корреляции с суточным изменением температуры,

причем максимум скорости счета приходился на конец рабочего дня (температура выше среднесуточной), а минимум – на раннее утро (температура ниже среднесуточной).

Вторая серия аналогичных измерений проводилась в условиях стабильной температуры в подвальном помещении электронного ускорителя без окон, с выключенными отоплением и вентиляцией. Температура в месте расположения источника измерялась ртутным термометром, установленным на поверхности детектора, рядом с источником. В течение всего цикла измерений она равнялась 14 градусам и изменилась не более чем на 0,2 градуса. Источник гамма-излучения ^{137}Cs типа ОСГИ устанавливался на поверхности сцинтилляционного детектора типа БДЭГ2-23 (то есть на расстоянии от поверхности кристалла около 5 мм). При измерениях использовался амплитудный анализатор LP-4900В, никаких специальных мер для стабилизации спектрометрического тракта не принималось. Длительность одного измерения составляла 60 минут живого времени (70 минут реального). Регистрировалось полное число отсчетов в диапазоне энергий гамма-квантов от 200 кэВ до 700 кэВ. Результаты измерений представлены на рис. 3. Видно, что в этих условиях суточные вариации интенсивности гамма-излучения пропали. Проверка показывает, что среднеквадратичное отклонение (7541 имп./70 мин) практически не превышает корня из среднего числа импульсов за измерение ($4,58 \cdot 10^7$ имп./70 мин), так что систематические отклонения от среднего если и существуют, то не превышают 0,02% от среднего значения. Таким образом, кажется вероятным, что причина суточных вариаций скорости счета гамма-квантов при данной геометрии проведения измерений заключается в температурной нестабильности одного или нескольких элементов установки, приводящей к изменению расстояния источник – детектор за счет теплового расширения.

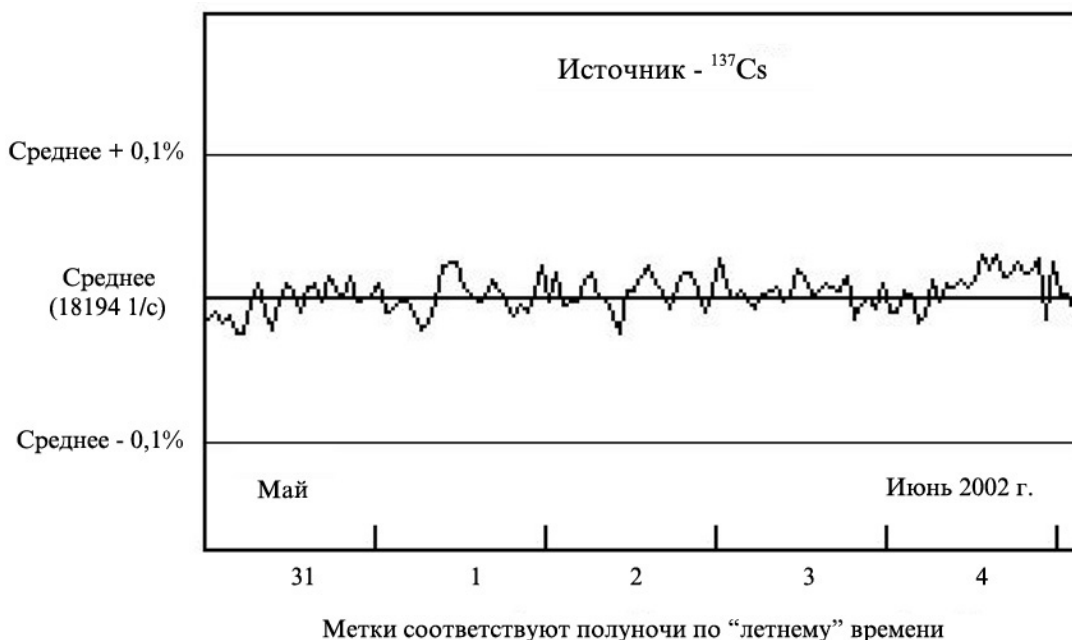


Рис. 3. Отсутствие суточных вариаций при стабильной температуре.

При попытке найти такую нестабильную деталь обращает на себя внимание вторая особенность эксперимента авторов статьи – использование кольцевых источников тип ОСГИ в виде тонкой органической пленки с нанесенным на нее радиоак-

тивным материалом, которая представляет собой тонкую мембрану, способную прогибаться при изменении температуры.

Для проверки такого предположения источник ^{137}Cs типа ОСГИ, лежащий на крышке сцинтилляционного детектора БДЭГ2-23, нагревался с помощью настольной осветительной лампы при непрерывном измерении гамма-спектра и измерении числа отсчетов в области 200-700 кэВ.

Результаты измерений приведены на рис. 4. Измерение температуры вблизи источника производилось с помощью расположенного рядом с ним ртутного термометра. При включении лампы (точка б на рисунке) показания термометра в течение нескольких минут изменялись от 13 до 32 градусов Цельсия. Число отсчетов в указанной выше области амплитудного спектра записывалось каждые 500 с. Резкое уменьшение скорости счета наблюдалось уже в течение второго интервала измерений (верхняя кривая). Для проверки влияния температуры именно на источник излучения он был установлен на детектор обратной стороной, при этом в аналогичных условиях эксперимента наблюдалось такое же резкое увеличение скорости счета (нижняя кривая), что однозначно указывает на прогиб пленки-мембраны при изменении ее температуры. В максимуме изменение скорости счета составило 2%. Верхняя кривая на рисунке соответствует постепенному снижению температуры (отодвигание источника тепла), нижняя – резкому прекращению нагрева (выключение и удаление источника тепла). Обращает на себя внимание быстрое изменение скорости счета при нагревании источника и ее медленное возвращение к исходному значению, что напоминает асимметричную форму пиков в приведенных в статье результатах эксперимента с кобальтом-60, которая вряд ли может иметь объяснение в рамках гипотезы о космологическом векторном потенциале. Следует заметить, что характер поведения источника при изменении его температуры может, по-видимому, быть различным для разных конкретных экземпляров источников.

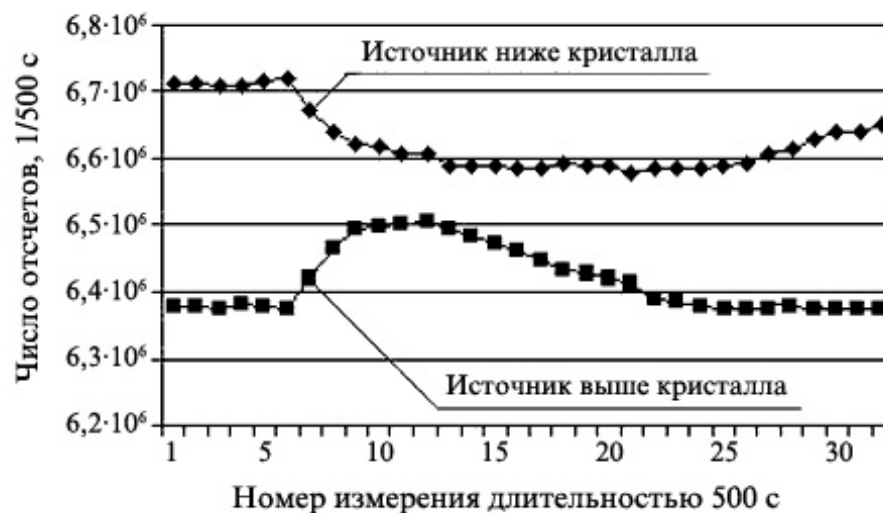


Рис. 4. Прогиб пленки источника ОСГИ при нагревании меняет скорость счета.

Выводы

В результате проведенных длительных измерений в условиях стабильной температуры суточные вариации активности цезия-137 на широте Санкт-Петербурга обнаружены не были. Для окончательной проверки наличия эффекта на широте

ОИЯИ и ИЯФ можно рекомендовать либо установить источники по отношению к детектору обратной стороной и наблюдать (или нет) эффект, «сдвинутый по фазе» относительно эффекта, полученного в предыдущих измерениях, либо отодвинуть источник от детектора на 20-30 см с тем, чтобы небольшие изменения расстояния источник – детектор не оказывали заметного влияния на эффективность регистрации излучения, и провести дополнительную серию измерений в такой геометрии.

В заключение авторы выражают благодарность С.В. Бахмуткину за помощь в измерениях.

Список литературы:

1. Baurov Yu.A., Konradov A.A. et al. / Mod. Phys. Lett., 2001, v. A16, p. 2089-2102.

On “daily variations” of beta-decay rate

M.N. Chubarov, A.V.Kuznetsov, A.A. Rimsky-Korsakov

Paper deals with verification of results published by Yu.A.Baurov et al.[1], where long term measurements of ^{60}Co and ^{137}Cs standard OSGI calibration gamma sources have shown daily variations (up to 0.7%) of gamma count rates. Repeating of these experiments by us permitted to find a possible trivial reason for such variations – the changes in measurement geometry, caused by daily temperature changes in the laboratory. Under stable temperature conditions no variations were observed.

Развитие методов обнаружения и идентификации взрывчатых веществ в Радиевом институте им. В.Г. Хлопина

А.В. Кузнецов, В.П. Аверьянов, И.Д. Алхазов, Д.Н. Вахтин, Б.П. Гаврилов, И.Ю. Горшков, А.В. Евсенин, М.Д. Зубков, О.И. Осетров, В.А. Плющев, В.М. Саидгареев

Представлено краткое изложение работ лаборатории прикладной физики Радиевого института по развитию современных методов обнаружения опасных веществ с помощью СВЧ-метода, метода неразрушающего анализа на базе изотопного источника нейтронов и оригинального метода наносекундного нейтронного анализа. Приводятся описания основных технических и эксплуатационных характеристик созданных действующих прототипов устройств для обнаружения взрывчатых веществ в гомогенных средах и багаже.

Существующие устройства для обнаружения и идентификации взрывчатых веществ (ВВ) можно условно разделить на четыре группы:

1. Устройства, основанные на использовании для исследования внутренней структуры подозрительного объекта проникающих излучений, с последующим анализом полученного изображения оператором (рентгеновские установки, подповерхностные радары, микроволновые сканеры).
2. Устройства, основанные на обнаружении следов или паров опасных веществ (детекторы паров, биосенсоры).
3. Устройства, обнаруживающие признаки возможного присутствия ВВ (металлодетекторы).
4. Устройства, использующие методы непосредственного обнаружения ВВ (методы гамма-радиографии, ядерный квадрупольный резонанс, различные ядерно-физические методы).

В лаборатории прикладной физики Радиевого института проводятся работы по развитию устройств, относящиеся к 1-й и 4-й из указанных групп, а именно:

1. Устройства, основанные на облучении подозрительной области электромагнитным излучением СВЧ-диапазона с последующим анализом амплитудно-частотного распределения отраженного и рассеянного электрического поля;
2. Приборы для неразрушающего анализа внутреннего содержимого различных объектов, основанные на “нейтрон-гамма” методах.

На рис. 1 изображено созданное СВЧ устройство для обнаружения ВВ в багаже и гомогенных средах. В устройстве в качестве зондирующего излучения используется частотно-модулированный непрерывный сигнал в диапазоне частот от 2 до 8 ГГц. На основе анализа частотных зависимостей амплитуды и фазы суммарного электромагнитного поля прибором восстанавливается СВЧ-изображение скрытых в гомогенных средах предметов и производится идентификация объекта, исходя из его формы и диэлектрических характеристик. Глубина сканирования СВЧ-модулем гомогенной среды составляет для песчаного грунта с влажностью $< 0,1\%$ – 50 см, для песчаного грунта с влажностью $\sim 16\%$ – 5 см, для бетона – 20 см. Предел обнаружения (линейный размер) – 1 см. Мощность СВЧ-излучения не превышает 1 мВт, масса – 5 кг.



Рис. 1. Лабораторные испытания ручного устройства для обнаружения ВВ, скрытых в гомогенных средах и багаже.

На рисунке 2 изображен созданный прототип мобильного прибора для поиска взрывчатых веществ, скрытых в грунте, стенах и ручном багаже. В приборе используются миниатюрная ионизационная камера с изотопным источником нейтронов (^{252}Cf) и специально изготовленный электронный блок с питанием от аккумуляторных батарей.

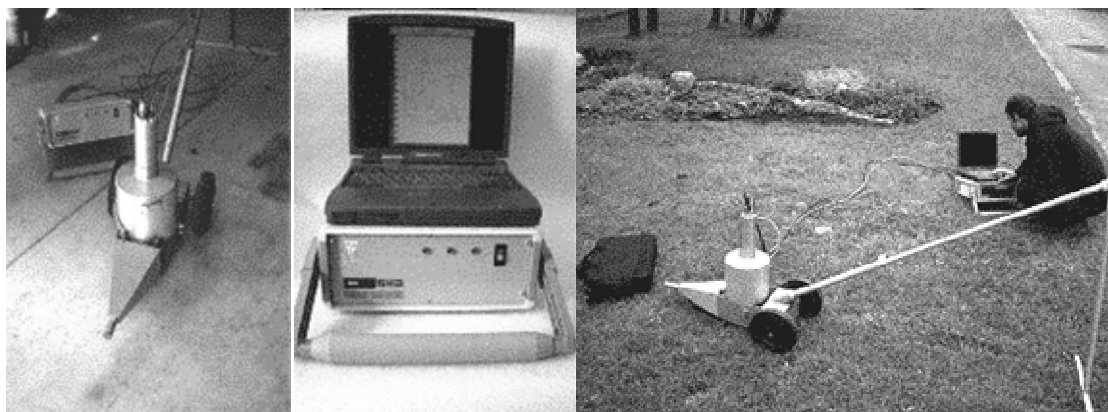


Рис. 2. Прототип мобильного прибора для обнаружения взрывчатых веществ в лаборатории и во время проведения полевых испытаний.

Для обнаружения взрывчатых веществ используется метод неразрушающего элементного анализа. При облучении объекта нейтронами образуется вторичное гамма-излучение. Измеренные спектры вторичного гамма-излучения позволяют определять относительные концентрации основных химических элементов (углерода, кислорода, азота, водорода и других) в исследуемом объекте; поскольку взрывчатые и другие опасные вещества характеризуются специфическими соотношениями концентраций химических элементов, возможно идентифицировать их в присутствии других веществ и бытовых товаров. Повышенная влажность среды (до 40% по массе) и металлические преграды толщиной до нескольких сантиметров не являются поме-

хой при работе прибора. Существующий прототип прибора идентифицирует 400 граммов скрытого взрывчатого вещества в течение 5 минут. Вес установки не превышает 30 кг. Прибор полностью энергонезависим и питается от аккумуляторных батарей.

На рисунке 3 представлен действующий прототип портативного устройства для обнаружения и идентификации ВВ, основанного на разработанном в Радиовом институте методе наносекундного нейтронного анализа (ННА). Прибор базируется на малогабаритном нейтронном генераторе ($1 \cdot 10^8$ нейтронов/сек) со встроенным детектором альфа-частиц, сопутствующих нейтронам в реакции $t(d,n)\alpha$ (совместная разработка с ВНИИА).

Метод ННА позволяет решить основную проблему, существующую при решении задач идентификации опасных веществ нейтронными методами, которая состоит в очень высокой загрузке спектрометрического тракта гамма-излучения, вызванной регистрацией фонового гамма-излучения из-за взаимодействия нейтронов с конструктивными элементами самой установки, с веществом исследуемого объекта и всего окружающего установку и исследуемый объект пространства. Высокий уровень фоновой загрузки до последнего времени не позволял говорить о сколь-нибудь значимом практическом применении нейтронных методов для реального поиска опасных веществ, например, внутри багажа пассажиров.

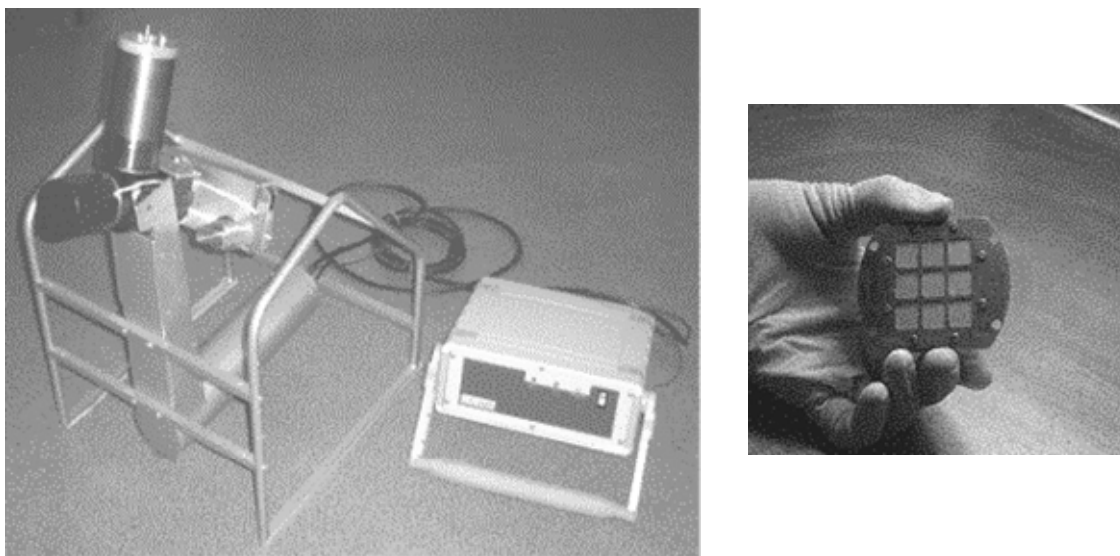


Рис. 3. Действующий прототип портативного устройства для обнаружения и идентификации ВВ, базирующийся на малогабаритном нейтронном генераторе со встроенным детектором сопутствующих частиц. Справа – девятиsegmentный встроенный детектор сопутствующих альфа-частиц.

Метод ННА с пространственной селекцией регистрируемых гамма-квантов позволил более чем на два порядка понизить уровень регистрируемого фонового излучения и вплотную приступить к созданию реально действующих прототипов по поиску опасных веществ.

Подавление фона регистрируемого гамма-излучения, и, соответственно, выделение полезного сигнала от обнаруживаемого объекта в методе ННА обусловлено:

1. Регистрацией гамма-квантов в пределах очень узких (~ 10 нс) временных окон, начало которых определяется моментом регистрации сопутствующей альфа-частицы. Нейтроны из дейтерий-тритиевой реакции с энергией около 14 МэВ (скорость около 5 см/нс) достигают досматриваемой области и вызывают мгновенные вторичные гамма-кванты, которые со скоростью света достигают детектора гамма-квантов. Все гамма-кванты, которые приходят до того, как нейтрон попадает в исследуемую область, либо после того как он вылетает из нее, не связаны с реакциями в данной области и фильтруются системой сбора данных.
2. Позиционно-чувствительный детектор альфа-частиц, встроенный в нейтронный генератор, дает информацию о месте, в котором произошло взаимодействие нейтрона с материалом осматриваемого объекта, поскольку направление движения альфа-частиц однозначно связано с направлением движения соответствующего нейтрона. Если регистрируется гамма-квант, но при этом не регистрируется альфа-частица, то это означает, что гамма-квант пришел не из области чувствительности прибора, и этот гамма-квант не рассматривается при анализе.

Использование двух указанных ограничений позволяет реализовать главную идею метода ННА – подавление фона от объектов, находящихся вне осматриваемой области, и, соответственно, многократно повысить отношение сигнал/шум.

Таким образом, встроенный в нейтронный генератор позиционно-чувствительный детектор сопутствующих частиц позволяет получать посегментное изображение в горизонтальной плоскости, а использование наносекундных интервалов времени позволяет получать изображение срезов объекта по глубине, то есть трехмерное элементное изображение объекта. Получаемая в режиме “on-line” информация с гамма-детектора и сегментов альфа-детектора автоматически анализируется, и оператору выдается информация о том, какое опасное вещество содержится в досматриваемом объеме, в каком количестве и в каком месте.

Созданный действующий прототип устройства обнаруживает и идентифицирует 100 г взрывчатого вещества в течение 10 секунд с пространственным разрешением 10 см. Одновременно досматриваемая область пространства равна $30 \times 30 \times 30$ см³. Масса и габариты устройства не превышают, соответственно, 40 кг и $50 \times 40 \times 30$ см³. Потребляемая мощность при автономном электропитании – 50 Вт.

Список литературы

1. Kuznetsov A.V. Development of a Spontaneous Portable Neutron Source with a Built-in System for Registration of Accompanying Particles for Background Reduction // Proceedings of IAEA Research Coordination Meeting “Application of Nuclear Techniques to Anti-personnel Landmines Identification”, 23-26 November 1999, RBI, Zagreb, Croatia.
2. Kuznetsov A.V. A Spontaneous Portable Neutron Source with a Built-in System for Registration of Accompanying Particles for Background Reduction // Proc. of The International Conference “Explosives and Drug Detection Techniques”, 18-24 June, 2000, Crete, Greece.
3. Kuznetsov A.V. Nuclear sensor for explosives detection based on timed radioactive source // Proc. of the Second Australian-American Joint Conference on the Technologies of Mine Countermeasures, Sydney, Australia, 27 – 29 March 2001. ISBN 0-642-99623-7.

4. Kuznetsov A.V. A prototype of mobile device for explosives and landmines identification based on timed radioactive source // Proc. the 7th International Conference on Applications of Nuclear Techniques "Nuclear and Atomic Industrial & Analytical Applications", Crete, Greece, 17 – 23 June 2001.
5. Kuznetsov A.V. Explosives and landmines identification based on times radioactive source. // Proc. of the Second RCM on Application of Nuclear Techniques to Anti-personnel Landmines Identification., St-Petersburg, Russia, 11-14 Sept., 2001. (IAEA/PS/RC-799-2).
6. Kuznetsov A.V. Concept of a combined mobile device for explosives and landmines identification based on timed neutron source and electromagnetic UHF waves // H.Schubert, A. Kuznetsov (eds.), proc. of the NATO ARW #977941 "Detection of explosives and land mines: methods and field experience", St.-Petersburg, Russia, 11 – 14 September 2001, Kluwer Academic Publishers, pp. 21-32, (2002).
7. Vakhtin D.N. et al. Decision-taking procedure for explosives detection by nuclear technique // *ibid*, pp. 59-67.
8. V.P.Averianov et al. Explosives Localization and Pre-Identification Based on UHF Electromagnetic Waves // *ibid*, pp. 137-146.
9. Kuznetsov A.V. et al. Combined sensor for detection of explosives based on timed neutron source and continuous microwaves // Proc. of the Fifth International Symposium on Technology and the Mine Problem. Naval Postgraduate School, Monterey, California. April 22-25, 2002.

Development of methods of detection and identification of explosive substances in V.G. Khlopin Radium Institute

A.V. Kuznetsov, V.P. Averianov, I.D. Alkhazov, D.N. Vakhtin, B.P. Gavrilov,
I.Yu. Gorshkov, A.V. Evsenin, M.D. Zubkov, O.I. Osetrov, V.A. Plushev,
V.M. Saidgareev

Overview of the research and development work at Radium Institute in the field of non-intrusive detection of explosives and other hazardous materials is presented. New methods based on electromagnetic waves in ultra-high frequency range (microwave technique) and on timed (nanosecond) neutron source (Nanosecond Neutron Analysis) have been developed. Technical characteristics of prototype devices for detection of explosive substances based on these two methods are given. Prototypes are intended for detection of explosive and other hazardous materials in homogeneous environments, in passenger luggage, including those that are hidden inside air-tight or metallic containers.

Анализ закономерностей загрязнения приземного воздуха радионуклидами при длительной эксплуатации (1982-2002 гг.) радиационно-опасных объектов на российском побережье Балтики

Л.Д. Блинова, В.Н. Душин

Проводится анализ закономерностей формирования загрязнения приземного воздуха техногенными радионуклидами в результате длительной эксплуатации в нормальном режиме радиационно-опасных объектов в регионе города Сосновый Бор Ленинградской области. Работа выполнена на основе статистического и корреляционного анализа многолетних исследований загрязнения приземной атмосферы.

Введение

При эксплуатации АЭС и других радиационно-опасных объектов в нормальном режиме в окружающую среду с газоаэрозольными выбросами в регламентированных пределах поступают радиоактивные вещества. Цель исследований заключается в анализе долговременных процессов формирования загрязнения радиоактивными нуклидами приземного слоя атмосферы. Результаты исследований могут быть использованы при:

- принятии решений о продлении ресурса АЭС и/или снятии с эксплуатации технологического оборудования, связанного с радионуклидами;
- оценке воздействия на окружающую среду;
- верификации моделей рассеяния радиоактивных веществ по региональным данным;
- оптимизации структуры и объема радиационного мониторинга;
- разработке методологии и проведении оценки радиационного риска от загрязнения окружающей среды радионуклидами;
- планировании контрмер в случае чрезвычайных ситуаций с радиационным фактором и др.

Объем и методы исследований

На российском побережье Балтийского моря (г. Сосновый Бор Ленинградской области) около 30 лет функционируют Ленинградская АЭС с реакторами РБМК-1000 первого поколения, Региональное предприятие по переработке и приповерхностному хранению отходов низкой и средней активности – Ленинградский спецкомбинат «Радон», Научно-исследовательский технологический институт им. А.П. Александрова, предприятие по дезактивации и переработке металлических радиоактивных отходов – ЗАО «Экомет-С». Существуют планы расширения объемов производства и развития ядерно-энергетических объектов. Расположение объектов ядерного комплекса в этом регионе вызывает закономерный интерес и повышенное внимание общественности к вопросам обеспечения радиационной безопасности. Регион (см. рис. 1) площадью около 1200 км² с населением менее 100 тыс. человек характеризуется доминированием в промышленности предприятий ядерного цикла, в сельском хозяйстве – интенсивными агрокультурой и животноводством. 30-километровая зона Ленинградской АЭС полностью входит в эти границы и является частью района исследований.

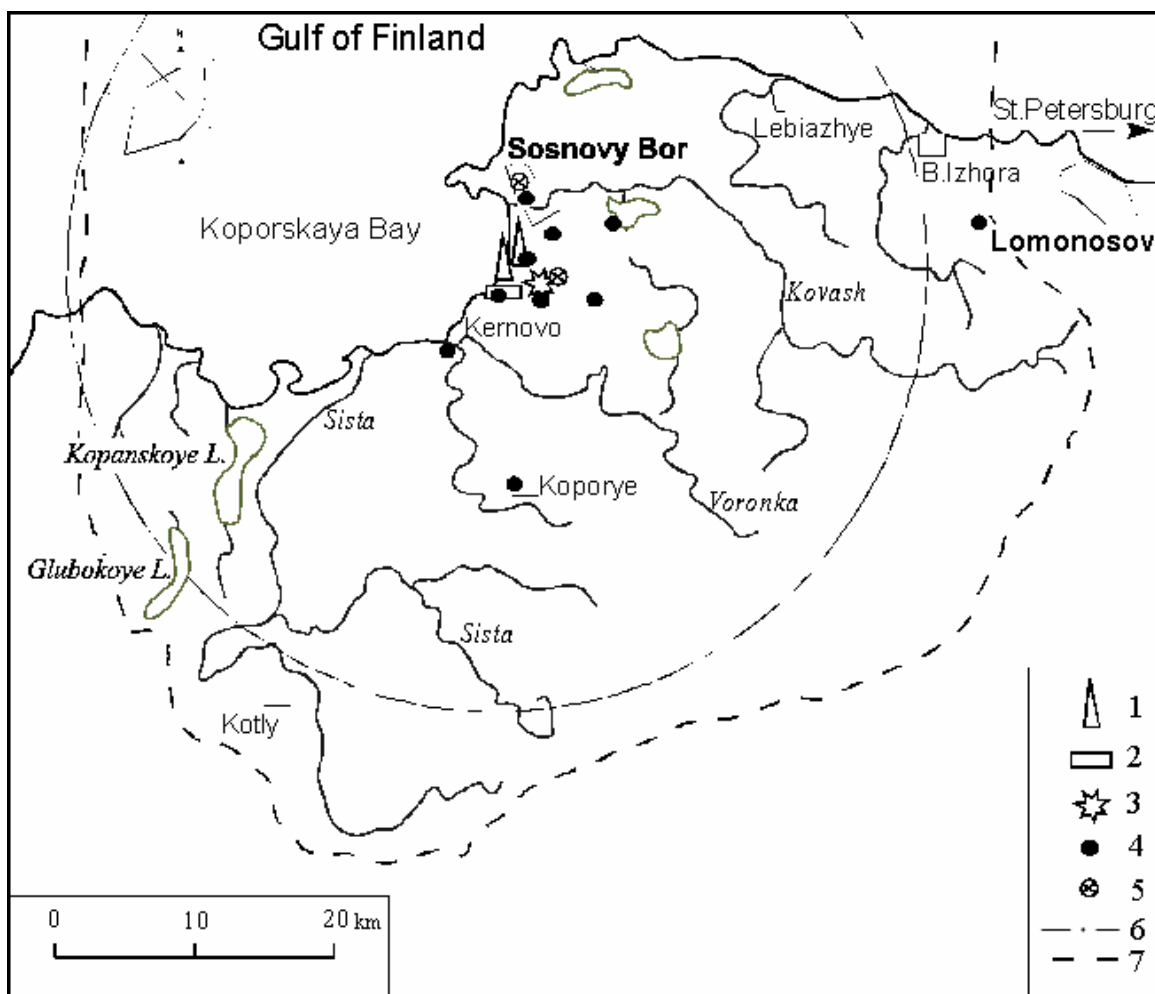


Рис. 1. Схема радиозоологического мониторинга в регионе РОО г. Сосновый Бор.

1 – ЛАЭС, 2 – НИТИ, 3 – ЛСК «Радон» и ЗАО «Экомет-С», 4 – фильтровентиляционные установки (ФВУ), 5 – ФВУ «Hunter», 6 – 30-километровая зона, 7 – водосборный бассейн

Рассматриваемый период времени, 1982-2002 гг., может быть разделен на временные интервалы, связанные со специфическими режимами работы радиационно-опасных объектов (РОО) региона, в частности:

- период минимальных глобальных атмосферных выпадений радионуклидов после испытаний ядерного оружия – 1982-1985 гг.; в 1982 году ЛАЭС вышла на проектную мощность;
- период интенсивных атмосферных выпадений техногенных радионуклидов, обусловленных их трансграничным переносом из района аварии на Чернобыльской АЭС – 1986 г.;
- период долговременных последствий для компонентов природной среды зоны наблюдения, связанный с включением «чернобыльских» радионуклидов в биологические циклы миграции вещества и вторичным ветровым подъемом – 1987-2002 гг.;
- капитальный ремонт энергоблоков ЛАЭС – с февраля 1989 года и по настоящее время;

- начало опытной, а затем и промышленной переработки загрязненного радионуклидами металла (1995-1996 гг.).

Газоаэрозольные выбросы ЛАЭС поступают в атмосферу через две вентиляционные трубы (100 м и 150 м), при нарушениях технологических режимов на РОО региона возможно поступление в атмосферу радионуклидов на существенно меньшей эффективной высоте – 5-20 м (так называемая “сдувка на кровлю”). Функционирует 10 станций отбора проб воздуха, снега, осадков, почвы и иных объектов природной среды на расстояниях до 35 км от АЭС. Высокопроизводительные ФВУ обеспечивают еженедельный сбор образцов атмосферных аэрозолей на фильтры из ткани Петрянова. Две установки, предоставленные СТУК Финляндии в качестве технической помощи, оборудованы, кроме того, угольными фильтрами, позволяющими контролировать газовую фракцию йода в воздухе. Производительность ФВУ составляет от 200 до 700 м³ в час. Расположение ФВУ можно увидеть на рис. 1. Для измерения содержания радионуклидов используются 3 полупроводниковых спектрометра, которые при времени накопления спектра гамма-фотонов до 5 часов обеспечивают нижний порог регистрации 1 мкБк/м³. Специальное программное обеспечение, разработанное для обработки спектров гамма-фотонов для определения активности ¹³⁷Cs в объектах природной среды, позволяет измерять содержание ¹³⁷Cs выше 0,1-0,2 мкБк/м³. Более подробно объем и методы исследований изложены в [1, 2].

В лаборатории существуют специальные процедуры для обеспечения качества измерений. Корректность измерений образцов проверяется регулярными тестами образцовых источников, параллельным анализом образцов, ежемесячным измерением фоновых спектров спектрометров, регулярным участием в межлабораторных калибровочных измерениях. Лаборатория аттестована Госстандартом РФ в системе лабораторий и центров радиационного контроля.

В статье рассматриваются объемные активности техногенных радионуклидов (^{134,137}Cs, ¹³¹I, ⁶⁰Co, ⁵⁴Mn, ⁵¹Cr), частоты их обнаружения в пробах аэрозолей приземного воздуха. Под частотой обнаружения понимается отношение количества проб, в которых данный радионуклид обнаружен, к общему количеству проб данного вида, отобранных в единицу времени, как правило, за год. Реальный порог обнаружения составлял от 0,3 мкБк/м³ (для проб, отбираемых в течение месяца) до 1,0 мкБк/м³ (для суточных и еженедельных проб).

Результаты и обсуждение

Динамические характеристики загрязнения приземной атмосферы радионуклидами, такие как концентрация в воздухе, частота обнаружения и их среднегодовые значения на территории промплощадки, в санитарно-защитной зоне (СЗЗ) и зоне наблюдения (ЗН) ЛАЭС являются важным критерием оценки степени стабильности технологического оборудования АЭС и других РОО региона. Учитывая крайне низкие уровни содержания радионуклидов в воздухе, необходимость длительных экспозиций и длительных гамма-спектрометрических измерений, использования прецизионного оборудования, такие исследования носят долговременный, ресурсоемкий характер. Измерения показывают, что коррозионные продукты (такие как Mn и Co) и аэрозоли йода присутствуют в воздухе в радиусе 5 км от АЭС в 60-90% образцов (см. рис. 2) при условиях нормальной эксплуатации АЭС. Средние значения концентрации варьируются от единиц мкБк/м³ до сотен мкБк/м³. Длительные наблюдения радиоактивного загрязнения приземного слоя воздуха в г. Сосновый Бор, который расположен в 5 км от АЭС, в направлении преобладающих ветров показывают, что

концентрации измеряемых радионуклидов в г. Сосновый Бор составляют 10-30% от значений концентраций регистрируемых на промплощадке АЭС в то же самое время. Этот результат является весьма важным, характеризует сложные процессы атмосферного переноса в прибрежной зоне Копорской губы и может быть использован при планировании контрмер.

В [1] было показано, что с начала первого капитального ремонта и реконструкции первой очереди ЛАЭС (1989-1991 гг.) частота обнаружения иода несколько снизилась. После ввода в эксплуатацию после ремонта (в 1992 г.) частота регистрации иода и продуктов активации (^{60}Co , ^{54}Mn) возросла (см. рис. 2). До 2000 г., содержание изотопов ^{131}I (аэрозоль) и продуктов коррозии (^{60}Co , ^{54}Mn) в воздухе г. Сосновый Бор находилось, как правило, в диапазоне 2,0-20,0 мкБк/м³. Наиболее вероятной причиной роста является старение технологического оборудования и использование конструкционных элементов первой очереди. Данные воздушного мониторинга, полученные позднее [1], показали, что частота обнаружения ^{131}I (аэрозоль) в слое приземного воздуха на промплощадке АЭС постепенно уменьшилась с 60% в 1997 г. до 1% в 2002 г. (см. рис. 2).

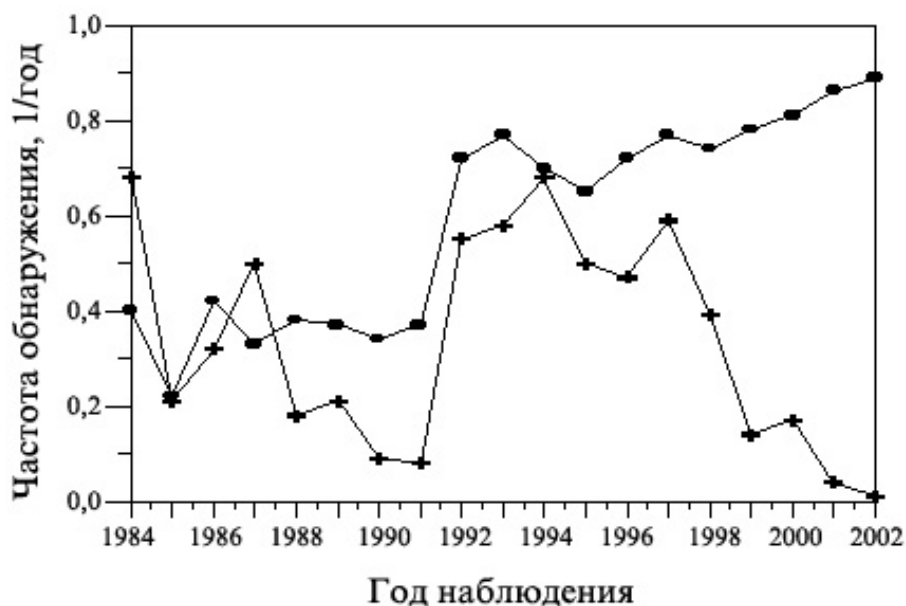


Рис. 2. Частота обнаружения радионуклидов ^{60}Co и ^{131}I (аэрозоль) на промплощадке АЭС.

● — ^{60}Co , + — ^{131}I

Максимальная регистрируемая концентрация ^{137}Cs практически не изменилась (примерно 1000 мкБк/м³), также практически не изменилась частота регистрации радиоактивного кобальта. В то же время значительно уменьшились значения средних концентраций ^{137}Cs (с 40 мкБк/м³ в 1993 г. до 10 мкБк/м³ в 2002 г.), ^{131}I (аэрозоль, с 25 мкБк/м³ до 1 мкБк/м³), ^{60}Co (с 25 мкБк/м³ до 7 мкБк/м³) и ^{54}Mn (с 15 мкБк/м³ до 5 мкБк/м³), в графическом виде данные показаны на рис. 3-12 (данные для периода 26.04.86 - 31.12.86 исключены). Мы применили термин “среднегодовая концентрация” для обозначения величин оценок средних для года величин концен-

траций радионуклидов, вычисляемых как моменты дельта-логнормального распределения (см. ниже) на основе экспериментальных данных. Результаты оценок по данным мониторинга подтверждают высокую эффективность работ по модернизации и герметизации оборудования ЛАЭС в 1997, 1998 и 1999 гг. и могут рассматриваться как предварительная информация о качественных изменениях в функционировании ЛАЭС в условиях длительной нормальной эксплуатации.

На рис. 3-12 показаны результаты оценок среднегодовых значений концентраций ^{137}Cs , ^{131}I , ^{54}Mn и ^{60}Co . Учитывая крайне малые величины концентраций и связанное с этим значительное число случаев значений ниже порога регистрации (от 10% для ^{137}Cs до 80% для ^{131}I измерений находились ниже порога регистрации оборудования), были использованы методы [3], рекомендованные для работы с усеченными распределениями. Для обработки наших данных мы ориентировались на технику «Delta-Lognormal статистики», то есть полагали, что распределение измеренных значений имеет вид суммы двух распределений – дельта- и логнормального. С точки зрения авторов, использование этих распределений для результатов измерений объектов природной среды оправдано и имеет практические основания. Хотя, идеологически, со статистической точки зрения, логичнее было бы рассмотрение набора экспоненциальных распределений. Результаты оценок средних значений были весьма устойчивы: так, использование различных статистик приводило к варьированию результата до примерно 10% при числе измерений ниже порога регистрации до 80%.

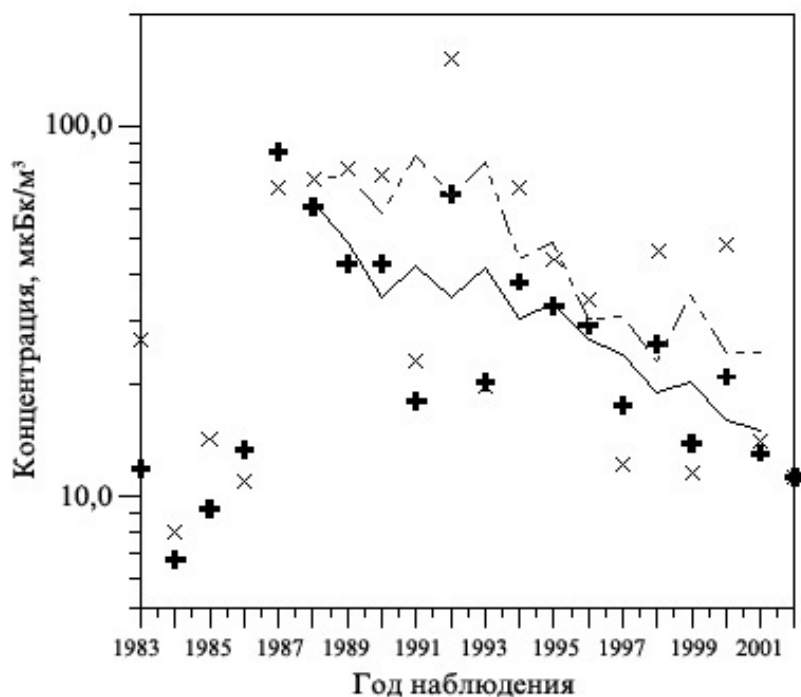


Рис. 3. Среднегодовая концентрация ^{137}Cs на промплощадке АЭС.

Линия и + - концентрация ^{137}Cs
 Пунктир и x – дисперсия концентрации ^{137}Cs

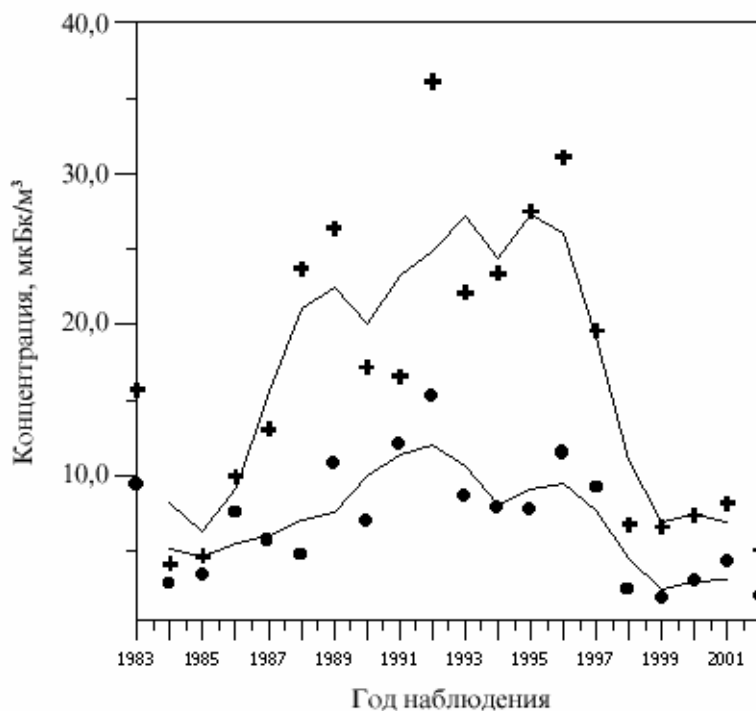


Рис. 4. Среднегодовая концентрация ^{60}Co и ^{54}Mn на промплощадке АЭС.

Линия и + – концентрация ^{60}Co

Линия и • – концентрация ^{54}Mn

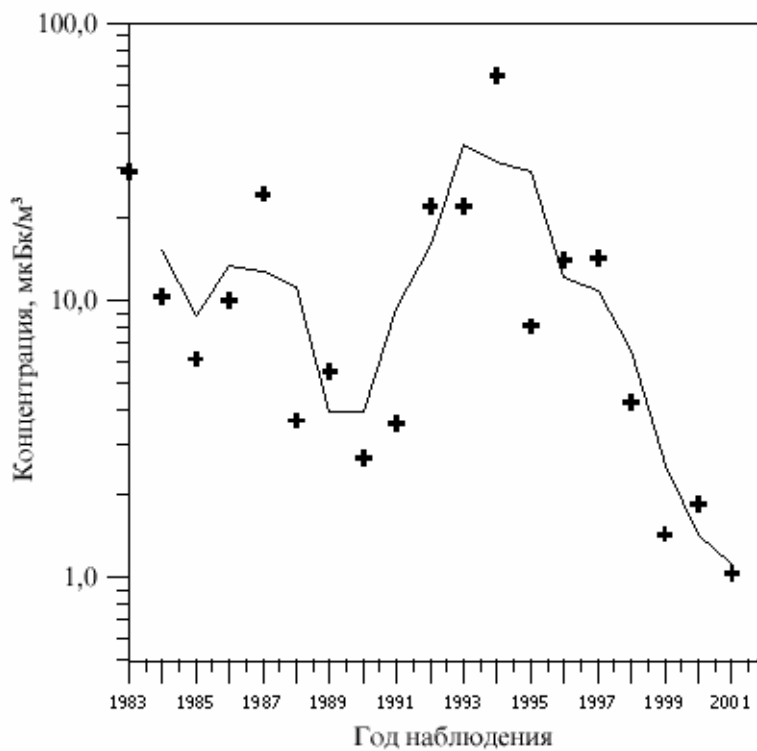


Рис. 5. Среднегодовая концентрация ^{131}I на промплощадке АЭС.

Линия и + – концентрация ^{131}I

Оценки дисперсии среднегодового значения концентрации радионуклида оказались примерно равными или незначительно выше собственно среднего значения, что характерно для случайного процесса с экспоненциальным распределением и говорит о том, что случайный процесс формирования загрязнения приземного воздуха описывается одним параметром, то есть в первом приближении – одним рутинным процессом с постоянной интенсивностью. Для ряда лет мы получили значения дисперсий и, соответственно, интервалов доверительности значительно выше собственно среднего значения. Эти наборы данных относятся к интервалам времени, когда наблюдались единичные высокие (на 1-2 порядка выше) концентрации радионуклидов. Например, для измерений на промплощадках АЭС и ЛСК «Радон» можно указать годы 1992, 1994, 1998, когда фиксировались единичные значения высоких концентраций радионуклидов. Со статистической точки зрения это означает, что на один рутинный процесс формирования загрязнения наложился еще один процесс формирования загрязнения с другим значением параметра распределения.

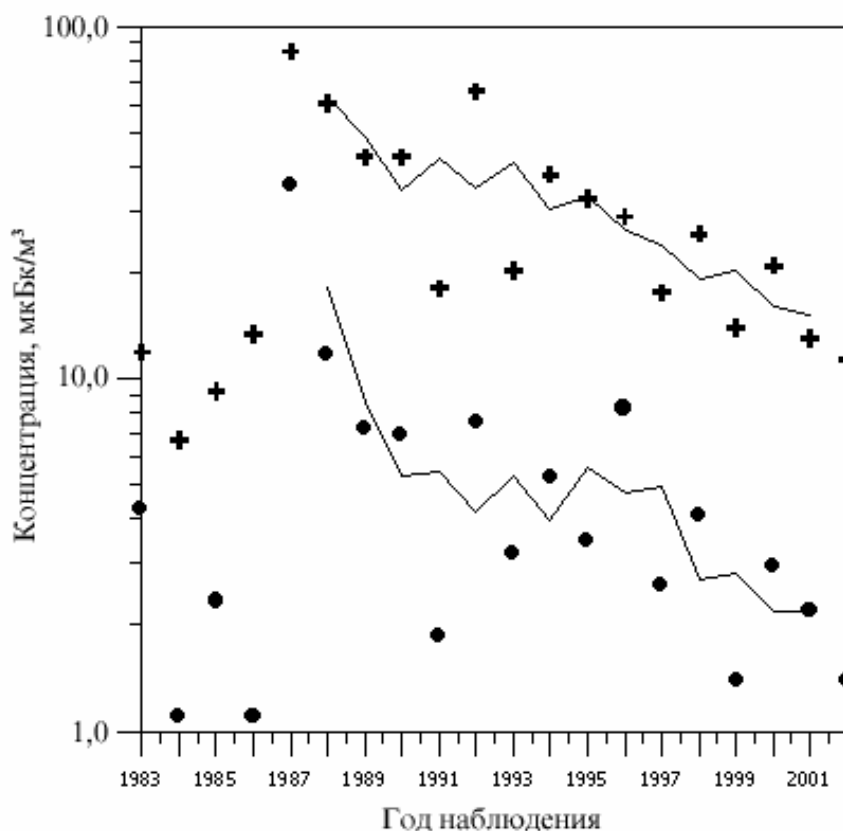


Рис. 6. Среднегодовая концентрация ^{137}Cs и ^{134}Cs на промплощадке АЭС.

Линия и + – концентрация ^{137}Cs

Линия и • – концентрация ^{134}Cs

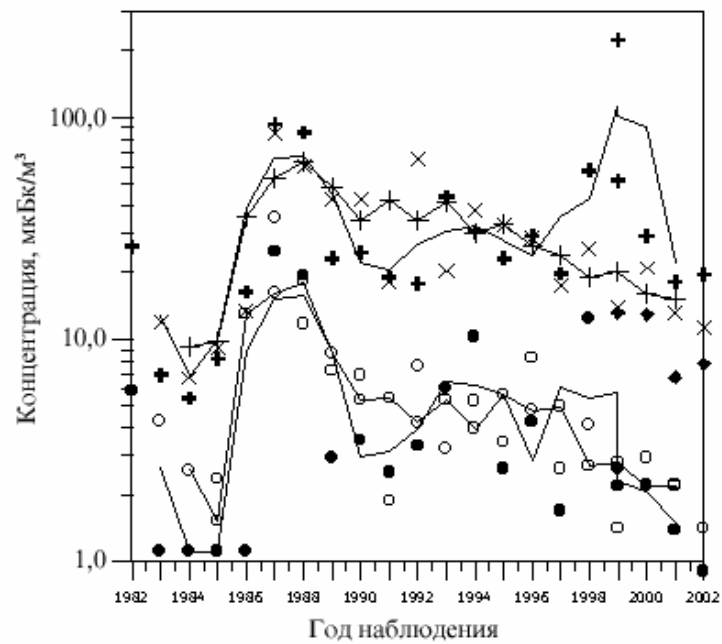


Рис. 7. Среднегодовая концентрация ^{137}Cs и ^{134}Cs на промплощадке ЛСК «Радон».

Линия и + – концентрация ^{137}Cs

Линия и • – концентрация ^{134}Cs

Для сравнения:

Линия с + и x – концентрация ^{137}Cs на промплощадке АЭС

Линия с o и o – концентрация ^{134}Cs на промплощадке АЭС

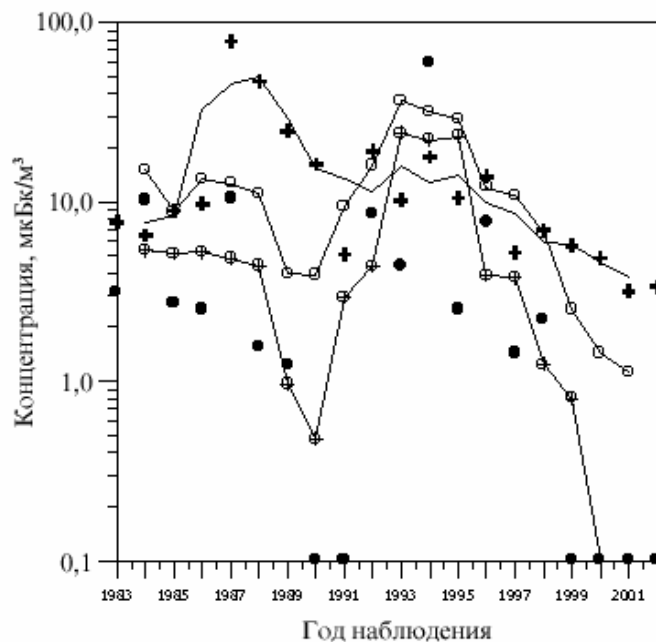


Рис. 8. Среднегодовая концентрация ^{137}Cs и ^{131}I на территории г. Сосновый Бор.

Линия с ⊕ и • – концентрация ^{131}I

Линия и + – концентрация ^{137}Cs

Для сравнения: Линия с o – концентрация ^{131}I на промплощадке АЭС

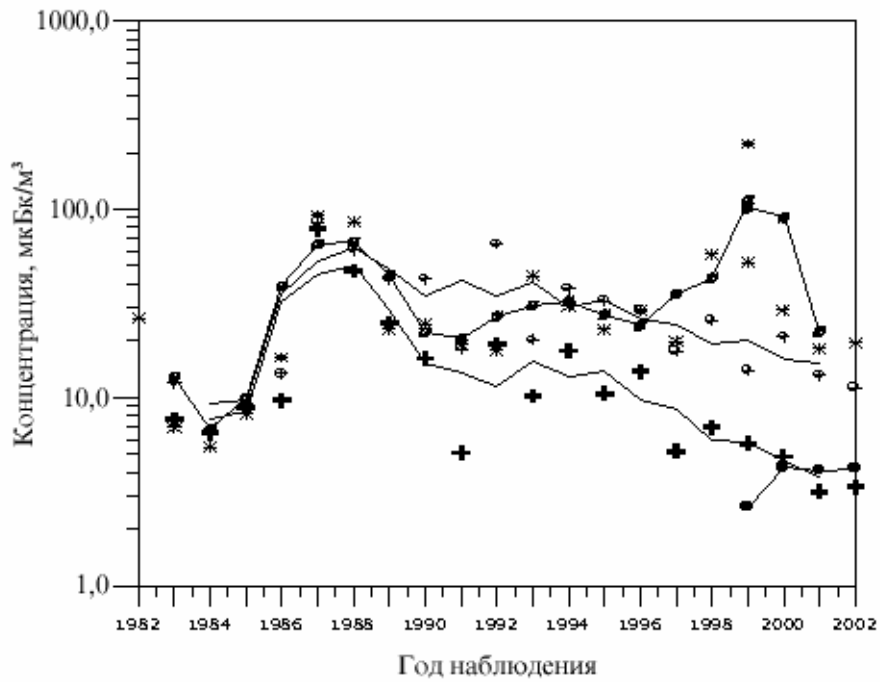


Рис. 9. Среднегодовая концентрация ^{137}Cs на территории г. Сосновый Бор, промплощадке ЛАЭС и ЛСК «Радон».

Линия, + и линия с • – концентрация в г. Сосновый Бор,

Линия с ∅ и * – концентрация на площадке ЛСК «Радон» и ЗАО «Экомет-С»

Линия и ⊕ – концентрация на промплощадке ЛАЭС

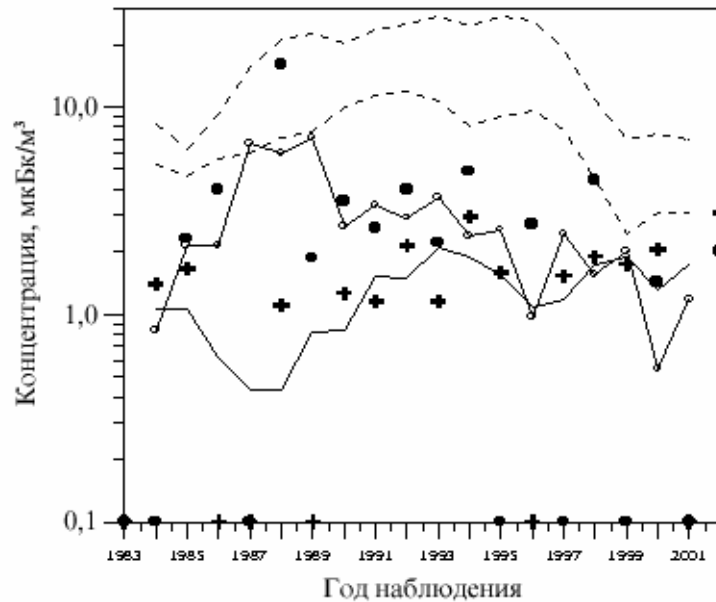


Рис. 10. Среднегодовая концентрация ^{54}Mn и ^{60}Co на территории г. Сосновый Бор.

Линия с ∅ и • – концентрация ^{60}Co

Линия и + – концентрация ^{54}Mn

Для сравнения:

Пунктир – концентрации ^{54}Mn и ^{60}Co (верхняя кривая) на промплощадке АЭС

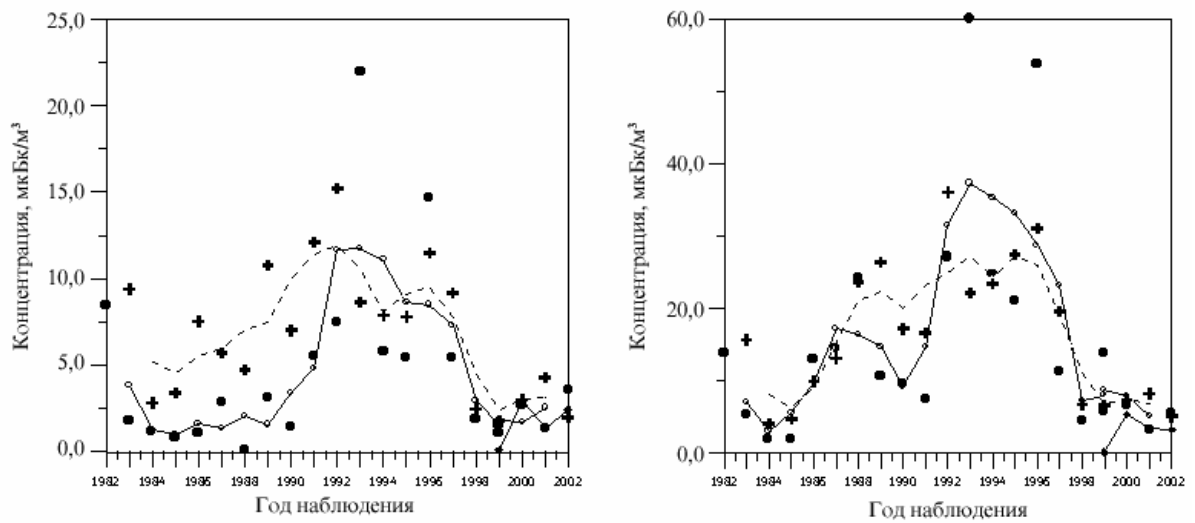


Рис. 11. Среднегодовая концентрация ^{60}Co и ^{54}Mn на территории ЛСК «Радон».

Линия с о и ● – ^{54}Mn на территории ЛСК «Радон»
 Пунктир и + – ^{54}Mn для промплощадки ЛАЭС

Линия с о и ● – ^{60}Co на территории ЛСК «Радон»
 Пунктир и + – ^{60}Co для промплощадки ЛАЭС

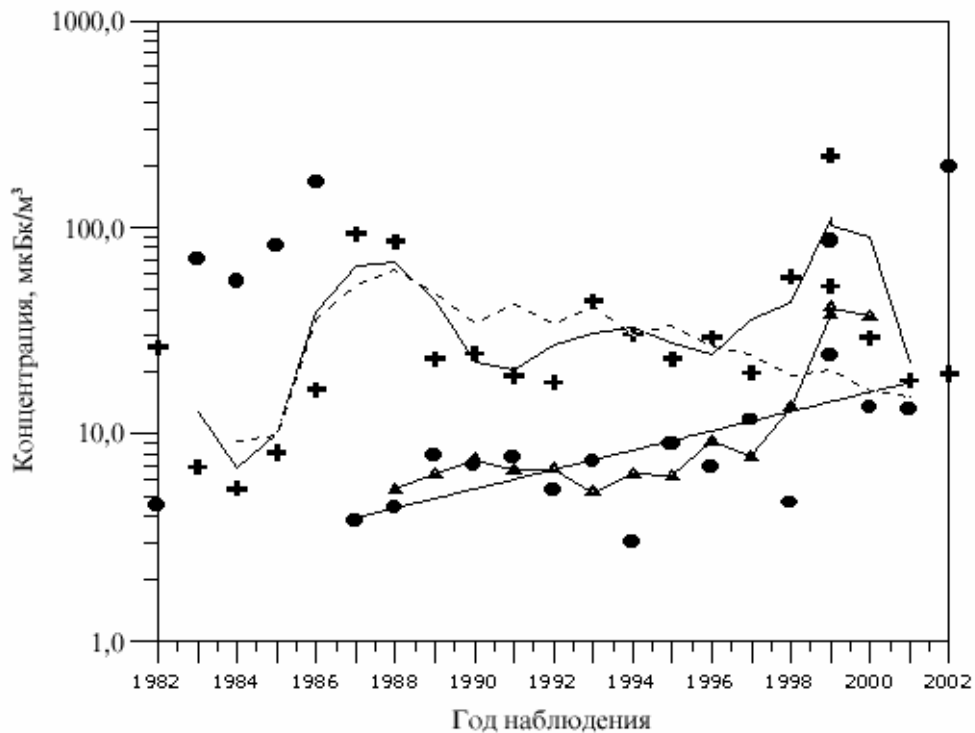


Рис. 12. Среднегодовая концентрация ^{137}Cs на территории ЛСК «Радон» и отношение концентраций ^{137}Cs и ^{134}Cs

Линия и + – концентрация ^{137}Cs , для сравнения: пунктир – концентрация ^{137}Cs на площадке АЭС

● – отношение концентраций ^{137}Cs и ^{134}Cs

Линия с ▲ – сглаженный тренд отношения концентраций ^{137}Cs и ^{134}Cs для данных после 1986 года

Линия – линейный фит отношения концентраций ^{137}Cs и ^{134}Cs

Как можно видеть, для ФВУ, размещенных на промплощадках ЛАЭС и ЛСК «Радон», нуклиды, связанные с топливом – ^{134}Cs и ^{131}I – имеют практически одинаковое поведение. Коррозионные нуклиды ^{54}Mn и ^{60}Co так же демонстрируют одинаковое поведение. Отсюда можно сделать вывод о том, что различия, связанные с повышенной концентрацией ^{137}Cs (начиная с 1996 г.) на площадке ЛСК «Радон», обусловлены выходом в атмосферу ^{137}Cs в результате работ в непосредственной близости от места размещения ФВУ, то есть на промплощадках ЛСК «Радон» и/или ЗАО «Экомет-С» и не из «горячего» ядерного материала. Изотопное отношение ^{137}Cs и ^{134}Cs (рис. 12) и небольшой набор данных для площадки НПО РИ не опровергают этот вывод.

На основе сравнения изотопного отношения ^{137}Cs и ^{134}Cs и их корреляции (см. ниже) между собой и с ^{131}I , и значения концентрации ^{137}Cs в точке 35 км от АЭС, авторы склонны сделать вывод о том, что в настоящее время выход цезия в приземный слой атмосферы делится примерно равными долями между оборудованием «близким» к РУ (1/3), оборудованием переработки загрязненного металла и/или радиоактивных отходов (1/3) и глобально-чернобыльского происхождения (1/3).

Мы оценили корреляционные зависимости между парами нуклидов для двух интервалов наблюдений – (01.01.1982 - 25.04.86 + 01.01.87 - 31.12.02) и (26.04.86-31.12.86). Числовые значения показаны в табл. 1 и табл. 2.

Таблица 1

Корреляции концентраций нуклидов для периода времени (01.01.1982 - 25.04.86 и 01.01.87 - 31.12.02), промплощадка ЛАЭС

	^{137}Cs	^{134}Cs	^{131}I аэрозоль	^{54}Mn	^{60}Co	^{51}Cr
^{137}Cs	1.0	0.36	0.22	0.103	0.123	0.091
^{134}Cs	0.36	1.0	0.324	0.146	0.188	0.185
^{131}I	0.22	0.324	1.0	0.145	0.086	0.296
^{54}Mn	0.103	0.146	0.145	1.0	0.788	0.236
^{60}Co	0.123	0.188	0.086	0.788	1.0	0.138
^{51}Cr	0.091	0.185	0.296	0.236	0.138	1.0

Как можно видеть из табл. 1, достаточно высокая корреляция ^{54}Mn – ^{60}Co говорит о том, что нуклиды имеют один общий источник, который, возможно, является элементом трубопроводной системы АЭС. ^{137}Cs и ^{134}Cs коррелируют слабо, видимо только небольшая часть цезия (полагаем, порядка 30%) связана с топливом АЭС. Остальная часть цезия в приземном слое воздуха обусловлена ресуспензией глобального и чернобыльского цезия и выбросами из оборудования, связанного с хранением отработавшего топлива, переработкой радиоактивных отходов и переплавки загрязненных металлов. Пары ^{131}I – ^{137}Cs и ^{131}I – ^{134}Cs имеют слабую корреляцию; возможно, это обусловлено тем, что только примерно 30% цезия поступает из «горячего» топлива, а так же различиями в физико-химии аэрозолей цезия и иода. Как оказалось, коррозионный продукт ^{51}Cr выбрасывается в атмосферу иными путями, чем коррозионные ^{54}Mn и ^{60}Co , коэффициент корреляции между ними весьма мал. Учитывая близость корреляционных коэффициентов пар иод - цезий и иод - хром,

можно предположить, что источник ^{51}Cr связан с ядерным топливом АЭС. Корреляция $^{131}\text{I} - ^{60}\text{Co}$ имеет ожидаемую, близкую к нулю, величину.

Таблица 2

Корреляции концентраций нуклидов для периода времени (26.04.86 - 31.12.86), промплощадка ЛАЭС.

	^{137}Cs	^{134}Cs	^{131}I аэро- золь	^{54}Mn	^{60}Co	^{51}Cr
^{137}Cs	1.0	0.995	0.999	-0.03	-0.07	0.0
^{134}Cs	0.995	1.0	0.998	-0.03	-0.064	0.0
^{131}I	0.999	0.998	1.0	-0.03	-0.065	-0.0
^{54}Mn	-0.03	-0.03	-0.03	1.0	0.238	0.0
^{60}Co	-0.07	-0.064	-0.065	0.238	1.0	0.034
^{51}Cr	0.0	0.0	-0.0	0.0	0.034	1.0

Для периода загрязнений приземного воздуха (26.04.86 - 31.12.86), коэффициенты корреляции (табл. 2) имеют ожидаемые значения. Однако на корреляционном графике $^{131}\text{I} - ^{137}\text{Cs}$ можно заметить две линии [2]; вероятно, для диапазона выше 3000 мкБк/м³ мы видим результат первой, начальной стадии аварии. Для диапазона ниже 3000 мкБк/м³ данные отражают более позднюю фазу выброса и/или влияние иной траектории атмосферного переноса.

Список литературы

1. Blinova L.D., Golubeva L.V., Michurina T.G. Radioecological monitoring as environmental safety basis in the course of nuclear power plant with RBMK many years operation / In World Nuclear Congress: ENC'98, Nice, v. 3, p. 58-62.
2. Blinova L.D., Golubeva L.V., Dushin V.N., Michurina T.G. Assessment of regularities of ground-level air radionuclides contamination at the Russian coast of the Baltic Sea in the course of the Leningrad Nuclear Power Plant multiyear (1983–1999) operation // Nukleonika 2001;46(4), p. 179–182.
3. US EPA. 1991. Technical support document for water quality-based toxic control. EPA/505/290001, March 1991, NTIS, Springfield, VA, p. 1-336.

Assessment of regularities of ground-level air radionuclides contamination in the course of the multiyear (1982–2002) operation radiation hazardous facilities on the Russian coast of the Baltic Sea

L.D. Blinova, V.N. Dushin

Multiyear results of ground-level air radionuclide contamination on the Russian coast of the Baltic Sea (nuclear facilities in the vicinity of the town of Sosnovy Bor) are under consideration. Multiyear weekly nuclides' concentration time series were examined by the statistic and correlation analysis. Results of the analysis are presented.

Разработка методологических подходов к оценке риска для населения и окружающей среды при эксплуатации радиационно-опасных объектов в нормальном режиме; сравнительная оценка риска

Л.Д. Блинова, В.Н. Душин

Изложены основные результаты многолетнего радиационно-экологического мониторинга на российском побережье Балтийского моря в районе расположения объектов ядерного комплекса в г. Сосновый Бор Ленинградской области. Функционирование радиационно-опасных объектов в этом регионе находится под пристальным вниманием огромного числа физических лиц и всевозможных организаций. Для оценки и ранжирования факторов и источников техногенного риска, а также обоснования принятия управленческих решений рассмотрены разработанные на основе собственных результатов регионального мониторинга и международных рекомендаций методологические подходы к сбору, обработке, анализу и представлению данных мониторинга для оценки риска неблагоприятных экологических последствий в районе расположения радиационно-опасных объектов. Приведены результаты оценки вероятности неблагоприятных эффектов в здоровье человека от загрязнения окружающей среды радиоактивными и вредными химическими веществами в районе расположения объектов ядерного комплекса в г. Сосновый Бор при их длительной эксплуатации в нормальном режиме.

Введение

В мировой практике приемлемость деятельности с использованием радиоактивных веществ принято оценивать на основе анализа риска для человека [1]. Решающее значение для развития атомной энергетики и промышленности, наряду с требованием минимизации риска аварий ядерных реакторов, имеет обеспечение ее безопасности для населения и окружающей среды в условиях длительной эксплуатации объектов ядерного комплекса в штатном режиме. Внедрение системы оценок риска неблагоприятных экологических последствий в районах расположения ядерных установок и других радиационно-опасных объектов имеет исключительное значение для выбора стратегии развития регионов России.

При оценке воздействия на окружающую среду объектов ядерного комплекса, работающих в нормальном режиме, мы придерживаемся трактовки термина «риск» как вероятности неблагоприятных эффектов для здоровья человека и окружающей среды от действия радиационных и нерадиационных факторов. Согласно стандарту ГОСТ Р ИСО 14050-99 [2], понятие «окружающая среда» нормативно включает в себя и человека.

Цель оценки риска – системно оценить и организовать данные, информацию, модельные представления, предположения и неопределенности так, чтобы предоставить лицам, принимающим решения, в том числе ответственным за защиту здоровья людей и окружающей среды, информацию для принятия управленческих решений. Лицам, принимающим решения, необходимо знать главный риск для конечных точек оценки и убедиться, поддерживаются ли заключения большими массивами данных достаточного количественного объема и необходимого качества и надежности, либо в них имеются значительные информационные пробелы.

Международными исследованиями подтверждена необходимость сравнительной оценки риска, в частности, топливных циклов различных видов, при выборе спо-

соба производства энергии. Полученные Европейской комиссией независимые результаты показывают, что при нормальных условиях эксплуатации радиационно-опасных объектов ядерная энергия оказывает негативное воздействие на окружающую среду и здоровье в меньших масштабах, чем ископаемое топливо. В то же время исследования важнейших непосредственных источников радиологической опасности, связанных с ядерным топливным циклом, показали, что при замкнутом ядерном топливном цикле значительное радиологическое воздействие на население оказывают (каждый в отдельности) процессы переработки топлива (80,7%) и производства электроэнергии (15,3%) [3].

Необходимость сравнения различных техногенных источников риска, в частности радиационно-опасных и других хозяйственных объектов, обуславливает организацию в районах расположения радиационно-опасных объектов работ по идентификации источников загрязнения окружающей среды и оценке их вкладов в загрязнение окружающей среды.

В 1997 г. Постановлением “Об использовании методологии оценки риска для управления качеством окружающей среды и здоровья населения в Российской Федерации” МЗ РФ и МПР РФ утверждено «Положение о порядке оценки риска загрязнения окружающей среды здоровью населения в Российской Федерации». В соответствии с указанной методологией, приоритеты экологической политики в РФ смещены с преимущественно природоохранной деятельности на программные действия, ориентированные на защиту здоровья людей от вредного воздействия загрязненной окружающей среды. Критерием экологической безопасности хозяйственной деятельности является вероятность неблагоприятных последствий для здоровья человека от загрязнения окружающей среды.

Необходимость сравнения воздействия различных техногенных факторов риска в районе расположения радиационно-опасных объектов обуславливает требование получения оценок риска здоровью человека в принятых в настоящее время единых показателях – вероятности смертельного и несмертельного рака и тяжелых наследственных эффектов [1, 4].

Целью настоящей статьи является разработка общей методологии организации мониторинга окружающей среды и оценки риска для населения и окружающей среды при эксплуатации радиационно-опасных объектов в нормальном режиме.

Объем и методы исследования

В регионе г. Сосновый Бор Ленинградской области функционируют Ленинградская АЭС с головным реактором РБМК-1000, Региональное предприятие по переработке и хранению радиоактивных отходов – Ленинградский Спецкомбинат «Радон», Научно-исследовательский технологический институт им. А.П. Александрова, предприятие по дезактивации и переработке металлических радиоактивных отходов – ЗАО «Экомет-С». Регион площадью около 1200 км² с населением менее 100 тыс. человек характеризуется доминированием в промышленности предприятий ядерного цикла, в сельском хозяйстве – интенсивными агрокультурой и животноводством. 30-километровая зона Ленинградской АЭС полностью входит в эти границы и является частью района исследований.

Исходя из многолетнего опыта проведения мониторинга окружающей среды в районах расположения РОО, авторы поддерживают мнение Агентства окружающей среды США (ЕРА, 1998 г.) [5] о том, что именно мониторинг является наиболее

информативным, достоверным, эффективным и недорогим способом сбора информации о загрязнении окружающей среды для оценки риска.

В отличие от существующей на РОО организации радиационного контроля окружающей среды, целью которого является доказательство непревышения допустимых объемных/удельных активностей техногенных радионуклидов в компонентах окружающей среды в результате выбросов и сбросов с радиационно-опасных объектов, организованный в начале 70-х годов комплексный мониторинг окружающей среды в регионе г. Сосновый Бор направлен на:

- исследования, оценку и ранжирование радиационных и нерадиационных факторов и их источников в окружающей среде;
- получение количественных оценок доз внутреннего и внешнего облучения населения в регионе г. Сосновый Бор и путей их формирования;
- оценку воздействия объектов ядерного комплекса на окружающую среду и здоровье человека по сравнению с другими промышленными объектами;
- информационную поддержку принятия решений для обеспечения экологической безопасности при долговременном хранении радиоактивных отходов;
- информационную поддержку выполнения требований законов РФ по готовности к чрезвычайным радиационным ситуациям.

Составными частями системы мониторинга в г. Сосновый Бор являются радиационный, химический и биологический мониторинги; виды объектов окружающей среды, объем, место и периодичность отбора проб определены таким образом, чтобы минимизировать вероятность не обнаружить изменения в воде, воздухе, компонентах экосистем, в то время как они произошли; чувствительность методических средств достаточна для определения фоновых концентраций техногенных загрязнителей в окружающей среде; система радиационного мониторинга обеспечивает получение информации, необходимой для оценки вклада потенциальных источников облучения в формирование внешней и внутренней дозовой нагрузки на население, оценки стабильности обращения с источником радиационной опасности.

Результаты, полученные в процессе многолетнего комплексного мониторинга окружающей среды и сравнительной оценки воздействия объектов ядерного комплекса (радиационный фактор) и других источников (нерадиационные факторы) в г. Сосновый Бор [6-19], использованы для разработки методологии оценки риска [20-24] на основе международных рекомендаций по оценке риска [1, 4, 25, 26], руководств по оценке дозовых нагрузок на население [27-29], международных нормативных документов по радиационной безопасности [30-33], отечественных нормативных документов по оценке воздействия на окружающую среду [34-37], опыта оценок риска в России [38, 39], законов РФ и других нормативных документов [40-44], исходных данных по выбросам и сбросам радиоактивных веществ в окружающую среду [45, 46].

Предварительная расчетная оценка дозы внешнего облучения от газоаэрозольных выбросов Ленинградской АЭС выполнена с использованием компьютерного кода МАССS2 [27] на основе данных о выбросах ЛАЭС за 1985 и 1998 гг. [45, 46]. Оценки годовых доз внутреннего облучения от потребления продуктов питания выполнены на основе «Методических указаний по расчету радиационной обстановки в окружающей среде и ожидаемого облучения населения при кратковременных выбросах радиоактивных веществ в атмосферу» [28] и Нормативно-технического документа ИнтерАтомЭнерго 38.220.56-84. «Безопасность в атомной

энергетике. Общие положения безопасности АЭС. Методы расчета распространения радиоактивных веществ с АЭС и облучения окружающего населения» [29]. В качестве входных данных для расчета ожидаемой эквивалентной дозы использовались собственные результаты многолетнего мониторинга.

В расчетах использовались количественные значения коэффициентов радиационного риска [1, 4] для населения, учитывающие фатальный ($0,050 \text{ [чел}\cdot\text{Зв]}^{-1}$) и нефатальный ($0,010 \text{ [чел}\cdot\text{Зв]}^{-1}$) рак, и тяжелые наследственные эффекты ($0,013 \text{ [чел}\cdot\text{Зв]}^{-1}$). В соответствии с рекомендациями МКРЗ при оценке радиационного риска используется линейная беспороговая форма зависимости доза – эффект.

Оценка риска от загрязнения воздуха, питьевой воды и продуктов питания химическими веществами производилась с учетом рекомендаций Агентства окружающей среды США [4, 5, 25-27].

Результаты и обсуждение

При эксплуатации АЭС в штатном режиме спецификой техногенного воздействия на природную среду и человека, в частности при использовании в качестве охладителей естественных водоемов, являются энергетический потенциал теплых сбросных вод и повседневные, существенно ниже допустимых, выбросы и сбросы радиоактивных веществ. Это воздействие происходит на фоне характерного для России повсеместно высокого уровня загрязнения природной среды химическими веществами, а также остаточного загрязнения территорий техногенными радионуклидами вследствие испытаний ядерного оружия и аварий на радиационно-опасных объектах.

Рассматриваемая ниже сравнительная оценка риска неблагоприятных экологических последствий при эксплуатации объектов ядерного комплекса в регионе г. Сосновый Бор является составной частью сравнительного анализа рисков для здоровья человека и окружающей среды на одном из важнейших этапов производства электроэнергии.

Радиационный риск

Действующие стандарты радиационной безопасности жестко регламентируют уровень приемлемого риска, предъявляя дополнительные требования к качеству информации (полноте, объективности, достоверности), используемой для оценки радиационного риска. В связи с этим основным требованием к организационной структуре мониторинга окружающей среды в районе расположения объектов ядерного комплекса является обеспечение возможности получения информации, необходимой для оценки вклада потенциальных источников облучения в формирование эффективной дозы для населения региона, оценки стабильности обращения с источником радиационной опасности, прогноза дозы потенциального облучения, того, насколько хорошо он управляем.

Для решения основных задач, присутствующих в стадиях оценки радиационного риска, существует множество методик и рекомендаций, например для оценок атмосферного переноса и доз для аварийных условий и определения допустимых воздействий на окружающую среду (ИнтерАтом84 ОНД86, МПА98, ДВ98). Известны и применяются в научных исследованиях программные продукты для расчетов дозовой нагрузки во время радиационных инцидентов и при нормальной эксплуатации (например, MACCS, COSYMA, PC-CREAM), оценке эффектов при использовании природных ресурсов в условиях загрязнения радионуклидами (CezarDDS, RESRAD, RESTRAT, ECOFATE, PRESTO).

По нашим предварительным оценкам, выполненным для 1985 и 1998 гг., при работе объектов ядерного комплекса в Сосновом Бору в штатном режиме, эффективная доза на население находится в диапазоне 20-50 мкЗв/год (см. таблицу 1). В 1985 г. доза облучения населения (50 мкЗв/год) определялась выбросами инертных радиоактивных газов ЛАЭС, распространяющихся по направлению преобладающих ветров в сторону г. Сосновый Бор. В 1998 г., в основном в результате существенного снижения газо-аэрозольных выбросов ЛАЭС, дозовая нагрузка на население снизилась до 20 мкЗв/год и определялась в основном потреблением местных продуктов питания, загрязненных ^{137}Cs «чернобыльского происхождения».

Таблица 1

Предварительная оценка доз техногенного облучения населения
г. Сосновый Бор, мкЗв/год

Вид облучения	Доза, 1985	Доза, 1998
Внутреннее: ^{137}Cs в продуктах питания и питьевой воде Йод в воздухе: эквивалентная доза (щитовидная железа) эквивалентная эффективная доза	1,02 0,78 (в т.ч. от 1-й очереди 0,24) 0,065 (в т.ч. от 1-й очереди 0,019)	13,8 0,345 (в т.ч. от 1-й очереди 0,084) 0,0226 (в т.ч. от 1-й очереди 0,006)
Внешнее: ^{41}Ar и $^{133,135}\text{Xe}$ в облаке ^{137}Cs в почве	51,26 (в т.ч. от 1-й очереди 20,9) 0,5	2,89 (в т.ч. от 1-й очереди 1,58) 4,8
Суммарная эффективная доза	52,85	21,5

Ранжирование источников доз внешнего и внутреннего облучения возможно после дополнительных исследований вероятностных распределений дозовых нагрузок на население, проживающее вблизи ядерного комплекса в Сосновом Бору, с учетом метеорологических, демографических и других региональных особенностей.

Оцененная величина индивидуального пожизненного риска (см. табл. 2) от техногенного облучения жителей г. Сосновый Бор в 1985 и 1998 годы $(1,6 - 3,9) \cdot 10^{-6}$ составляет 0,6-1,4% от риска за счет естественного радиационного фона, лежит выше уровня пренебрежимых рисков (10^{-6}) и находится в области «исследований», когда, в соответствии с НРБ-99, требуется уточнить оценки величины годовой эффективной дозы и определения дозы, ожидаемой за 70 лет.

Санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ-99), согласно соответствующим оценкам дозовых нагрузок, требуют осуществлять «радиационный контроль с оценкой доз облучения населения за счет радиоактивного загрязнения территории, если эта доза может превысить 10 мкЗв/год». Оцененный индивидуальный риск неблагоприятных эффектов в здоровье человека от естественного радиационного фона в 300 мкЗв/год [4] составляет ежегодно $2,19 \cdot 10^{-4}$.

Таблица 2

Предварительные оценки индивидуального пожизненного риска от техногенного облучения жителей г. Сосновый Бор

Год	Риск смер- тельного рака,	Риск несмер- тельного рака	Риск геноток- сичных эффектов	Суммарный риск
1985 год	$2,64 \cdot 10^{-6}$	$5,3 \cdot 10^{-7}$	$6,9 \cdot 10^{-7}$	$3,86 \cdot 10^{-6}$
1998 год	$1,10 \cdot 10^{-6}$	$2,1 \cdot 10^{-7}$	$2,8 \cdot 10^{-7}$	$1,57 \cdot 10^{-6}$
<i>Для справки</i>				
$K_{\text{риска}}$, случаев/чел·Зв	0,05	0,01	0,013	0,073
Естественный фон	$1,5 \cdot 10^{-4}$	$3,0 \cdot 10^{-5}$	$3,9 \cdot 10^{-5}$	$2,19 \cdot 10^{-4}$

Химический риск

При оценке химического риска для здоровья населения определяются два основных типа вредных эффектов: канцерогенный и неканцерогенный.

Канцерогенные вещества вызывают увеличение частоты злокачественных новообразований. Важной характеристикой этих веществ является отсутствие порога действия. Ряд канцерогенных веществ влияет на наследственность увеличением частоты генетически обусловленных заболеваний. Канцерогенные и генетические эффекты тесно взаимосвязаны и сопоставимы по величине. Вместе они образуют класс стохастических эффектов при достаточно низких дозах (концентрациях). Нормирование канцерогенных эффектов осуществляется по уровню приемлемого риска. Сам же риск представляет собой вероятность (или при другой интерпретации – количество дополнительных случаев) заболеваний раком или наследственных заболеваний при воздействии оцениваемого фактора.

Неканцерогенные вещества вызывают ряд нарушений состояния здоровья, которые можно рассматривать как разные формы проявлений токсических эффектов, регистрируемых на клеточном, тканевом, организменном и популяционном уровнях.

Существует также еще один подход к оценке неканцерогенного риска от ингаляции загрязненного воздуха. Он основан на применении методик ЕРА, где приоритетными компонентами загрязнения воздушной среды, формирующими неканцерогенный риск, признаются твердые взвешенные частицы, которые, будучи повсеместно распространенными, вызывают дополнительные случаи смертности населения. Рассчитываются индивидуальный и популяционный риски от фракции твердых частиц размером менее 10 мкм, так называемые PM_{10} по классификации ЕРА. Предполагается определенное процентное увеличение смертности на каждые 10 мкг/м^3 . Подход основан на эпидемиологических исследованиях кратковременного и хронического воздействия PM_{10} в США. Результаты исследований показывают, что общая смертность увеличивается на 1% на каждые 10 мкг/м^3 увеличения PM_{10} .

Химический риск для населения г. Сосновый Бор оценивался от воздействия канцерогенных химических веществ в местных продуктах питания и питьевой воде и взвешенного вещества (неканцероген) в воздухе.

В таблице 3 приведены оценки риска для здоровья населения г. Сосновый Бор от загрязнения окружающей среды радиоактивными и вредными химическими веще-

ствами. Заметим, что риск для здоровья человека от воздействия химических веществ приведен к интервалу 1 год для возможности сравнения с радиационным риском.

Таблица 3

Оценки основных факторов риска здоровью населения от загрязнения природной среды в районе расположения объектов ядерного комплекса в г. Сосновый Бор Ленинградской области, случаев/чел.·год

Воздействующий фактор	Риск, $\times 10^{-6}$
Техногенные радионуклиды 1985, 1998. ^{137}Cs в местных продуктах питания. Выбросы инертных газов ЛАЭС.	1,6-3,9 0,07-1,0 0,2-3,7
Вредные химические вещества. Тяжелые металлы в местных продуктах питания. Тяжелые металлы в питьевой воде.	7,0 6,5 0,43
Пыль, PM_{10} .	40-130
Естественный радиационный фон.	200

Полученные оценки вероятности неблагоприятных эффектов в здоровье человека от загрязнения воды и продуктов питания местного производства тяжелыми металлами, в основном кадмием, и радиоактивными веществами находятся в диапазоне приемлемых рисков (10^{-5} - 10^{-6}). В России величина допустимого суммарного техногенного риска законодательно пока не определена. В США от многофакторного загрязнения окружающей среды является допустимым 1 дополнительный случай смерти на миллион населения. В Нидерландах допустимый риск составляет $1 \cdot 10^{-6}$ в год для отдельного вещества и $1 \cdot 10^{-5}$ в год – для суммарного воздействия [39].

Вероятность неканцерогенных эффектов от взвешенного вещества в воздухе существенно (в 6-20 раз) выше вероятности эффектов от загрязнения тяжелыми металлами продуктов питания и тем более, питьевой воды (более чем в 100 раз, см. табл. 3). По результатам выполненных работ основным фактором техногенного риска для здоровья населения города Сосновый Бор ($4,0 \cdot 10^{-5}$ – $1,3 \cdot 10^{-4}$ сл./чел.·год) является мелкодисперсная пыль в воздухе, а также загрязнение продуктов питания местного производства тяжелыми металлами, в основном кадмием ($6,5 \cdot 10^{-6}$ сл./чел.·год). Вероятность неблагоприятных эффектов от загрязнения воды, воздуха и продуктов питания местного производства техногенными радионуклидами, присутствующими в компонентах окружающей среды после аварии на Чернобыльской АЭС и в результате выбросов инертных радиоактивных газов ЛАЭС, по крайней мере, в несколько раз ниже химического риска.

Результаты, полученные в процессе многолетнего мониторинга окружающей среды и сравнительной оценки воздействия объектов ядерного комплекса (радиационный фактор) и других источников (нерадиационные факторы) в г. Сосновый Бор на окружающую среду, использованы для разработки методологии оценки риска [20-22, 24].

Методологические основы оценки риска

Побудительным мотивом для оценки риска неблагоприятных экологических последствий в регионе г. Сосновый Бор стали результаты систематического мониторинга окружающей среды, указывающие на изменения в экологических условиях региона при длительной эксплуатации хозяйственных объектов г. Сосновый Бор в штатном, безаварийном режиме [7, 10-13, 17].

В результате многолетних исследований было показано, что при эксплуатации АЭС в штатном режиме основное воздействие на окружающую среду оказывают факторы нерадиационной природы, в частности сброс подогретых вод ЛАЭС [8]. Воздействие тепловых сбросов на природный водоем-охладитель АЭС усугубляется общим высоким фоновым уровнем загрязнения окружающей среды химическими веществами. По данным многолетних исследований в Сосновом Бору [7, 10-13, 17], в водосборном бассейне Копорской губы основными химическими веществами, концентрации которых в природных водах превышают природный уровень, являются нефтепродукты, азот, фосфор, органические соединения, некоторые тяжелые металлы. Так, в 2000 г. средние концентрации нефтепродуктов в прибрежной акватории составили 0,223-0,262 мг/л (4,5-5 ПДК), в речных пробах – около 6 ПДК, средняя концентрация органических соединений составляет 60 мг/л (2 ПДК).

Вследствие загрязнения акватории Копорской губы фосфором и азотом, источником которого являются реки, локальные сбросы коммунальных вод и трансграничный перенос [8], особенно существенно проявление эффекта эвтрофирования прибрежных вод. Этот процесс влечет за собой цепь негативных проявлений: снижение видового разнообразия водных сообществ, ухудшение самоочищающей способности прибрежных вод, исчезновение некоторых биоресурсов. Так, в рыбном сообществе Копорской губы существенно изменился состав главных постоянных видов. Нарушение естественной структуры и функций прибрежных биоценозов ведет к снижению самоочищающей способности водоемов [47-49].

До настоящего времени в районах расположения радиационно-опасных объектов и на территории России действуют программы радиационного контроля и мониторинга окружающей среды различных ведомств и органов власти, однако выполнение этих программ не преследует цели оценки риска. В связи с изменившимся в последние годы законодательством в области радиационной безопасности (введением НРБ-99, ОСПОРБ-99, СП АС-99) и необходимостью использования методологии оценки риска при управлении качеством окружающей среды и здоровья населения в Российской Федерации [34], по заказу Научно-технического центра ядерной и радиационной безопасности Госатомнадзора РФ были разработаны «Методологические рекомендации по сбору, обработке, анализу и представлению данных мониторинга для оценки риска неблагоприятных экологических последствий в районе расположения радиационно-опасных объектов». В соответствии с ними система мониторинга окружающей среды в районах расположения радиационно-опасных объектов должна объединять правовые нормы, концептуальную основу, технические и методические средства, обеспечивающие наблюдение за состоянием природных сред и экосистем, и информацию, необходимую для сравнительной оценки риска за счет факторов радиационной и нерадиационной природы (см. рис. 1).

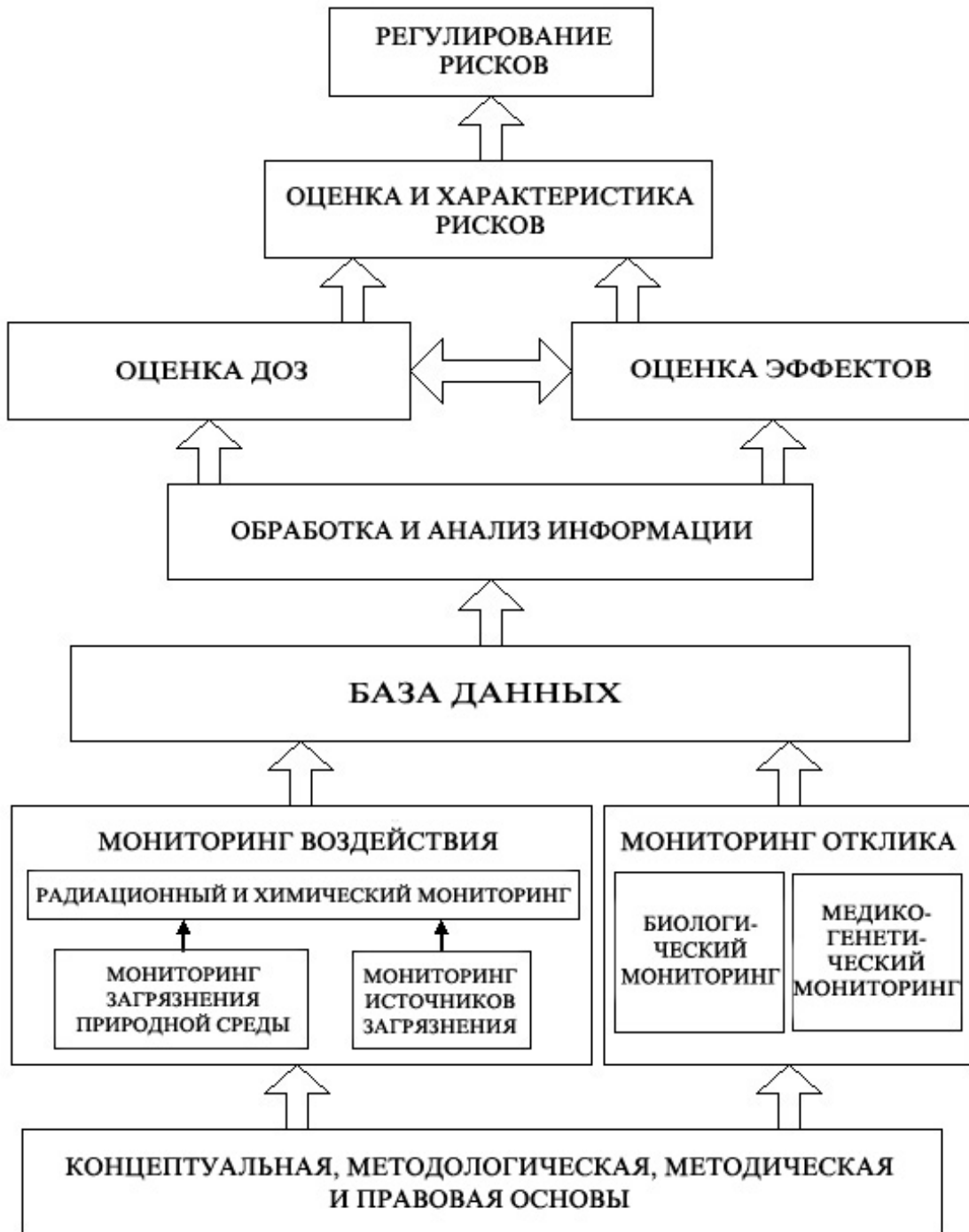


Рис. 1. Схема организации работ для оценки риска неблагоприятных экологических последствий в районе расположения радиационно-опасных объектов.

В соответствии с общими подходами к оценке экологического риска [4, 5] и с учетом многолетнего опыта комплексного мониторинга, основными этапами оценки риска в районах расположения радиационно-опасных объектов являются:

1. Идентификация и ранжирование источников техногенного риска для окружающей среды. Наряду с радиационно-опасными объектами необходи-

- мо оценить выбросы и сбросы и других источников загрязнения окружающей среды и возможного воздействия на население.
2. Идентификация и ранжирование техногенных факторов риска в окружающей среде. Наряду с радиоактивными веществами, поступающими в окружающую среду с повседневными выбросами и специфическими для радиационно-опасных объектов, необходимо оценить и другие загрязняющие вещества, в частности химические.
 3. Характеристика и ранжирование риска для окружающей среды и населения. Наряду с оценкой радиационного риска необходимо оценить в принятых в настоящее время единых показателях, риск для населения от загрязнения окружающей среды, в частности, химическими веществами.
 4. Многофакторная оценка риска. Необходимо оценить в единых показателях и ранжировать факторы и основные источники риска здоровью населения от загрязнения окружающей среды.
 5. Оценка неопределенностей полученных результатов, связанная, в частности, с неопределенностями оценок коэффициентов химического риска, методологией сбора и анализа данных для оценки дозы внутреннего и внешнего облучения населения, неполным перечнем загрязняющих веществ в окружающей среде, учтенных при оценке риска.

Основным назначением Рекомендаций является обеспечение общих требований к информации, необходимой для получения объективных оценок и ранжирования радиационного и химического риска в районах расположения радиационно-опасных объектов на базе комплексной оценки состояния окружающей среды (см. рис. 1). Рекомендации разработаны в целях обеспечения компетентных органов, предприятий отрасли и других заинтересованных сторон нормативными документами для использования при организации системы мониторинга природной среды в районах расположения радиационно-опасных объектов. Рекомендации могут быть использованы для принятия решений и оценки стохастических эффектов в здоровье персонала радиационно-опасных объектов при необходимости выполнения работ в условиях комплексного воздействия радиоактивных и химических веществ.

Методология оценки радиационного риска основана на Рекомендациях МКРЗ, Агентства охраны окружающей среды США и других международных документах, НРБ-99, ОСПОРБ-99, Постановлений Минздрава РФ 1997 г., в соответствии с которыми основными исходными данными для оценки радиационного риска является величина эффективной эквивалентной дозы для населения и соответствующие коэффициенты риска.

Методология оценки химического риска основана на принципах, опубликованных в последние годы Минздравом РФ, МАГАТЭ и Агентством по охране окружающей среды США. В соответствии с принятыми методами основными исходными данными для оценки химического риска для населения являются концентрации вредных химических веществ в воде, воздухе, пище и соответствующие коэффициенты риска.

Заключение

Основным фактором техногенного риска здоровью населения города Сосновый Бор ($4,0 \cdot 10^{-5} - 1,3 \cdot 10^{-4}$ сл./чел.·год) является мелкодисперсная пыль в воздухе, а также загрязнение продуктов питания местного производства тяжелыми металлами, в основном кадмием ($6,5 \cdot 10^{-6}$ сл./чел.·год). Полученные оценки вероятности неблаго-

приятных эффектов в здоровье человека от загрязнения воды и продуктов питания химическими и радиоактивными веществами (10^{-5} - 10^{-6}) находятся в диапазоне приемлемых рисков. Вероятность неблагоприятных эффектов от загрязнения воды, воздуха и продуктов питания техногенными радионуклидами, присутствующими в компонентах окружающей среды после аварии на Чернобыльской АЭС и в результате выбросов инертных радиоактивных газов ЛАЭС, по крайней мере, в несколько раз ниже химического риска.

Результаты оценки в районах расположения радиационно-опасных объектов радиационного и химического риска, выраженные в сопоставимых единицах, позволяют ранжировать источники и факторы воздействия на окружающую среду, оценивать ущерб от загрязнения окружающей среды, могут быть использованы при выборе оптимальных управленческих решений, в частности для принятия решений и оценки стохастических эффектов в здоровье персонала радиационно-опасных объектов при необходимости выполнения работ в условиях комплексного воздействия радиоактивных и химических веществ, выборе способа производства электроэнергии, экономическом обосновании приоритетных природоохранных мероприятий, а также при разработке нормативно-технической документации, в частности закона о ядерном страховании.

Список литературы

1. Рекомендации МКРЗ 1990 г. Публикация 60 МКРЗ, Часть 2. М.: Энергоатомиздат, 1994, 208 с.
2. Управление окружающей средой. Словарь. ГОСТ Р ИСО 14050-99. М., 1999.
3. Струпчевски А. Сравнительные оценки эмиссий энергетических систем: польза и вред // Бюллетень МАГАТЭ, 41/1/1999, с. 19-24.
4. Evaluation of Human Health Effects from Normal Operation. Appendix C to Guidance for Conducting Risk Assessments and Related Risk Activities for DOE-ORO Environmental Management Program. BJC/OR-271, 1999, 232 p.
5. US EPA Guidelines for Ecological Risk Assessment. EPA/630/P-95/002F, April 98, Final. U.S. Environmental Protection Agency. Washington, 1998, 171 p.
6. Недбаевская Н.А. Оценка воздействия выбросов атомных электростанций на агроэкосистемы (на примере Ленинградской АЭС) // Автореферат диссертации на соискание ученой степени канд. биолог. наук. ВНИИСХР, Обнинск, 1992, 24 с.
7. Блинова Л.Д., Недбаевская Н.А., Зими́на Л.М., Виногорова В.Т. Комплексный радиационно-экологический мониторинг в районе Ленинградской АЭС в 1992 г. // Научный информационно-методический бюллетень. М.: Ядерное общество, 1993, № 3(7)/93, с. 10-22.
8. Зими́на Л.М. Исследование антропогенного эвтрофирования водоема-охладителя Ленинградской АЭС // Автореферат диссертации на соискание учен. степени канд. биол. наук. МГУ, М., 1993, 24 с.
9. Blinova L.D. St. Petersburg (Leningrad) NPP's region radioecological state estimation. // Transactions of International Nuclear Congress. «Atoms for Energy ENC-94». Lyon, October 2-6, 1994, v. II, p. 37-39.
10. Zimina L.M. St. Petersburg (Leningrad) nuclear power plant: nonradioactive environment // Transactions of International Nuclear Congress. «Atoms for Energy ENC-94». Lyon, October 2-6, 1994, v. II., p. 40-42.

11. Блинова Л.Д., Недбаевская Н.А. Ленинградская АЭС: радиоэкологический мониторинг в 1993 г. // Научный информационно-методический бюллетень. М.: Ядерное общество России. 1995, № 2-3/95, с. 24-30.
12. Блинова Л.Д., Недбаевская Н.А., Зими́на Л.М., Виногорова В.Т., Зимин В.Л. Ленинградская АЭС: экологический мониторинг в 1994-1995 гг. // Научный информационно-методический бюллетень. М.: Ядерное общество России, 1997, № 1-2/97, с. 27-38.
13. Blinova L.D., Zimina L.M., Zimin V.L., Vinogorova V.T., Golubeva L.V., Michurina T.G., Zemskova S.V. Ecological evaluation of the area around the Leningrad Nuclear Power Plant in 1996 // Экологическая химия, 1999, т. 8, № 3, с. 204-216.
14. Блинова Л.Д. Радиоэкологический мониторинг атмосферы и гидросферы в районе расположения объектов ядерного комплекса (на примере города Сосновый Бор) // Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата физ.-мат. наук. Обнинск, НПО «Тайфун», 1998, 24 с.
15. Blinova L.D., Dushin V.N., Golubeva L.V., Michurina T.G. Radioecological Monitoring and Radiological Control in the Region of Sosnovy Bor Nuclear Facilities as Baltic Sea Region Safety Basis. - Radiation protection No.110, The radiological exposure of the population of the European Community to radioactivity in the Baltic Sea, EUR 19200, Proceedings of Marina Balt. Seminar. Stockholm, Sweden, 1998, p. 365-372.
16. Blinova L.D., Dushin V.N., Golubeva L.V., Michurina T.G. The development of environmental protection approaches in the region of nuclear facilities at the Russian coast of the Baltic Sea. // Proceedings of the Second Int. Symposium on Ionizing Radiation. Environmental Protection Approaches for Nuclear Facilities. Canada, Ottawa, 1999, section 6, p. 156-163.
17. Блинова Л.Д., Зими́на Л.М., Виногорова В.Т., Зимин В.Л., Голубева Л.В., Мичурина Т.Г., Земско́ва С.В., Шукина Т.Н. Экологический мониторинг в районе расположения ядерного комплекса Сосновый Бор в 1997 году // Экологическая химия, 2000, т. 9, № 1, с. 49-63.
18. Блинова Л.Д., Душин В.Н., Зими́на Л.М. Методологические подходы к защите окружающей среды в районе расположения атомной электрической станции на российском побережье Балтийского моря // Проблемы развития атомной энергетики на Дону. Материалы научно-практической конференции, Ростов-на-Дону, 29 февраля-1 марта, 2000 г., т. 2, с. 69-175.
19. Blinova L.D., Golubeva L.V., Dushin V.N., Michurina T.G. Assessment of regularities of ground-level air contamination by radionuclides at the Russian coast of the Baltic Sea in the course of the Leningrad Nuclear Power Plant multiyear (1983-1999) operation. // Nukleonika, 2001, vol. 46(4), p. 179-182.
20. Блинова Л.Д., Душин В.Н. Оценка радиационного риска на российском побережье Балтики. Рефераты трудов конференции ЯО РФ «Экологическая безопасность, техногенные риски и устойчивое развитие», Москва, 23-27.06.02 г.
21. Блинова Л.Д., Душин В.Н., Зими́на Л.М. Методологические основы многофакторной оценки риска в районах расположения радиационно-опасных объектов // Рефераты трудов конференции ЯО РФ «Экологическая безопасность, техногенные риски и устойчивое развитие», Москва, 23-27 июня 2002 г.
22. Зими́на Л.М., Блинова Л.Д., Зимин В.Л. и др. Экологический мониторинг как основа оценки риска в районах расположения предприятий атомной промышленности // Тезисы докладов. Третий съезд по радиационным исследованиям, 14-17 окт. 1997, Москва, т. 2.

23. Blinova L.D., Dushin V.N., Gubanov V.A., Lazarev L.N., Petrov B.F., Pleskachevsky L.A., Vasiliev S.K., Zimina L.M. Risk and Safety Assessment as the Base for Decision Making // Proceedings of International Conference, Amarillo, 1997.
24. Блинова Л.Д., Душин В.Н., Зими́на Л.М. Опыт оценки риска неблагоприятных экологических последствий при длительной эксплуатации объектов ядерного комплекса // Доклады и выступления 6-ой Всероссийской научно-практической конференции «Управление рисками чрезвычайных ситуаций», 20-21 марта 2001, Москва, с. 221-229.
25. Health Effects Assessments Summary Tables. US EPA. Annual FY-1992. Washington, DC. IAEA (1996). International Basic Safety Standards for Protection Against Ionizing Radiation and for the Safety of Radiation Sources, Safety Series N 115, Vienna. 1992.
26. Procedural Guide for Integrated Health and Environmental Risk Assessment and Safety Management in Large Industrial Areas. Inter-Agency Program on the Assessment and Management of Health and Environmental Risk from Energy and Other Complex Industrial Systems. UNEP, WHO, IAEA, UNIDO, Vienna, 1992.
27. Chanin, D.I. et al. MELCOR Accident Consequence Code System (MACCS) User's Guide, NUREG/CR-4691, SAND86-1562, Vol.1, Sandia Nat. Lab, Albuquerque, NM, February, 1990.
28. Методические указания по расчету радиационной обстановки в окружающей среде и ожидаемого облучения населения при кратковременных выбросах радиоактивных веществ в атмосферу. Технический документ МПА-98. Утв. Зам. гл. гос. сан. врача РФ по спецвопросам О.И. Шамовым 10.12.98, М., 1998.
29. Нормативно-технического документа ИнтерАтомЭнерго 38.220.56-84. «Безопасность в атомной энергетике. Общие положения безопасности АЭС. Методы расчета распространения радиоактивных веществ с АЭС и облучения окружающего населения».
30. Европейский союз 1997. Директива 97/11/ЕС от 3 Марта 1997.
31. Основные Стандарты Безопасности, Директива 96/29/EUROATOM.
32. Директива по оценке воздействия на окружающую среду 85/337/ЕЕС.
33. Руководство по Программе мониторинга Балтики (Труды по экологии Балтики №27 - BSEP No.27) - 1988.
34. Постановление Главного государственного санитарного врача Российской Федерации №25 от 10.11.97 и Главного государственного инспектора Российской Федерации по охране природы № 03-19/24-3483 от 10.11.97 г. «Об использовании методологии оценки риска для управления качеством окружающей среды и здоровья населения в Российской Федерации».
35. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99): Гигиенические нормативы СП 2.6.1.758-99 М.: Центр санитарно-эпидемиологического нормирования, гигиенической сертификации и экспертизы Минздрава России, 1999, 116 с.
36. Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности ОСПОРБ-99. СП 2.6.1.799-99, М., Минздрав России, 2000.
37. Санитарные правила проектирования и эксплуатации атомных станций СП АС-99. СП 2.6.1.27-2. М., 2000.
38. Киселев А.В., Савватеева Л.А. Методические рекомендации по оценке риска здоровью населения от загрязнения атмосферного воздуха. СПб.: «Дейта», 1995, 54 с.
39. Управление риском для здоровья в регионе и финансирование природоохранных проектов (на примере Великого Новгорода). Опыт применения методологии анализа риска в России. Центр эколого-экономических исследований, М., 1999.

40. Закон РФ «Об использовании атомной энергии», в редакции от 28.03.2002 г. № 170-ФЗ.
41. Закон РФ «О радиационной безопасности населения» от 09 января 1996 г. № 3-ФЗ.
42. Закон РФ «Об охране окружающей среды» от 10 января 2002 г. №7-ФЗ.
43. Закон РФ «О санитарно-эпидемиологическом благополучии населения» от 30.12.2001 г.
44. Постановление Правительства Российской Федерации «О порядке разработки радиационно-гигиенических паспортов организаций и территорий», № 93 от 28 января 1997 г.
45. Гусев Н.Г., Головкин М.Ю., Шаповалов О.И., Хамьянов Л.П., Шмелев В.И, Альтшуллер М.А. Выброс радиоактивных газов и аэрозолей серийными атомными станциями // Атомная энергия. 1993. Т. 74. Вып. 4. С. 360.
46. Письмо ЛАЭС № 17/2185 от 21.04.1999.
47. Zimina L.M., Zimin V.L, Shchukina T., Ryabova V., Pomiluiiko G. Risks for marine coastal ecosystems from anthropogenic loading in the Leningrad NPP environs // Proceedings. The annual conference of the Society for Risk Analysis-Europe. "Risk analysis: opening the process". Paris - France, October, 11-14, 1998.
48. Zimin V.L. Changes in marine fish community under influence of Leningrad nuclear power plant and another human activities in the watershed of Kопorskaya bay (Gulf of Finland, Baltic sea) // International Symposium on Marine pollution. Monaco, 5-9 October 1998.
49. Zimina L.M., Zimin V.L. Kопlan-Diks V.A. Anthropogenic influence on the watershed of the Kопorskaya Bay of the Gulf of Finland (Leningrad nuclear plant area). Proceedings of the International Symposium on Integrated Water Resources Managment 9-12 April, 2000, Davis, USA.

Methodological approaches to environmental risk assessment under nuclear facilities normal operation, comparative risk assessment

L.D. Blinova, V.N. Dushin

The main results of the radiation and ecological monitoring on the Russian coast of the Baltic Sea in the region of the nuclear facilities in Sosnovy Bor city (Leningrad region) are under consideration. The operation of nuclear facilities in this region is completely controlled by a great number of persons and organizations. In order to assess and rank the factors and the sources of technogenic risks, and to justify the decision making, the elaborated methodological approaches to data collection, processing, analysis and utilization in the region of nuclear facilities are analyzed. The results of risk assessment to human health due to environment contamination by radioactive and chemical substances in the region of Sosnovy Bor as a result of nuclear facilities multiyear normal operation are given.

Характеристики фракции, содержащей кюрий и редкоземельные элементы, получаемой при переработке ОЯТ ВВЭР-1000

Б.А. Бибичев, В.М. Есимантовский, А.Г. Кавецкий, В.М. Окаминов

В работе проведена оценка количества изотопов америция, кюрия и РЗЭ в ОЯТ в зависимости от глубины его выгорания и времени выдержки. Рассчитаны характеристики кюриевой фракции (КФ), получаемой при переработке ОЯТ ВВЭР-1000: выход КФ на тонну ОЯТ, изотопный состав РЗЭ и ТПЭ в ней, удельные нейтронные потоки, мощность экспозиционной дозы, теплофизические параметры и скорости выделения радиогенного гелия.

Введение

«Стратегия развития атомной энергетики России в первой половине XXI века» в качестве приоритетной определила задачу переработки ОЯТ АЭС с реакторами на тепловых нейтронах и использования выделенного плутония в АЭС с реакторами на быстрых нейтронах [1]. В соответствии с этим проект перерабатывающего комплекса завода РТ-2 на Горно-химическом комбинате (г. Железногорск) предусматривает:

- переработку ОТВС ВВЭР-1000 с исходным обогащением топлива до 4,4%, выгоранием топлива до 50 ГВт·сут/т U и предварительной выдержкой в хранилищах АЭС не менее 3-х лет;
- выделение урана и плутония с целью их возврата в топливный цикл;
- подготовку РАО всех уровней к экологически безопасному хранению или захоронению.

Отсрочка ввода в эксплуатацию перерабатывающего комплекса завода РТ-2 приблизительно до 2020 года с соответствующим увеличением сроков технологической выдержки ОТВС (до 50 лет), а также перевод реакторов ВВЭР-1000 на четырехгодичный и в перспективе на пятигодичный топливный цикл с глубиной выгорания топлива до 60 ГВт·сут/т U приведет к значительному увеличению накопления малых актиноидов в ОЯТ по сравнению с проектным трехгодичным топливным циклом со средним выгоранием топлива в ОТВС ~40 ГВт·сут/т U. Поэтому важной задачей является выбор и обоснование технологии обращения на заводе РТ-2 с америцием и кюрием с учетом того, что америций целесообразно будет направлять на трансмутацию, а кюрий – на длительное хранение до превращения ^{243}Cm и ^{244}Cm в изотопы плутония [2].

Основная цель настоящей работы состоит в оценке:

- количества изотопов америция, кюрия и РЗЭ в ОЯТ в зависимости от глубины выгорания и времени выдержки;
- состава предназначенной для длительного хранения фракции, содержащей изотопы кюрия, америция и РЗЭ (далее – кюриевая фракция, КФ), получаемой при переработке ОЯТ с различной глубиной выгорания и временем выдержки и расчет ее радиационно-физических и теплофизических параметров.

1. Оценка содержания изотопов ТПЭ в ОЯТ ВВЭР-1000

При увеличении глубины выгорания топлива увеличивается флюенс нейтронов и увеличивается содержание изотопов америция и кюрия в топливе. В настоящей работе рассмотрено накопление в ОЯТ изотопов америция, кюрия, а также PЗЭ для следующих топливных циклов реакторов ВВЭР-1000:

- проектный трехгодичный топливный цикл с исходным обогащением топлива 4,4% и средним выгоранием ОЯТ 40 ГВт·сут/т U;
- проектный трехгодичный топливный цикл с исходным обогащением топлива 4,4% и повышенным выгоранием ОЯТ до 50 ГВт·сут/т U;
- перспективный пятигодичный топливный цикл с исходным обогащением топлива 4,87% и средним выгоранием ОЯТ до 58 ГВт·сут/т U (топливный цикл будет внедряться на АЭС РФ и Украины после 2010 года).

Для этих топливных циклов в табл. 1 приведено содержание изотопов PЗЭ, америция и кюрия в ОЯТ (в кг на тонну исходного урана) при выдержке ОЯТ, соответственно, 10, 30 и 50 лет.

Для проектных топливных циклов расчеты содержания изотопов америция и кюрия в ОЯТ выполнены по программе SOCRAT [3]. Эта программа предварительно верифицирована по результатам измерения изотопного состава актиноидных элементов в образцах ОЯТ ВВЭР-1000 с исходным обогащением топлива 4,4% и выгоранием топлива до 52 ГВт·сут/т U [4]. Содержание изотопов PЗЭ в ОЯТ для этих топливных циклов было взято из справочника [5] при выгорании топлива 40 ГВт·сут/т U с последующей экстраполяцией этих значений до выгорания 50 ГВт·сут/т U. Для перспективного пятигодичного топливного цикла реакторов ВВЭР-1000 расчеты содержания изотопов PЗЭ, америция и кюрия были выполнены в РНЦ “Курчатовский институт” по программе ТВС-М.

Из табл. 1 видно, что содержание изотопов кюрия в ОЯТ ВВЭР-1000 может достигать 82,5 г на тонну исходного урана. При производительности завода РТ-2 1500 т/год по урану из ОЯТ ВВЭР-1000 может ежегодно выделяться около 120 кг кюрия. Следует отметить, что в настоящее время нет опыта долговременного хранения таких количеств смеси изотопов кюрия. Поэтому для проведения анализа технических проблем, связанных с хранением КФ, необходимо определить целый ряд ее радиационно-физических и теплофизических параметров.

Таблица 1

Содержание изотопов РЗЭ и ТПЭ в ОЯТ ВВЭР-1000

Элемент	Массовое число изотопа	T _{1/2} , лет	Содержание изотопов, кг/т						
			Выгорание 40 ГВт·сут/т U		Выгорание 50 ГВт·сут/т U		Выгорание 58 ГВт·сут/т U		
			Выдержка 10 лет	Выдержка 50 лет	Выдержка 10 лет	Выдержка 50 лет	Выдержка 10 лет	Выдержка 30 лет	Выдержка 50 лет
La	139	Стаб.	1,492	1,492	1,843	1,843	2,092	2,092	2,092
	140	Стаб.	1,522	1,522	1,880	1,880	2,115	2,115	2,115
Ce	142	Стаб.	1,406	1,406	1,737	1,737	1,927	1,927	1,927
	144	0,79	6,100·10 ⁻⁵	–	7,350·10 ⁻⁵	–	7,404·10 ⁻⁵	1,780·10 ⁻¹²	–
	141	Стаб.	1,375	1,375	1,700	1,700	1,925	1,925	1,925
Pr	144	3,27·10 ⁻⁵	2,570·10 ⁻⁹	–	3,100·10 ⁻⁹	–	–	–	–
	142	Стаб.	2,481·10 ⁻²	2,481·10 ⁻²	2,851E·10 ⁻²	2,851·10 ⁻²	5,301·10 ⁻²	5,301·10 ⁻²	5,301·10 ⁻²
Nd	143	Стаб.	9,912·10 ⁻¹	9,912·10 ⁻¹	1,237	1,237	1,238	1,238	1,238
	144	Стаб.	1,436	1,436	1,793	1,793	2,403	2,403	2,403
	145	Стаб.	8,248·10 ⁻¹	8,248·10 ⁻¹	1,015	1,015	1,097	1,097	1,097
	146	Стаб.	8,536·10 ⁻¹	8,536·10 ⁻¹	1,051	1,051	1,270	1,270	1,270
	148	Стаб.	4,505·10 ⁻¹	4,505·10 ⁻¹	5,623·10 ⁻¹	5,623·10 ⁻¹	6,265·10 ⁻¹	6,265·10 ⁻¹	6,265·10 ⁻¹
	150	Стаб.	2,146·10 ⁻¹	2,146·10 ⁻¹	2,676·10 ⁻¹	2,676·10 ⁻¹	3,098·10 ⁻¹	3,098·10 ⁻¹	3,098·10 ⁻¹
Pm	147	2,62	1,467·10 ⁻²	3,772·10 ⁻⁷	1,557·10 ⁻²	4,005·10 ⁻⁷	1,528·10 ⁻²	7,700·10 ⁻⁵	3,884·10 ⁻⁷
Sm	147	Стаб.	2,742·10 ⁻¹	2,889·10 ⁻¹	2,898·10 ⁻¹	3,053·10 ⁻¹	–	–	–
	148	Стаб.	2,627·10 ⁻¹	2,627·10 ⁻¹	3,723·10 ⁻¹	3,723·10 ⁻¹	2,777·10 ⁻¹	2,777·10 ⁻¹	2,777·10 ⁻¹
	150	Стаб.	2,571·10 ⁻¹	2,571·10 ⁻¹	3,077·10 ⁻¹	3,077·10 ⁻¹	4,636·10 ⁻¹	4,636·10 ⁻¹	4,636·10 ⁻¹
	151	87	1,407·10 ⁻²	1,034·10 ⁻²	1,461·10 ⁻²	1,073·10 ⁻²	1,771·10 ⁻²	1,510·10 ⁻²	1,288·10 ⁻²
	152	Стаб.	1,045·10 ⁻¹	1,045·10 ⁻¹	1,167·10 ⁻¹	1,167·10 ⁻¹	1,839·10 ⁻¹	1,839·10 ⁻¹	1,839·10 ⁻¹
	154	Стаб.	1,650·10 ⁻²	1,650·10 ⁻²	1,843·10 ⁻²	1,843·10 ⁻²	6,097·10 ⁻²	6,097·10 ⁻²	6,097·10 ⁻²
Eu	152	12,4	3,752·10 ⁻⁵	4,687·10 ⁻⁶	3,065·10 ⁻⁵	3,828·10 ⁻⁶	2,142·10 ⁻¹	2,142·10 ⁻¹	2,142·10 ⁻¹
	153	Стаб.	1,443·10 ⁻¹	1,443·10 ⁻¹	1,805·10 ⁻¹	1,805·10 ⁻¹	6,097·10 ⁻²	6,097·10 ⁻²	6,097·10 ⁻²
	154	8,5	2,955·10 ⁻²	1,267·10 ⁻³	4,023·10 ⁻²	1,724·10 ⁻³	2,302·10 ⁻²	4,510·10 ⁻³	8,826·10 ⁻⁴
	155	4,96	5,916·10 ⁻³	2,211·10 ⁻⁵	5,717·10 ⁻³	2,137·10 ⁻⁵	2,543·10 ⁻³	1,550·10 ⁻⁴	9,512·10 ⁻⁶

Продолжение таблицы 1

Элемент	Массовое число изотопа	T _{1/2} , лет	Содержание изотопов, кг/т						
			Выгорание 40 ГВт·сут/т U		Выгорание 50 ГВт·сут/т U		Выгорание 58 ГВт·сут/т U		
			Выдержка 10 лет	Выдержка 50 лет	Выдержка 10 лет	Выдержка 50 лет	Выдержка 10 лет	Выдержка 30 лет	Выдержка 50 лет
Gd	156	Стаб.	$7,432 \cdot 10^{-2}$	$7,432 \cdot 10^{-2}$	$9,180 \cdot 10^{-2}$	$9,180 \cdot 10^{-2}$	$1,907 \cdot 10^{-1}$	$1,907 \cdot 10^{-1}$	$1,907 \cdot 10^{-1}$
	158	Стаб.	$1,944 \cdot 10^{-2}$	$1,944 \cdot 10^{-2}$	$2,401 \cdot 10^{-2}$	$2,401 \cdot 10^{-2}$	$4,991 \cdot 10^{-2}$	$4,991 \cdot 10^{-2}$	$4,991 \cdot 10^{-2}$
Итого РЗЭ			$1,181 \cdot 10^{-1}$	$1,177 \cdot 10^{-1}$	$1,459 \cdot 10^{-1}$	$1,454 \cdot 10^{-1}$	$1,6569 \cdot 10^{-1}$	$1,652 \cdot 10^{-1}$	$1,651 \cdot 10^{-1}$
Cm	242	0,446	$1,568 \cdot 10^{-6}$	$1,304 \cdot 10^{-6}$	$1,708 \cdot 10^{-6}$	$1,419 \cdot 10^{-6}$	$2,777 \cdot 10^{-6}$	$2,730 \cdot 10^{-6}$	$2,307 \cdot 10^{-6}$
	243	28,5	$3,541 \cdot 10^{-4}$	$1,3397 \cdot 10^{-4}$	$6,262 \cdot 10^{-4}$	$2,367 \cdot 10^{-4}$	$6,792 \cdot 10^{-4}$	$4,180 \cdot 10^{-4}$	$2,568 \cdot 10^{-4}$
	244	18,5	$2,430 \cdot 10^{-2}$	$5,254 \cdot 10^{-3}$	$5,805 \cdot 10^{-2}$	$1,255 \cdot 10^{-2}$	$7,521 \cdot 10^{-2}$	$3,500 \cdot 10^{-2}$	$1,626 \cdot 10^{-2}$
	245	8532	$2,610 \cdot 10^{-3}$	$2,610 \cdot 10^{-3}$	$7,376 \cdot 10^{-3}$	$7,353 \cdot 10^{-3}$	$6,566 \cdot 10^{-3}$	$7,080 \cdot 10^{-3}$	$6,545 \cdot 10^{-3}$
Итого Cm			$2,73 \cdot 10^{-2}$	$8,00 \cdot 10^{-3}$	$6,61 \cdot 10^{-2}$	$2,01 \cdot 10^{-2}$	$8,259 \cdot 10^{-2}$	$4,25 \cdot 10^{-2}$	$2,31 \cdot 10^{-2}$
Am	241	432,8	$6,216 \cdot 10^{-1}$	1,354	$7,421 \cdot 10^{-1}$	1,624	$7,771 \cdot 10^{-1}$	1,562	1,666
	242m	152	$5,310 \cdot 10^{-4}$	$4,4257 \cdot 10^{-4}$	$5,780 \cdot 10^{-4}$	$4,816 \cdot 10^{-4}$	$9,458 \cdot 10^{-4}$	$8,630 \cdot 10^{-4}$	$7,881 \cdot 10^{-4}$
	242	0,00183	$6,372 \cdot 10^{-9}$	$5,309 \cdot 10^{-9}$	$6,936 \cdot 10^{-9}$	$5,780 \cdot 10^{-9}$	$1,128 \cdot 10^{-8}$	$1,110 \cdot 10^{-8}$	$9,395 \cdot 10^{-9}$
	243	7400	$1,033 \cdot 10^{-1}$	$1,032 \cdot 10^{-1}$	$1,881 \cdot 10^{-1}$	$1,877 \cdot 10^{-1}$	$2,619 \cdot 10^{-1}$	$2,612 \cdot 10^{-1}$	$2,607 \cdot 10^{-1}$
Итого Am			$7,25 \cdot 10^{-1}$	1,46	$9,31 \cdot 10^{-1}$	1,81	1,04	1,82	1,93
Итого ТПЭ			$7,25 \cdot 10^{-1}$	1,47	$9,97 \cdot 10^{-1}$	1,83	1,12	1,86	1,95
Сумма РЗЭ и ТПЭ			12,6	13,2	15,6	16,4	17,7	18,4	18,5

2. Оценка содержания изотопов кюрия, америция и РЗЭ в КФ

При выделении КФ, предназначенной для длительного хранения, вначале в ее состав ТПЭ переводят полностью, а РЗЭ – частично. Соотношение ТПЭ и РЗЭ в КФ по сравнению с этим соотношением в ОТВС изменяется в зависимости от коэффициента очистки ТПЭ от РЗЭ. С учетом того, что на первой стадии выделения КФ ТПЭ в ее состав переходят полностью, коэффициент очистки ТПЭ от РЗЭ, $k_{\text{очистки}}$, определяется как

$$k_{\text{очистки}} = \frac{(\Sigma_{\text{РЗЭ}})_{\text{ОТВС}}}{(\Sigma_{\text{РЗЭ}})_{\text{КФ}}}, \quad (1)$$

где $(\Sigma_{\text{РЗЭ}})_{\text{КФ}}$ – сумма масс всех изотопов редкоземельных элементов в КФ,

$(\Sigma_{\text{РЗЭ}})_{\text{ОТВС}}$ – сумма масс всех изотопов редкоземельных элементов в ОТВС.

$k_{\text{очистки}}$ составляет, по данным [6], величину в интервале от 30 до 140.

В состав КФ переходят, согласно [6], не все редкоземельные элементы, присутствующие в ОТВС, а только Nd, Sm, Eu и Gd. Их содержание (обозначим эту величину $g_{\text{Эл}}$; РЭл – Nd, Sm, Eu и Gd) в КФ составляет 0,6%, 27,9%, 40,6% и 30,9% от всей массы РЗЭ во фракции соответственно. Доля каждого изотопа из перечисленных РЗЭ в КФ будет, по-видимому, такой же, как и в ОТВС. Эту долю для изотопов неодима, самария, европия, гадолиния в ОТВС, $\eta_{i,\text{Nd}}$, $\eta_{i,\text{Sm}}$, $\eta_{i,\text{Eu}}$, $\eta_{i,\text{Gd}}$, соответственно, можно рассчитать по выражению

$$\eta_{i,\text{РЭл}} = \frac{(M_{i,\text{РЭл}})_{\text{ОТВС}}}{(\Sigma_{\text{РЭл}})_{\text{ОТВС}}}, \quad (2)$$

где $(M_{i,\text{РЭл}})_{\text{ОТВС}}$ – масса i -го изотопа элемента РЭл в ОТВС;

$(\Sigma_{\text{РЭл}})_{\text{ОТВС}}$ – сумма масс всех изотопов элемента РЭл в ОТВС.

С учетом вышеизложенного, массу i -го изотопа элемента РЭл в КФ, получаемую с тонны ОЯТ, можно рассчитать по выражению

$$(M_{i,\text{РЭл}})_{\text{КФ}} = \frac{(\Sigma_{\text{РЗЭ}})_{\text{ОТВС}}}{k_{\text{очистки}}} \cdot g_{\text{РЭл}} \cdot \eta_{i,\text{РЭл}}. \quad (3)$$

После отделения РЗЭ от ТПЭ из КФ выделяют америций и передают его на трансмутацию. При этом все изотопы кюрия, имевшиеся в ОТВС, остаются в КФ полностью. Следовательно, можно записать

$$(M_{i,\text{Cm}})_{\text{КФ}} = (M_{i,\text{Cm}})_{\text{ОТВС}}, \quad (4)$$

где $(M_{i,\text{Cm}})_{\text{КФ}}$, $(M_{i,\text{Cm}})_{\text{ОТВС}}$ – масса i -го изотопа кюрия в КФ и ОТВС, соответственно.

Примем для проведения дальнейших расчетов, что содержание америция в КФ будет составлять 1% от его содержания в ОТВС. Ограничение остаточного содержания америция во фракции лимитировано технологическими и экономическими факторами

$$(M_{i,\text{Am}})_{\text{КФ}} = 0,01 \cdot (M_{i,\text{Am}})_{\text{ОТВС}}, \quad (5)$$

где $(M_{i,\text{Am}})_{\text{КФ}}$, $(M_{i,\text{Am}})_{\text{ОТВС}}$ – масса i -го изотопа америция в КФ и ОТВС.

Предполагается, что химическая форма, в которой будут присутствовать указанные выше элементы в КФ, будет оксидной. По-видимому, РЗЭ и америций будут

присутствовать, в основном, в виде полтораокисей, а кюрий – в виде двуокиси. В соответствии с этим, массу кислорода, входящего в состав КФ, $(M_{\text{кислорода}})_{\text{КФ}}$, можно рассчитать по выражению

$$\begin{aligned} (M_{\text{кислорода}})_{\text{КФ}} = & \sum_{\text{РЭл}} \sum_i \frac{3A_{\text{кислорода}}}{2A_{i,\text{РЭл}}} \cdot (M_{i,\text{РЭл}})_{\text{КФ}} + \\ & + \sum_i \frac{2A_{\text{кислорода}}}{A_{i,\text{Cm}}} \cdot (M_{i,\text{Cm}})_{\text{КФ}} + \sum_i \frac{3A_{\text{кислорода}}}{2A_{i,\text{Am}}} \cdot (M_{i,\text{Am}})_{\text{КФ}}, \end{aligned} \quad (6)$$

где $A_{\text{кислорода}}$ – атомный вес кислорода,

$A_{i,\text{РЭл}}$, $A_{i,\text{Cm}}$, $A_{i,\text{Am}}$ – атомные веса i -го изотопа элемента РЭл, Cm и Am, соответственно.

Выход КФ, W , получаемый с одной тонны ОЯТ, рассчитывался по выражению

$$W = \sum_{\text{РЭл}} \sum_i (M_{i,\text{РЭл}})_{\text{КФ}} + \sum_i (M_{i,\text{Cm}})_{\text{КФ}} + \sum_i (M_{i,\text{Am}})_{\text{КФ}} + (M_{\text{кислорода}})_{\text{КФ}}. \quad (7)$$

Тогда массовую долю i -го изотопа элемента Эл (неодима, самария, европия, гадолиния, кюрия и америция) в составе КФ, $m_{i,\text{Эл}}$, в граммах на грамм фракции, можно определить как

$$m_{i,\text{Эл}} = \frac{(M_{i,\text{Эл}})_{\text{КФ}}}{W}. \quad (8)$$

Описанным выше способом были проведены расчеты состава КФ, получаемой при переработке ОТВС с ОЯТ, имевшим начальное обогащение 4,4%, с глубиной выгорания 40 и 50 ГВт·сут/т U и временем выдержки 10 и 50 лет, и ОТВС с ОЯТ, имевшим начальное обогащение 4,87%, с глубиной выгорания 58 ГВт·сут/т U и временем выдержки 10 и 50 лет при значениях $k_{\text{очистки}}$, равных 40 и 100. В таблице 2 представлены массовые доли (в граммах на грамм фракции) суммы всех PЗЭ (Nd, Sm, Eu и Gd), ТПЭ, кислорода, а также изотопа ^{154}Eu , суммы изотопов кюрия (^{242}Cm , ^{243}Cm , ^{244}Cm , ^{245}Cm), изотопа ^{244}Cm и суммы изотопов америция (^{241}Am , $^{242\text{m}}\text{Am}$, ^{242}Am , ^{243}Am).

Как можно видеть из представленных в таблице 2 результатов расчетов, основной вклад в массовый состав КФ вносят изотопы PЗЭ. Их содержание в КФ, получаемых при $k_{\text{очистки}}$, равных 40 и 100, варьируется от 0,56 до 0,80 г/г фракции. В то же время содержание ТПЭ изменяется примерно от 0,06 до 0,31 г/г фракции. При этом содержание ^{244}Cm может составлять от 0,015 до 0,25 г/г фракции. Содержание кислорода во всех случаях примерно постоянно и составляет величину около 0,13 г/г фракции. Полученные результаты будут использованы в дальнейшем для расчетов радиационных и теплофизических характеристик КФ.

3. Радиационные и теплофизические параметры КФ

3.1. Расчет нейтронных потоков

Поток нейтронов от КФ будет возникать вследствие двух процессов: спонтанного распада ТПЭ и ядерной реакции типа (α, n) , протекающей на кислороде под действием α -частиц. Из входящих в начальный период хранения в состав КФ изотопов распад путем спонтанного деления возможен для некоторых изотопов кюрия и америция. В процессе хранения в КФ будут накапливаться изотопы, также способ-

ные претерпевать распад путем спонтанного деления. Расчет удельного нейтронного потока n , $\text{с}^{-1} \cdot \text{г}^{-1}$, от КФ (на единицу массы фракции) за счет спонтанного деления изотопов проводился по выражению

$$n_{\text{с.д.}} = \sum_i \frac{\ln 2 \cdot v_i \cdot N_A \cdot m_i}{3,15 \cdot 10^7 \cdot T_{\text{с.д.},i} \cdot A_i}, \quad (9)$$

где $T_{\text{с.д.},i}$ – период полураспада путем спонтанного деления i -го изотопа, лет,

m_i – его массовая доля во фракции, г/г,

A_i – его атомный вес,

v_i – число нейтронов на акт деления,

N_A – число Авогадро,

$3,15 \cdot 10^7$ – число секунд в году.

В таблице 3 приведены значения нейтронных потоков, возникающих за счет спонтанного деления, рассчитанные по выражению (9). Как видно из приведенных в таблице 3 данных, основной вклад в поток нейтронов спонтанного деления вносит изотоп $^{244}\text{См}$.

Помимо нейтронов спонтанного деления вклад в суммарный поток будут вносить нейтроны, возникающие за счет реакции (α, n) на кислороде. Кислород в КФ присутствует в составе оксидов ТПЭ и РЗЭ (см. табл. 2). В соответствии с [7], удельный нейтронный поток $n_{(\alpha,n)}$, $\text{с}^{-1} \cdot \text{г}^{-1}$, можно оценить по формуле

$$n_{(\alpha,n)} = \left(\sum_i q_i \cdot A_i \right) \cdot \frac{S_O \cdot D_O}{\sum_j S_j \cdot D_j}, \quad (10)$$

где q_i – выход реакции (α, n) на кислороде под действием α -частиц с энергией E_i , которые испускает i -й изотоп,

A_i – активность этого изотопа, Бк,

S_O и S_j – относительные значения атомной тормозной способности кислорода и j -го изотопа,

D_O и D_j – доля атомов кислорода и j -го изотопа в смеси, соответственно.

Значения активности A_i рассчитывались на основании данных о массовой доле изотопов в КФ (см. табл. 2). Для расчета величины q_i использовалось соотношение [7]

$$q_i = 1,02 \cdot 10^{-9} \cdot E_i^{2,53}. \quad (11)$$

Расчет значений относительной атомной тормозной способности можно произвести по формуле [8]

$$S_j = 0,264 \cdot Z_j^{2/3}, \quad (12)$$

где Z_j – порядковый номер j -го изотопа и кислорода.

Результаты проведенных расчетов удельного нейтронного потока за счет реакции (α, n) на кислороде приведены в таблице 3.

Как видно из представленных в таблице 3 данных, основной вклад в удельный поток нейтронов, образующихся в результате реакции (α, n) , дают нейтроны, возникающие в этой реакции под действием α -частиц от изотопа $^{244}\text{См}$.

Значения ядерно-физических констант, характеризующих изотопы КФ, брались по данным [9-12].

Таблица 2

Массовая доля РЗЭ, ТПЭ и кислорода (г/ г КФ) и выход КФ, получаемой при переработке ОЯТ ВВЭР-1000 с различной глубиной выгорания и временем выдержки

Выгорание ОЯТ	Выдержка, лет	$K_{очистки}$	РПЭ			ТПЭ				Кислород	Выход КФ, кг/т
			Всего	В том числе		Всего	В том числе				
				Стабильные РЗЭ	Изотоп ^{154}Eu		Изотопы кюрия	Изотоп ^{244}Cm	Изотопы америция		
40 ГВт·сут/т U	10	40	0,776	0,711	$5,18 \cdot 10^{-2}$	$9,07 \cdot 10^{-2}$	$7,17 \cdot 10^{-2}$	$6,39 \cdot 10^{-2}$	$1,90 \cdot 10^{-2}$	0,133	0,38
		100	0,673	0,616	$4,49 \cdot 10^{-2}$	$1,97 \cdot 10^{-1}$	$1,55 \cdot 10^{-1}$	$1,38 \cdot 10^{-1}$	$4,13 \cdot 10^{-2}$	0,130	0,18
	50	40	0,805	0,800	$2,84 \cdot 10^{-3}$	$6,18 \cdot 10^{-2}$	$2,19 \cdot 10^{-2}$	$1,44 \cdot 10^{-2}$	$3,98 \cdot 10^{-2}$	0,133	0,37
		100	0,730	0,725	$2,58 \cdot 10^{-3}$	$1,40 \cdot 10^{-1}$	$4,96 \cdot 10^{-2}$	$3,26 \cdot 10^{-2}$	$9,04 \cdot 10^{-2}$	0,130	0,16
50 ГВт·сут/т U	10	40	0,719	0,658	$5,19 \cdot 10^{-2}$	$1,49 \cdot 10^{-1}$	$1,30 \cdot 10^{-1}$	$1,14 \cdot 10^{-1}$	$1,83 \cdot 10^{-2}$	0,132	0,51
		100	0,575	0,525	$4,15 \cdot 10^{-2}$	$2,97 \cdot 10^{-1}$	$2,60 \cdot 10^{-1}$	$2,29 \cdot 10^{-1}$	$3,66 \cdot 10^{-2}$	0,128	0,25
	50	40	0,785	0,779	$3,01 \cdot 10^{-3}$	$8,26 \cdot 10^{-2}$	$4,35 \cdot 10^{-2}$	$2,71 \cdot 10^{-2}$	$3,92 \cdot 10^{-2}$	0,133	0,46
		100	0,689	0,685	$2,65 \cdot 10^{-3}$	$1,81 \cdot 10^{-1}$	$9,55 \cdot 10^{-2}$	$5,95 \cdot 10^{-2}$	$8,59 \cdot 10^{-2}$	0,129	0,21
58 ГВт·сут/т U	10	40	0,709	0,675	$2,76 \cdot 10^{-2}$	$1,59 \cdot 10^{-1}$	$1,41 \cdot 10^{-1}$	$1,29 \cdot 10^{-1}$	$1,78 \cdot 10^{-2}$	0,131	0,58
		100	0,559	0,532	$2,18 \cdot 10^{-2}$	$3,13 \cdot 10^{-1}$	$2,78 \cdot 10^{-1}$	$2,54 \cdot 10^{-1}$	$3,51 \cdot 10^{-2}$	0,128	0,30
	50	40	0,787	0,782	$1,31 \cdot 10^{-3}$	$8,07 \cdot 10^{-2}$	$4,40 \cdot 10^{-2}$	$3,10 \cdot 10^{-2}$	$3,68 \cdot 10^{-2}$	0,133	0,53
		100	0,693	0,689	$1,15 \cdot 10^{-3}$	$1,78 \cdot 10^{-1}$	$9,68 \cdot 10^{-2}$	$6,82 \cdot 10^{-2}$	$8,08 \cdot 10^{-2}$	0,129	0,24

Таблица 3

Радиационно-физические и теплофизические характеристики КФ при различных параметрах ОЯТ

Выгорание ОЯТ	Выдержка, лет	Континг	Удельный поток нейтронов, нейтр·с ⁻¹ г ⁻¹ КФ					МЭД	Тепловыделение	Выделение гелия на 1 г КФ	
			За счет спонтанного деления ²⁴⁴ Cm в КФ	За счет спонтанного деления от КФ	За счет реакции (α, n) от α-частиц ²⁴⁴ Cm в КФ	За счет реакции (α, n) от КФ	Суммарный поток нейтронов от КФ			МЭД, Р/ч от 1 г КФ	P _{sp} , Вт/г КФ
40 ГВт·сут/т U	10	40	6,96·10 ⁵	6,96·10 ⁵	4,56·10 ³	4,66·10 ³	7,01·10 ⁵	9,74	0,20	6,0	1,1
		100	1,50·10 ⁶	1,50·10 ⁶	9,82·10 ³	1,00·10 ⁴	1,51·10 ⁶	8,45	0,39	13	2,3
	50	40	1,57·10 ⁵	1,57·10 ⁵	1,02·10 ³	1,15·10 ³	1,58·10 ⁵	0,53	0,046	1,8	0,33
		100	3,55·10 ⁵	3,55·10 ⁵	2,30·10 ³	2,58·10 ³	3,58·10 ⁵	0,49	0,11	4,2	0,74
50 ГВт·сут/т U	10	40	1,24·10 ⁶	1,24·10 ⁶	8,15·10 ³	8,26·10 ³	1,25·10 ⁶	9,71	0,34	10,5	1,9
		100	2,49·10 ⁶	2,49·10 ⁶	1,63·10 ⁴	1,65·10 ⁴	2,51·10 ⁶	7,77	0,66	21,2	3,8
	50	40	2,95·10 ⁵	2,95·10 ⁵	1,93·10 ³	2,06·10 ³	2,97·10 ⁵	0,56	0,082	3,0	0,53
		100	6,48·10 ⁵	6,48·10 ⁵	4,15·10 ³	4,47·10 ³	6,51·10 ⁵	0,50	0,18	6,5	1,2
58 ГВт·сут/т U	10	40	1,41·10 ⁶	1,41·10 ⁶	9,18·10 ³	9,29·10 ³	1,41·10 ⁶	5,16	0,37	11,9	2,1
		100	2,77·10 ⁶	2,77·10 ⁶	1,81·10 ⁴	1,83·10 ⁴	2,79·10 ⁶	4,06	0,72	23,4	4,2
	50	40	3,38·10 ⁵	3,38·10 ⁵	2,21·10 ³	2,33·10 ³	3,40·10 ⁵	0,25	0,09	3,3	0,58
		100	7,43·10 ⁵	7,43·10 ⁵	4,80·10 ³	5,07·10 ³	7,48·10 ⁵	0,22	0,20	7,2	1,3

3.2. Расчет МЭД

Наряду с нейтронным излучением, КФ будет обладать значительным гамма-фоном. Расчет мощности экспозиционной дозы (МЭД) P_D в Р/ч от 1 г КФ на расстоянии 1 м без фильтрации излучения можно провести по выражению

$$P_D = 3,58 \cdot 10^4 \cdot \sum_i \frac{K_{\gamma,i} \cdot m_i(t)}{A_i \cdot T_{1/2,i}}, \quad (13)$$

где $K_{\gamma,i}$ – гамма постоянная i -го изотопа, $P \cdot \text{см}^2 \cdot \text{ч}^{-1} \cdot \text{мКи}^{-1}$.

Результаты проведенных вычислений для различных вариантов КФ как в начале, так и в конце срока ее хранения приведены в таблице 3. Как видно из представленных в таблице 3 данных, МЭД в начале срока хранения может достигать от 1 г КФ величины около 10 Р/ч. При этом основной вклад в значение МЭД будет вносить изотоп ^{154}Eu .

3.3. Расчет теплофизических параметров КФ

Удельное тепловыделение радиоактивного изотопа w , Вт/г, можно рассчитать по выражению [13]

$$w = 2120 \cdot \frac{\varepsilon_{av}}{A \cdot T_{1/2}}, \quad (14)$$

где ε_{av} – средняя энергия α или β излучения, в МэВ,

A – масса грамм-атома изотопа в г,

$T_{1/2}$ – период полураспада в годах.

Расчет удельного (на 1 г КФ) тепловыделения P_{sp} , Вт/г, можно провести по формуле:

$$P_{sp} = \sum_i w_i \cdot m_i(t). \quad (15)$$

Результаты проведенных вычислений представлены в таблице 3. Как видно из данных, приведенных в таблице 3, удельное тепловыделение КФ в начале срока ее хранения лежит в пределах от 0,05 до 0,7 Вт/г. При этом основной вклад в тепловыделение КФ в начале хранения вносит изотоп ^{244}Cm , удельное тепловыделение которого составляет 2,78 Вт/г. Его вклад может составлять от 75 до 95% в различных вариантах КФ.

3.4. Расчет объема и скоростей накопления радиогенного гелия при хранении КФ

Образование радиогенного гелия происходит в результате α -распада ряда изотопов ТПЭ. Расчет зависимости объема выделившегося гелия от времени хранения $V_{\text{He}}(t)$ в см^3 (при нормальных условиях) на 1 г (начальный) КФ можно провести путем решения уравнения

$$\frac{dV_{\text{He}}(t)}{dt} = \frac{V_{GA}}{N_A} \cdot \sum_i p_i \cdot \lambda_i \cdot N_i(t) \quad (16)$$

при начальных условиях $V_{\text{He}}(0)=0$. В этом уравнении:

V_{GA} – объем, занимаемый одним грамм-атомом идеального газа при нормальных условиях,

N_A – число Авогадро,

λ_i – постоянная распада i -го α -радиоактивного изотопа, год^{-1} ,

$N_i(t)$ – число атомов i -го изотопа в единице массы КФ,

p_i – доля α -распадов в схеме распада i -го изотопа.

При проведении расчетов учитывалось образование гелия только за счет претерпевающих α -распад изотопов с периодом полураспада менее 1000 лет. Такими изотопами в КФ являются ^{242}Cm , ^{243}Cm , ^{244}Cm , ^{241}Am , $^{242\text{m}}\text{Am}$ (0,5% распадов), а также ^{238}Pu , накапливающийся в КФ в процессе ее хранения. Зависимости $N_i(t)$ определены на основании закона радиоактивного распада с учетом схемы распада каждого изотопа.

Исходные данные для расчета объема выделяющегося гелия на 1 г КФ $V_{\text{He}}(t)$ – начальные массовые доли α -радиоактивных изотопов ^{242}Cm , ^{243}Cm , ^{244}Cm , ^{241}Am , $^{242\text{m}}\text{Am}$, ^{242}Am в г/г фракции для КФ, которые могут быть получены при переработке ОЯТ ВВЭР-1000 с выгоранием 40, 50 и 58 ГВт·сут/т U, выдержкой 10 и 50 лет и коэффициентах очистки ТПЭ от РЗЭ, равных 40 и 100, получены способом, описанным в разделе 2. Результаты проведенных расчетов приведены в таблице 3. Как видно из представленных в таблице 3 данных, объем выделившегося за 100-летний период хранения КФ гелия варьируется в зависимости от состава КФ от 0,05 до 24 см³ и, соответственно, его масса составляет от 0,3 до 4,2 мг на 1 г заложенной на хранение КФ.

Выводы

1. В работе проведена оценка количества изотопов америция, кюрия и РЗЭ в ОЯТ в зависимости от глубины выгорания и времени выдержки. Установлено, что содержание изотопов кюрия может достигать 82 г на тонну ОЯТ.
2. Анализ состава и радиационно-физических и теплофизических характеристик кюриевой фракции (КФ), получаемой при переработке ОЯТ ВВЭР-1000 с начальным обогащением 4,4%, с глубиной выгорания 40 и 50 ГВт·сут/т U и временем выдержки 10 и 50 лет и ОЯТ с начальным обогащением 4,87%, глубиной выгорания 58 ГВт·сут/т U и временем выдержки 10 и 50 лет показал, что:
 - удельный нейтронный поток от КФ может достигать $2,8 \cdot 10^6 \text{ с}^{-1}$ на грамм фракции,
 - удельное тепловыделение – 0,7 Вт/г, МЭД – 10 Р/ч,
 - объем выделяющегося гелия за столетний период хранения – 24 см³ на 1 г фракции.
3. Нейтронные потоки, тепловыделение, образование гелия обусловлены в основном присутствием в КФ изотопа ^{244}Cm , а основной вклад в МЭД дает изотоп ^{154}Eu .

Полученные результаты следует учитывать при анализе технических проблем, связанных с длительным хранением КФ.

Список литературы

1. Стратегия развития атомной энергетики России в первой половине XXI века. М., ФГУП «ЦНИИАтоминформ», 2001.
2. Адамов Е.О. и др. Трансмутационный топливный цикл в крупномасштабной ядерной энергетике. М., ГУП НИКИЭТ, 1993, с. 183.
3. Бибичев Б.А. и др. Программный модуль SOCRAT для расчета выгорания и нуклидного состава топлива в ОТВС РБМК-1000. Отчет ГУП НПО «Радиевый институт им.В.Г.Хлопина», инв. № 2615-И, С.-Петербург, 1998.
4. Бибичев Б.А. и др. Результаты измерения выгорания топлива и содержания изотопов Y, Pu в образцах отработавшего топлива ВВЭР-1000. Отчет ГУП НПО «Радиевый института им.В.Г.Хлопина», инв. № 2684-И, С.-Петербург, 1998.

5. Колобашкин В.М., Рубцов П.М., Рушанский П.А. Радиационные характеристики отработанного ядерного топлива. Справочник. М.: Энергоатомиздат, 1983, 384 с.
6. Есимантовский В.М. Концептуальные решения по технологии обращения с ОЯТ на заводе РТ-2. Разд. 3.14. Экстракционное фракционирование ВАО. Отчет ГУП НПО «Радиевый институт им. В.Г. Хлопина», инв. № 2852-И, С.-Петербург, 2001.
7. Смирнов В.М. и др. Атомная энергия, 1987, т.63, вып. 2, с. 136.
8. Горшков Г.В. и др. Естественный нейтронный фон атмосферы и земной коры. М.: Атомиздат, 1966.
9. Хольнов Ю.В. и др. Оцененные значения ядерно-физических характеристик радиоактивных нуклидов, применяемых в народном хозяйстве. Справочник. М.: Энергоатомиздат, 1982, 312 с.
10. Хольнов Ю.В. и др. Характеристики излучений радиоактивных нуклидов, применяемых в народном хозяйстве. Оцененные данные. Справочник. М.: Атомиздат, 1980, 376 с.
11. Хольнов Ю.В. и др. Оцененные значения ядерно-физических характеристик радиоактивных нуклидов, применяемых в технике и медицине. Справочник. М.: Энергоатомиздат, 1984, 184 с.
12. Бибичев А.П. и др. Физические величины. Справочник. / Под ред. И.С. Григорьевой, Е.З. Мейлихова. М.: Энергоатомиздат, 1991, 1232 с.
13. Корлисс У., Харви Д. Источники энергии на радиоактивных изотопах. М.: Мир, 1967.

Parameters of a fraction containing curium and rare earths obtained in WWER-1000 spent fuel reprocessing.

B.A. Bibichev, V.M. Esimantovsky, A.G. Kavetsky, V.M. Okaminov

The quantity of americium, curium and rare earths isotopes in WWER-1000 spent fuel depending on burnup depth and cooling time is estimated. The characteristics of curium fraction (CF) obtained in reprocessing WWER-1000 are calculated: CF yield per a ton spent fuel, isotopic composition of rare earths, americium and curium contained in it, specific neutron fluxes, intensity of exposure dose, thermal parameters and release rates of radiogenic helium.

Монографии, опубликованные сотрудниками Радиевого института в 1950 – 2002 годы

1950

Аглинцев К.К. Дозиметрия ионизирующих излучений. Радиометрия и рентгенометрия. // М.-Л.: Гостехиздат, 1950. – 500 с.

1951

Гринберг А.А. Введение в химию комплексных соединений. Изд. 2-е переработ. и доп. // Л.: Госхимиздат, 1951. – 465 с.

Справочник химика. (Составители: Андреев А.С.; Ария С.М., Долгов Б.Н., **Митрофанова Г.И., Никольская Л.М.** и др.; под ред. **Б.П. Никольского**). т. I. – Л.-М.: Госхимиздат, 1951. – 896 с.; т. II. – 1148 с.

1952

Джелепов Б.С., Зырянова Л.Н. Таблицы по бета распаду. // Л.: Изд-во ЛГУ, 1952. – 104 с.

Справочник химика. (Составители: Андреев А.С.; Ария С.М., Долгов Б.Н., **Митрофанова Г.И., Никольская Л.М.** и др.; под ред. **Б.П. Никольского**). т. III. – Л.-М.: Госхимиздат, 1952. – 1192 с.;

1953

Рик Г.Р. Масс-спектрометрия. // М.: Гостехиздат, 1953. – 296 с.

1954

Аглинцев К.К. Основы дозиметрии ионизирующих излучений. // Л.: Медгиз, 1954. – 288 с.

1955

Мурин А.Н. Введение в радиоактивность. // Л.: Изд. ЛГУ. – 251 с.

Применение меченых атомов в аналитической химии. Сб. статей (Авторы: **Мурин А.Н., Ратнер А.П., Рик Г.Р., Старик И.Е.** и др.). // М.: Изд-во АН СССР, 1955. – 372 с.

1956

Горшков Г.В. Гамма-излучение радиоактивных тел. // Л.: Изд. ЛГУ, 1956. – 139 с.

Джелепов Б.С., Зырянова Л.Н. Влияние электрического поля атома на бета-распад. // М.-Л.: Изд. АН СССР, 1956. – 312 с.

Джелепов Б.С., Пекер Л.К. Схемы распада радиоактивных изотопов. // М.-Л.: Изд. АН СССР, 1956. – 176 с.

Никитин Б.А. Избранные труды. (отв. ред. Старик И.Е.). // М.-Л.: Изд. АН СССР, 1956. – 349 с.

Материал подготовлен Н.А. Абрамовой и Ю.Л. Каминским.

Фамилии авторов, являвшихся сотрудниками Радиевого института, выделены полужирным шрифтом.

Труды Радиевого института им. В.Г. Хлопина, т. VII. Химия и геология. (Авторы: **Гринберг А.А., Комлев Л.В., Крылов А.Я., Петржак Г.И., Старик**

И.Е., Толмачев Ю.М., Ушатский В.Н. и др.; отв. ред. **Старик И.Е.**) – М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1956. – 215 с.

Труды Радиевого института им. В.Г. Хлопина, т. VII, вып. 1 (Авторы: **Бак М.А., Горшков Г.В., Джелепов Б.С., Жданов А.П., Жуковский Н.Н., Перфилов Н.А., Петржак К.А., Рик Г.Р., Смирнов В.В., Эйсмонт В.П.** и др.; под ред. **Лукирского П.И.** и **Джелепова Б.С.**) // М.-Л.: Изд. АН СССР, 1956. – 292 с.

Труды Радиевого института им. В.Г. Хлопина, т. VII, вып. 2 (Авторы: **Бриземейстер К.А., Жданов А.П., Ложкин О.В., Лукирский П.И., Мурин А.Н., Немиллов Ю.А., Никитин Б.А., Перфилов Н.А.** и др.; под ред. **Лукирского П.И.** и **Джелепова Б.С.**) // М.-Л.: Изд. АН СССР, 1956. – 131 с.

1957

Аглинцев К.К. Дозиметрия ионизирующих излучений. Изд. 2-е, дополненное. // М.: Гостехиздат, 1957. – 503 с.

Аглинцев К.К. Экспериментальные основы дозиметрии и дозиметрическая аппаратура. // Л.: Изд. В.-М. Академии кораблестроения и вооружения им. А.Н. Крылова, 1957. – 259 с.

Джелепов Б.С., Пекер Л.К. Схемы распада радиоактивных изотопов. // М.-Л.: Изд. АН СССР, 1957. – 176 с.

Хлопин В.Г. Избранные труды. т. I. Труды в области радиохимии (Отв. ред. **Никитин Б.А.** и **Ратнер А.П.**) // М.-Л.: Изд. АН СССР, 1957. – 372 с. т. II. Труды по неорганической и аналитической химии и по геохимии. (Отв. ред. **Гринберг А.А.** и **Старик И.Е.**) // М.-Л.: Изд. АН СССР, 1957. – 306 с.

Радиометрические методы поиска и разведки урановых руд. Сб. статей (Авторы: **Горшков Г.В., Граммаков А.Г., Николаев Д.С.** и др.) // М.: Госгеолтехиздат, 1957. – 195 с.

Труды Радиевого института им. В.Г. Хлопина, т. V, вып. 2 (Авторы: **Горшков Г.В., Гребенщикова В.И., Комлев Л.В., Никитин Б.А., Пермьяков В.М., Ратнер А.П., Ростова М.Н., Старик И.Е., Хлопин В.Г.** и др.; отв. ред. **Старик И.Е.**) // М.-Л.: Изд. АН СССР, 1957. – 292 с.

Труды Радиевого института им. В.Г. Хлопина, т. VI. (Авторы: **Вдовенко В.М., Горшков Г.В., Гуревич А.М., Меликова О.С., Ратнер А.П., Толмачев Ю.М., Шиманская Н.С.** и др.; отв. ред. **Старик И.Е.**) // М.-Л.: Изд. АН СССР, 1957. – 167 с.

35 лет Радиевому институту имени В.Г. Хлопина (Отв. ред. **Старик И.Е.**). – Л.: Изд-во АН СССР, 1957. – 72 с.

1958

Джелепов Б.С., Пекер Л.К. Схемы распада радиоактивных ядер. // М.-Л.: Изд. АН СССР, 1958. – 787 с.

Труды Радиевого института им. В.Г. Хлопина, т. VIII. Химия и геохимия. (Авторы: **Вдовенко В.М., Гринберг А.А., Гуревич А.М., Зив Д.М., Ковалева Т.В., Ковальская М.П., Никитин Б.А., Никольский Б.П., Ратнер А.П., Старик И.Е., Шестаков Б.И.** и др.; отв. ред. **Старик И.Е.**) // М.-Л.: Изд. АН СССР, 1958. – 276 с.

1959

- Горшков Г.В.** Гамма-излучение радиоактивных тел и элементы расчета защиты от излучения. // М.-Л.: Изд. АН СССР, 1959. – 292 с.
- Джелепов Б.С.** Изобарные ядра с массовым числом $A = 74$. // М.-Л.: Изд. АН СССР, 1959. – 40 с.
- Старик И.Е.** Основы радиохимии. // М.-Л., 1959. – 459 с.
- Труды Радиевого института им. В.Г. Хлопина, т. IX. (Авторы: **Аглинцев К.К., Бак М.А., Горшков Г.В., Жданов А.П., Немилов Ю.А., Петржак К.А., Протопопов А.Н., Селицкий Ю.А., Соловьев С.М., Смирнов В.В. и др.**; отв. ред. **Перфилов Н.А.**). // М.-Л.: Изд. АН СССР, 1959. – 288 с.

1960

- Бак М.А., Романов Ю.Ф.** Нейтрон. // М.: Атомиздат, 1960. – 82 с.
- Вдовенко В.М.** Химия урана и трансураниевых элементов. // М.-Л.: Изд. АН СССР, 1960. – 700 с.
- Джелепов Б.С., Приходцева В.П., Хольнов Ю.В.** Изобарные ядра с массовым числом $A = 140$. // М.-Л.: Изд. АН СССР, 1960. – 97 с.
- Джелепов Б.С., Жуковский Н.Н.** Изобарные ядра с массовым числом $A = 110$. // М.-Л.: Изд. АН СССР, 1960. – 72 с.
- Джелепов Б.С., Драницына Г.Ф.** Систематика энергий β -распада. // М.-Л.: Изд. АН СССР, 1960. – 60 с.
- Радиохимический анализ продуктов деления. Сб. статей (Авторы: **Абрамова Л.И., Блинова Н.И., Венедиктова Р.В., Зив Д.М., Москалькова Э.А., Родионова Л.П., Толмачев Ю.М., Ушатский В.Н.** и др.; ред. **Толмачев Ю.М.**). // М.-Л.: Изд. АН СССР, 1960. – 134 с.
- Радиохимия и химия ядерных процессов. Сб. статей (Авторы: **Кривоухатский А.С., Мурин А.Н., Преображенский Б.К., Росянов С.П., Шведов В.П.** и др.; ред.: **Мурин А.Н., Нефедов В.Д., Шведов В.П.**). // Л.: Химиздат, 1960. – 784 с.

1961

- Старик И.Е.** Ядерная геохронология. // М.-Л.: Изд. АН СССР, 1961. – 630 с.
- Вяземский Е.О., Ломоносов И.И., Писаревский А.Н., Тетерин Е.Д.** и др. Сцинтилляционный метод в радиометрии. – М.: Госатомиздат, 1961. – 430 с.
- Aglinev K.K.** Dozimetria promieniowania jonizujacego. // Warszawa, Państw. wyd-wo nakowe, 1961. – 519 p.
- Aglinev K.K.** Dosimetrie jonisacniho zariadeni. // Praha, Státní nacl-ví technické literatury, 1961. – 498 p.

1962

- Аглинцев К.К., Кодюков В.М., Лызлов А.Ф., Сивинцев Ю.В.** Прикладная дозиметрия. // М.: Госатомиздат, 1962. – 248 с.
- Перфилов Н.А., Ложкин О.В., Остроумов В.И.** Ядерные реакции под действием частиц высоких энергий. // М.-Л.: Изд. АН СССР, 1962. – 251 с.
- Старик И.Е.** Ядерная геохронология. // Япония (на японском яз.), 1962. – 355 с.

- Физика деления атомных ядер. Сб. статей (Авторы: **Беляев Б.Н., Драпчинский Л.В., Курчатова Б.В., Мушин А.Н., Обухов А.И., Перфилов Н.А., Петржак К.А., Протопопов А.Н., Соловьева З.И., Эйсмонт В.П.** и др.; ред.: **Перфилов Н.А., Эйсмонт В.П.**). // М.: Гостехиздат, 1962. – 244 с.
- Справочник химика. 2-е изд., переработ. и доп. т. I (Авторы: **Абрамова Н.А., Айзенштадт Н. И., Ария С.М., Липовский А.А.** и др.; глав. ред. **Никольский Б.П.**). – М.-Л.: Госхимиздат, 1962. – 1071 с.

1963

- Джелепов Б.С., Пекер Л.К.** Схемы распада радиоизотопов с $A \geq 100$. // М.-Л.: Изд. АН СССР, 1963. – 1059 с.
- Нефедов В.Д., Торопова М.А., Кривохатская И.В., Синотова Е.Н.** Радиоактивные изотопы в химических исследованиях. // М.-Л.: Изд. «Химия», 1965. – 300 с.
- Пермяков В.М.** Радиоактивные эманации. – М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1963. – 176 с.
- Справочник химика. 2-е изд., переработ. и доп. т. II (Авторы: **Абрамова Н.А., Воеводский А. С., Гинзбург О.Ф., Колычев В.Б.** и др.; глав. ред. **Никольский Б.П.**). – М.-Л.: Госхимиздат, 1963. – 1071 с.
- Vak M.A., Romanov Yu. F.** Neutron.// Budapest, Műszaki könyvkiado, 1963. –91 p.
- Vak M.A., Romanov Yu. F.** Neutronal.// Bucharest, «Editura Tehnică», 1963. –77 p.
- Starik I. Je.** Grundlagen der Radiochemie. – Akademie-Verlag-Berlin, 1963. – 386 S.

1964

- Спектроскопические методы в химии комплексных соединений. Сб. статей (под ред. **Вдовенко В.М.**; авторы: **Яцимирский К.Б., Варшавский Ю.С., Колычев В.Б., Комаров Е.В., Никольский Б.П., Парамонова В.И., Суглобов Д.Н., Щербаков В.А., Пальчевский В.В.** // М.: «Химия». – 268 с.
- Справочник химика. 2-е изд., переработ. и доп. т. III (Авторы: **Абрамова Н.А., Бельченко Г.В., Каминский Ю.Л.** и др.; глав. ред. **Никольский Б.П.**). – М.-Л.: Изд-во «Химия», 1964. – 1006 с.

1965

- Соосаждение и адсорбция радиоактивных элементов. Сб. статей (отв. ред. **Вдовенко В.М.**; авторы: **Ампелогова Н.И., Брызгалова Р.В., Гребенщикова В.И., Гинзбург Ф.Л., Старик И.Е., Шейдина Л.Д., Черницкая И.В.** и др.). // М.-Л.: «Наука», 1965. – 196 с.
- Справочник химика. 2-е изд., переработ. и доп. т. IV (Авторы: **Алдорова Н.Ш., Крижанский Л.М., Лазарев Л.Н., Липовский А.А.** и др.; глав. ред. **Никольский Б.П.**). – М.-Л.: Изд-во «Химия», 1965. – 1006 с.

1966

- Горшков Г.В., Зябкин В.А., Лятковская Н.М., Цветков О.С.** Естественный нейтронный фон атмосферы и земной коры.// М.: Атомиздат, 1966. – 410 с.
- Гринберг А.А.** Введение в химию комплексных соединений. Изд. 3-е, переработ. и доп. // Л. «Химия», 1966. – 631 с.
- Джелепов Б.С., Пекер Л.К.** Схемы распада радиоизотопов с $A < 100$. // М.-Л.: «Наука», 1966. – 750 с.
- Джелепов Б.С., Г.Ф. Драницына, Извольски И.** Изобарные ядра с массовым числом $A = 157$. // М.-Л.: «Наука», 1966. – 103 с.

1967

- Горшков Г.В.** Проникающее излучение радиоактивных источников. Изд 2-е, доп. и перераб. // Л.: «Наука», 1967. – 395 с.
- Химия трансурановых и осколочных элементов. Сб. статей. (Авторы: **Гринберг А.А., Никольский Б.П., Парамонова В.И. Петржак Г.И. и др.**; ред. **Вдовенко В.М.**). // Л.: «Наука», 1967. – 182 с.

1968

- Воинова Н.А., **Джелепов Б.С.** Изобарные ядра с массовым числом $A = 182$. // М.-Л.: «Наука», 1968. – 328 с.
- Джелепов Б.С.**, Драницына Г.Ф., Звольский И. Изобарные ядра с массовым числом $A = 157$. // М.-Л.: «Наука», 1968. – 103 с.
- Кузнецов Ю.В., Щebetковский В.Н., Трусов А.Г.** Основы дезактивации воды. – М.: Атомиздат, 1968. – 318 с.
- Ломоносов И.И., Сошин Л.Д.** Измерение трития. – М.: Атомиздат, 1968. – 108 с.

1969

- Бак М.А., Шиманская Н.С.** Нейтронные источники. // М.: Атомиздат, 1969. – 167 с.
- Вдовенко В.М.** Современная радиохимия. // М.: Атомиздат, 1969. – 543 с.
- Старик И.Е.** Основы радиохимии. Изд. 2-е, допол. // Л.: «Наука», 1969. – 647 с.

1970

- Джелепов Б.С.**, Кошкарева С.Ф. Таблицы энергий гамма-лучей, возникающих при распаде радиоактивных ядер. // Л.: «Наука», 1970. – 285 с.
- Кривохатский А.С., Романов Ю.Ф.** Получение трансурановых и актиноидных элементов при нейтронном облучении. // М.: Атомиздат, 1970. – 317 с.

1971

- Гринберг А.А.** Введение в химию комплексных соединений. Изд. 4-е исправл. // Л.: «Химия», 1971. – 631 с.
- Балалаев В.А., **Джелепов Б.С.**, Учеваткин И.Ф. Изобарные ядра с массовым числом $A = 174$. // М.-Л.: «Наука», 1971. – 146 с.
- Джелепов Б.С.**, Драницына Г.Ф., Михайлов В.М. Свойства деформированных ядер с $K = 1/2$. // Л.: «Наука», 1971. – 251 с.
- Кривохатский А.С., Кацапов В.И.** Радиационная безопасность при технических ядерных взрывах. // М.: Атомиздат, 1971. – 48 с.
- Справочник химика. 3-е изд., переработ. и доп. т. I (Авторы: **Абрамова Н.А.**, Айзенштадт Н.И., Ария С.М., **Липовский А.А.** и др.; глав. ред. **Никольский Б.П.**). – М.-Л.: Изд-во «Химия», 1971. – 1071 с.;
- т. II (Авторы: **Абрамова Н.А.**, Воеводский А.С., Гинзбург О.Ф., Колычев В.Б. и др.; глав. ред. **Никольский Б.П.**). – М.-Л.: Изд-во «Химия», 1971 – 1068 с.

1972

- Гринберг А.А.** Физическая химия комплексных соединений. Избранные труды. // Л.: «Наука», 1972. – 435 с.
- Витман В.Д., **Джелепов Б.С.**, Медведев А.И. Изобарные ядра с массовым числом $A = 72$. // М.-Л.: «Наука», 1972. – 120 с.

- Джелепов Б.С., Зырянова Л.Н., Суслов Ю.П. Бета-процессы. Функции для анализа бета-спектров и электронного захвата. // Л.: «Наука», 1972. – 347 с.
Радиевый институт имени В.Г. Хлопина. К 50-летию со дня основания. (Под общей редакцией **Б.П. Никольского**) – Л.: Изд-во «Наука», 1972. – 243 с.

1973

- Вдовенко В.М., Дубасов Ю.В.** Аналитическая химия радия. // Л.: «Наука», 1973. – 190 с.
Джелепов Б.С., Шестопалова С.А. Изобарные ядра с массовым числом $A = 174$. // М.-Л.: «Наука», 1973. – 332 с.
Шиманская Н.С. Калориметрия ионизирующих излучений. – М.: Атомиздат, 1973. – 328 с.

1974

- Джелепов Б.С. Методы разработки сложных схем распада. // Л.: «Наука», 1974. – 232 с.
Джелепов Б.С., Кошкарева С.Ф. Гамма-кванты изотопов, применяемых в нейтронно-активационном анализе. Справочник. // М.: Атомиздат, 1974. – 74 с.
Витман В.Д., **Дмитриев А.Г., Жуковский Н.Н., Иванов Р.Б., Медведев А.И., Михайлова М.А., Приходцева В.П.** Схемы распада радиоактивных ядер. $A = 70 - 79$. // Л.: «Наука», 1974. – 296 с.
Комплексообразование и экстракция актиноидов и лантаноидов. Сб. статей (Авторы: **Балуев А.В., Буляница Л.С., Вдовенко В.М., Гуревич А.М., Ковалева Т.В., Макарова Т.П., Никольская Л.Е., Пушленков М.Ф., Синицына Г.С., Шестаков Б.И.** и др.; отв.ред. **Вдовенко В.М.**) // Л.: «Наука», 1974. – 161 с.
Неорганические ионообменные материалы. Сб. статей. Вып.1. (Авторы: **Никольский Б.П., Брызгалова Р.В., Высокоостровская Н.Б., Гребенщикова В.И., Легин Е.К., Рогозин Ю.М., Макарова Т.А.** и др.; под ред. **Б.П. Никольского**). Л.: Изд-во ЛГУ, 1974. – 344с.
Кузнецов Ю.В., Щebetковский В.Н., Трусов А.Г. Основы очистки воды от радиоактивных загрязнений. – М.: Атомиздат, 1974. – 360 с.

1975

- Берштейн И.Я., **Каминский Ю.Л.** Спектрофотометрический анализ в органической химии. // Л.: «Химия», 1975. – 230 с.
Дмитриев А.Г., Жуковский Н.Н., Приходцева В.П., Усыпко Т.М. Схемы распада радиоактивных ядер. $A = 65 - 69$. // Л.: «Наука», 1975. – 168 с.
Никольский Б.П., Пальчевский В.В., Пендин А.А., Якубов Х.М. Оскредметрия. // Л.: «Химия». – 304 с.

1976

- Балалаев В.А., **Джелепов Б.С., Тер-Нерсесьянц В.Е.** Изобарные ядра с массовым числом $A = 169$. $^{169}\text{Ho} \rightarrow ^{169}\text{Er} \rightarrow ^{169}\text{Tm} \leftarrow ^{169}\text{Yb}$. // Л.: «Наука», 1976. – 223 с.
Джелепов Б.С., Иванов Р.Б., Михайлова М.А. Схемы распада радиоактивных ядер. $A = 225 - 229$. // Л.: «Наука», 1976. – 90 с.
Кузнецов Ю.В. Радиохронология океана. – М.: Атомиздат, 1976. – 279 с.
Ампелогова Н.И. Радиохимия полония. – М.: Атомиздат, 1976. – 143 с.

1978

- Балалаев В.А., **Джелепов Б.С.**, Тер-Нерсесьянц В.Е. Изобарные ядра с массовым числом $A = 169$. $^{169}\text{Yb} \leftarrow ^{169}\text{Lu} \leftarrow ^{169}\text{Hf} \leftarrow ^{169}\text{Ta} \leftarrow (^{169}\text{W}) \leftarrow (^{169}\text{Re}) \leftarrow ^{169}\text{Os}$. // Л.: «Наука», 1978. – 279 с.
- Чайхорский А.А.** Химия нептуния. // М.: Атомиздат, 1978. – 216 с.
- Чечев В.П., Крамаровский Я.М.** Радиоактивность и эволюция Вселенной. // М.: «Наука», 1978. – 208 с.
- Рысьев О.А., Жарков А.В.** и др. Сцинтилляционный метод измерения трития в биологии и медицине. – М.: Атомиздат, 1978. – 136 с.
- Shcherbakov V., Eichhoff J.** Atlas wide lines NMR-spectra of different nuclei. V. I. // FRG, “Brucker - Physic AG”, 1978. – 100 p.

1980

- Никольский Б.П., Матерова Е.А.** Ионоселективные электроды. // Л.: «Химия», 1980. – 239 с.
- Хольнов Ю.В., Чечев В.П., Камынов Ш.В., Кузьменко Н.К., Недовесов В.Г.** Характеристика излучений радиоактивных нуклидов, применяемых в народном хозяйстве. Оцененные данные. Справочник. // М.: Атомиздат, 1980. – 376 с.
- Джелепов Б.С., Шестопалова С.А.** Ядерно-спектроскопические нормали. // М.: Атомиздат, 1980. – 231 с.
- Неорганические ионообменные материалы. Вып.2 (Авторы: **Брызгалова Р.В., Гребенщикова В.И., Высокоостровская Н.Б.**; под ред **Б.П.Никольского**). – Л.: Изд-во ЛГУ, 1980. – 220 с.

1981

- Андреев В.И., Никольский Б.П., Храмов Н.Н., Сирая Т.Н.** Элементы анализа и планирования радиохимического эксперимента. // М.: Энергоиздат, 1981. – 72 с.

1982

- Джелепов Б.С., Драницына Г.Ф.** Схемы распада радиоактивных ядер. $A = 181$. // Л.: «Наука», 1982. – 104 с.
- Иониты в химической технологии. Сб. статей (Авторы: **Высокоостровская Н.Б., Парамонова В.И.** и др.; ред. **Никольский Б.П., Романков П.Г.**). // Л.: «Химия», 1982. – 416 с.
- Хольнов Ю.В., Чечев В.П., Камынов Ш.В., Кузьменко Н.К., Недовесов В.Г.** Оцененные значения ядерно-физических характеристик радиоактивных нуклидов, применяемых в народном хозяйстве. Справочник. // М.: Энергоиздат, 1982. – 311 с.

1983

- Землянухин В.И., **Ильенко Е.И., Кондратьев А.Н., Лазарев Л.Н., Царенко А.Ф., Царицына Л.Г.** Радиохимическая переработка ядерного топлива АЭС. // М.: Энергоатомиздат, 1983. – 232 с.
- Землянухин В.И., **Ильенко Е.И., Кондратьев А.Н., Лазарев Л.Н., Царенко А.Ф., Царицына Л.Г.** Радиохимическая переработка ядерного топлива АЭС. (на китайском яз.) // Китай, 1983.

- Ефимов А.И., Белорукова Л.П., Васильева И.В., **Чечев В.П.** Свойства неорганических соединений. Справочник. // Л.: «Химия», 1983. – 392 с.
- Ефимов А.И., Белорукова Л.П., Васильева И.В., **Чечев В.П.** Свойства неорганических соединений. Справочник (на японском яз.). // Япония, 1983. – 390 с.
- Shcherbakov V.**, Eichhoff J. Atlas wide lines NMR-spectra of different nuclei. V. II. // FRG, “Brucker -Physic AG”, 1983. – 75 p.

1984

- Акулов Г.П.** Радиоактивные изотопы в химии полимеров. // М.: Энергоатомиздат, 1984. – 151 с.
- Хольнов Ю.В., Чечев В.П., Камынов Ш.В., Кузьменко Н.К.** Оцененные значения ядерно-физических характеристик радиоактивных нуклидов, применяемых в технике и медицине. Справочник. // М.: Энергоатомиздат, 1984. – 184 с.
- Крылов А.Я.** Изотопные методы в морской геологии. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 120 с.
- Ионный обмен и ионометрия. Вып.4. Мужвуз. сб. (Авторы: **Никольский Б.П., Высокоостровская Н.Б., Калашников В.М.** и др.; отв. ред. **Б.П. Никольский**). – Л.: Изд-во ЛГУ, 1984. – 204 с.

1985

- Барбанель Ю.А.** Координационная химия f-элементов в расплавах. // М.: Энергоатомиздат, 1985. – 144 с.
- Джелепов Б.С., Жуковский Н.Н.** Изобарные ядра с массовым числом $A = 124$ ($^{124}\text{Cd} \rightarrow ^{124}\text{In} \rightarrow ^{124}\text{Sn}; ^{124}\text{Sb} \rightarrow ^{124}\text{Te} \rightarrow ^{124}\text{In}; ^{124}\text{Xe} \leftarrow ^{124}\text{Cs} \leftarrow ^{124}\text{Ba} \leftarrow ^{124}\text{La} \leftarrow ^{124}\text{Ce}$). // Л.: «Наука», 1985. – 228 с.

1986

- Берштейн И.Я., **Каминский Ю.Л.** Спектрофотометрический анализ в органической химии. Изд. 2-е, допол. // Л.: «Химия», 1986. – 230 с.
- Аккерман А.Ф., **Грудский М.Я., Смирнов В.В.** Вторичное электронное излучение из твердых тел под действием гамма-квантов. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 168 с.

1987

- Крамаровский Я.М., Чечев В.П.** Синтез элементов во Вселенной. // М.: «Наука», 1987. – 160 с.
- Суглобов Д.Н., Сидоренко Г.В., Легин Е.К.** Летучие органические и комплексные соединения f-элементов. // М.: Энергоатомиздат, 1987. – 208 с.

1988

- Джелепов Б.С., Тер-Нерсесьянц В.Е., Шестопалова С.А.** Схемы распада радиоактивных ядер. $A = 169, 170$. // Л.: «Наука», 1988. – 193 с.

1989

- Землянухин В.И., **Ильенко Е.И., Кондратьев А.Н. Лазарев Л.Н., Царенко А.Ф., Царицына Л.Г.** Радиохимическая переработка ядерного топлива АЭС. Изд. 2-е, перераб. и доп. // М.: Энергоатомиздат, 1989. – 280 с.

1990

Чечев В.П., Чукреев Ф.Е. Характеристики распада и излучений долгоживущих радионуклидов, применяемых в народном хозяйстве и научных исследованиях. (Оцененные данные). Справочник. // М.: ИАЭ им. И.В. Курчатова, 1990. – 64 с.

1991

Москвин Л.Н., **Царицына Л.Г.** Методы разделения и концентрирования в аналитической химии. // Л.: «Химия», 1991. – 256 с.

Chechev V.P., Chukreev F.E. Characteristics of decay and Radiation in long-lived radionuclides used in national economics and scientific researches. Report IAEA INDC (ССР)-338/L, IAEA, Vienna, 1991.

1992

Ядерные взрывы в СССР. Вып.1. Северный испытательный полигон. Справочная информация (Авторы: **Кривохатский А.С.**, **Дубасов Ю.В.** и др.; составит. и науч. ред. **Кривохатский А.С.**, **Дубасов Ю.В.**;) // М., 1992. – 194 с.

1993

Ядерные взрывы в СССР. Вып.2. Северный испытательный полигон. Справочная информация (Авторы: **Кривохатский А.С.**, **Дубасов Ю.В.** и др.; составит. и науч. ред. **Кривохатский А.С.**, **Дубасов Ю.В.**;) // С.-Пб.: 1993. – 404 с.

1994

Ядерные взрывы в СССР. Вып. 4. Мирное использование ядерных взрывов. Справочная информация (Авторы: Абалакин В.Г., Безумов Н.В., **Дубровин В.С.**, **Дубасов Ю.В.** и др.; науч. ред. О.Л.Кедровский, **А.С.Кривохатский**). // М.: ВНИПИПТ, РИ, 1994. – 162 с.

1995

Голашвили Т.В., **Чечев В.П.**, Лбов А.А. Справочник нуклидов. // М.: ЦНИИАтоминформ, 1995. – 440 с.

Чуклаев С.В., **Грудский М.Я.**, **Артемьев В.А.** Вторичные эмиссионные детекторы ионизирующих излучений. – М.: Энергоатомиздат, 1995. 365 с.

1997

Ядерные испытания в СССР: Семипалатинский полигон. Обеспечение общей и радиационной безопасности ядерных испытаний. (Авторы: Волошин Н.П., Гуськова А.К., **Дубасов Ю.В.** и др.) // М.: Изд-во ИГЕМ РАН, 1997. – 319 с.

Ядерные испытания в СССР. т. 2. Технология ядерных испытаний. Воздействие на окружающую среду. Меры по обеспечению безопасности. Ядерные полигоны и площадки. (Авторы: Михайлов В.Н., Адушкин В.В., **Дубасов Ю.В.** и др.) // Begell-Atom, LLC, 1977. – 302 p.

Радиевый институт имени В.Г. Хлопина. К 75-летию со дня основания. (Авторы: **Андерсон Е.Б.**, **Бутомо С.В.**, **Галкин Б.Я.**, **Джелепов Б.С.**, и др.; под общей ред. **Ильенко Е.И.**.) – СПб., 1997. – 340 с.

1999

- Ядерные взрывы в СССР. Северный испытательный полигон. Справочная информация. Изд. 2-е, испр. и доп. (Авторы: **Кривохатский А.С.**, **Дубасов Ю.В.** и др.; гл. ред. Михайлов В.Н.; составители и науч. ред.: **Кривохатский А.С.**, **Дубасов Ю.В.** и др.). // СПб., 1999. – 163 с.
- Be M.-M., Duchemin B., Lame J., Morillon C., Piton F., Bromne E., **Chechev V.**, Helmer R., Schönfeld E. et al. Table de radionucleides. // СЕА, 1999. (Франция).
- Be M.-M., Bromne E., **Chechev V.**, Helmer R., Schönfeld E. Table de radionucleides. // СЕА, 1999. (Франция).

2000

- Ядерные испытания в СССР. Т. 4. Использование ядерных взрывов для решения народно-хозяйственных задач и научных исследований. (Авторы: Михайлов В.Н., Адушкин В.В. **Дубасов Ю.В.** и др.). // Саров: РФЯЦ «ВНИИЭФ», 2000. – 200 с.
- Ядерные испытания в СССР. Новоземельский полигон. Обеспечение общей и радиационной безопасности ядерных испытаний. (Авторы: Боярский В.П., Веретенников А.И., **Дубасов Ю.В.** и др.). // М., 2000. – 527 с.

2001

- Ядерные испытания в СССР. Мирные ядерные взрывы. Обеспечение общей и радиационной безопасности при их проведении. (Ред. группа: Логачев В.А., Волошин Н.П., **Дубасов Ю.В.** и др.). // М., 2001. – 519 с.

2002

- Polimers, phosphors, and voltaics for radioisotope microbatteries. (Authors: **Akulov G. P.**, **Kaminsky Yu. L.**, **Kavetsky A.G.**, **Meleshkov S.P.**, **Nekhoroshkov S.N.** et al.; ed. by **Barbanel' Yu.A.** et al.) // CRC Press, 2002. – 656 p.
- Голашвили Т.В., **Чечев В.П.**, Лбов А.А., Куприянов В.М., Демидов А.П. Справочник нуклидов - 2. // М.: ФГУП «ЦНИИАтоминформ», 2002. – 348 с.
- Ядерные испытания в СССР. Современное радиоэкологическое состояние полигонов. (Ред. группа: Логачев В.А., Волошин Н.П., **Дубасов Ю.В.** и др.). // М., 2002. – 653 с.

Сотрудники Радиевого института – лауреаты Ленинской, Государственной премии СССР и премии им. В.Г. Хлопина

Лауреаты Ленинской премии

- Гребенщикова Вера Ильинична** (1962) – за научные труды в области химических наук.
- Гуревич Анна Моисеевна** (1962) – за научные труды в области химических наук.
- Зив Давид Моисеевич** (1966) – за разработку технологии и промышленное производство новых материалов.
- Никольский Борис Петрович** (1961) – за усовершенствование метода производств в области химической технологии.
- Парамонова Валентина Ивановна** (1962) – за научные труды в области химических наук.
- Посвольский Михаил Владимирович** (1962) – за научные труды в области химических наук.
- Пушленков Михаил Федорович** (1962) – за научные труды в области химических наук.

Лауреаты Государственной премии СССР

- Гедеев Лев Иванович** (1953) – за выполнение специального задания Правительства.
- Горшков Георгий Васильевич** (1953) – за выполнение специального задания Правительства.
- Гринберг Александр Абрамович** (1946) – за монографию «Введение в химию комплексных соединений».
- Джелепов Борис Сергеевич** (1953) – за выполнение специального задания Правительства.
- Дубасов Юрий Васильевич** (1985) – за работу в области специальной радиохимии.
- Жданов Александр Павлович** (1946) – за выполнение специального задания Правительства.
- Зив Давид Моисеевич** (1951, 1953) – за выполнение специального задания Правительства.
- Каминский Юрий Леонович** (1983) – за разработку и освоение производства меченных тритием соединений для физико-химической биологии и биотехнологии.
- Кривохатский Анатолий Сергеевич** (1977) – за разработку и внедрение специальной технологии создания подземных резервуаров-хранилищ для газоконденсата; (1985) – за работу в области специальной радиохимии.
- Лазарев Леонард Николаевич** (1981) – за разработку и внедрение новой технологии переработки стандартной продукции.
- Никитин Борис Александрович** (1943) – за разработку метода выделения и промышленного применения радиотория; (1949) – за выполнение специального задания Правительства.

- Никольский Борис Петрович** (1949) – за выполнение специального задания Правительства; (1973) – за цикл работ «Теория стеклянного электрода и электродные свойства стекол».
- Петржак Константин Антонович** (1946) – за открытие явления самопроизвольного деления урана; (1953) – за выполнение специального задания Правительства.
- Полесицкий Александр Ефимович** (1943) – за разработку метода выделения и промышленного применения радиотория.
- Протопопов Алексей Николаевич** (1949, 1953) – за выполнение специальных заданий Правительства.
- Ратнер Александр Петрович (Хацкелевич)** (1949) – за выполнение специального задания Правительства.
- Румянцева Людмила Николаевна** (1983) – за разработку и освоение производства меченных тритием соединений для физико-химической биологии и биотехнологии.
- Савоненков Владимир Григорьевич** (1985) – за работу в области специальной радиохимии.
- Самарцева Анна Георгиевна (Егоровна)** (1953) – за выполнение специального задания Правительства.
- Сковородкин Николай Витальевич** (1985) – за работу в области специальной радиохимии.
- Сорокина Анна Викентьевна** (1953) – за выполнение специального задания Правительства.
- Старик Иосиф Евсеевич** (1949, 1951, 1953) – за выполнение специальных заданий Правительства.
- Суглобов Дмитрий Николаевич** (1986) – за цикл работ «Соединения металлов в ранее неизвестных состояниях окисления, исследование их свойств и применение».
- Толмачев Юрий (Георгий) Маркианович** (1953) – за выполнение специального задания Правительства.
- Ушатский Вячеслав Николаевич** (1953) – за выполнение специального задания Правительства.
- Хлопин Виталий Григорьевич** (1943) – за разработку метода выделения и промышленного применения радиотория; (1946) – за научные исследования в области химии радиоактивных веществ; (1949) – за выполнение специального задания Правительства.
- Шпунт Лев Борисович** (1988) – за создание промышленного комплекса.
- Яковлев Владимир Андреевич** (1953) – за выполнение специального задания Правительства.

Лауреаты премии имени В.Г. Хлопина

- Вдовенко Виктор Михайлович** (1971) – за монографию « Современная радиохимия » и серию оригинальных работ по теоретической и прикладной радиохимии.
- Гребенщикова Вера Ильинична** (1962) – за комплекс работ в области соосаждения радиоэлементов с различными осадками.

Иоффе Эсфирь Моисеевна (1962) – за комплекс работ в области соосаждения радиоэлементов с различными осадками.

Клокман Валентина Рудольфовна (1962) – за комплекс работ в области соосаждения радиоэлементов с различными осадками.

Легин Евгений Корнельевич (1995) – за цикл работ «Летучие соединения f-элементов (уран, нептуний, плутоний) и технеция».

Никольский Борис Петрович (1980) – за серию работ на тему: состояние радиоэлементов в растворах, методы их выделения, разделения и очистки.

Сидоренко Георгий Васильевич (1995) – за цикл работ «Летучие соединения f-элементов (уран, нептуний, плутоний) и технеция».

Старик Иосиф Евсеевич (1959) – за монографию «Основы радиохимии».

Суглобов Дмитрий Николаевич (1995) – за цикл работ «Летучие соединения f-элементов (уран, нептуний, плутоний) и технеция».

Содержание

Предисловие, <i>А.А. Римский-Корсаков</i>	3
Ядерная физика в Радиевом институте: наука и практика последних лет, <i>Н.П. Кочеров, О.В. Ложкин, В.П. Эйсмонт</i>	6
Развитие работ по производству медицинских изотопов в Радиевом институте им. В.Г.Хлопина, <i>Л.М. Солин, М.П. Зыков, Б.И. Шестаков, В.И. Безносюк</i>	17
Исследования экстракции в Радиевом институте им. В.Г. Хлопина, <i>Б.Я. Зильберман, В.Н. Романовский</i>	22
Радиохимические исследования последствий ядерных взрывов, тяжелых радиационных аварий и захоронения радиоактивных отходов, <i>Ю.В. Дубасов</i>	33
Деятельность сектора фундаментальной радиохимии на современном этапе, <i>Д.Н. Суглобов</i>	45
Прецизионное определение плутония методами спектрофотометрии с внутренней стандартизацией и абсолютного альфа-счета с жидким сцинтиллятором, <i>А.В. Степанов, С.А. Никитина, В.Т. Карасев, Д.А. Степанов, М.В. Пенькин, А.Б. Богородский, Е.В. Певцова</i>	50
Пределы изменения фундаментальных физических констант из радионуклидных данных и модели первичного нуклеосинтеза, <i>В.П. Чечев</i>	59
Вариант модификации сил тяготения, <i>М.Н. Чубаров, А.В. Кузнецов, А.А. Римский-Корсаков</i>	65
К вопросу о “суточных вариациях” скорости бета-распада, <i>А.А. Римский-Корсаков</i> 70	
Развитие методов обнаружения и идентификации взрывчатых веществ в Радиевом институте им. В.Г. Хлопина, <i>А.В. Кузнецов, В.П. Аверьянов, И.Д. Алхазов, Д.Н. Вахтин, Б.П. Гаврилов, И.Ю. Горшков, А.В. Евсенин, М.Д. Зубков, О.И. Осетров, В.А. Плющев, В.М. Саидгареев</i>	75
Анализ закономерностей загрязнения приземного воздуха радионуклидами при длительной эксплуатации (1982-2002 гг.) радиационно-опасных объектов на российском побережье Балтики, <i>Л.Д. Блинова, В.Н. Душин</i>	80
Разработка методологических подходов к оценке риска для населения и окружающей среды при эксплуатации радиационно-опасных объектов в нормальном режиме; сравнительная оценка риска, <i>Л.Д. Блинова, В.Н. Душин</i>	92
Параметры получаемой при переработке ОЯТ ВВЭР-1000 фракции, содержащей кюрий и редкоземельные элементы, <i>Б.А. Бибичев, В.М. Есимантовский, А.Г. Кавецкий, В.М. Окаминов</i>	106
Монографии, опубликованные сотрудниками Радиевского института в 1950 – 2002 годы	118
Сотрудники Радиевского института – лауреаты Ленинской, Государственной премии СССР и премии им. В.Г. Хлопина.....	128