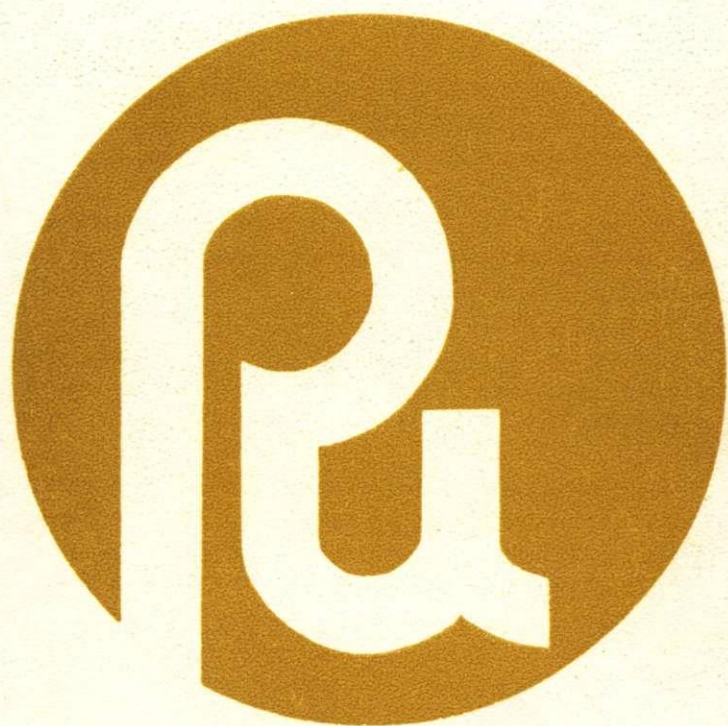


LXXV



РАДИЕВЫЙ ИНСТИТУТ
имени В. Г. ХЛОПИНА



НПО “РАДИЕВЫЙ ИНСТИТУТ им. В. Г. ХЛОПИНА”.
Главный корпус

Под общей редакцией
Е. И. ИЛЬЕНКО

ISBN 5-86763-104-4

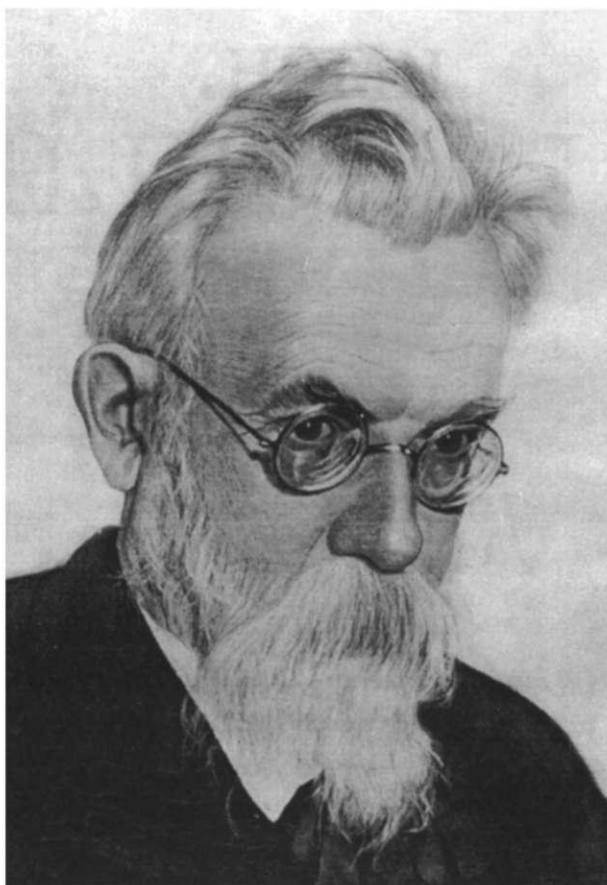
© НПО “Радиевый институт
им. В. Г. Хлопина”, 1997

РАДИЕВЫЙ ИНСТИТУТ имени В. Г. ХЛОПИНА

*К 75-летию
со дня основания*



Санкт-Петербург
1997



Основатель и первый директор
Радиевого института

Академик
Владимир Иванович
Вернадский
(1863-1945)



Директор Радиевого института

Академик
Виталий Григорьевич
Хлопин
(1890-1950)

**ДИРЕКТОРА РАДИЕВОГО ИНСТИТУТА им. В. Г. ХЛОПИНА
(после 1950 года)**



**член-корреспондент АН СССР
Борис Александрович
Никитин**



**член-корреспондент АН СССР
Виктор Михайлович
Вдовенко**



**доктор технических наук
Леонард Николаевич
Лазарев**



**доктор технических наук
Александр Иванович
Карелин**



**доктор физ.-мат. наук
Александр Андреевич
Римский-Корсаков**

**ИЗ ПРЕДИСЛОВИЯ К СБОРНИКУ
"РАДИЕВЫЙ ИНСТИТУТ ИМ. В. Г. ХЛОПИНА.
К 50-ЛЕТИЮ СО ДНЯ ОСНОВАНИЯ"**

Деятельность Радиевого института за 50 лет его существования является характерной для развития советской науки. Созданный в первый период существования радиологической науки, этот институт быстро превратился в передовое научное учреждение, стоящее на переднем крае современной науки. Его вклад в развитие мировой науки трудно переоценить. В этом институте были созданы оригинальные направления и новые методы исследования в области радиохимии, ядерной физики и радиогеохимии, короче говоря, радиологии. Трудом академиков В. И. Вернадского и В. Г. Хлопина и их учеников были заложены основы советской радиохимии, как теоретической, так и прикладной. 50 лет работы Радиевого института, носящего имя В. Г. Хлопина, показали, насколько плодотворным оказалось сотрудничество специалистов трех областей знаний - радиохимии, ядерной физики и радиогеохимии. Поэтому создание книги, подводящей итоги развития научных исследований, проведенных в Радиевом институте, должно представлять интерес не только для специалистов, но и для широкого круга читателей, интересующихся успехами одной из увлекательнейших областей знания - радиологии.

член-корреспондент АН СССР
В. М. Вдовенко

АТОМ-ПРЕССА
(1996, N 30)

"В январе 1997 года исполняется 75 лет легендарному Радиевому институту имени В. Г. Хлопина - первому в стране научному учреждению для комплексного изучения радиоактивности и поисков путей ее практического применения и сыгравшему важную роль в ликвидации Чернобыльской аварии."

ПРЕДИСЛОВИЕ

Сборник, посвященный 75-летию Радиевого института, по своему содержанию принципиально отличается от двух предыдущих юбилейных сборников, посвященных 25-летию и 50-летию института.^{*)} Эта особенность связана с глубокими изменениями в жизни страны, которые произошли в последнее десятилетие. Теперь стало возможным рассказать о тех работах, которые в течение многих лет оставались секретными. В связи с этим сборник охватывает не только исследования, выполненные в институте за 25 лет, прошедшие после выхода последнего юбилейного издания, но в нем большое внимание уделено прежде закрытым работам, относящимся к 40-м - 70-м годам.

Поскольку именно эти работы были наиболее крупными, приоритетными на протяжении послевоенных лет и имевшими значительный удельный вес в общем объеме работ института, то при формировании сборника они были вынесены вперед как основная тематика, определившая научную жизнь института.

В отличие от сборника "50 лет Радиевого института им. В. Г. Хлопина" настоящий сборник не дает систематического описания всех, или даже основных научных направлений. Здесь помещены статьи ведущих ученых и специалистов института, в которых обращается внимание на наиболее значимые этапы работ, в которых они сами, как правило, были активными участниками. С этим связан и различный стиль изложения в разных статьях. В большинстве случаев приводится цель работ и описание основных результатов, а в других - это, скорее, научные мемуары. Несомненно, многие статьи содержат фактор субъективности, что совершенно естественно и неизбежно, когда автор является непосредственным участником событий. В сборнике содержатся как статьи, в которых рассмотрено развитие целых крупных направлений, так и отдельных вопросов, которые, однако, внесли существенный вклад в понимание природы явлений или в развитие технологии и т. п. Ряд одних и тех же работ упоминается в разных статьях. Это вызвано тем, что такие работы интересны с разных точек зрения и повторение их оправдано сохранением целостности и полноты представления материала в каждом из разделов.

Статьи неравноценны также и по временному охвату рассмотренных в них работ. В ряде случаев традиционность и преемственность подчеркнута взглядом в прошлое, к истокам истории института.

Представленный в сборнике материал далеко не исчерпывает все работы, выполнявшиеся за рассмотренный период времени. Однако он дает общее представление о широте интересов Радиевого института, о масштабах проводившихся работ и их результативности, о том вкладе, который внесли сравнительно небольшие коллективы в развитие разных областей и направлений науки, а также в практические дела своей страны, связанные, в первую очередь, с укреплением ее обороноспособности, развитием атомной промышленности, ядерной энергетики, способствовали развитию таких разных направлений, как, например, разведка полезных ископаемых и ядерная медицина.

Радиевый институт сыграл решающую роль в создании и дальнейшем совершенствовании радиохимической технологии получения оружейного плутония - одной из ключевых и наиболее сложных задач атомной промышленности.

Большая роль принадлежит институту в определении основных характеристик ядерных взрывов, в организации радиационного контроля при испытаниях ядерного оружия и проведении ядерных взрывов в народнохозяйственных целях. Уникальные радиохимические исследования и эксперименты, связанные с ядерными взрывами, привели к созданию совершенно нового направления - радиохимии ядерных взрывов.

^{*)} Изд. АН СССР, М.-Л.: 1947

Изд. "Наука", Л.: 1972

Сотрудники института были непосредственными участниками как пуска, отладки, совершенствования технологии радиохимических заводов, так и участниками ядерных испытаний и промышленных ядерных взрывов.

Нельзя не отметить труднейшие работы, выполненные сотрудниками института при выявлении и анализе причин и последствий аварии на Чернобыльской АЭС, работы, проводившиеся непосредственно на разрушенном реакторе, в ближайшей к нему зоне и в дальних зонах, по направлениям распространения радиоактивных загрязнений.

Свое 75-летие Радиевый институт отмечает в сложное для страны время. Резко сокращены расходы на научные исследования, в том числе, на исследования, направленные на интересы военных ведомств. Это не могло не отразиться на деятельности института. Именно поэтому авторы многих статей в сборнике выражают тревогу о дальнейшей судьбе тех направлений работ, которые стали традиционными в институте и занимают ведущие позиции в современной российской, а часто и мировой науке. С этим связаны встречающиеся в статьях замечания такого типа: "...в связи с резким сокращением финансирования..." или "...в связи с перестройкой работы были прекращены" и т. п.

Однако очень важным обстоятельством является то, что в институте всегда серьезное внимание уделялось фундаментальным исследованиям. Как химики, так и физики практически все прикладные задачи решали с глубокой проработкой научных основ проблемы. Таким образом, была создана та база, на которой могут развиваться новые направления. Всем своим развитием институт был подготовлен к возможности применения своих опыта и знаний для выполнения новых, актуальных в современных условиях фундаментальных и прикладных исследований и разработок. Об этом свидетельствует, в частности, тот большой интерес, который проявляют зарубежные специалисты практически ко всем основным направлениям исследований и разработок института, и значительная активизация международного сотрудничества.

Надеемся, что Радиевый институт, который всегда имел свои самостоятельные, оригинальные направления работ и всегда был авторитетным научным коллективом, сохранит свои позиции и в будущем.

На предстоящей научной сессии Радиевого института, посвященной его 75-летию, предполагаются выступления ведущих ученых института с проблемными докладами о современном состоянии и перспективах научных направлений и прикладных разработок. Эти доклады будут изданы в виде отдельного тома, посвященного 75-летнему юбилею.

Формирование тематической части данного сборника проходило в рамках работы программного комитета юбилейной научной сессии института в составе: В. Н. Романовский (председатель), С. А. Бартенев, С. В. Бутомо, Ю. В. Дубасов, Е. И. Ильенко, В. К. Легин, О. В. Ложкин, Г. С. Синицына, Е. А. Смирнова, Д. Н. Суглобов, С. Л. Фаддеев, П. И. Федотов, Е. А. Шашуков.

Большая часть исторических справок подготовлена по первичным и архивным документам Н. А. Абрамовой и Е. А. Шашуковым. В восстановлении истории событий во многих случаях помогал С. А. Бартенев, который внес также существенный вклад советами и замечаниями при обсуждении ряда материалов.

В организации подготовки материалов сборника большую работу провели С. Л. Фаддеев и П. И. Федотов.

Фотографии для сборника подготовлены Г. Н. Ковалевым.

Подготовка сборника к изданию и организация издания проведена под руководством заместителя Генерального директора института В. Н. Романовского сотрудниками отдела научно-технической информации: Е. И. Ильенко, Г. С. Александровой, Л. Н. Степановой, О. Д. Федорова и др.

Генеральный директор

НПО "Радиевый институт им. В. Г. Хлопина"

доктор физ.-мат. наук, профессор

А. А. Римский-Корсаков

ОСНОВАНИЕ РАДИЕВОГО ИНСТИТУТА И НАЧАЛЬНЫЕ ЭТАПЫ ЕГО ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

Е. А. Шашуков, Г. С. Синицына, С. В. Бутомо

Радиевый институт был основан по инициативе выдающегося естествоиспытателя академика Владимира Ивановича Вернадского. Устав института был утвержден Государственным Ученым Советом 23 января 1922 г., а 25 апреля того же года Наркомпрос и Президиум ВСНХ приняли «Положение о Радиевом институте и радиевом заводе».

По мысли В. И. Вернадского институт должен был стать научным центром, объединяющим и координирующим все ведущиеся в России работы по радиоактивности в их физическом, химическом и геохимическом направлениях.

В. И. Вернадский одним из первых понял значение открытия явления радиоактивности и важность его всестороннего изучения. Так, в декабре 1910 г. он выступил на Общем собрании Российской Академии наук с исторической речью «Задача дня в области радия», в которой, в частности, сказал: «Теперь перед нами открываются в явлениях радиоактивности источники атомной энергии, в миллионы раз превышающие все те источники сил, какие рисовались человеческому воображению». В той же речи В. И. Вернадский говорил о необходимости «систематического расследования на радий всей земной коры, составления мировой Карты радиоактивных минералов». Он также обращал внимание на то, что «в вопросе о радии ни одно государство и общество не может относиться безразлично, как, каким путем, кем и когда будут использованы и изучены находящиеся в его владениях источники лучистой энергии...» и призывал к их изучению и использованию собственными силами.

На пути к созданию Радиевого института было пройдено несколько этапов. Им предшествовала организация, начиная с 1908 г., по инициативе и под общим руководством В. И. Вернадского первых широкомасштабных экспедиций по обследованию на радиоактивность различных регионов России. В 1910 г. при Российской Академии наук была образована Радиевая комиссия, на следующий год создана Минералогическая (Радиогеохимическая) лаборатория, а в 1912 г. - постоянно действующая Радиевая экспедиция, на которую была возложена организация всех экспедиционных работ по поиску радиоактивного сырья. В 1917 г. в Комиссии по изучению естественных производительных сил России (КЕПС) был организован Радиевый отдел, а в 1918 г. - Коллегия по организации пробного радиевого завода.

В этом же году был создан Рентгенологический и Радиологический институт, в составе которого было Радиевое отделение. Кроме того, при Химическом отделе ВСНХ имелаась Радиевая лаборатория, которая 27 апреля 1921 г. была передана в ведение Академии наук. Виталий Григорьевич Хлопин был назначен ее заведующим.

Однако В. И. Вернадский продолжал прилагать усилия по организации более крупного центра для всестороннего изучения явления радиоактивности. Этой точки зрения придерживался и В. Г. Хлопин, который в переписке с В. И. Вернадским писал, что организация Радиевой лаборатории при Академии наук - «это временное соглашение, на которое пришлось пойти с целью удержать за Академией две наиболее важные... вещи: верховное научное руководство и обладание конечным продуктом».

Усилия В. И. Вернадского и его ближайшего соратника В. Г. Хлопина закончились успехом, и в 1922 г. Радиевый институт был основан. Он объединил в своем составе все имеющиеся к тому времени в Петрограде радиологические учреждения и отдельные подразделения, в том числе Радиевую лабораторию Академии наук, Радиогеохимическую лабораторию и Радиевое отделение Государственного рентгенологического и радиологического института. Ему же были подчинены в плане научного руководства радиевый рудник и завод

в Бондюге. На этом заводе В. Г. Хлопиным и М. А. Пасвик в декабре 1921 г. были получены первые в России высокообогащенные препараты радия.

Первым директором Радиевого института и заведующим Геохимическим и минералогическим отделом был утвержден В. И. Вернадский, В. Г. Хлопин стал заместителем директора и заведующим Химическим отделом, Физический отдел возглавил Л. В. Мысовский. Через 20 лет, в 1942 г., получив поздравления по случаю юбилея Радиевого института, В. И. Вернадский записал в своем дневнике: «В заседании Химического отделения в Казани праздновалось двадцатилетие Радиевого института. Получил телеграмму как «основатель»... Моя роль была меньшая, чем Хлопина и Мысовского... Одно могу считать правильным - соединение вместе физиков, химиков и геохимиков. В этом отношении Радиевый институт единственный...». Эта запись указывает на признание В. И. Вернадским роли его выдающихся коллег в организации института, а также на уверенность в правильности выбранного пути.

Еще в 1911 г. В. И. Вернадский подробно ознакомился с работой возглавляемого М. Кюри Радиевого института в Париже, а также с рядом Радиевых институтов Европы. В статье «Радиевые институты», опубликованной вскоре после возвращения в Россию, он пишет: «...Ярким проявлением новой области знания является создание новых, посвященных ее изучению - научных институтов».

Определяя задачи Радиевого института в самом начале его деятельности, В. И. Вернадский на заседании совета Государственного радиевого института (ГРИ) 11.02.22 г. говорил: «Радиевый институт должен быть сейчас организован так, чтобы он мог направлять работу на овладение атомной энергией - самым могучим источником силы, к которому подошло человечество в своей истории». Эта задача стала определяющей на все последующие годы деятельности института. По мере развития исследований она дополнялась и видоизменялась с учетом потребностей науки и практики, уровня радиологических знаний, интересов участников работ.

В деятельности института, как отмечал В. Г. Хлопин в 1947 г. в «Кратком очерке истории развития радиевого дела в России», следует резко различать два периода: первый - с основания института до 1925-1926 гг. и второй - с 1925 г. по настоящее время.

В первый период «тематика института в главной своей части была подчинена интересам только что созданной радиевой промышленности и ее развитию». В частности, проводилась разработка методов химического и физического контроля за производством радия и других элементов, а также осуществлялось совершенствование метода дробной кристаллизации солей радия-бария и сопутствующих процессов. В 1924 г., обобщая результаты лабораторных и заводских работ, В. Г. Хлопин высказывает предположение, что в процессе дробной кристаллизации распределение радия между кристаллами и раствором происходит по закону распределения вещества между несмешивающимися растворителями. В конечном итоге это привело В. Г. Хлопина к формулировке закона, носящего ныне его имя. В этот период деятельности института проводились также актуальные «работы, связанные с поисками гелия для нарождавшейся новой отрасли промышленности - гелиевой». Эти исследования были вызваны острой потребностью в гелии гражданского и военного воздушного флота. Радиевый институт внес свой весомый вклад в обеспечение работ по поиску и изучению месторождений гелия.

В эти годы в Физическом отделе института, помимо отработки методов измерений радиоактивных излучений, Л. В. Мысовским были начаты работы по изучению свойств космических лучей (1924 г.), а также была налажена установка по получению эманации радия (1925 г.).

В последующие годы тематика института существенно трансформировалась. Определяя задачи института на 1927-1928 гг., В. И. Вернадский отмечал: «Главное внимание института будет сосредоточено на трех основных вопросах: первый вопрос - это изучение и освещение роли живого вещества в истории химических элементов в земной коре и, в частности, в вопросе о возможном разделении изотопов химических элементов в природе в результате «проявления жизни». Одновременно предложено основную часть внимания Геохимического

отдела обратить также на изучение вопроса о распространении радиоэлементов в живой природе, равно как и обратить специальное внимание на организацию изучения радиоактивности морей, вод и горных пород, т. е. на постановку работ с очень слабыми активностями. Второй основной вопрос - это вопрос о всестороннем изучении радиоактивных излучений и, особенно специального жесткого гамма-излучения, изучение которого возможно только с большим количеством радиоактивного вещества, и установление вероятной связи его с проникающим космическим излучением, привлекающим в последнее время особое внимание ученых. Последний из трех основных вопросов, стоящих перед институтом, - это вопрос о химии веществ при бесконечном разведении, основной вопрос для химии радиоактивных элементов, освещение которого представляет исключительное значение и для теоретической химии вообще».

В эти годы физиками института был проведен ряд важных методических работ. Среди них следует отметить разработку Л. В. Мысовским, А. П. Ждановым и др. метода изучения тяжелых ионизирующих частиц с использованием толстослойных фотоэмульсий. Отмечая успехи физиков института за 25 лет работы, П. И. Лукирский пишет, что «этот метод Радиевого института оказался необычайно плодотворным и нашел очень широкое применение при изучении процессов в атомных ядрах и при исследовании космического излучения».

Л. В. Мысовским была проведена также пионерская работа по гамма-дефектоскопии металлических отливок.

В начале 30-х годов в мировой науке произошли серьезные изменения в представлениях о структуре ядра и ядерных превращениях. Это привело к активизации исследований в области ядерной физики и ядерной химии, что нашло отражение и в работе Радиевого института. В статье, опубликованной в 1938 г. в Вестнике АН СССР «Задачи, структура и деятельность Радиевого института Академии наук СССР», В. Г. Хлопин, которому В. И. Вернадский незадолго до этого передал руководство институтом, писал, что вся деятельность Радиевого института укладывается в рамки одной большой проблемы, которую можно озаглавить «Проблема атомного ядра и ее приложения». Он выделил шесть направлений разработки этой проблемы:

- изучение внутриядерных сил и свойства элементарных частиц;
- изучение ядерных реакций и методов получения искусственных радиоэлементов;
- конструирование и эксплуатация мощных установок для получения ионных пучков большой интенсивности и энергии;
- изучение естественных и искусственных радиоэлементов;
- изучение проявления ядерных процессов в природе;
- применение радиоактивных элементов и элементарных частиц в народном хозяйстве.

Значительная часть работ сконцентрировалась вокруг созданного в институте в 1932-1937 гг. по инициативе Л. В. Мысовского при активной поддержке В. И. Вернадского и В. Г. Хлопина циклотрона, который был первым в Европе и вторым в мире. На циклотроне были развернуты исследования, связанные с процессами деления ядер урана и других элементов, изучением ядерных реакций различных типов, активизированы поиски трансурановых элементов, осуществлялась наработка различных изотопов для проведения химических и физических исследований и т. д. Кроме того, циклотрон Радиевого института явился школой, проложившей дорогу для создания в нашей стране более мощных ускорителей. При этом следует отметить, что еще до работ на циклотроне Л. В. Мысовский был инициатором работ в нашей стране по искусственному ускорению заряженных частиц.

С помощью циклотрона продолжались начатые под руководством В. Г. Хлопина еще в 1935 г. с использованием Rn-Be нейтронных источников поиски трансурановых элементов. В письме В. И. Вернадскому в апреле 1939 г. В. Г. Хлопин сообщал: «Опыты, которые удалось пока поставить, используя циклотрон, делают весьма вероятным, что трансураны все же существуют, т. е. распад урана под действием нейтронов течет различными путями».

Наработка на циклотроне ряда искусственных радионуклидов позволила А. А. Гринбергу и А. Е. Полесицкому в 1939 г. открыть новую страницу в изучении химии комплексных соединений с использованием метода «меченых атомов».

Открытие в конце 1938 г. Ханом и Штрассманом явления деления ядер урана нашло оперативное отражение в тематике Радиевого института.

Первая отечественная работа по делению ядер, выполненная Л. В. Мысовским и А. П. Ждановым, называлась «Наблюдение ядер отдачи при бомбардировке урана нейтронами». Она была представлена в журнал «Доклады Академии наук» 7 марта 1939 г., т. е. всего через два месяца после того, как стало известно об открытии деления ядер. А работа Н. А. Перфилова «Расщепление ядер урана нейтронами» была представлена в этот же журнал 4 мая 1939 г. В мае того же года В. Г. Хлопиным совместно с М. А. Пасвик-Хлопиной и Н. Ф. Волковым была направлена в печать статья «Деление ядер урана под действием нейтронов и вопрос о существовании трансуранов». В этой и в ряде последующих работ было показано существование нескольких неизвестных направлений деления ядер урана.

В предвоенные годы физики института явились соавторами выдающихся открытий. Л. В. Мысовский совместно с И. В. Курчатовым и А. И. Русиновым открыли явление ядерной изомерии, а К. А. Петржак совместно с Н. Г. Флеровым - явление спонтанного деления ядер.

В 40-е годы мировая радиологическая мысль нащупывала пути к практическому использованию ядерной энергии. Отрывочные сообщения из-за рубежа указывали на активизацию работ в этом направлении. В. И. Вернадский понял всю значимость сообщений и предпринял важные шаги, которые отразились, в конечном итоге, и на деятельности Радиевого института.

Одним из первых шагов В. И. Вернадского совместно с В. Г. Хлопиным явилось обращение к академику-секретарю Отделения геолого-географических наук СССР П. И. Степанову с Запиской, в которой предлагается «обсудить вопрос о состоянии поисков и разведки урановых месторождений, наметить план развертывания этих работ и войти в Правительство с проектом соответствующих мероприятий». Предложение было принято, и 25 июня 1940 г. состоялось заседание Отделения, на котором с совместным докладом выступили авторы Записки. В результате было признано, что следует разработать проект мероприятий, которые необходимо осуществить в связи с возможностью использования внутриатомной энергии. Это было поручено «тройке» академиков: В. И. Вернадскому, В. Г. Хлопину и А. Е. Ферсману. «Тройка» начала активные действия, обратившись, в частности, 12 июля 1940 г. с письмом к заместителю Председателя Совнаркома Н. А. Булганину, обращая его внимание на важность проблемы и предлагая срочно начать осуществление намеченного ими плана мероприятий. Вслед за этим письмом В. И. Вернадский нанес визит Председателю Совнаркома В. М. Молотову. В итоге Президиуму Академии наук было предложено организовать специальную Комиссию по проблеме урана («Урановую комиссию») для разработки плана исследований и координации работ с привлечением всех заинтересованных лиц и учреждений. Комиссия была организована 30 июля 1940 г., а ее председателем стал директор Радиевого института академик В. Г. Хлопин.

Институт принял деятельное участие в выполнении задач, которые ставились Урановой комиссией. Одним из первоочередных вопросов явилось участие в работе сырьевой бригады под руководством академика А. Е. Ферсмана. От Радиевого института в состав бригады были включены В. Г. Хлопин как радиохимик и технолог и Л. В. Комлев как специалист по геохимии урановых месторождений и радиевых вод.

Согласно плану Урановой комиссии на 1941 г. в институте намечалось проведение работ по урановой проблеме в следующих направлениях:

- выяснение механизма деления урана и тория;
- разработка методов разделения изотопов урана;
- разработка методов получения и изучения летучих соединений и металлического урана;

поиски богатых источников урановых руд в СССР и разработка методов их переработки.

И все это планировалось, несмотря на то, что было еще совершенно неясно, возможно ли практическое осуществление цепной реакции на уране.

В отчете о работе Радиевого института за первое полугодие 1941 г. В. Г. Хлопин в разделе «По проблеме урана» писал об успехах в расчетах критических масс для цепной реакции в уране как на быстрых, так и на медленных нейтронах (И. И. Гуревич), в углубленном изучении спонтанного деления урана (К. А. Петржак, А. М. Гуревич), в использовании термомодиффузии в жидкой фазе для разделения изотопов (А. П. Ратнер и др.).

Война внесла в эти планы свои коррективы. В соответствии с Постановлением Правительства от 29 июля 1941 г. основная часть сотрудников Радиевого института (49 человек) вместе с членами семей (72 человека) была эвакуирована в Казань. В Ленинграде оставалась небольшая группа (26 человек) во главе с профессором В. В. Белоусовым, который исполнял обязанности заместителя директора Ленинградского филиала института до его отъезда в Казань в ноябре 1941 г. На этом посту его сменил и оставался в этой должности до возвращения института из эвакуации в январе 1945 г. профессор А. Б. Вериго.

Планы работ института были изменены с учетом интересов обороны страны. Наиболее крупным его достижением во время пребывания в Казани являются работы по получению светящихся составов постоянного действия. Из хранящегося в Радиевом институте государственного запаса радия периодически выделялся радиоторий (^{228}Th) методом, основанным на разделении хлоридов радия и тория в процессе возгонки. Это позволило значительно увеличить производство светосоставов постоянного действия без увеличения расхода радия. За работу «Радиоторий, его получение и использование для оборонных целей» В. Г. Хлопин, Б. А. Никитин и А. Е. Полесицкий были удостоены в 1943 г. Государственной премии.

Важная работа была проведена в 1943 г. А. Г. Самарцевой и др. по получению люминофоров для рентгеновских усиливающих экранов в интересах медицины.

Понимая важность и перспективность работ по проблеме урана, В. Г. Хлопин не прекращал их и в период пребывания в Казани, несмотря на указания Президиума Академии наук о приостановке работ. Работа проводилась по четырем основным направлениям:

- работы по технологии переработки табошарской урановой руды;
- поиски и разведка урановых месторождений;
- исследования по химии урана;
- изучение процессов деления урана под действием нейтронов.

В 1942 г. прекратились публикации по ядерным исследованиям в западной научной прессе. Среди наших ученых росло убеждение, что в Германии и США ведутся работы по использованию атомной энергии в военных целях. На это указывали и данные разведки.

В конце 1942 г. работы в нашей стране по урановой проблеме были возобновлены, но развивались они поначалу сравнительно малыми силами. В. Г. Хлопин и возглавляемый им коллектив Радиевого института, где продолжались работы по урановой проблеме, привлечены к работам по урановому проекту не были. В письме от 15.01.43 г. на имя вице-президента АН СССР А. Ф. Иоффе и уполномоченного Госкомитета обороны С. В. Кафтanova Виталий Григорьевич обращал внимание на ненормальность такого положения и подробно изложил свое видение путей решения сложнейшей задачи. В. Г. Хлопин, в частности, писал: «...Решение поставленной ГКО перед Академией наук задачи не может быть дано без основного участия в этой работе вверенного мне Радиевого института АН СССР и меня лично...»

В апреле 1943 г. Радиевому институту была поручена разработка технологии выделения эка-рения ($Z=93$) и эка-осмия ($Z=94$) из облученного нейтронами урана.

Это был этап, с которого началась новая история института.

РАДИОХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

ВВЕДЕНИЕ

Настоящий раздел подводит итоги работ Радиевого института в области радиохимической технологии с 1945 г. по настоящее время. Основные направления исследований и работ в указанный период охватывали:

- создание первой советской технологии выделения плутония из облученного урана;
- совершенствование осадительной технологии выделения плутония и создание сорбционной технологии аффинажа плутония;
- модернизацию заводов по производству плутония в оборонных целях с переходом на экстракционную технологию;
- разработку технологии завода РТ-2, предназначенного для регенерации отработавшего ядерного топлива АЭС с реакторами ВВЭР-1000;
- радикальное совершенствование технологии обращения с радиоактивными отходами, образующимися на радиохимических заводах.

В этом разделе изложение результатов ограничено, как правило, описанием разработок, нашедших промышленное воплощение, а также перспективных исследований последнего времени. При этом часто не подчеркивалось то обстоятельство, что ни один технологический процесс в радиохимии не может быть отработан “в пробирке”. Необходимость ряда промежуточных этапов от первоначальной химической идеи до внедрения процесса в производство диктуется не только проблемами масштабности. Мы имеем дело с высокорadioактивными объектами исследования, характеризующимися сложным радионуклидным и химическим составом. Коэффициенты очистки конечных продуктов от радионуклидов достигают величин 10^9 . Необходимость глубокого извлечения обусловлена требованиями экологической безопасности. Поэтому разработка технологических процессов требует комплексных стендовых испытаний с применением реальных высокоактивных материалов и прототипов технологических аппаратов. Таким образом, для Радиевого института развитие экспериментальной базы было одним из существенных условий успеха.

Не менее важным фактором прогресса была структурная перестройка института в начале 70-х годов. Целью ее было обеспечение условий для всестороннего научного обоснования и проектирования новых сложных производств, к которым, в первую очередь, следует отнести завод РТ-2.

Наряду с основными исследованиями большое значение имела научно-организационная деятельность. Она была направлена на объединение усилий специалистов широкого круга исследовательских, проектных, конструкторских и промышленных организаций для реализации крупных программ, по которым Радиевый институт был определен головной организацией. К этой области деятельности можно отнести и международное сотрудничество, имевшее свои специфические особенности как в период существования Советского Союза, так и в дальнейшем, с образованием Российской Федерации.

В последнее время, когда обостренное внимание общественности, в силу ряда причин, было привлечено к проблемам безопасности природной среды, возникла необходимость активизации участия ученых и специалистов Минатома, в том числе Радиевого института, в разрешении этой проблемы как посредством технических разработок, так и путем участия в

формировании объективного отношения общественности к ядерной энергетике в части ее топливного цикла.

Все указанные основные области разработок и направления деятельности последовательно освещены в этой статье.

Главный научный сотрудник
Л. Н. Лазарев

ТЕХНОЛОГИЯ ДЛЯ ВОЕННЫХ ЗАВОДОВ

СОЗДАНИЕ ПЕРВОЙ СОВЕТСКОЙ ТЕХНОЛОГИИ ВЫДЕЛЕНИЯ ПЛУТОНИЯ ИЗ ОБЛУЧЕННОГО УРАНА

Е. И. Ильенко, Н. А. Абрамова

По признанию советских специалистов [1, 2] радиохимическая технология выделения плутония из облученного урана является самой сложной и опасной частью уранового проекта.

Эта же мысль звучит в одной из первых книг, посвященных истории создания Манхэттенского проекта в США [3]: «.. Разрешение многих химических вопросов было одним из наиболее замечательных достижений Металлургической лаборатории».

По-видимому, это же можно сказать о химической части и советского уранового проекта. При этом одним из наиболее ярких достижений, несомненно, были необычайно короткие сроки решения этой задачи.

В условиях современной техники средний срок создания радиохимического завода по известной, проверенной технологии определяют примерно в 10 лет. В те времена три года и три месяца прошло от того времени, когда РИАН только еще получил задание на разработку технологии (декабрь 1945 г.), до тех пор, когда с радиохимического завода был выпущен первый плутоний (февраль 1949 г.), а еще через полгода плутония было уже достаточно, чтобы изготовить и испытать первую атомную бомбу (29 августа 1949 г.).

Этот срок, в принципе, сопоставим со сроками выполнения аналогичных работ в США. Однако упомянутая выше книга Смита [3] завершается словами: «Никакая другая страна в мире не была бы способна на подобную затрату мозговой энергии и технических усилий».

Но такой страной оказался Советский Союз, хотя советские ученые работали в значительно более трудных условиях, чем создатели Манхэттенского проекта. Если в США на решении этой проблемы были сосредоточены ресурсы богатой, благополучной страны и собрана мировая элита ученых, то Советский Союз был страной, ослабленной войной, с разоренной экономикой и промышленностью, а его ученые практически отрезаны от мировой науки.

Работы в первые годы велись с крайне скудными ресурсами. В протоколах заседаний НТС РИАН в 1946-1947 гг. мы неоднократно видим обсуждение вопросов об отсутствии приборов, недостатке реактивов и т. п.

Создание первой радиохимической технологии было поручено Радиевому институту, директором которого был академик В. Г. Хлопин - признанный глава единственной в стране школы радиохимиков [4].

А. К. Круглов в книге, посвященной созданию в СССР атомной промышленности, пишет: «РИАН был практически единственным институтом в стране, способным организо-

вать выделение плутония из высокоактивных материалов и очистить от радионуклидов уран в промышленных масштабах.» [1].

Как уже упоминалось в предыдущей статье этого сборника (Е. А. Шашуков, Г. С. Сидницина, С. В. Бутомо), первое поручение на разработку технологии выделения эка-урания ($Z=93$) и эка-осмия ($Z=94$) из облученного нейтронами урана Радиевый институт получил в апреле 1943 г.

В это время институт находился в эвакуации в Казани и не имел практически никакой экспериментальной базы. Однако и там В. Г. Хлопин продолжал свои эксперименты по имитации процессов выделения трансурановых элементов, которыми он занимался еще в довоенное время в Ленинграде. Работы в институте начали оживляться лишь в 1944 году. После снятия блокады Ленинграда (27 января 1944 г.) только летом 1944 г. было получено разрешение направить туда группу сотрудников для скорейшего восстановления циклотрона.

В октябре 1944 г. циклотрон был пущен в сильноточном режиме, обеспечивающем получение интенсивных пучков нейтронов, необходимых для синтеза трансурановых элементов [4]. С этого времени начались эксперименты по длительному облучению урановых солей с целью накопления в них плутония.

Первый в Советском Союзе препарат ^{239}Pu был выделен в начале 1945 г. В. И. Гребенщиковой и А. М. Гуревич в количестве 33 имп/мин. На этом препарате К. А. Петржак определил пробег альфа-частиц и начал разработку метода радиометрического определения плутония.

Работы по урановому проекту в СССР были резко форсированы после американской атомной бомбардировки японских городов Хиросима и Нагасаки 6 и 9 августа 1945 г. 20 и 30 августа 1945 г. при Совнаркоме СССР были созданы Специальный комитет и Первое главное управление (ПГУ) для решения задач разработки ядерного оружия и создания атомной промышленности [1].

5 декабря 1945 г. Постановлением Специального комитета Радиевому институту были поручены:

- 1) проверка и испытания методов выделения плутония посредством осаждения с носителями;
- 2) изучение химии плутония;
- 3) выработка химико-технологической схемы выделения плутония из урана к 1.07.1946 г.;
- 4) выдача технологических данных заводу 817 к 1.07.1946 г. [5].

Именно от этой даты, 5 декабря 1945 г., начинают отсчет времени разработки крупномасштабной технологии химического выделения плутония, на что было отпущено не более полугода. Следует подчеркнуть необычность и сложность поставленной задачи: необходимо было выделять граммы плутония из тонн облученного урана, причем требования к чистоте выделяемого плутония по тем временам казались невероятными. Содержание осколочных элементов в выделенном плутонии не должно было превышать 0,00001 % от массы плутония. Таких задач химическая промышленность в те времена не решала. И эту сложнейшую технологию необходимо было создать в дистанционном оформлении.

Работы в институте были развернуты немедленно, в напряженном ритме, с широким охватом проблем, к решению которых были привлечены все радиохимики и многие физики института. Общее руководство осуществлял академик В. Г. Хлопин.

М. Г. Мещеряков, один из активных участников работ, так характеризует В. Г. Хлопина того времени [4]: «..Благодаря творческой воле Хлопина, его умению отделять важное от случайного, притягательной силе его личности, руководимый им многочисленный коллектив специалистов, таких разных по своим интересам и стремлениям, был слит воедино и оказался на высоте своих обязанностей. Эксперименты проводились буквально круглосуточно, чрезвычайно быстрыми темпами.»

В. Г. Хлопину принадлежал выбор основных направлений разработок. По его инициативе уже в декабре 1945 г. были созданы три бригады для разработки разных вариантов технологии:

1. Бригада академика В. Г. Хлопина (руководитель) в составе старших научных сотрудников А. П. Ратнера (зам. руководителя), В. И. Гребеншиковой, А. М. Гуревич, М. А. Пасвик-Хлопиной, А. Г. Самарцевой, М. Л. Яценко-Ковалевской, мл. научных сотрудников Н. Ф. Волкова, А. К. Пермязовой, М. И. Якунина, ст. лаборанта Н. А. Гордеевой разрабатывала ацетатно-лантан-фторидную технологическую схему.

2. Бригада члена-корреспондента АН СССР А. А. Гринберга (руководитель) в составе ст. научных сотрудников Б. В. Птицына, Ф. М. Филинова и мл. научного сотрудника В. Н. Лаврентьева разрабатывала оксалатно-купфероновый метод и висмут-фосфатную схему с регенерацией урана.

3. Бригада члена-корреспондента АН СССР Б. А. Никитина в составе ст. научного сотрудника В. М. Вдовенко и мл. научного сотрудника Т. В. Ковалевой разрабатывала экстракционную технологическую схему с диэтиловым эфиром в качестве экстрагента. Эта бригада сначала работала в специальной лаборатории, созданной на кафедре неорганической химии в Ленинградском университете, а затем вошла в состав РИАН.

Кроме этих бригад с апреля 1946 г. в специальной лаборатории, созданной на кафедре физической химии Ленинградского университета (которая затем тоже вошла в РИАН), работала группа под руководством профессора Б. П. Никольского в составе доцента В. И. Парамоновой и ассистента П. М. Чулкова, а позднее в эту лабораторию вошли ст. н. с. А. М. Трофимов, м. н. с. А. Ф. Вьюгина, лаборант Е. П. Казанская. Группа разрабатывала процесс растворения урановых блоков, а также исследовала на имитаторах возможный процесс хлоридной возгонки плутония с целью выдачи продукта в виде хлорида - форме, удобной для металлургии.

С начала февраля 1946 г. совместно с учеными РИАН над всеми технологическими схемами начали работать технологи ГИПХ Я. И. Зильберман и Н. К. Хованский, а также проектировщики ГСПИ-11. Я. И. Зильберман осуществлял руководство технической и технологической частями проекта.

Одновременно с экспериментальной проверкой методов выделения плутония ученые начали и теоретическую проработку возможной технологической схемы.

Для разработки технологии получения плутония очень важным оказался опыт создания радиевой промышленности, из которого как наиболее важные можно отметить следующие аспекты:

- надежным методом выделения микроколичеств элементов из массы других, загрязняющих веществ является метод соосаждения с носителем;
- при лабораторной разработке технологии необходимо учитывать возможность перенесения процессов на промышленный масштаб с учетом возрастающих радиационных полей;
- все процессы и организацию производства необходимо разрабатывать с обеспечением безопасности для персонала.

Первым помощником В. Г. Хлопина в разработке основных принципов технологии был Б. А. Никитин. В его рабочих тетрадях за январь 1946 г. мы находим первые соображения о требованиях к будущей технологии. По существу, там изложена вся идеология создаваемого радиохимического производства [6].

Работа началась с осмысления всех основных исходных позиций.

На основании данных, полученных из Лаборатории № 2, Б. А. Никитин провел расчеты возможных количеств осколочных элементов в облученном уране. Вероятность образования каждой цепочки изотопов определялась согласно публикации Андерсона и др. в *Phys. Rev.*, **59**, 52 (1941). Вместе с А. Н. Муриным рассчитывались также возможная радиоактивность урановых блоков в зависимости от времени выдержки, накопление плутония и целесообразное время выдержки блоков урана после изъятия их из котла до передачи на переработку.

Была детально изучена литература по химии урана. В рабочих тетрадях Б. А. Никитина имеются рефераты из литературы за период с 1900 по 1941 г.

Были сформулированы основные требования к технологии, а к 4 февраля 1946 г. Б. А. Никитин в Записке "Предварительные замечания к проектированию химического завода" [7] определяет принципы, которые необходимо заложить в создаваемую технологию. Среди них, например, такие:

- максимальный сброс осколков на первой операции;
- повторение операций очистки до получения продуктов, позволяющих безопасное их транспортирование;
- отсасывание радиоактивных газов через трубу, контроль радиоактивности в трубе с помощью ионизационных камер и естественное разбавление выброшенных газов воздухом;
- герметизация всех аппаратов, где имеются осколки; цеха очистки должны быть оборудованы по типу современных радиевых заводов с применением соответствующих правил безопасности;
- дистанционное управление и контроль технологии со специальной системой отбора проб;
- организация защиты для обеспечения безопасности здоровья работников и ряд других.

Уже на стадии теоретической проработки возможной технологической схемы Б. А. Никитин предвидел многие трудности, которые могут стать на пути осуществления процессов и которые, действительно, имели место при внедрении технологии:

- газоочистка: будет ли радиоактивный иод попадать в газовые выбросы из аппарата растворения урановых блоков?
- возможные потери плутония при механическом захвате маточного раствора осадком или путем образования аномальных смешанных кристаллов;
- возможная адсорбция радионуклидов на стенках сосудов;
- возможность адсорбционного захвата радиоэлементов осадками и стенками сосудов в зависимости от их коррозии;
- возможность регенерации использованных реагентов, очистка их от захваченных осколков.

Все эти соображения свидетельствуют о глубоком понимании особенностей поведения радиоизотопов в микроконцентрациях, а также принципов организации производства с радиоактивными материалами.

В. Г. Хлопин считал наиболее целесообразным применить для технологии хорошо изученный к этому времени прием сокристаллизации находящегося в микроколичествах выделяемого радиоэлемента с соединениями элементов-носителей, т. е. способ, который применяли в технологии выделения радия из урановой руды.

Как равноценный рассматривался также метод экстракции несмешивающимися растворителями.

В процессах соосаждения естественным носителем для плутония в изучаемой системе был уран - элемент, химия которого была уже достаточно известна, который присутствовал в системе в большом количестве и по свойствам близок к плутонию.

Для выбора осадителя были рассмотрены различные вещества, исходя из общехимических соображений или практики аналитической химии. Это могли быть фосфаты, оксалаты, карбонаты, фториды, ацетаты и др. Из различных возможных осадителей нужно было выбрать наиболее эффективный, т. е. обеспечивающий высокую полноту выделения и очистки плутония; реагент должен был быть также доступным в существовавших условиях и, по возможности, дешевым. В. Г. Хлопин предложил использовать ацетат натрия.

Предложенная В. Г. Хлопиным технологическая схема включала циклы окислительных и восстановительных осаждений натрий-уранилтриацетата с последующей доочисткой плутония от РЗЭ окислительным осаждением фторида лантана. Процесс выделения и очистки плутония от осколочных элементов и от урана и в этой, и в других разрабатываемых в

РИАН схемах основывался на различном поведении окисленных и восстановленных форм плутония (рис. 1).

АЦЕТАТНО-ФТОРИДНАЯ СХЕМА ВЫДЕЛЕНИЯ И ОЧИСТКИ ПЛУТОНИЯ

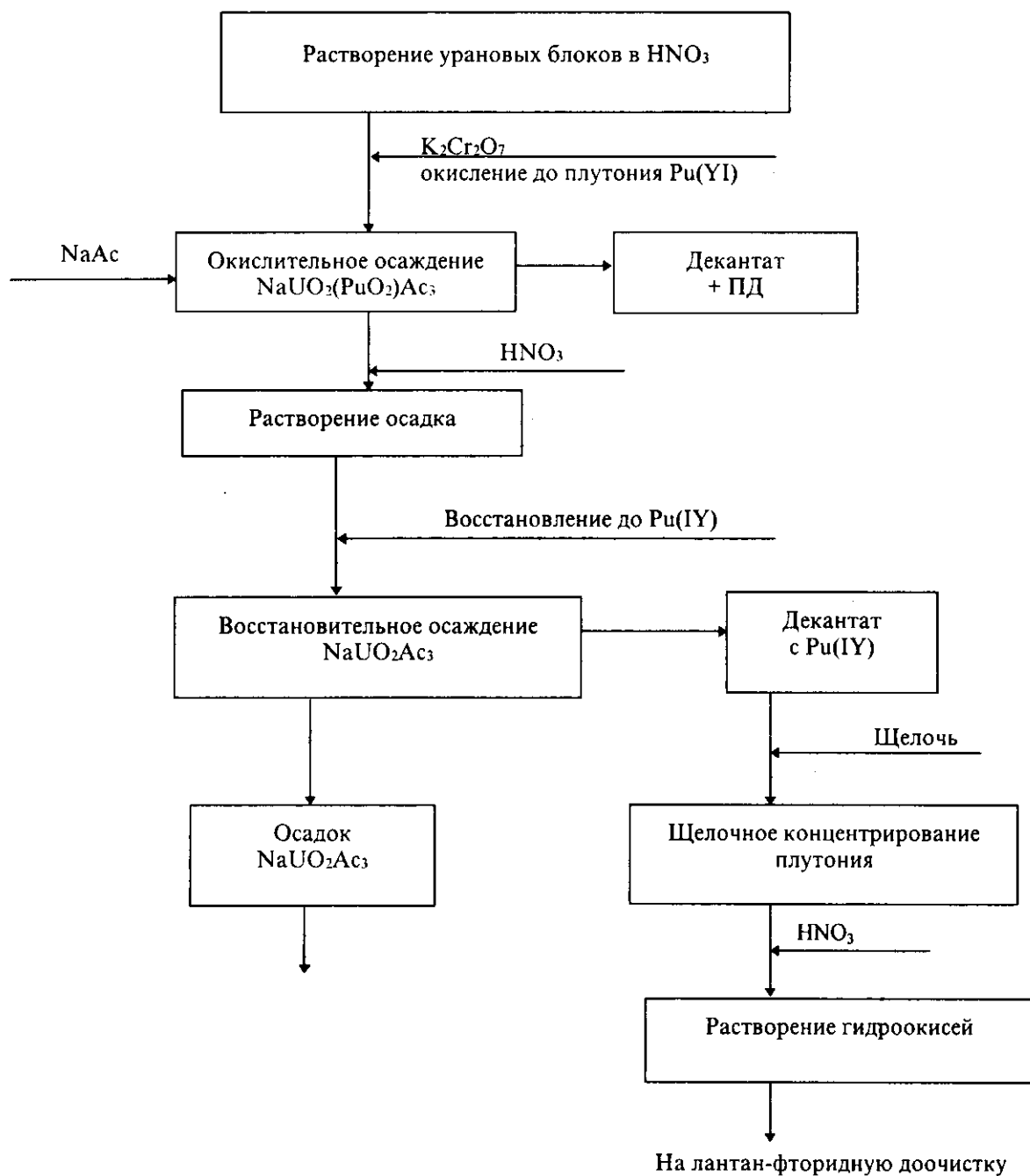


Рис. 1

Следует отметить, что лантан-фторидный метод является исторически первым методом выделения плутония. Он был описан Абельсоном и Мак-Милланом в 1940 г. /Phys. Rev. 57, 1185 (1940)/.

В. Г. Хлопин предложил использовать этот метод, и он был введен в технологическую схему для доочистки плутония после ацетатных осаждений. Однако, забегая вперед, нужно сказать, что этот метод оказался очень трудным для технологии, прежде всего, из-за сильной коррозии оборудования в присутствии фтор-ионов.

Несомненно, что создание структуры технологической схемы и включение в нее ряда процессов происходило под влиянием и с учетом тех сведений, которые к этому времени уже были известны о разработках США в рамках Манхэттенского проекта. Роль разведки в работах физиков и создателей конструкции первой советской атомной бомбы теперь уже хорошо известна. Но одновременно разведка доставляла сведения и о свойствах ядерных материалов, о химических свойствах плутония, о радиохимической технологии. Особенно активно эти сведения поступали в течение 1943-1944 гг. Они были известны очень узкому кругу ученых, среди которых был Б. А. Никитин.

В. Б. Барковский, бывший разведчик в области атомных проблем, а в настоящее время историк советской научно-технической разведки, приводит следующий отзыв Б. А. Никитина о полученных данных [8]: «Поступившие материалы представляют очень большой практический интерес. В них изложены исследования по химии плутония, нигде не публиковавшиеся ранее. Наши лабораторные исследования проводились с учетом сведений, которые мы получали из этих материалов. В общем эти сведения сократили объем наших работ. Во многих случаях нам достаточно было повторить американские работы. Материал представляет большой интерес для научных работников, конструкторов и производственников.»

В качестве примера таких сведений можно привести четкое представление о положении плутония в Периодической системе элементов и, соответственно, о его химических аналогах и основных химических свойствах, в частности о переменной валентности с устойчивыми степенями окисления +4 и +6. Важность этих сведений не вызывает сомнений, если учесть, что первое задание, полученное Радиевым институтом в 1943 г., было сформулировано как задание на выделение эка-рения и эка-осмия. Самостоятельное экспериментальное исследование потребовало бы немалых усилий и времени, особенно с учетом того, что доступные для работы с ним количества плутония стали появляться лишь в 1946 г. Таким образом, очевидно, что это не только сократило общий объем работ, но и дало существенный выигрыш во времени. Чрезвычайно важна была также уверенность в выполнимости задачи и правильности выбранного пути.

Сочетание двух факторов - интенсивная работа высококвалифицированных специалистов и сокращение объема работ за счет полученных сведений - дало возможность уже к середине марта 1946 г. подвести первые итоги и дать сравнительную оценку всех разрабатываемых методов.

Эта огромная работа, выполненная химиками РИАН, была возможна благодаря бесперебойной работе в течение 7 месяцев циклотрона РИАН под руководством М. Г. Мещерякова. Полученные на нем препараты содержали всего ~ 150-175 имп/мин плутония. В циклотронную бригаду входили также А. А. Реут, К. А. Бриземейстер, А. Я. Абрамов, Б. Л. Фунштейн, П. И. Мостицкий, В. А. Григорьев.

Позднее, в конце 1946 г., был пущен циклотрон Физико-технического института, более мощный, чем циклотрон РИАН. Облучение урана на этом циклотроне давало возможность получить до 250-300 имп/мин плутония. Кроме того, экспериментальные работы проводили и на имитаторах плутония - тории и нептунии.

Химические проблемы выделения плутония прорабатывали в РИАН в комплексе с другими проблемами, решение которых было необходимо для промышленного осуществления технологии. Разрабатывали аналитические и радиометрические методы контроля процесса, принципы конструирования измерительных приборов для дистанционного контроля, рассматривали меры безопасности. Г. В. Горшков выполнил расчеты защиты от излучений, которыми потом пользовались на всех объектах строящегося комбината.

Большая работа была проведена под руководством К. А. Петржака по разработке методов измерения альфа-активности и идентификации плутония по энергиям альфа-частиц. Был разработан метод экспрессного определения выхода плутония. Метод регистрации альфа-частиц был применен в дальнейшем в качестве основного метода контроля содержания плутония как на опытной установке № 5, так и в заводских условиях.

16 марта 1946 г. Технический совет РИАН рассмотрел проработанные к тому времени варианты технологических схем и принял решение рекомендовать для промышленной технологии ацетатно-фторидный метод. Метод обеспечивал получение плутония и урана почти свободными от загрязнений и в форме, удобной для дальнейшей переработки. Все необходимые для процесса химикаты производились в СССР (в отличие, например, от фосфата висмута, который в стране вообще не производился) и были относительно дешевы. Предполагалось, что аппаратное оформление такого процесса в зоне, не допускающей непосредственного обслуживания, будет достаточно простым. Таким образом, этот процесс соответствовал первоначально разработанным требованиям, и схема была рекомендована как основа для промышленной технологии. Другие процессы - висмут-фосфатный и экстракционный - продолжали разрабатывать как запасные варианты.

По докладу В. Г. Хлопина было принято решение: ГИПХ и ГСПИ-11 немедленно приступить к разработке технологической части проекта, а РИАН выдать задание ИФХАН на исследование коррозии и ИРЕА - на подготовку реактивов необходимой квалификации.

К 1 апреля бригада В. Г. Хлопина представила принципиальную технологическую схему будущего завода. Дальнейший успех был обеспечен работой опытных технологов и инженеров ГИПХ под руководством Я. И. Зильбермана и Н. К. Хованского. Этот коллектив за один месяц разработал общую аппаратную схему завода, составил материальный баланс, произвел расчеты расходных норм реактивов, электроэнергии, пара, воды и т. д.

29 апреля 1946 г. РИАН совместно с ГИПХ выпустил "Технологическую часть проектного задания объекта «Б»", получившую по цвету обложки название "Синяя книга" (рис. 2).

Здесь содержались практически все разделы, необходимые для промышленного осуществления технологии: от свойств исходных материалов, их поведения в технологических процессах и до расчетов материального баланса, потоков и т. д.; рассмотрены вопросы безопасности и обезвреживания отходов; обращалось внимание на то, что весь персонал должен находиться под постоянным медицинским наблюдением и контролем. Подробное изложение принципиальной схемы выделения плутония заканчивалось описанием операции получения отфильтрованного и промытого осадка фторида плутония, который должны были передавать на дополнительный аффинаж. Вопросы аффинажа в этом проекте не рассматривались, так как отсутствие весомых количеств плутония не давало возможности проверить этот процесс. Рассмотрены и необходимые дальнейшие работы.

В приложении к проектному заданию была описана разработанная в Радиевом институте профессором А. Б. Вериго принципиальная схема дистанционного контроля за ходом технологического процесса на заводе и изложены предложенные им принципы конструкции соответствующих приборов.

Впоследствии "Синяя книга" для многих химиков, физиков и технологов служила и как справочник, и как учебник.

Таким образом, к маю 1946 г. уже была создана основа для проектирования завода.

В начале мая 1946 г. в РИАН прибыла специальная комиссия ПГУ под председательством заместителя председателя СНК СССР М. Г. Первухина. Комиссия детально ознакомилась с состоянием работ и рекомендовала принять ацетатно-фторидную схему за основу для проектирования и строительства завода, произвести проверку метода на достаточном количестве плутония и для этой цели организовать опытный цех при реакторе Ф-1, который строился И. В. Курчатовым.

20 мая 1946 г. В. Г. Хлопин и Я. И. Зильберман докладывали Научно-техническому совету (НТС) ПГУ о проработанных в РИАН схемах и о преимуществах ацетатно-

ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ
ПРОЕКТНОГО ЗАДАНИЯ ОБЪЕКТА " Б "

/предварительные данные по ацетатно-фторидному
варианту /

Т О М I

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА

Научный руководитель
Директор РИАН'а СССР
заслуженный деятель
науки академик



/ХЛОПИН/

Ленинград

А Прель 1946 г.

фторидной технологии. Интересно, что уже в этом докладе В. Г. Хлопин отмечал преимущества и экстракционного метода:

- количественное выделение плутония;
- возможность высокой очистки урана и плутония от осколочных элементов на первой же стадии процесса, что облегчало дальнейшую переработку;
- отсутствие осадков, которые представляли значительную сложность для работы в условиях радиации.

На основании заслушанного доклада и рекомендаций комиссии М. Г. Первухина НТС ПГУ принял решение о проектировании завода по ацетатной технологии; остальные же схемы было решено продолжать разрабатывать в качестве запасных.

В августе 1946 г. было принято решение о строительстве завода по ацетатной технологии. Строительство завода было решено вести с учетом возможного переключения его на другие схемы.

После выхода "Синей книги" в Москве, в НИИ-9, начали создавать установку для укрупненных испытаний технологической схемы. Выбор НИИ-9 как места создания такой установки был связан с тем, что этот институт расположен неподалеку от Лаборатории № 2 с ее первым реактором Ф-1. После пуска реактора (25 декабря 1946 г.) на установку № 2 для переработки начал поступать реакторный облученный уран.

Первые опыты на установке были неудачны, так как сотрудники НИИ-9 поспешили её построить без должной консультации с разработчиками технологии - учеными РИАН. Ошибки в конструкции установки и крайне неудачный монтаж не позволяли вести на установке процессы так, как они были запроектированы. По специальному решению НТС ПГУ была заказана новая аппаратура, моделирующая проектную, и под руководством Б. А. Никитина и А. П. Ратнера установку самым срочным образом практически полностью перестроили.

Все последующие работы на установке велись под непосредственным руководством Б. А. Никитина. Его заместителями были назначены А. П. Ратнер, Б. П. Никольский, А. П. Виноградов (ГЕОХИ). От РИАН на установке работали В. И. Гребенщикова, руководившая группой радиохимиков-технологов, А. М. Гуревич, которая руководила группой химиков-аналитиков, В. М. Вдовенко, Р. В. Брызгалова, Т. В. Ковалева, Н. Н. Попова, М. И. Якунин, Б. Б. Петров, М. М. Шац и многие другие, всего около тридцати человек. Много времени проводил на установке заместитель директора РИАН И. Е. Старик, который осуществлял координацию работ, проводимых исследователями и проектировщиками в РИАН, на установке, а также в других привлеченных учреждениях. Кроме сотрудников РИАН и НИИ-9 на установке работали сотрудники ИОНХ, ИФХАН, от проектировщиков постоянно бывал Я. И. Зильберман.

К этому времени в работы были уже вовлечены научные коллективы и других институтов. Одни из них получали свои задания от Спецкомитета ПГУ, другие - от РИАН, которому было дано право привлекать необходимые силы. Среди многих организаций особенно большой вклад на разных этапах внесли:

ФТИ	- облучение урана на циклотроне (с конца 1946 г.);
ГИПХ	- технологическая часть проектного задания;
ГСПИ-11	- проект завода Б;
Лаб. 2	- облучение урана в реакторе Ф-1. Сорбция Рn и осколков на осадках, фильтрах, аппаратуре и т. п.;
НИИ-9	- организация стендовой установки № 5 для проверки всей технологической цепочки;
ИФХАН	- коррозия материалов, действие радиации на технологические процессы;
ИРЕА	- база реагентов необходимой чистоты;
ГЕОХИ	- аналитическое обеспечение;

ИОНХ - химия осколочных элементов;
ЦЗЛ комбината 817 (создана в 1947 г.).

Роль этой заводской лаборатории следует отметить особенно. Ее сотрудники не только занимались совершенствованием технологических процессов действующих объектов, но и проводили научные исследования на уровне ведущих институтов отрасли.

На установке, проработавшей около полутора лет, были проверены варианты технологической схемы, определены выходы плутония и степень его очистки в различных операциях, отработаны условия проведения отдельных операций, сняты показатели главных узлов схемы. Основные технологические показатели ацетатной схемы были подтверждены, однако проверить показатели конечной операции - лантан-фторидного процесса - так и не удалось. Слишком сильна была коррозия аппаратуры, и продукты коррозии сильно искажали ход процесса.

Специалисты РИАН не только сами вели работы на установке, но и обучали теории и практике работы с радиоактивными веществами тех, кому предстояло работать на заводе. На опытной установке получили необходимый опыт работы будущие руководители завода М. И. Ермолаев, Б. В. Громов, М. В. Гладышев, Н. С. Чугреев, Н. Г. Чемарин и многие другие специалисты.

В это же время в самом РИАН были организованы курсы по подготовке кадров для первого радиохимического завода. Обучение проходили инженеры-химики, техники-химики, научные сотрудники. Соответствующие программы теоретических курсов и практических занятий были разработаны Б. А. Никитиным и А. П. Ратнером.

В этой связи хочется упомянуть, что кадры для создаваемой атомной промышленности готовила также первая в стране кафедра радиохимии, организованная в 1947 г. по инициативе В. Г. Хлопина на химическом факультете Ленинградского государственного университета. Все ведущие преподаватели кафедры в течение 10-15 лет были сотрудниками РИАН, также как заведующие кафедрой до 70-х годов (последовательно В. Г. Хлопин, Б. А. Никитин, И. Е. Старик, А. Н. Мурин). Первые три-четыре выпуска кафедры почти полностью были направлены на комбинат 817 в Челябинск и в РИАН. Последующие выпуски кафедры давали молодое пополнение многим предприятиям отрасли.

Пока шла напряженная работа на установке № 5, на Урале полным ходом развернулось строительство первого атомного комбината, включающего радиохимический завод, завод Б.

В августе 1948 г. приказом начальника ПГУ на строительную площадку завода была направлена пусковая бригада ученых и инженеров, многие из которых прошли практику работы на установке № 5. Бригада включилась в работы по монтажу, а затем холодные испытания оборудования, пуск и освоение производства.

Руководителем пусковой бригады был назначен Б. А. Никитин, его заместителями Б. П. Никольский (РИАН), А. П. Виноградов (ГЕОХИ), А. П. Ратнер (РИАН), а позже также М. В. Угрюмов (НИИ-9).

Этим же приказом на членов бригады возлагалось научное руководство отделениями (цехами) завода и лабораториями. Б. А. Никитин назначался также заместителем по химии научного руководителя комбината И. В. Курчатова, а А. П. Ратнер - научным руководителем завода Б. Научным руководителем отделения эфирной очистки, которое тоже создавалось на заводе, был назначен В. М. Вдовенко.

В состав пусковой бригады от РИАН входили также физики Г. В. Горшков, Н. С. Шиманская и другие. В пусковой период эта группа проверила эффективность реальной защиты и сняла дозиметрические карты не только завода Б, но и других объектов комбината. Большая помощь группой Г. В. Горшкова была оказана службе дозиметрии и заводским радиометрическим лабораториям.

В. Г. Хлопин по состоянию здоровья выехать на завод уже не мог. Но он поддерживал постоянную связь с бригадой, давал указания и советы при всех серьезных затруднениях.

22 декабря 1948 г. завод был пущен на реальном продукте, а уже с февраля 1949 г. начался плановый выпуск плутония. Работа ученых на заводе не прекращалась ни на один день.

При проектировании завода Б и при проверке его технологии на опытной установке в НИИ-9 было ясно, что наиболее тяжелым участком технологии будет фторидное отделение из-за коррозионной нестойкости материалов в сильно агрессивной среде и загрязнения растворов продуктами коррозии.

При проектировании завода, его оборудования и коммуникаций к работам привлекли ИФХАН. Специалист по коррозии, член-корреспондент АН СССР Г. В. Акимов и его сотрудники предложили делать аппараты и коммуникации фторидного отделения из нихрома, а вентили из палладиевого сплава, стоимость их была огромной. Кроме того, при рекомендации этих материалов учитывали только их коррозионную стойкость и не учли, что продукты коррозии, которая все же была весьма значительной, могут существенно нарушить технологический процесс.

Первая пробная операция на заводе очень встревожила - плутония в конечном продукте почти не оказалось, не обнаруживался он в необходимом количестве и в промежуточных растворах. Как оказалось, палладиевый сплав основательно разрушился, продукты коррозии резко нарушили ход процесса, и практически весь плутоний осел на нихроме.

Отделение пришлось переделывать: новые переходные трубы в отделении сделали из винидура, часть аппаратов заменили на плексигласовые и таким образом избавились от влияния коррозии. Кроме того, в плексигласовых аппаратах можно было наблюдать ход процесса. Визуальные наблюдения позволили внести некоторые существенные исправления как в конструкцию аппаратов, так и в режим проведения процессов. Тем не менее отделение работало с большими трудностями.

Очень важную роль сыграло то, что весной 1949 г. вошло в строй отделение эфирной очистки. Отделение проектировалось и строилось как опытное, в нем предполагалось отрабатывать варианты экстракционной технологии. Однако в связи с частыми неполадками в работе фторидного отделения и его остановками растворы вместо фторидного отделения передавали на переработку в отделение эфирной очистки. Работа отделения позволяла получать продукцию высокого качества с выходом, превышающим проектный. Но поскольку отделению, не рассчитанному на значительные нагрузки, пришлось работать как промышленному, периодические сбои происходили и там.

Тем не менее завод выдавал необходимую продукцию. Уже в первые месяцы после пуска завода было получено необходимое количество плутония для создания первых образцов изделий - полусфер из металлического плутония.

29 августа 1949 г. в нашей стране было проведено первое испытание ядерного оружия. Страна была гарантирована от атомного шантажа.

Такое краткое изложение истории, конечно, ни в какой степени не может передать все напряжение и все сложности пройденного пути.

Наиболее поражающим моментом в этой поистине героической эпопее является непосредственный переход от лабораторных исследований к промышленному масштабу. Основной объем лабораторных работ был выполнен на уране, облученном на циклотроне РИАН как единственном источнике нептуния и плутония. Этот уран сильно отличался от реакторного по содержанию как плутония, так и продуктов деления. Даже на укрупненной установке № 5 были получены лишь миллиграммовые количества плутония, а условия облучения урана в реакторе Ф-1 не соответствовали условиям промышленного реактора.

Сложность переноса лабораторных опытов на промышленный масштаб связана, в частности, с тем, что несравнимы уровни радиационных полей. Поэтому процесс, успешно проходящий в лаборатории, может оказаться непригодным на заводе. К этому следует добавить, что в промышленном масштабе имели дело с огромной массой высокоактивного материала - урана, содержащего в виде загрязнений более 30 различных химических элементов. Состав этой системы не мог быть моделирован в лабораторных условиях. При этом, одна

тонна такого материала содержала лишь доли процента плутония, который должен был быть выделен с высокими требованиями к чистоте конечного продукта. И этот самый сложный технологический процесс велся практически вслепую, с дистанционным управлением и связан с передачей растворов через десятки аппаратов и километры трубопроводов с сотнями затворов, вентилей и пр. Таких задач химическая технология в те времена не решала. К этому надо добавить, что за столь короткое время, естественно, технология не была отработана во всех деталях, и уточнения вводились прямо по ходу пусковых работ.

В цитированной выше книге Г. Д. Смита [3] есть такое признание о практически близкой ситуации, которая имела место в США: "В нормальное, мирное время...ни один ученый или инженер, находящийся в здравом рассудке, не предпринял бы столь резкого увеличения масштабов... только возможность получить чрезвычайно важные результаты могла служить оправданием этому."

Действительно, только понимание чрезвычайности ситуации и чрезвычайной важности ожидаемых результатов могло вызвать и необычайно самоотверженный труд и принятие необычайно смелых, ответственных решений в весьма сложных ситуациях.

В последние годы не только очень часто говорят, но даже скорее, принято говорить о работе из страха перед КГБ. Мы, уже младшее поколение радиохимиков, ученики и сотрудники создателей первой технологии, слышали от них много рассказов о тех днях напряженной работы. Да, они говорили о постоянном присутствии и определенном давлении со стороны КГБ, но никогда не звучало, что это и была та движущая сила, которая заставляла работать. Наоборот, это была увлеченная работа ученых, преданных своему делу, понимающих, что поставленная задача непременно должна быть решена и может быть решена и отдававших этому весь свой опыт, знания, рисковавших своим здоровьем, а иногда и жизнью. И, вопреки утверждению Смита, процитированному нами в начале этой статьи, наша страна оказалась способной и на затрату необходимой мозговой энергии, и на технические усилия.

В связи с выполнением комплекса работ по созданию технологии и пуску радиохимического завода выделения плутония большая группа сотрудников Радиевого института была удостоена правительственных наград:

Звание Героя Социалистического труда (1949) было присвоено академику В. Г. Хлопину. Ему в третий раз была присуждена Сталинская премия (1949, прежде 1943, 1946) и именная премия СМ СССР (1950). Он был награжден третьим орденом Ленина (1949, прежде 1945, 1947) и другими специальными правительственными наградами (дом, дача и др.);

Сталинские премии в 1949 г. были присуждены также Б. А. Никитину, А. П. Ратнеру, Б. П. Никольскому, И. Е. Старику. Они получили также именные премии СМ СССР и были удостоены специальных наград правительства;

Орденом Ленина были награждены: в 1949 г. - Г. В. Горшков, Б. П. Никольский, А. П. Ратнер, И. Е. Старик; в 1950 г. - В. М. Вдовенко;

Орденом Трудового Красного Знамени - А. Б. Веригу (1950) и В. И. Гребенщикова (1951);

Орденом "Знак Почета" награжден В. М. Вдовенко (1951);

Именные премии СМ СССР были присуждены более 30 сотрудникам РИАН.

Описанный период времени, несомненно, был целой эпохой в жизни института и определил пути его развития на последующие 50 лет. Это было логическое развитие технологических разработок с широким охватом многочисленных проблем и выходом на новые направления.

Работы в области радиохимической технологии инициировали глубокие фундаментальные исследования радиохимических проблем. Результаты этих исследований часто вновь возвращались в область прикладной науки, создавали ее фундамент и приносили новые решения прикладных задач. Эти исследования обогащали и общенаучные познания свойств веществ и природы явлений.

Технологические разработки определили и основные направления развития в Радиовом институте работ в области аналитической химии, а также многие работы геохимиков и физиков.

Л и т е р а т у р а

1. Гладышев М. В. Плутоний для атомной бомбы: Директор плутониевого завода делится воспоминаниями. Челябинск-40: ПО "Маяк", 1992.
2. Круглов А. К. Как создавалась атомная промышленность в СССР. М.: ЦНИИАтоминформ, 1994.
3. Смит Г. Д. Атомная энергия для военных целей. М., 1946.
4. Мещеряков М. Г. В. Г. Хлопин: вхождение на последнюю вершину. // Природа, 1993, N 3, с. 93.
5. Архив РИ, ф. 1, оп. N1/снт, ед. хр. 3.
6. Архив РИ, ф. 1, оп. N1/снт, ед. хр. N 4а.
7. Архив РИ, ф. 1, оп. N1/снт, дело N 3.
8. Барковский В. Б. Атомное оружие и научно-техническая разведка. // Курчатовский институт История атомного проекта, М., 1995, вып. 2.

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ОСАДИТЕЛЬНОЙ ТЕХНОЛОГИИ ВЫДЕЛЕНИЯ ПЛУТОНИЯ И ВНЕДРЕНИЕ АНИОНООБМЕННОГО АФФИНАЖА

Е. И. Ильенко, Л. Н. Лазарев

Начало 50-х годов в РИАН было периодом активных работ в области прикладной радиохимии, направленных, прежде всего, на совершенствование технологии выделения плутония из облученных урановых блоков. К этому времени разработанная в РИАН осадительная ацетатная технология с фторидным (или экстракционно-эфирным) аффинажем плутония эксплуатировалась в промышленном режиме на заводе Б комбината 817. Она обеспечивала плановый выпуск продукции, необходимой для создания ядерного оружия. Однако завод работал с большими трудностями и многочисленными сбоями. Срочность осуществления всех этапов разработок и пуска завода, естественно, привела к тому, что оставалось много нерешенных вопросов. Между тем, в самой технологии была заложена возможность ее совершенствования, так как основные процессы не были ограничены жесткими безвариантными условиями их проведения. Поиски новых условий, новых приемов реализации процессов, новых сочетаний реагентов и т. д. давали возможность осуществлять их гибкую модернизацию без остановок производства. Эта особенность технологии и обеспечила ее длительное, почти тридцатилетнее существование.

Усовершенствования технологии начались, по существу, одновременно с ее промышленным освоением, и к началу 50-х годов была очевидна необходимость ее дальнейшего развития в следующих направлениях:

- создание условий и режимов, обеспечивающих устойчивость проведения операций на всех переделах;
- повышение выхода целевого продукта - плутония;
- повышение качества конечных продуктов (уранового и плутониевого);
- снижение засоленности сбросных растворов;
- уменьшение объемов сбросных растворов;
- снижение выбросов вредных газов в атмосферу;
- повышение общей производительности завода Б.

Радиевый институт оставался ведущей научно-исследовательской организацией и на этой стадии работ. Однако следует подчеркнуть, что все внедренные Радиевым институтом разработки были осуществлены при активном творческом участии сотрудников радиохимических заводов и ЦЗЛ комбината 817, а позднее и комбинатов 815 и 816 (Челябинск, Томск, Красноярск). Много новых предложений внесли также другие институты отрасли и Академии наук СССР: ГСПИ-11 (ВНИПИЭТ), НИИ-9 (ВНИИНМ), НИИ-10 (ВНИИХТ), Свердловский ИИХИММАШ, ИФХАН СССР, ИОНХ АН СССР и др.

1950-1951 гг., последовавшие после испытания первой советской атомной бомбы, были этапными как для развития радиохимической технологии, так и в организации технологических разработок в Радиевом институте.

В эти годы отечественная радиохимия понесла тяжелые утраты. В 1950 г. умер директор Радиевого института, академик В. Г. Хлопин, под руководством которого была создана первая технология выделения и очистки плутония. Директором института стал член-корреспондент АН СССР Б. А. Никитин, что сразу же сильно отвлекло его от работы на комбинате 817, где он был заместителем И. В. Курчатова, научным руководителем комбината по химии. А уже в 1952 г. он скоропостижно скончался в возрасте 46 лет, что было результатом полученного им сильного переоблучения.

В 1951 г. из-за болезни уехал с комбината и А. П. Ратнер - заведующий лабораторией Радиевого института, научный руководитель завода Б, практически безотлучно находившийся там с самого начала подготовки к пуску завода и внесший большой вклад в освоение его производства^{*)}.

После отъезда Б. А. Никитина и А. П. Ратнера, с 1951 г. и до середины 60-х годов, научным руководителем химических работ на комбинате был заведующий лабораторией Радиевого института Б. П. Никольский. Он сразу же включил свою лабораторию и сотрудников ЦЗЛ комбината в систематические, детальные исследования механизмов химических процессов, поведения урана, плутония и продуктов деления на всех технологических переделах. Это были годы углубленной проработки и создания научных основ радиохимической технологии, открывавшей пути ее совершенствования.

Сотрудники Радиевого института работали параллельно - на модельных растворах в институте и на реальных технологических продуктах - на комбинате.

Основные направления исследований:

- механизмы образования и свойства всех типов осадков (после ацетатного, щелочного, оксалатного осаждений) с целью получения крупнокристаллических и плотных, хорошо отделяющихся от жидкости осадков;
- свойства и поведение отдельных продуктов деления (Zr, Nb, Ru, Sr, PЗЭ) с целью повышения очистки от них урана и плутония;
- свойства и поведение урана и плутония с целью повышения их выхода и качества конечных продуктов;
- механизм растворения урановых блоков в азотной кислоте с целью интенсификации процесса и повышения производительности узла растворения; разработка процесса растворения блоков на основе уран-магниевого керамики и изучение состава газовой фазы при проведении этой операции с целью исключения условий взрывоопасности;

^{*)} М. В. Гладышев, бывший в течение многих лет директором завода Б, так пишет об А. П. Ратнере в своей книге "Плутоний для атомной бомбы": "Вряд ли я преувеличу, если скажу, что Б. В. Громов вместе с А. П. Ратнером довели производство до нормальной эксплуатации". И еще: "Александр Петрович Ратнер - доктор химических наук, ученик Хлопина, во время пуска и в первый период эксплуатации наблюдал за технологией не со щита, и не только по анализам, а сам лез в каньон, в аппарат, смотрел, щупал, нюхал... Вряд ли я преувеличу, если назову его Героем труда и науки".

- механизмы пенообразования и пеногашения в осадительных операциях с целью исключения возможности выброса продуктов из технологических аппаратов в результате вспенивания или уноса осадков с пенами во время декантации.

В первом варианте внедренной на заводе Б ацетатно-фторидной технологии наибольшие трудности вызывала эксплуатация узла фторидной доочистки и концентрирования плутония.

В начале 1951 г. А. П. Ратнер вместе с Б. В. Громовым (главным инженером завода Б) предложили заменить фторидное осаждение плутония на повторный цикл окислительного и восстановительного ацетатных осаджений (так называемая схема "ББ"). Таким образом, схема становилась цельноацетатной. Это было одним из самых существенных, коренных усовершенствований ацетатной технологии.

В связи с болезнью А. П. Ратнера реализация схемы "ББ" велась сотрудниками комбината и РИАН под руководством Б. П. Никольского. Внедрение этой схемы обеспечило высокий прямой выход и необходимую очистку плутония, а также позволило закрыть лантан-фторидное отделение. В это же время вопрос повышения общего выхода плутония был решен путем введения дополнительного извлечения его из сбросных растворов - декантатов после окислительного осаждения и др. (переработка "возвратов").

Цельноацетатная схема была внедрена на заводе Б Челябинского комбината в 1952 г., а в 1959 г. на этом же комбинате и по этой же схеме был пущен второй завод переработки облученных урановых блоков - завод-дублер (завод ДБ или завод 35).

Практически в это же время в схему было введено еще одно существенное изменение. Когда в 1951 г. была поставлена задача повышения производительности завода, крайне остро встал вопрос о нехватке ацетата натрия. Химическая промышленность не могла быстро увеличить поставку этого реактива. Тогда, по предложению Б. В. Громова и А. П. Ратнера, восстановительное ацетатное осаждение стали проводить не ацетатом натрия, а путем нейтрализации щелочью свободной уксусной кислоты, образующейся при растворении осадка после окислительного осаждения. Однако в этом случае получались мелкокристаллические, рыхлые осадки, и пульпа часто не укладывалась в заданный объем. После исследований, проведенных в РИАН и на заводе, для нейтрализации уксусной кислоты решили применять содово-щелочной раствор. Это не только решало проблему экономии ацетата натрия, но привело к получению более плотных осадков и значительному удешевлению процесса, так как стоимость соды была существенно ниже стоимости щелочи.

В 1957 г. процесс восстановительного ацетатного осаждения с помощью содово-щелочных растворов был внедрен в производство; в дальнейшем его использовали и на других комбинатах.

Начиная с 1952 г., в лаборатории Б. П. Никольского велось систематическое изучение зависимости полноты выделения урана и плутония от режимов проведения операций окисления и восстановления, а также полноты их выделения и очистки от продуктов деления в зависимости от режимов ацетатных и щелочных осаджений. Необходимо было получить хорошо сформированные, плотные аморфные осадки от щелочного осаждения и крупнокристаллические ацетатные осадки. Это обеспечивало полноту выделения (или разделения) урана и плутония, минимальный захват осадками продуктов деления и снижало вероятность "сдергивания" пульпы при декантации.

С этой целью испытывались различные режимы осаджений: изменяли температуру, скорость сливания растворов, концентрацию реагентов, порядок ввода продуктов (осадитель в продукт или наоборот - "прямое" и "обратное" осаждение), время отстаивания осадков и др.

Большая работа была связана с исследованиями распределения осколочных элементов (индивидуальных и их суммы) между технологическими продуктами по всей технологической цепочке. Специальные исследования были связаны с изучением поведения и состояния в производственных растворах осколочных элементов с наиболее сложными химическими свойствами (Zr, Nb, Ru, РЗЭ).

От Радиевого института под руководством Б. П. Никольского эту серию исследований выполняла группа А. М. Трофимова (Н. А. Абрамова, Е. И. Ильенко, Г. Г. Панфилова, Л. Н. Степанова).

Детальные физико-химические исследования технологических систем давали возможность систематически вводить изменения в регламенты технологических операций на заводе с целью повышения очистки и выхода урана и плутония.

Одним из существенных результатов этих исследований явилось установление факта преимущественного захвата осколочных циркония и ниобия осадком уранилтриацетата натрия при ацетатных осаждениях. Чтобы предотвратить захват циркония и ниобия осадками, А. П. Ратнер предложил изменить их химическое состояние перед ацетатным осаждением путем введения в раствор перекиси водорода.

В 1952-1958 гг. А. П. Ратнером, Б. П. Никольским и их сотрудниками (М. В. Посвольский, А. М. Гуревич, В. И. Андреев, З. П. Морозова, Л. И. Крылов, Г. А. Синеева и др.) процесс был разработан детально и после успешной проверки в производственных условиях внедрен на заводе. Осаждение уранилтриацетата натрия в присутствии перекиси водорода обеспечивало повышенную очистку уже на первом окислительном осаждении, что позволило отказаться от второго окислительного осаждения без снижения очистки урана и плутония. Это сразу резко снизило расход реагентов, общее количество операций, объем сильно засоленных сбросных растворов и одновременно повысило производительность этого технологического передела. Существенным преимуществом процесса было и образование крупнокристаллического хорошо осаждающегося плотного осадка, что обеспечивало удовлетворительное отделение пульпы при декантации маточного раствора. Все эти факторы в сумме давали значительный экономический эффект. Процесс успешно использовали на заводах Б других комбинатов.

Проведение ацетатных осаждений в присутствии перекиси водорода было вторым (после внедрения схемы "ББ") крупным усовершенствованием ацетатной технологии, сыгравшим решающую роль в ее долгой жизни.

С пуском на Челябинском комбинате второго радиохимического завода ("завод - дублер") продолжались работы, направленные на повышение технологических показателей процесса, экономию реагентов и снижение затрат на производство.

В конце 50-х - начале 60-х годов в РИАН был разработан процесс растворения урановых блоков, аналогичный французскому (метод Фожера) - растворение в азотной кислоте с поддувом кислорода. Процесс был внедрен на комбинате 817, в результате чего в узле растворения резко сократился расход азотной кислоты, уменьшились выбросы окислов азота и радиоактивных аэрозолей в окружающую среду (Б. П. Никольский, С. А. Бартенев, Е. А. Шашуков).

Последним из основных усовершенствований ацетатной технологии была замена осадительных процессов аффинажа плутония (линия "ББ") на сорбционные и создание осадительно-сорбционной технологии.

В 1957-1959 гг. в РИАН под руководством Б. П. Никольского и В. И. Парамоновой изучали возможность применения отечественных сильноосновных анионитов на основе стирол-дивинилбензола для доочистки плутония в экстракционной и ацетатной технологиях.

Испытания на опытной установке завода 35 сорбционного аффинажа плутония в схеме "ББ" показали, что процесс принципиально возможен, но испытанные аниониты в производственных условиях не достаточно прочны.

Сотрудники Радиевого института (Ю. А. Копалкин и др.) приняли самое активное участие в синтезе более прочных винилпиридиновых анионитов, который осуществляли в НИИПМ.

Испытания, проведенные на установке СМ-35 в горячих камерах завода, показали, что двух последовательных сорбционных очисток и одного оксалатного осаждения достаточно для получения товарной двуокиси плутония высокого качества и что винилпиридиновые аниониты могут работать достаточно длительное время без изменения свойств. Исполь-

зование этих процессов позволило полностью исключить из технологической цепочки линию "ББ", и технология из цельноосадительной стала осадительно-сорбционной.

Весной 1965 г. анионообменный аффинаж плутония был внедрен на комбинатах 817 и 815, а весной 1966 г. - на комбинате 816. Этот процесс в дальнейшем был усовершенствован. Так, в конце 60-х - начале 70-х годов в Радиевом институте была разработана и внедрена на заводе Б комбината 815 схема аффинажа плутония с использованием комбинации операций на фосфатном катионите КФП и винилпиридиновом анионите ВП-1А. Внедрение этой схемы позволило решить проблему очистки плутония от тория, а также исключить операцию марганцевой очистки плутония от циркония и ниобия. Сорбционный аффинаж был сохранен и после реконструкции заводов Б по экстракционной технологии.

На стендовых установках и в процессе промышленного внедрения сорбционной технологии работала большая группа сотрудников Радиевого института, из которых создавались сменявшие друг друга бригады, обеспечившие практически непрерывную в течение нескольких лет работу на комбинатах. Руководителями этих бригад с переменным составом чаще других были Е. Л. Мордберг и В. П. Попик. В состав бригад как постоянные участники работ входили Н. А. Абрамова, С. А. Бартенев, А. В. Вихлянцева, Н. Б. Высокоостровская, Е. И. Ильенко, Л. А. Кочеванова, Н. В. Куценко, Р. И. Любцев, Э. М. Пазухин, И. В. Рыжкова, Е. Н. Соколов, Л. Н. Степанова и др.

Внедрение анионообменного аффинажа на заводах Б всех комбинатов привело к значительному повышению производительности технологии и качества продукта при снижении его себестоимости. По этим показателям осадительно-сорбционная технология удовлетворяла требованиям, предъявлявшимся к радиохимическому производству. Резкое повышение производительности существующих заводов по выделению плутония позволило отказаться как от строительства на них новых ниток для переработки облученных блоков, так и от строительства новых, уже проектировавшихся заводов, поскольку действующие объекты стали полностью обеспечивать выполнение программы производства плутония.

В результате проведенных мероприятий первоначально громоздкая цельноацетатная схема стала более компактной, количество операций значительно сократилось, что само по себе сделало ее более экономичной при одновременном повышении производительности.

Среди крупных работ, выполненных под руководством Б. П. Никольского в 60-х годах, было и определение реального количества плутония, направляемого с реакторного производства на радиохимический завод. Комплексные аналитические исследования содержания плутония во всех технологических продуктах (в так называемых арбитражных операциях) позволили получить экспериментальные данные о поступлении плутония и подтвердить его высокий выход в конечную продукцию.

Для обеспечения арбитражного контроля был успешно использован новый, разработанный М. В. Посвольским и Г. С. Марковым, метод определения плутония с бензилхинолином. Метод был применен для определения количества плутония в исходном продукте (азотнокислый раствор урановых блоков), а также в сбросных растворах для изучения каналов потерь плутония.

В описываемый период времени в Радиевом институте было проведено большое количество и других работ, направленных на совершенствование технологии или на научное обоснование технологии и вскрытие природы проходящих процессов. Однако в коротком очерке мы имели возможность отметить лишь наиболее крупные из них, которые внесли существенный вклад в развитие технологии и в экономику промышленного производства.

Однако не хочется, чтобы остались забытыми работы по использованию в качестве альтернативного окислителя озона (А. А. Гринберг, Е. А. Шашуков), работы по пеногашению (М. В. Посвольский, В. И. Андреев, Е. И. Ильенко), по переработке марганцевых пульп с доизвлечением из них плутония (Д. Н. Быховский), а позднее - по применению нового типа сорбентов, твэксов, для извлечения из радиоактивных отходов урана и плутония, а также палладия с целью его последующего использования (В. П. Попик).

За участие в работах по совершенствованию радиохимической технологии большая группа сотрудников Радиевого института была удостоена правительственных наград:

- | | |
|-------------------|---|
| Б. П. Никольский | - звание Заслуженного деятеля науки и техники РСФСР (1961)
- Лауреат Ленинской премии (1961)
- Герой Социалистического труда (1970)
- орден Ленина (1970)
- Лауреат Государственной премии (1973) |
| А. А. Гринберг | - орден Ленина (1953)
- звание Заслуженного деятеля науки и техники РСФСР (1959) |
| В. И. Парамонова | - Лауреат Ленинской премии (1962)
- орден "Знак Почета" (1962)
- орден Трудового Красного Знамени (1971) |
| А. М. Гуревич | - Лауреат Ленинской премии (1962) |
| М. В. Посвольский | - Лауреат Ленинской премии (1962)
- орден Трудового Красного Знамени (1962) |
| В. И. Андреев | - орден "Знак Почета" (1971) |
- Многие сотрудники были награждены медалями.

ВНЕДРЕНИЕ ЭКСТРАКЦИОННОЙ ТЕХНОЛОГИИ

Л. Н. Лазарев

С самого начала разработки технологии выделения плутония, с 1945 г., наряду с вариантами осадительных схем, исследовалась возможность извлечения урана и плутония из азотнокислых растворов с помощью жидких органических экстрагентов. Первоначально с указанной целью использовался диэтиловый эфир. Руководителем этих работ был Б. А. Никитин.

Первая опытная экстракционная установка была пущена на комбинате 817 уже весной 1949 г. Применение эфирной экстракции обеспечивало высокий выход и хорошую очистку плутония. Это дало возможность в первый период работы завода Б использовать экстракцию как запасной вариант в линии аффинажа плутония вместо фторидного процесса, когда фторидное отделение давало очередной сбой в работе. Однако несколько инцидентов (взрывы, возгорание диэтилового эфира) привели к необходимости отказаться от использования этой технологии. Но к этому времени уже был разработан аффинаж по схеме "ББ" (см. предыдущую статью).

Временное промышленное применение эфирной технологии осуществлялось в простейших аппаратах колонного типа, которые обеспечивали лишь так называемый полудинамический режим. Колонна заполнялась одним из несмешивающихся растворителей, а вторая фаза пропусклась через колонну.

С целью замены диэтилового эфира на более безопасные экстрагенты под руководством В. М. Вдовенко с участием Т. В. Ковалевой, М. П. Ковальской, М. Ф. Пушленкова и ряда других исследователей проводились испытания с использованием дибутилового эфира с четыреххлористым углеродом. При этом ставилась задача создания цельноэкстракционной схемы, в которой на переработку должен был поступать продукт с узла растворения урановых блоков.

Такая технология не была реализована в промышленности. Это было обусловлено рядом причин: низкой экстракционной способностью эфиров, необходимостью использования высаливателей, коррозионной активностью хлорсодержащих экстрагентов, а также отсутствием в то время эффективных экстракционных аппаратов. Не менее важной причиной отсрочки внедрения жидкостной экстракции были достигнутые успехи в совершенствовании уже освоенной осадительной технологии, обеспечивавшей производство плутония.

Экстракционная технология признавалась перспективной, исследования в той области не прерывались, но в течение длительного времени в промышленности продолжали использовать осадительно-сорбционную технологию. Однако "врожденные недостатки" осадительной технологии - неизбежность накопления сильнозасоленных отходов, большой расход реагентов, недостаточное, с точки зрения радиоэкологической безопасности, извлечение плутония и периодический характер процесса - не могли быть исключены никакими дальнейшими усовершенствованиями. Поэтому в конце шестидесятых годов коренная модернизация радиохимических производств с переходом на экстракционную технологию стала объективной необходимостью.

Вопрос о реконструкции радиохимического производства с переводом его на экстракционную технологию был поставлен в 1967 г. на заводе - дублере, в то время называвшемся заводом 35.

К этому времени в Радиевом институте и в НИИ-9 в ходе лабораторных работ был накоплен достаточный объем знаний и опыта, необходимый для выдачи исходных данных на проектирование таких производств. Важное значение имела и зарубежная информация о Пурекс-процессе, основанном на использовании в качестве экстрагента трибутилфосфата (ТБФ) в смеси с разбавителями. В НИИХИММАШ и в НИИ-9 разрабатывался ряд экстракционных аппаратов для осуществления непрерывного процесса. В принятии управленческих решений, направленных на переход к прогрессивной экстракционной технологии, важное значение имела и позиция курирующего Минсредмаш сектора ЦК КПСС, настаивавшего на радикальных мерах по внедрению новой технологии.

В Радиевом институте работы по экстракционной технологии переработки облученного урана с использованием ТБФ проводились в лаборатории М. Ф. Пушленкова. В этой лаборатории быстро сложился сильный коллектив исследователей (В. Г. Шумков, В. Г. Воден, Е. В. Комаров, О. Н. Шувалов, В. А. Игнатов, М. Е. Обухова, Н. Н. Щепетильников, Б. Я. Зильберман, Л. Б. Шпунт, Н. С. Тихонов, В. В. Лякин, Г. А. Куманева, Г. П. Никитина, С. М. Куликов, В. Н. Усачев, А. Г. Горский, Р. Н. Киселева, Л. И. Котович, А. Л. Ясновицкая и др.).

В 1956-1958 гг. в Челябинске на радиохимическом заводе была успешно проведена комплексная проверка технологической схемы переработки облученных урановых блоков с экстрагентом 30 % (объемн.) ТБФ - четыреххлористый углерод. Для этого был создан стенд смесителей-отстойников, пригодный для работы с реальным исходным раствором, доставляемым с действующего производства.

В дальнейшем была создана опытно-промышленная установка 35-71, обеспечившая не только получение технологических показателей процесса, но и испытание аппаратурной цепочки, а также получение опыта ведения процесса.

Идея применения тяжелого негорючего разбавителя для ТБФ получила дальнейшее развитие в предложении НИИ-10 использовать с этой целью гексахлорбутадиен.

Первоначально работы велись отдельно тремя научными коллективами: НИИ-9 под руководством В. Б. Шевченко, НИИ-10 под руководством Б. Н. Ласкорина и Радиевского института под руководством М. Ф. Пушленкова. Все три коллектива вели совместные работы с комбинатом, где руководителями работ были В. И. Землянухин и М. В. Гладышев.

Руководством комбината (Б. В. Никипеловым) и завода (М. В. Гладышевым, Г. Д. Тороповым) были приняты энергичные меры для объединения усилий Радиевского института, НИИ-9, НИИ-10, завода и ЦЗЛ комбината путем создания единой комплексной бригады (руководители: от НИИ-9 - В. В. Ревякин, от Радиевского института - Б. Я. Зильберман, от НИИ-10 - В. Г. Фоменков, от комбината - Г. А. Лелюк и В. А. Боровинский). Этот коллектив в 1976-1979 гг. обеспечил промышленное внедрение экстракционной технологии.

Особенностью ее была комбинация первого совместного экстракционного уран-плутониевого цикла с сорбционной доочисткой уранового реэкстракта. Для аффинажа плутония использовался действующий сорбционный узел. Была решена задача упаривания высокоактивного рафината с заикловкой оборотных растворов (Б. Я. Зильберман, В. А. Старченко, В. Ф. Сапрыкин, С. Л. Титов, Ю. А. Копейкин, М. Н. Макарычев-

Михайлов и др.). В схему был включен также новый узел сорбционного удаления тория (С. А. Бартенев) и узел сорбционной очистки газовых выбросов от паров разбавителя (Ю. Н. Казанкин).

Очень важным фактом было то обстоятельство, что реконструкция завода по экстракционной технологии осуществлялась поэтапно без остановки завода. Технология использовалась вплоть до 1986 г., когда на комбинате исчезла необходимость в переработке урановых блоков.

Полученный опыт был использован при проведении исследовательских работ с целью реконструкции радиохимического завода ГХК, где была внедрена двухциклическая экстракционная схема. Выбор в ее пользу был принят из соображений повышенной надежности в случае каких-либо отклонений в режиме первого экстракционного цикла. В качестве экстрагента использовалась смесь ТБФ и гексахлорбутадиена. В отличие от челябинского завода, где использовались экстракторы типа смеситель-отстойник с пульсационным перемешиванием, были применены экстракционные аппараты того же класса, но с механическим перемешиванием. Это обеспечивало герметичность аппаратов и исключало проблемы очистки пульсационного воздуха, что особенно важно в условиях подземного расположения завода.

Со стороны комбината руководство осуществлялось Е. И. Микериним, И. Н. Кокориным, Л. П. Прохоровым, Ю. А. Ревенко и В. П. Мельниковым. В качестве научно-технологических организаций в работах участвовали НИИ-10 и Радиевый институт, в котором руководителями программы были Л. Н. Лазарев и Р. И. Любцев. К работам были привлечены, главным образом, сотрудники лаборатории М. Ф. Пушленкова (В. Г. Воден, О. Н. Шувалов, С. М. Куликов, Н. Н. Щепетильников, Л. В. Сытник, В. Н. Усачев, В. В. Лякин, Т. И. Ефремова, Е. Н. Мишин и др.).

Пуск экстракционной технологии состоялся в 1979 г. Успешная ее эксплуатация осуществляется до настоящего времени.

В 1986-1987 гг. на экстракционную технологию перешел и радиохимический завод Сибирского химического комбината в Томске. Более поздние сроки ее внедрения были обусловлены двумя обстоятельствами:

- ориентацией на экстракционные аппараты колонного типа открывались перспективы высокой производительности. Однако при освоении технологии с использованием этих экстракторов встретились значительные трудности, чего не было на челябинском и красноярском заводах благодаря применению аппаратов типа смеситель-отстойник;

- проблемами коррозии оборудования, проявившейся в опытных работах при освоении экстракционной технологии, что явилось причиной отказа от экстракционной системы с тяжелым хлорированным разбавителем и переориентацией на углеводородные разбавители.

Последующие события показали, что проявлениям коррозии было придано чрезмерное внимание, а причины ее трактовались не вполне объективно.

Внедрение экстракционной технологии на СХК осуществлялось под непосредственным руководством заместителя главного инженера А. И. Карелина при активном участии ВНИИНМ, ВНИИХТ и Радиевого института, бригаду специалистов которого возглавлял Л. Б. Шпунт (в состав бригады входили В. Н. Романовский, М. Л. Савопуло, В. Ф. Зуев, А. А. Пряников, Б. В. Андронов, В. Л. Столяров, В. П. Арсентьева). После выполнения необходимых строительно-монтажных работ и этапа освоения технологии экстракционный процесс был реализован и эксплуатируется до настоящего времени.

Переход от осадительной к экстракционной технологии выделения оружейного плутония на всех трех производственных комбинатах занимает важное место в цепи развития радиохимической технологии. Было обеспечено существенное повышение эффективности производства и накоплен опыт для решения новых задач.

За разработку экстракционной технологии и участие в реконструкции заводов Б сотрудники Радиевого института были удостоены правительственных наград:

М. Ф. Пушленков	- Лауреат Ленинской премии (1962)
	- орден "Знак Почета" (1957)
	- орден Трудового Красного Знамени (1962)
	- орден Ленина (1981)
В. М. Вдовенко	- орден Трудового Красного Знамени (1962)
М. П. Ковальская	- орден Трудового Красного Знамени (1962)
В. Г. Воден	- орден "Знак Почета" (1971)
Т. В. Ковалева	- орден "Знак Почета" (1971)
Л. Н. Лазарев	- Государственная премия (1981)
	- орден Трудового Красного Знамени (1982)
Б. П. Никольский	- орден Октябрьской Революции (1981)
В. И. Парамонова	- орден Трудового Красного Знамени (1982)
В. И. Андреев	- орден Дружбы Народов (1982)
Б. Я. Зильберман	- орден Дружбы Народов (1982)
Р. И. Любцев	- орден Трудового Красного Знамени (1982)
Л. Б. Шпунт	- Лауреат Государственной премии (1986)

Ряд сотрудников были награждены другими орденами и медалями.

Учитывая большой опыт и вклад Радиевого института в создание современной радиохимической промышленности, в частности в разработку экстракционной технологии, в 1972 г. приказом Министра на Радиевый институт были возложены функции Головной организации по общим проблемам радиохимии и по проблеме "Переработка урановых блоков для получения кондиционного плутония". В соответствии с этим был организован Координационный научно-технический совет (КНТС) под председательством академика Б. П. Никольского, в состав которого вошли представители трех комбинатов (Челябинск-40, Томск-7 и Красноярск-26), научно-исследовательских институтов (НИИ-9, НИИ-10, ИФХАН, ГЕОХИ и др.), конструкторских и проектных организаций.

Позднее, в связи с болезнью и постепенным отходом от активной деятельности Б. П. Никольского, председателем КНТС с 1977 г. стал директор Радиевого института Л. Н. Лазарев. К этому времени задачи КНТС существенно изменились, и основные усилия были направлены на решение проблем отработавшего ядерного топлива энергетических реакторов ВВЭР-1000 и создание завода РТ-2. Этой проблеме посвящена следующая статья.

НЕБОЛЬШОЕ ПОСЛЕСЛОВИЕ

Все технологические разработки были связаны с длительными командировками сотрудников института на комбинаты - в Челябинск, Томск, Красноярск. Часто, особенно в периоды стендовых испытаний и промышленных внедрений, выезжали целые бригады, обеспечивавшие多月есячные круглосуточные работы. Эти трудные условия в отрыве от дома, выполнение сложной, часто совершенно неизведанной работы, с постоянным сознанием ответственности и пониманием важности и необходимости скорейшего получения результата, создавали совершенно особую, дружную и творческую "командировочную" атмосферу.

В первые годы, до 1954-1955 гг., когда выезд на комбинат был крайне ограничен, частые смены командированных бригад не рекомендовались. Поэтому в эти годы длительность каждой командировки составляла 3-4 месяца, а в дальнейшем сократилась до 2-2.5 месяцев, после чего выезжала сменная бригада. Но общий состав "выезжающих" был достаточно ограничен. Поэтому среди названных в этом разделе сотрудников, многие в сумме провели на комбинатах по несколько лет.

В этих условиях формировались и спланивались коллективы, вырастали высококвалифицированные специалисты, умеющие принимать ответственные решения, которые на многие годы составили основу, школу радиохимиков Радиевого института. Не случайно, именно среди них, выросли многие из будущих руководителей лабораторий и отделов института. Только среди упомянутых выше сотрудников можно назвать такие фамилии: В. И. Андреев, С. А. Бартенев, Н. Б. Высокоостровская, Б. Я. Зильберман, Е. И. Ильенко, Л. И. Крылов, Н. В. Куценко, Р. И. Любцев, Э. М. Пазухин, В. П. Попик, В. А. Старченко, Н. С. Тихонов, А. М. Трофимов, Е. А. Шашуков, Л. Б. Шпунт, В. Г. Шумков.

Е. И. Ильенко

ПЕРЕРАБОТКА ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РЕАКТОРОВ

Л. Н. Лазарев

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ЗАВОДА РТ-2

С переходом на экстракционную технологию в конце 70-х - начале 80-х годов для научно-исследовательских институтов задачи модернизации плутониевых заводов были практически исчерпаны. Дальнейшие разработки перешли в руки эксплуатационного персонала. В то же время неограниченные потребности в развитии радиохимической технологии имелись в области регенерации отработавшего топлива АЭС.

Согласно концепции развития атомной энергетики СССР планировался замкнутый топливный цикл. Плутоний, накапливавшийся в легководных реакторах, предполагалось выделять для использования в реакторах на быстрых нейтронах. Обогащенный уран из отработавшего топлива также подлежал повторному использованию. Для решения этих задач намечалось строительство нескольких заводов по регенерации отработавшего топлива.

Введенный в эксплуатацию в 1976 г. на ПО "Маяк" опытно-промышленный завод РТ-1 успешно решал задачи возврата урана из топлива с высоким и средним обогащением, а также переработки топлива АЭС с реакторами ВВЭР-440. Дальнейшее развитие атомной энергетики СССР и стран СЭВ планировалось главным образом на базе реакторов ВВЭР - 1000. Задача переработки топлива этих реакторов потребовала строительства нового радиохимического завода, получившего наименование РТ-2. Местом его создания был определен ГХК (Красноярск-26). Радиевому институту руководством Министерства поручалась роль головной организации по научно-техническому сопровождению проектирования и ввода в эксплуатацию этого завода. Для действующего при Радиевом институте Координационного научно-технического совета по радиохимической технологии основной задачей стало создание завода РТ-2. Этому способствовало включение в состав совета представителей всех участвующих в разработке научно-исследовательских, конструкторских, проектных и промышленных организаций. Этот совет работает и в настоящее время.

Технический проект завода был разработан ВНИПИЭТ на основе исходных данных, подготовленных Радиевым институтом. Роль ведущей конструкторской организации по аппаратуре завода выполнялась Свердловским НИИХИММАШ.

Строительство завода РТ-2 началось в 1975 г. В 1985 г. в здание 1 завода, где расположено хранилище отработавшего топлива, начали поступать сборки с АЭС.

При разработке технологии завода РТ-2 использовался весь ранее накопленный опыт создания и эксплуатации оборонных производств и завода РТ-1. Важным результатом освоения экстракционной технологии на радиохимических заводах ПО "Маяк", ГХК и СХК было получение богатейшего опыта создания и эксплуатации различных типов экстракционного оборудования: смесителей-отстойников с пульсационным и механическим перемешиванием, а также пульсационных колонн. Многие технические решения, например по узлам выдачи конечной продукции, упариванию высокоактивных растворов, системам очистки воздуха от аэрозолей и т. д. нашли применение в проекте завода РТ-2.

Роль головного технологического института в программе создания завода РТ-1 принадлежала ВНИИНМ. Однако из-за трудностей, встретившихся на этапе освоения технологии, по инициативе руководства комбината (Б. В. Брохович, Б. В. Никипелов) ряд исследований был выполнен в Радиевом институте. Так, например, сравнивались показатели экстракционного процесса при использовании различных разбавителей. Было исследовано поведение в процессе технеция и палладия и их влияние на распределение плутония. Казавшееся аномальным накопление палладия в межфазных образованиях было объяснено присутствием серы в составе разбавителя ТБФ. Изучено распределение в схеме иода-129, что позволило отказаться от применения диоксида азота для его обдувки на этапе подготовки исходного раствора. Были получены данные, обеспечившие выдачу предложений по локализации трития в системе потоков водных растворов.

Возможность таких исследований была обеспечена тем, что в гатчинском технологическом филиале института имела возможность моделирования технологии регенерации топлива. Созданные в горячих камерах экспериментальные стенды позволяли имитировать все узлы основной технологии и обработки отходов.

Возвращаясь непосредственно к истории подготовки проекта нового завода по регенерации отработавшего топлива, следует отметить, что он не мог быть простым повторением завода РТ-1 в привязке к новой площадке по ряду причин:

- сборки ВВЭР-1000 по весогабаритным характеристикам, наличию поглощающих элементов, обогащению урана, планируемому выгоранию и накоплению плутония существенно отличаются от сборок ВВЭР-440;
- значительно большие масштабы производства, поскольку мощность первой очереди завода РТ-2 была принята 1500 т по урану в год и намечалось дальнейшее развитие производства (мощность завода РТ-1 составляла 300-400 т/год);
- необходимость более глубокого решения задач конечной изоляции радиоактивных отходов и ограничения их воздействия на окружающую среду.

Первый из этих моментов потребовал разработки новых транспортных средств (ВНИПИЭТ), дистанционно управляемых механизмов для обеспечения манипуляций со сборками (ЦКБМ), неразрушающего контроля отработавшего топлива (Радиевый институт, П. И. Федотов, Б. А. Бибичев, Н. М. Казаринов).

Планируемая производительность потребовала разработки усовершенствованного высокопроизводительного оборудования, в частности для головных операций рубки - растворения. Так, ЭНИКМАШ сконструировал новый агрегат для механического измельчения топлива. На основе принципов очень надежных кольцевых аппаратов-растворителей с пневматическим удалением нарубленных оболочек твэлов, использованных на заводе РТ-1, - СКБ ГИТ АН СССР создал новую модель с повышенной производительностью. Радиевым институтом была предложена технология процесса растворения (В. И. Андреев) и приняты меры по уменьшению нагрузки на линию очистки выделяющихся газов (В. К. Исупов, А. Б. Колядин, В. К. Веселов, В. Я. Мишин, В. В. Гаврилов, В. А. Треушченко, Л. Б. Фицук, И. О. Лашевский и др.).

Обеспечение ядерной безопасности при больших масштабах переработки также потребовало дополнительных исследований. Эти вопросы решались ФЭИ при участии группы специалистов Радиевого института (В. Т. Ипполитов, В. А. Рубченя, В. Н. Душин, Е. В. Королев).

Чтобы избежать необходимости создания многих параллельных технологических линий, в качестве экстракторов первого цикла были приняты аппараты колонного типа. Решение основывалось на требовании высокой производительности в сочетании с задачей обеспечения ядерной безопасности. Принимались во внимание также условия ограничения радиационного воздействия на экстрагент.

Экстракционные колонны, отвечающие требованиям завода РТ-2, к тому времени еще не были созданы. Это привело к развитию двух направлений разработок: аппаратов с пульсационным перемешиванием (ВНИИНМ, СвсрдНИИХИММАШ) и вибрационных колонн (НИИХИММАШ, ИТОХП ЧСАН, РИ). На стенде, созданном в Радиевом институте, были испытаны модели вибрационных колонн (Л. Б. Шпунт, Е. Н. Мишин, Н. И. Ломаев, Л. Г. Матюхов, С. Г. Стрижов, Б. В. Андронов и др.). Исследования показали, что по удельной производительности они в несколько раз превосходят пульсационные колонны. Это было особенно важно с точки зрения обеспечения ядерной безопасности. Испытания на ресурс работоспособности узла привода вибрационной колонны, выполненные на ГХК, дали удовлетворительные результаты.

Выбор герметичных аппаратов типа смеситель-отстойник для последующих экстракционных циклов основывался на большом опыте их использования на ГХК в промышленных условиях и наличии конструкторской документации на целый ряд аппаратов этого класса (НИИХИММАШ).

В части химической технологии экстракционных процессов испытания в гатчинском технологическом отделении Радиевого института (Р. И. Любцев, Б. Я. Галкин, В. Н. Романовский и др.) показали достижимость требований очистки и разделения на двух экстракционных циклах в линиях урана и плутония.

Важное значение для обоснования существенных деталей экстракционной схемы имели также результаты экспериментальных работ, выполненных лабораторией М. Ф. Пушленкова (впоследствии руководитель Б. Я. Зильберман) на ПО "Маяк" с участием персонала завода 235 и ЦЗЛ.

Необходимо отметить, что уже в то время была установлена необходимость выведения в отдельный продукт нептуния, а также показано влияние технеция на химические процессы.

Упаривание всех видов радиоактивных растворов было ориентировано на за цикловывание азотной кислоты. Эта часть работы была выполнена под руководством Б. Я. Зильбермана и В. Ф. Сапрыкина. Для проведения экспериментальных работ использовался стенд, созданный в СвсрдНИИХИММАШ.

С учетом крупномасштабного характера производства и перспективы длительной эксплуатации завода необходимо было предусмотреть, кроме обычной газоочистки, очистку газовых выбросов с узлов рубки и растворения от криптона-85 и иода-129. Требования по их удержанию определены Д. И. Гусевым. Технология улавливания указанных радионуклидов была разработана под руководством В. К. Исупова.

Для удаления жидких радиоактивных отходов всех уровней активности первоначально планировалось использовать метод закачки в глубинные гидроизолированные горизонты. Этот метод, разработанный ВНИИПИПТ и ИФХАН, уже применялся на ГХК для изоляции отходов, получаемых на оборонном радиохимическом заводе. Одним из оснований для выбора ГХК как места создания завода РТ-2 как раз и было наличие там разведанных геологических формаций, пригодных для закачки отходов.

Регенерация топлива АЭС имеет смысл лишь в том случае, если в топливный цикл возвращается не только уран, но и плутоний. Поскольку программа создания АЭС с реакторами на быстрых нейтронах не обеспечивала потребления плутония с завода РТ-2, было достаточно очевидно, что решение проблемы может быть найдено только при использовании плутония в реакторах ВВЭР. Эта идея, естественно, не новая, но в СССР она не получила развития. В то же время, главным образом, в Западной Европе, были созданы основы для широкого применения плутония в реакторах на тепловых нейтронах.

В качестве одного из основных аргументов против такого решения приводились экономические показатели. Утверждалось, что плутоний целесообразно использовать только в том случае, если цена сборки с уран-плутониевым топливом не будет превосходить стоимость урановой сборки. Выполнение такого требования мало реально, но оно не является обоснованным. При такой постановке вопроса не учитывается необходимость решения судьбы плутония, неизбежно накапливаемого в урановом топливе малого обогащения. Сотрудникам Радиевого института (Л. Н. Лазарев, Л. Н. Любцев) удалось привлечь внимание и получить поддержку руководства Министерства к данной проблеме. Это нашло отражение в развитии соответствующих исследовательских программ и проекте завода РТ-2.

Собственные исследования Радиевого института по вопросам технологии уран-плутониевого топлива были направлены, главным образом, на получение порошков оксидного топлива плазмохимическим методом (Д. Н. Быховский, В. А. Старченко, В. Г. Васильев, Ю. И. Нестеров, М. А. Кузьмина, Г. С. Новиков, Э. М. Рошинская, Ю. И. Ибрагимов, К. Е. Гильбо и др.). Испытания, проведенные во ВНИИНМ, показали, что полученные таким путем материалы вполне пригодны для изготовления топливной композиции.

Задачей ближайших лет является изготовление нескольких топливныхборок со смешанным топливом и установка их на испытание в реактор Балаковской АЭС. В этой работе уже принимает участие ряд отечественных организаций и готовится вопрос о международной кооперации.

Широкий размах строительства завода РТ-2 пришелся на начало 80-х годов. Но в дальнейшем ряд причин экономического и политического характера привел к замиранию работ, а в дальнейшем и к их прекращению. С 1990 г. на площадке РТ-2 выполнялось только то, что было необходимо для консервации уже построенных зданий и сооружений. Да и эти работы финансировались в недостаточном объеме.

Минсредмаш (в настоящее время Минатом) не отказался от идеи замкнутого топливного цикла и, соответственно, задачи создания завода РТ-2. Необходимо было пересмотреть проект завода и решить ряд новых задач. Поручение на подготовку нового проекта Радиевому институту, ГХК и ВНИПИЭТ было дано Министерством в начале 1992 г. Разработка технологии завода РТ-2 осуществлялась большим коллективом сотрудников Радиевого института, при этом основная роль, несомненно, принадлежит гатчинскому отделению. Руководителями работ были Л. Н. Лазарев, Р. И. Любцев, Б. Я. Галкин, В. Н. Романовский, а позднее также и В. А. Старченко.

Следует отметить также ряд сотрудников института, внесших существенный вклад в те работы по технологии РТ-2, которые не были упомянуты в тексте статьи ввиду краткости изложения: М. К. Абдулахатов, Г. А. Акопов, Ф. Э. Гофман, А. П. Криницын, В. И. Орлов, В. П. Попик, Ю. А. Похитонов и др.

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ОБРАЩЕНИЯ С РАДИОАКТИВНЫМИ ОТХОДАМИ И ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ПРОИЗВОДСТВ

В период реформирования нашего государства вопросы экологической безопасности стали привлекать огромное внимание общественности. Отчасти это было обусловлено реальными потребностями в защите окружающей среды, хотя подавляющее большинство населения совершенно дезинформировано в отношении значимости различных техногенных факторов риска. Главной же причиной такой ситуации явилось манипулирование общественным мнением в интересах внутривполитической борьбы. В результате в сознание населения Красноярского края было внедрено представление о существовании опаснейших радиоактивных загрязнений в зоне воздействия ГХК и возможных катастрофических последствиях создания завода РТ-2.

На протяжении всего периода деятельности комбината его службами осуществлялся радиационный контроль в широкой зоне вокруг комбината. Лаборатория Радиевого института, которой руководил Л. И. Геденов (в последнее время начальник лаборатории

В. П. Тишков), в течение многих лет оказывала помощь ГХК в контроле окружающей среды, главным образом путем передачи методик анализа тех радионуклидов, определение которых представляет наибольшие трудности.

В последние годы под руководством Ю. В. Кузнецова лабораториями В. К. Легина и В. П. Тишкова был выполнен большой объем работ по изучению радиационной обстановки и совершенствованию системы мониторинга. В результате совместными усилиями Радиевого института и ГХК было показано, что, вопреки утверждениям многочисленных защитников окружающей среды, воды р. Енисей, донные отложения, намывные и периодически затопляемые береговые участки не загрязнены в значительной степени плутонием. Главным итогом проделанной работы явилось опровержение заявлений о том, что строительство завода РТ-2 недопустимо из-за уже существующего радиоактивного загрязнения района Красноярска и системы р. Енисей.

В целях формирования объективного общественного мнения отделом научно-технической информации института (руководитель Е. И. Ильенко) совместно с Радиологическим центром ГХК проведена подготовка ряда информационных материалов. Эта работа требует продолжения и постоянного внимания.

Самой сложной современной задачей в области ядерного топливного цикла является обеспечение безопасной изоляции радиоактивных отходов. Принятый в первом проекте завода РТ-2 метод удаления жидких радиоактивных отходов в подземные горизонты противоречит недавно принятым природоохранным законам России. Поэтому потребовался радикальный пересмотр всей системы обращения с отходами на заводе РТ-2 и, в первую очередь с высокоактивным рафинатом первого экстракционного цикла.

В мировой и отечественной (завод РТ-1) практике схема обращения с этим рафинатом основывается на остекловывании и последующем захоронении после периода выдержки для снижения тепловыделения. Такой подход не представляется оптимальным. К его основным недостаткам следует отнести:

- отсутствие уверенности в сохранении изолирующих свойств стекла на протяжении времени, необходимого для достаточно глубокого распада наиболее долгоживущих радионуклидов;
- при совместном отверждении нефракционированных ВАО трудность выбора других, более устойчивых, матриц для включения долгоживущих радионуклидов (например, типа синрока) ввиду их принадлежности к различным группам химических элементов;
- нереальность принятия решения об окончательном захоронении высокоактивных остеклованных отходов, содержащих ультрадолгоживущие нуклиды.

Поэтому для завода РТ-2 потребовалась новая стратегия обращения с высокоактивными отходами. Л. Н. Лазаревым было предложено включить в технологическую схему узел экстракционного разделения радионуклидов из ВАО с использованием дикарболлида кобальта, технология которого была разработана в Радиевом институте.

Первоначально этот процесс предполагалось использовать с целью выделения цезия-137 и стронция-90 для их технического использования. Экстракция с применением хлорированного дикарболлида кобальта (ХДК) имеет существенные особенности с химической точки зрения. Извлечение катионов в органическую фазу с высокополярным разбавителем обусловлено образованием ионных пар с анионом ХДК. Использование синергетных органических добавок обеспечивает экстракцию редкоземельных и трансплутониевых элементов.

Указанная технология позволяет разделить высокоактивный рафинат первого цикла экстракции урана и плутония на три фракции:

- цезия и стронция;
- трансплутониевых и редкоземельных элементов;
- оставшейся части радионуклидов, а также нерадиоактивных солей в виде рафината цикла разделения.

Первая из этих фракций, на протяжении нескольких сотен лет определяющая радиотоксичность отходов, может быть остеклована и после выдержки в течение десятков лет захоронена.

Вторая фракция подлежит отверждению в наиболее устойчивые формы и длительно-му контролируемому хранению до тех пор, когда будет достаточно обоснована возможность захоронения. В качестве альтернативного варианта по отношению к захоронению может рассматриваться ядерная трансмутация, для которой этап химического выделения является первым необходимым шагом.

Третья фракция подлежит отверждению и захоронению.

В число наиболее опасных долгоживущих радионуклидов, в отдаленном времени определяющих радиотоксичность отходов, входят также нептуний и технеций. Особенности химических свойств этих элементов приводят к тому, что вывести полностью их в рафинат первого цикла не удастся и существует возможность "размазывания" их по различным продуктам.

Присутствие значительной доли нептуния и технеция в рафинате потребовало бы применения специфических приемов их выделения в процессе фракционирования отходов, что явно неприемлемо. Поэтому общая схема обращения с отходами предусматривала не только фракционирование рафината первого цикла, но и глубокое извлечение нептуния и технеция при экстракции урана и плутония трибутилфосфатом с последующим выведением в самостоятельные потоки.

Предпосылки для такого решения были созданы в работах, проводившихся в 1972 г. под руководством Б. Я. Галкина и Б. Я. Зильбермана. В последующем в исследованиях Б. Я. Зильбермана и Ю. С. Федорова было установлено, что обеспечение полного извлечения технеция приводит к полному извлечению и циркония, а это, в свою очередь, упрощает концентрирование высокоактивного рафината. Такой первый цикл получил наименование модифицированного Пурекс-процесса.

Исходя из периодов полураспада и индексов опасности нептуния и технеция, в схеме обращения с отходами завода РТ-2 предусмотрено их объединение с фракцией трансплутониевых элементов.

Схема разделения радионуклидов обеспечивает реальную возможность окончательной изоляции двух фракций и создает условия для глубокой проработки вопросов безопасного обращения с такими наиболее долгоживущими и наиболее опасными компонентами отходов, как нептуний, америций и технеций. К этой же категории относится и иод-129, выделение которого предусмотрено в системе газоочистки завода РТ-2.

Изложенный подход в определенной мере противоречит положениям МАГАТЭ о том, что нынешнее поколение не должно оставлять в наследство свои проблемы потомкам. Но жизнь человека слишком коротка для решения таких сложных вопросов. Во всех сферах технической и хозяйственной деятельности лишь труд многих поколений позволит найти решение сложнейших экологических проблем.

Как уже было отмечено, применение остекловывания предусмотрено схемой обращения с высокоактивными отходами завода РТ-2 как метод отверждения фракции цезия и стронция. Работами в этом направлении в Радиовом институте руководит А. С. Алой. Поскольку цезий и стронций выделяются в форме практически чистых концентратов, были проведены исследования, направленные на оптимизацию состава боросиликатного стекла с повышенным содержанием этих радионуклидов.

С учетом ограничений по тепловыделению была установлена область составов в соответствующей диаграмме плавности многокомпонентной системы, которая позволяет реализовать технологический процесс варки весьма устойчивых к выщелачиванию и к кристаллизации боросиликатных стекол, содержащих 10-15 масс. % продуктов деления.

Выбор надежных материалов, в которые целесообразно включать долгоживущие радионуклиды перед захоронением, может быть основан на принципе геологического подобия. При этом в качестве матрицы, в которую включается индивидуальный радионуклид или целая фракция, выбирается искусственный аналог наиболее устойчивых природных минералов. Выбор таких материалов и разработка методов их синтеза с использованием горячего газостатического прессования проводится под руководством Е. Б. Андерсона и В. А. Стар-

ченко с участием Б. Е. Буракова, В. Г. Васильева, В. К. Исупова и других сотрудников института.

При любой схеме обращения с отходами удаление в геологические формации будет ее составной частью. Однако к началу работы над второй редакцией проекта завода РТ-2 отсутствовали сведения о том, имеются ли в районе расположения завода скальные формации, пригодные для создания пункта захоронения отверженных отходов. От решения этого вопроса зависела судьба завода, так как перевозка высокоактивных отходов в другие регионы нереальна. Поэтому в 1993 г. было начато изучение геологических фондовых материалов, а затем и поисковые исследования.

Под руководством Е. Б. Андерсона в указанном направлении работает коллектив геологов, геохимиков и радиохимиков института - В. Г. Савоненков, Ю. М. Рогозин, С. И. Шабалев и другие. При координации усилий со стороны Радиевого института в исследованиях участвует целый ряд организаций. Основные из них - ВНИПИЭТ, Санкт-Петербургский университет, Красноярский филиал ГЦ "Природа", ГХК, ГИН РАН, ИГЕМ РАН. В результате вблизи площадки РТ-2 были выявлены массивы гранитоидов, перспективные для дальнейшего изучения. Эти работы будут продолжены.

На основании данных, представленных Радиевым институтом, ВНИПИЭТ подготовил технико-экономическое обоснование нового проекта РТ-2. В 1996 г. этот этап проектирования был завершен согласованием во всех центральных и краевых надзорных органах. Рассмотрение ТЭО привело к появлению многочисленных и, в ряде случаев, очень серьезных замечаний, которые надлежит учесть на стадии разработки Технического проекта. При защите и согласовании ТЭО ведущую роль со стороны Радиевого института играл В. А. Старченко.

Задача научно-технического обеспечения разработки обновленного варианта проекта завода РТ-2 должна стать центральным направлением деятельности технологов Радиевого института на весь период создания и освоения этого важнейшего промышленного объекта.

Идея осуществления фракционирования отходов на заводе РТ-2 - дело будущего. В то же время эти подходы оказались плодотворными применительно к задачам переработки уже накопленных отходов на комбинате "Маяк". В результате многолетней производственной деятельности радиохимического завода там образовалось большое количество жидких сильнозасоленных высокоактивных отходов. Для отверждения их введен в действие цех остекловывания.

Как впервые показал Е. Г. Дрожко, ныне заместитель директора комбината, эффективность работы установки остекловывания могла бы быть значительно повышена при условии создания производства по подготовке отходов к остекловыванию.

Задача на комбинате "Маяк" сводится к тому, чтобы сконцентрировать в одной фракции основную долю радиоактивных компонентов отходов, а нерадиоактивные соли с остаточными количествами радионуклидов перевести в категорию среднеактивных отходов. В этом случае будет повышена удельная радиоактивность получаемого стекла и значительно ускорится ликвидация запасов жидких радиоактивных отходов.

Для решения поставленной задачи Радиевым институтом было предложено использовать упомянутый выше процесс экстракции радионуклидов с применением ХДК, который прошел стадию испытаний на укрупненной лабораторной установке с применением реальных высокоактивных отходов от переработки облученного ядерного топлива.

Первоначальная химическая идея процесса была сформулирована чехословацкими исследователями С. Гержманеком и М. Кыршем. Однако в Чехословакии не существовало радиохимических производств, отсутствовал соответствующий технический опыт и не было условий для проработки сложнейшего комплекса вопросов, решение которых было необходимо для перехода от метода разделения в аналитической химии к крупномасштабному производству.

Разработка технологии проводилась в Радиевом институте большим коллективом исследователей, включавших Л. Н. Лазарева, Р. И. Любцева, Б. Я. Галкина, В. Н. Романовско-

го, В. М. Есимантовского, Д. Н. Шишкина, В. В. Лякина, В. А. Бабаина и многих других специалистов.

Внедрению технологии на комбинате "Маяк" предшествовал ряд подготовительных этапов с переходом от опытов в горячих камерах к испытаниям на опытно-промышленной установке. В организации работ приняли большое участие члены руководства комбината и завода Б. В. Никипелов, М. В. Гладышев, Е. Г. Дзекун; весомый вклад в выполнение экспериментальных работ был внесен специалистами ЦЗЛ и завода (Ю. З. Прокопчук, В. А. Мезенцев и многие другие). На всех этапах испытаний, а затем промышленного освоения процесса работала бригада Радиевого института во главе с В. М. Есимантовским. Важнейшим условием внедрения технологии была организация производства ХДК, которую курировал Ю. А. Копалкин.

В результате впервые в мировой практике в августе 1996 г. была введена в эксплуатацию промышленная установка фракционирования высокоактивных отходов. На ней достигнуты высокие показатели извлечения цезия и стронция. Дальнейшее развитие технологии фракционирования для комбината "Маяк" будет направлено на расширение круга радионуклидов, извлекаемых из высокоактивных рафинатов.

В разработках технологии обращения с РАО, кроме упомянутых в статье, принимали участие также следующие сотрудники Радиевого института: Г. А. Акопов, А. Н. Визный, Д. И. Гусев, З. Г. Гритченко, Ю. Л. Егоров, А. С. Ильин, О. А. Исакова, А. П. Криницын, М. Н. Макарычев-Михайлов, Ю. А. Пантелеев, Ю. Н. Поспелов, В. П. Рамзаев, В. И. Рязанцев, З. Н. Симоняк, Ан. В. Степанов, В. Н. Струков, Н. С. Тихонов, Т. Г. Ткаченко, А. В. Трофименко, О. Н. Шувалов, З. С. Шулепко, Н. Н. Щепетильников.

РАЗВИТИЕ СТРУКТУРЫ ИНСТИТУТА И ОРГАНИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

В период экстремальных усилий по созданию первого отечественного оборонного радиохимического завода в институте было налажено очень четко организованное распределение задач и взаимодействие групп исследователей первоначально под непосредственным руководством В. Г. Хлопина, а затем Б. А. Никитина. Впоследствии, в силу ряда причин, и, в первую очередь, в связи с некоторым смягчением обстановки мобилизованности произошло некоторое обособление отдельных лабораторий по разработке конкретных технологических проблем.

Наиболее актуальные в 50-х - 60-х годах исследования по совершенствованию ацетатной технологии и внедрению сорбционной технологии аффинажа плутония выполнялись в лабораториях Б. П. Никольского, В. И. Парамоновой и А. А. Гринберга.

В начале 50-х годов разработка экстракционной технологии выделения плутония с применением различных простых эфиров осуществлялась в лаборатории Б. А. Никитина, а затем его преемника В. М. Вдовенко. Однако с появлением новых типов экстрагентов и, в первую очередь трибутилфосфата, ведущим коллективом в области экстракционных процессов стала лаборатория М. Ф. Пушленкова.

Под руководством А. А. Гринберга продолжалось исследование химии оксалатов. Методы переработки марганцево-ниобиевых пульп, разработанные в этой лаборатории Д. Н. Быховским и Г. И. Петржак, имели существенное значение, но все же являлись достаточно частной задачей.

Формально радиохимический отдел в институте существовал, но взаимодействие в нем ограничивалось некоторыми совместными межлабораторными работами и периодически проводимыми семинарами.

Возложение на Радиевый институт обязанностей головного по проблемам замены осадительно-сорбционной технологии на экстракционную и создания завода РТ-2 потребовали коренной реорганизации технологических исследований, а также значительного расширения объема выполняемых работ. Относительно образования Координационного науч-

но-технического совета при Радиевом институте по указанным проблемам уже упоминалось в приведенной выше статье о совершенствовании осадительной технологии.

Важным шагом в развитии экспериментальных возможностей института и обеспечении комплексного подхода в технологических разработках было создание в 1967 г. в г. Гатчина на базе корпуса 6 филиала Ленинградского физико-технического института (впоследствии Ленинградский институт ядерной физики АН СССР) нового крупного научно-исследовательского подразделения Радиевого института. Формальное наименование его несколько раз изменялось, но существо оставалось постоянным. Задачей этого отделения являлась разработка и испытания в укрупненно-лабораторном масштабе технологических схем радиохимических производств. В период становления, в 1967-1972 гг., руководителем отделения был Л. Н. Лазарев.

Благодаря наличию в корпусе цепочки горячих камер, связанных с боксами, удалось создать миниатюрные модели не только отдельных технологических узлов, но и действующих макетов целых радиохимических заводов.

Отработка технологии на таких стендовых установках проводилась с использованием реальных высокорadioактивных материалов. Летом 1972 г. в гатчинское отделение впервые для технологических экспериментов были доставлены десятки килограммов ОЯТ с Нововоронежской АЭС.

Для выполнения экспериментов создавались установки, которые и в аппаратурном отношении имитировали производство. Инженерное воплощение технологического проекта было новым шагом для института. Разработка полной схемы, начиная от входа сырья и до выхода конечного продукта, с решением вопросов об очистке всех сбросов и выбросов в окружающую среду, кондиционирования всех видов отходов, аналитического и технологического контроля процессов, внедрения элементов автоматизации и т. д. была необходима для представления всеобъемлющих исходных данных, обеспечивающих проектирование завода РТ-2.

Такой подход вначале встретил неприятие со стороны руководителей существовавших ранее технологических лабораторий. Выдвигались требования о закреплении одной-двух горячих камер за каждой из этих лабораторий для проведения в них независимых исследований. Естественно, подобное решение было нецелесообразным. Эти противоречия, не носившие, правда, острого характера, были исчерпаны с назначением в 1972 г. директором института Л. Н. Лазарева. Его преемниками в гатчинском отделении были сначала Р. И. Любцев, а затем Б. Я. Галкин.

Рациональным решением вопроса о взаимодействии расположенных в Ленинграде "традиционных" лабораторий и филиала был путь их специализации и вхождения в общий проект на соответствующих этапах технологических схем.

Чрезвычайно сложный характер завода РТ-2 как объекта разработки потребовал существенных шагов по развитию института. Необходимо было вернуться к более широкой кооперации с включением в работу представителей физической части института, геологов, геохимиков, экологов, аналитиков и т. д. Предыстория института обеспечивала для этого благоприятную базу. Однако явно существовал ряд задач, решение которых трудно было обеспечить привлечением имевшихся собственных сил института или при сотрудничестве со смежными организациями. В последнем случае внутри института необходимо было иметь лаборатории или хотя бы квалифицированных экспертов по соответствующим областям науки и техники. Все это потребовало принятия существенных организационных мероприятий.

В 1972 г. была создана новая структура института с организацией специализированных отделов и созданием ряда новых лабораторий. Эта работа продолжалась вплоть до настоящего времени. Вероятно, внимание читателя было бы излишне перегружено полным перечислением всех преобразований с их привязкой к определенным датам и событиям. Поэтому здесь будет дан перечень, главным образом, новых направлений работ.

Лаборатории В. И. Парамоновой и М. Ф. Пушленкова сохранили свой прежний профиль. В лаборатории А. А. Гринберга, которой после его смерти руководила Г. И. Петржак,

появилось новое направление, связанное с радиохимическими задачами в торий-урановом топливном цикле (Л. Б. Шпунт). Эта проблема не получила дальнейшего развития, однако возврат к ней в дальнейшем вполне вероятен. С 1974 г. этой лабораторией руководит В. П. Попик. Лаборатория Б. П. Никольского, которой впоследствии руководил его ученик В. И. Андреев, существенно изменила свой профиль. В ней главное внимание стало уделяться изучению радиационно-химических процессов, важных для радиохимической технологии.

Во вновь организованном отделе контроля окружающей среды и радиоактивных отходов (руководитель Ю. В. Кузнецов) была создана лаборатория по проблеме отверждения жидких высокоактивных отходов (Е. А. Шашуков, А. С. Алой). Радиологическая лаборатория под руководством доктора медицинских наук Д. И. Гусева имела задачу разработки требований к технологическим процессам с точки зрения обеспечения радиационной безопасности. Внимание уже существовавшей лаборатории А. М. Трофимова (затем руководитель А. А. Палладиев) было сконцентрировано на проблеме газоочистки. Лаборатория В. Н. Щетковскова (впоследствии руководитель В. Е. Вяткин) выполняла работы в области обращения с низкоактивными отходами. Лаборатория Л. И. Геденова (преемник - В. П. Тишков) обеспечивала вопросы контроля окружающей среды. В этом же направлении после смерти Д. И. Гусева работала его лаборатория уже под руководством В. К. Легина.

В аналитическом отделе, первым руководителем которого был А. А. Липовский, а его преемником стал Е. А. Шашуков, ряд разработок был тесно связан с задачами радиохимической технологии. Так, в химической лаборатории А. В. Степанова и масс-спектрометрической Л. М. Крижанского (затем Б. Н. Беляева) были развиты прецизионные методы контроля количества и изотопного состава делящихся и воспроизводящих материалов. Одна из бывших лабораторий физического отдела института была переориентирована на физические методы контроля, главным образом рентгенофлуоресцентный анализ (руководитель В. В. Бердилов, затем В. П. Майоров).

В физическом отделе была создана лаборатория неразрушающего контроля отработавшего ядерного топлива (П. И. Федотов) в интересах входной паспортизации сборок, поступающих на завод РТ-2. В решении вопросов обеспечения ядерной безопасности важное значение в установлении эффективного сотрудничества с ФЭИ имели исследования физиков-теоретиков нашего института.

Все эти лаборатории тесно сотрудничали с соответствующими лабораториями гатчинского филиала:

- технологической (Б. Я. Галкин, В. Н. Романовский, Ю. А. Похитов, В. Ф. Сапрыкин);
- аналитической (Р. И. Любцев, Г. А. Акопов);
- физических методов контроля и автоматизации (В. В. Бердилов, В. И. Орлов);
- газоочистки (В. К. Исупов).

Такая организация работ имела место в период работы над первым проектом завода РТ-2. В этих исследованиях принимало участие более половины всех научных сил института. К сожалению, не все они дожили до 75-летнего юбилея института. Но мы с огромной благодарностью вспоминаем всех участников разработок.

К не меньшему сожалению, приходится отметить и тот факт, что в современных катастрофических условиях отсутствия финансирования гибели и некоторые научные коллективы, которые заслуживали лучшей судьбы.

В последние годы, когда главной задачей стал пересмотр проекта завода РТ-2, в работы по проблеме захоронения радиоактивных отходов плодотворно включились геологи института (Е. Б. Андерсон, В. Г. Савоненков) и радиохимики (Ю. М. Рогозин). Подчеркивать высокую значимость этих работ нет необходимости.

Возвращаясь к вопросу развития экспериментальной базы института, следует отметить, что в 1984 г. в Ленинграде был введен новый лабораторный корпус, позволивший улучшить условия работы в ряде лабораторий. Однако главные перспективы были связаны с созданием нового филиала института в г. Сосновый Бор Ленинградской области. Необходимость его строительства была обусловлена ограниченностью возможностей проведения

исследований в Гатчине (расположение на территории ЛИЯФ, устарение корпуса, отсутствие необходимой санитарно-защитной зоны и т. д.).

Первая очередь строительства в Сосновом Бору была завершена вводом трех корпусов в 1989-1990 гг. Со стороны института работы курировались Н. И. Ломаевым и Г. Д. Волгиным. Однако, по существу, это был лишь подготовительный этап. Главное - строительство корпуса для работ с высокорadioактивными материалами - было еще впереди.

Казалось, что складывается весьма благоприятная ситуация для создания современного комплекса. Наличие в Сосновом Бору мощной строительной организации Минсредмаша было лишь одной из важнейших предпосылок. Расположение рядом Ленспецкомбината решало вопрос об удалении радиоактивных отходов. К тому же, в 1988 г. это производство в форме опытного завода вошло в состав Радиевого института. Лучшей базы для развития проблемы обращения с радиоактивными отходами не могло быть. Ленспецкомбинат обладал неплохой технической базой и опытными, инициативными инженерными кадрами.

Однако в стране все шире развивалась "перестройка" с ее катастрофическими последствиями. В результате институт потерял опытный завод, а создание экспериментальной базы оборвалось. Остается только надеяться, что в 2022 году наши потомки, подводя итоги столетия Радиевого института, смогут показать, что начало создания экспериментальной базы получило свое дальнейшее развитие.

МЕЖДУНАРОДНОЕ СОТРУДНИЧЕСТВО

Выполнению стоявших перед Радиевым институтом задач способствовала система международных научно-технических контактов. В 70-х и 80-х годах важным ее элементом было сотрудничество со странами СЭВ в рамках Постоянной комиссии по использованию атомной энергии. Институт играл ведущую роль в рабочей группе по обращению с отработавшим топливом и радиоактивными отходами. Руководителем советской делегации в этой группе был Л. Н. Лазарев, а его заместителем Р. И. Любцев.

В силу специфики распределения задач между странами СЭВ в области атомной энергетики наиболее актуальные темы рабочей группы были связаны с вопросами транспортирования отработавшего топлива, что не входило в направление собственных работ института. Однако контакты с исследовательскими центрами СЭВ позволили организовать реальное сотрудничество по таким направлениям, как разработка экстракционных колонн с вибрационным перемешиванием фаз, экстракция радионуклидов с применением хлорированного дикарбонилла кобальта, аналитический контроль и др.

В 90-е годы значительно расширилось взаимодействие Радиевого института с США, странами Западной Европы и Китаем.

Сотрудничество с Департаментом энергетики США осуществлялось, главным образом, по линии российско-американского Комитета по восстановлению окружающей среды и обращению с радиоактивными отходами, в работе которого с первых дней его образования участвовали Л. Н. Лазарев и В. Н. Романовский. Как перед Россией, так и перед США стоит общая задача преодоления негативных последствий для окружающей среды, связанных с деятельностью оборонных радиохимических производств. В ряде технических разработок, таких как, например, разделение высокоактивных отходов, Радиевый институт занимает лидирующее положение. Адаптация методов обращения с радиоактивными отходами к условиям американских ядерных центров осуществляется на контрактной основе. Активную роль в этой работе играют сотрудники института В. М. Есимантовский, Б. Н. Зайцев и И. В. Смирнов.

Контакты с Департаментом энергетики США сделали возможным участие ведущих специалистов Радиевого института в сериях таких крупных международных конференций, как Global, Waste Management, Spectrum, что дает огромный объем самой актуальной научной информации.

Сотрудничество с французским Комиссариатом по атомной энергии развивается в области проблемы обращения с долгоживущими радиоактивными отходами и использования смешанного уран-плутониевого топлива в легководных реакторах. С французской фирмой COGEMA, занимающей самые передовые позиции в мире в области замкнутого ядерного топливного цикла, осуществляется обсуждение проекта завода РТ-2 и возможного его места на международном рынке услуг по репроцессингу топлива. Специалисты COGEMA положительно оценили технологию завода. Сотрудничество с французскими партнерами организовано Р. И. Любцевым, а ведущими специалистами в нем являются Е. Б. Андерсон, В. А. Старченко, В. Ф. Сапрыкин, Д. Н. Быховский, Б. Я. Зильберман и Е. И. Ильенко.

British Nuclear Fuel Limited (BNFL) также является важным партнером Радиового института в области радиохимической технологии, обращения с радиоактивными отходами и защиты окружающей среды. Установленные с этой ведущей фирмой контакты взаимопользуются с точки зрения научной информации и стимулирования технологических исследований. Контакты с BNFL ведутся под руководством Б. Я. Галкина, Е. Б. Андерсона, Ю. В. Кузнецова, В. А. Старченко, Б. Я. Зильбермана.

В Китайской Народной Республике перспективы развития атомной энергетики ориентированы на создание замкнутого топливного цикла. По контракту с Китайской компанией индустрии атомной энергии в гатчинском экспериментальном комплексе института проводятся укрупненные лабораторные испытания технологии, предложенной китайскими специалистами для завода по переработке топлива. Эта работа началась благодаря инициативе Р. И. Любцева, а непосредственно осуществляется под руководством Б. Я. Галкина, В. Ф. Сапрыкина, Б. Я. Зильбермана, Г. А. Аكوпова и В. К. Исупова.

Международное сотрудничество не исчерпывается указанными странами и направлениями, но в краткой статье нет возможностей для более полного их изложения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Перспективы технологических исследований определяются тем, что атомная техника, несмотря на ожесточенную критику, в будущем веке будет играть важную роль в удовлетворении энергетических потребностей. Ядерный топливный цикл не может строиться лишь за счет привлечения все новых количеств природного урана с игнорированием накапливающегося плутония. Атомные энергетические станции, на которых происходит образование плутония, несут ответственность за его дальнейшую судьбу. Поэтому в национальной атомной энергетике должен быть достигнут баланс между реакторами, в которых образуется плутоний, и реакторами, его потребляющими. При таком подходе обеспечивается глубокое использование энергетического потенциала сырья и решается экологическая проблема плутония путем его трансмутации. Задачей радиохимиков-технологов является решение проблем замкнутого топливного цикла. При этом обязательным условием будет решение проблем экологической безопасности.

Таким образом, разработка процессов регенерации отработавшего ядерного топлива в обозримом будущем остается важнейшим направлением работ. В равной мере для замыкания топливного цикла необходимо решить вопросы безопасного производства смешанного уран-плутониевого топлива. Регенерация топлива из последующих циклов его оборота хотя и не должна принципиально отличаться от первичного процесса, будет иметь все же свои особенности, определяемые изменением состава.

Использование принципов фракционирования радиоактивных отходов, содержащих долгоживущие радионуклиды, позволит получить некоторую отсрочку в определении их конечной судьбы. При любом варианте решения этой проблемы задачи выделения индивидуальных радиоэлементов или их групп с переводением в необходимую форму для захоронения или трансмутации потребуют выполнения крупномасштабных поисковых и технологических исследований.

Любая схема обращения с долгоживущими техногенными радионуклидами предполагает захоронение хотя бы части соответствующим образом подготовленных радиоактивных

отходов в глубинные формации Земли. Поэтому потребуется постоянное сотрудничество радиохимиков-технологов с геологами и геохимиками.

На выбор основных технологических решений все большее влияние будут оказывать нормативные требования по обеспечению безопасности. Сейчас трудно предсказать их последующие изменения, поскольку они формируются в значительной мере не на основе объективных оценок факторов риска от различных естественных и техногенных источников опасности. Конъюнктурные политические факторы, к сожалению, существенно влияют на принимаемые регламентирующие документы.

Хотя все эти соображения носят достаточно общий характер, их необходимо принимать во внимание при долгосрочном планировании исследований.

Подводя итоги с точки зрения сегодняшнего состояния технологических работ в институте, можно сделать следующие выводы:

- несмотря на исключительно неблагоприятные условия последних лет, в институте, в основном, сохранен коллектив исследователей и работы не остановлены, что оказалось возможным благодаря традициям Радиевого института и достигнутым результатам в предкризисный период;
- наличие опытных научных кадров и экспериментальной базы позволили технологическому отделению найти свое место в решении актуальных отечественных задач и на рынке международной кооперации;
- жизнеспособность технологического направления связана с возможностью привлечения к работам внутри института специалистов разных направлений;
- широкое взаимодействие с исследовательскими, проектными и конструкторскими институтами обеспечивает выполнение задач головной научной организации;
- постоянные тесные связи с промышленными предприятиями и, в первую очередь с ГХК и ПО "Маяк", необходимы для корректной постановки задач исследований и оценки их результатов.

Несмотря на отмеченные выше положительные моменты, в существующей обстановке глубокого экономического кризиса содержится прямая угроза дальнейшему существованию технологического направления исследований.

Последний вывод звучит весьма пессимистично. На нем трудно закончить юбилейную статью. Но такова реальность момента. Ядерная наука и техника нужны могучему и процветающему государству. Их всестороннее развитие по силам только великим державам. Остается лишь верить в великие потенциальные возможности нашей страны.

НЕКОТОРЫЕ РАБОТЫ В ОБЛАСТИ РАДИОХИМИЧЕСКОЙ ТЕХНОЛОГИИ

ОСОБЕННОСТИ ЭКСТРАКЦИОННОГО ПРОЦЕССА В ТЕХНОЛОГИИ ПЕРЕРАБОТКИ ОБЛУЧЕННОГО УРАНА, ЗАВИСЯЩИЕ ОТ АППАРАТУРНОГО ОФОРМЛЕНИЯ

Л. Б. Шпунт

В начале 60-х годов стала очевидной необходимость замены периодического осадительного процесса переработки облученного урана на более прогрессивный экстракционный. Эта необходимость обуславливалась несколькими причинами, среди которых основными были: снижение количества радиоактивных отходов, повышение безопасности процес-

са, достижение более высоких технологических показателей по очистке целевых продуктов от радионуклидов и разделению их друг от друга, снижение затрат на переработку. Внедрение экстракционной технологии в промышленность лимитировалось отставанием в области разработки промышленных образцов экстракторов, отвечающих требованиям радиохимического производства, а также уровнем разработанности химических основ технологического процесса.

Исторически сложилось так, что исследованием работы экстракционных аппаратов (экстракторов) сотрудникам института пришлось заниматься с того момента, как М. Ф. Пушленков предложил использовать смесители-отстойники для аппаратурного оформления разрабатываемой им технологической схемы переработки облученного урана на основе использования 30 % ТБФ в четыреххлористом углероде. Он же был научным руководителем всей работы. Испытания первых промышленных экстракционных аппаратов, смесителей-отстойников ящичного типа, были организованы в период с 1959 по 1963 г. на специально созданном для этой цели стенде Нарвского опытного завода. Испытательный стенд включал штатное оборудование, позволяющее реализовать непрерывное циркулирование урана, и сменное (испытываемое) оборудование в виде экстракционных аппаратов, работающих в режиме экстракции и реэкстракции. Штатное оборудование включало узлы корректировки состава исходного водного раствора и оборотного экстрагента, выпарного узла для выпарки реэкстракта и сорбционного узла для очистки дренажных и обмывочных растворов. В экстракционном цикле находилось три тонны урана. Экстрагентом служил 30 % раствор три-н-бутилфосфата в четыреххлористом углероде. Начальником стенда был Г. И. Кузнецов - ныне начальник отдела НИКИМТ, профессор, лауреат Гос. премии, руководитель разработки центробежных экстракторов - аппаратов, отвечающих самым высоким требованиям современной индустрии. От Радиевого института на стенде постоянно работала группа сотрудников, занимавшихся исследованием режимов работы аппаратов и вносивших предложения по совершенствованию их конструкции - В. Г. Шумков (руководитель группы), Н. Н. Щепетильников, С. М. Куликов, Л. М. Белов, Л. Б. Шпунт.

На стенде проводились испытания экстракторов различного типа, в частности смесителей-отстойников с механическим перемешиванием конструкции А. М. Берестового (ВНИПИЭТ), смесителей-отстойников с механическим и пульсационным перемешиванием конструкции коллектива лаборатории Г. М. Векслера Московского НИИХИММАШ, пульсационных перемешивающих устройств и аппаратов на их основе конструкции отдела С. М. Карпачевой (НИИ-9). Были испытаны также аппараты ядернобезопасной геометрии, горизонтальная пульсационная колонна, различные типы перемешивающих устройств, а также первые образцы центробежных экстракторов. Проведенные на стенде работы послужили основой как исследовательских работ в области кинетики массопереноса, так и в понимании принципов конструирования и условий эксплуатации конкретных экстракторов.

По способу проведения процесса экстракторы делятся на две основные группы: ступенчатые и дифференциально-контактные. К первой группе, в частности, относятся смесители-отстойники и центробежные одноступенчатые экстракторы, ко второй - экстракционные колонны. Условное деление аппаратов на эти две группы обусловлено тем, что в каждой ступени экстракторов первого типа реализуется термодинамическое равновесие, в то время как в любом поперечном сечении колонны такое равновесие принципиально недостижимо. Из этого следует прежде всего то, что при использовании первого типа экстракторов масштабный переход от одной производительности процесса к другой не вызывает затруднений и требует, в основном, соблюдения условий геометрического подобия. Иными словами, в терминах понятий "теоретическая ступень" можно утверждать (и это показано экспериментально), что каждая реальная ячейка (ступень, секция) экстракционного каскада в зоне интенсивного массообмена практически эквивалентна теоретической ступени. Совершенно не так обстоит дело в случае масштабирования аппаратов дифференциально-контактного типа. Для характеристики массообменной эффективности такого экстрактора используется понятие "высота, эквивалентная теоретической ступени (тарелке)" (ВЭТС или ВЭТТ). На практике это означает, что реальная высота колонны или ее части приравняется к определенному

числу идеальных ступеней экстракционного каскада из аппаратов первого типа. ВЭТС в одном и том же технологическом процессе будет существенным образом зависеть от производительности, следовательно, от диаметра экстракционной колонны.

Все сказанное об экстракционных аппаратах имеет весьма важные практические следствия. Основные параметры технологических процессов, реализуемых с помощью ступенчатых экстракторов, такие как степень извлечения ценных компонентов или полнота разделения, могут быть проверены и оптимизированы на лабораторных установках с экстракторами малого объема и малыми объемами растворов. Эти параметры могут быть рассчитаны из данных о равновесных концентрациях извлекаемых компонентов (изотермы экстракции), причем расчетные данные хорошо совпадают с экспериментальными. В технологии переработки радиоактивных материалов это обстоятельство играет важную роль: результаты моделирования процесса в горячих камерах могут непосредственно переноситься на промышленное производство.

Гораздо сложнее моделировать процессы извлечения и разделения при использовании в качестве оборудования экстракционных колонн. Даже если бы удалось найти горячую камеру (достаточно высокую), в которой можно разместить лабораторные колонны для проведения основных стадий экстракционного процесса (например, экстракции или реэкстракции урана), лабораторные эксперименты мало что дали бы для определения параметров промышленной колонны.

Процесс экстракции сопровождается целым рядом явлений, не имеющих прямого отношения к массопереносу. Эти явления, тем не менее, оказывают иногда решающее влияние на показатели технологического процесса. Речь, в частности, идет о так называемых "медузах" (терминология сотрудников НИИ-9) или межфазных осадках (терминология Радиевого института). При испытаниях в отстойных камерах смесителей-отстойников наблюдалось образование устойчивых эмульсий, внешне напоминающих студень, но обладающих подвижностью жидкости. Это не приводило к созданию дополнительного гидравлического сопротивления, однако существенно замедляло скорость расслаивания эмульсии. Тогда же в лаборатории М. Ф. Пушленкова начались систематические исследования этого явления. Работы проводились под руководством Е. В. Комарова. Им же были высказаны весьма убедительные и плодотворные суждения относительно природы и причин возникновения межфазных образований, он же предложил термин "межфазные осадки". Наблюдения показали, что ячеистое строение устойчивой эмульсии обусловлено наличием на межфазной поверхности тонкой пленки твердого продукта. Химический анализ этой твердой фазы показал, что ее состав близок к составу водного раствора экстракционной системы, в частности к составу водопроводной воды, когда эта вода перемешивается с экстрагентом. Из других, более поздних источников, известно, например, что состав межфазных осадков, генерируемых экстракционным процессом в технологии гидрометаллургии металлов, совпадает с составом производственной пыли помещений, в которых расположены экстракторы. Механизм образования межфазных осадков может быть качественно описан в рамках представлений о поверхностных явлениях в системах жидкость-жидкость. Процесс экстракции в некотором смысле подобен процессу флотации. И тот и другой сопровождаются образованием обширной межфазной поверхности. Это создает условия для концентрирования на вновь образованной поверхности поверхностно-активных продуктов, прежде всего механических взвесей, присутствующих в системе. Кроме того, к межфазной поверхности будут тяготеть дифильные молекулы, т. е. такие молекулы, в составе которых имеются и гидрофильные, и гидрофобные группы. К таким продуктам относятся всегда присутствующие в системе с ТБФ алкилфосфорные кислоты, кремниевая кислота и ее соли, а также гидролизированные формы некоторых металлов, например циркония. При расслаивании эмульсии в районе границы раздела фаз площадь межфазной поверхности уменьшается на три порядка, и локальная концентрация молекул, сорбированных на поверхности капель, существенно превышает их концентрацию в объеме раствора. Создаются, таким образом, условия для выпадения осадков, образования которых в объеме раствора не происходит. Этот механизм образования межфазных осадков

достаточно хорошо объясняет явления, наблюдаемые в реальном процессе переработки облученного урана.

Особенности экстракционного процесса переработки облученного урана в колонных аппаратах, обусловленные образованием межфазных осадков, хорошо иллюстрируются на примере технологического процесса, реализованного на Сибирском химическом комбинате (СХК). Внедрение на СХК экстракционной технологической схемы проводилось по инициативе и под общим научным руководством заместителя главного инженера СХК А. И. Карелина в 1986-1987 гг. Под его непосредственным руководством был разработан и реализован план поэтапного внедрения экстракционной технологии. На первом этапе был пущен в эксплуатацию экстракционный каскад из двух колонн (экстракции и резэкстракции) и двухступенчатого смесителя-отстойника (для содовой промывки оборотного экстрагента). Каскад был смонтирован на заводе по производству гексафторида урана для дополнительной очистки урана, поступающего с радиохимического завода. На втором этапе был смонтирован и пущен в эксплуатацию экстракционный каскад на втором цикле очистки урана на радиохимическом заводе. С учетом опыта эксплуатации этих экстракционных установок была выбрана, спроектирована и пущена в эксплуатацию экстракционная технологическая схема переработки облученного урана. Во время разработки технологической схемы сложился научный творческий коллектив, принимавший участие на всех стадиях разработки, испытаний и внедрения этой технологии на радиохимическом заводе СХК. Ведущими технологами были В. А. Белов (СХК), В. И. Волк (НИИ-9), Л. Б. Шпунт (Радиевый институт); разработчиками оборудования, специалистами по автоматизации и КИП были сотрудники НИИ-9. От Радиевого института в работах по реконструкции на СХК активное участие принимали сотрудники института М. Л. Савопуло, В. Л. Столяров, Б. В. Андронов, В. Ф. Зуев, А. А. Прямыков. В экстракционной технологической схеме, внедренной на СХК, в качестве основного экстракционного оборудования используются пульсационные колонны, а экстрагентом служит 30 % раствор ТБФ в смеси н-парафинов.

На начальной стадии внедрения экстракционной технологии на радиохимическом заводе СХК в качестве экстрагента использовался предложенный сотрудниками НИИ-10 тяжелый разбавитель, плотность экстрагента (30 % ТБФ) в котором выше плотности водного раствора.

Скорость переноса урана из одной фазы в другую, как показывает эксперимент, существенно выше в том случае, когда отдающая фаза является сплошной, а принимающая - дисперсной. Это означает, что при сплошной водной фазе в колонне экстракции (м/в) и сплошной органической (в/м) - в колонне резэкстракции ВЭТС будет ниже, чем при обратном типе эмульсии. В пользу выбора указанного типа эмульсии может служить также соображение, касающееся очистки урана от продуктов деления. Фаза, принимающая уран, должна быть дисперсной, чтобы по возможности уменьшить количество механически захваченного в виде мелких капель раствора, несущего основную массу продуктов деления. На операции экстракции (в головной колонне цикла) раствор, несущий основную массу продуктов деления, - водный раствор.

Перед разработчиками оборудования задача, в частности, состояла в том, чтобы по возможности уменьшить высоту колонн, не ухудшая технологических показателей процесса. В колонном экстракторе в зависимости от типа эмульсии конструируется либо верхняя, либо нижняя отстойная зона или, если тип эмульсии может меняться в процессе эксплуатации, - и верхняя, и нижняя отстойные зоны. Если экстрагент легче водного раствора, то в случае эмульсии масло в воде устанавливается верхняя отстойная зона, а в случае эмульсии вода в масле - нижняя. Если же экстрагент тяжелее водного раствора, то наоборот - нижняя и верхняя отстойные зоны, соответственно. С целью максимально эффективного использования высоты разработчики установили только одну отстойную зону - нижнюю, что дало возможность максимально увеличить высоту насадочной части колонны (т. е. увеличить зону массообмена) за счет отсутствия верхней отстойной зоны. Результаты опытно-промышленных испытаний показали, что извлечение урана достигает величины, близкой к 100 %, что удовлетворяет техническим условиям процесса. Однако очистка урана от продуктов деления

была явно неудовлетворительной. В процессе эксплуатации она постепенно падала от коэффициента очистки, равного 300-500 в первые сутки, до коэффициента, близкого к 1, в конце второй недели. Неоднократные повторения эксперимента с полной отмывкой колонны в промежутках приводили к одному и тому же результату. Обсуждение наблюдаемого парадоксального результата и причин, приведших к нему, проходило уже с участием Радиевого института, подключенного к реализации проекта. Привлечение Радиевого института к проекту было инициировано научным руководителем А. И. Карелиным и директором института Л. Н. Лазаревым. По предложению начальника отдела В. И. Андреева, поддержанному Л. Н. Лазаревым, на комбинат в качестве технолога - руководителя работ от института был направлен Л. Б. Шпунт.

В ряду мероприятий, проведенных для выяснения причин наблюдаемого явления, было измерение γ -фона на уровне отстойной зоны колонны, которое показало многократное превышение его в районе границы раздела фаз в сравнении с фоном в насадочной части. На основании этого наблюдения был сделан вывод о накоплении продуктов деления в зоне образования межфазных осадков. Механизм такого накопления может носить двоякий характер: продукты деления (например цирконий) сами непосредственно участвуют в образовании межфазных осадков или сорбируются на свежесформированных осадках, обладающих развитой поверхностью и ненасыщенными связями. Таким образом, осколочные радионуклиды концентрировались в той же отстойной зоне, из которой выводился экстракт урана, очищенного от них экстракционным методом. Накопление радионуклидов не может быть бесконечным, и единственно возможный для них путь выхода из аппарата - тот же самый, что и для чистого экстракта.

Для исключения возможности попадания концентрата радионуклидов из межфазных осадков в очищенный урановый экстракт пришлось пойти на достаточно сложную в техническом отношении операцию - изменение конструкции колонны с созданием верхней отстойной зоны. Решение об этой операции принял А. И. Карелин по рекомендации технологов (В. А. Белов, Л. Б. Шпунт). Обращение типа эмульсии в колонне привело к привычной для технолога стабильной во времени картине показателей процесса. Полное извлечение урана сопровождалось очисткой его от продуктов деления с коэффициентом очистки, близким к 300. При работе экстракционных колонн в режиме обращенных фаз место концентрирования осколочных радионуклидов в колонне - граница раздела фаз - оказывается отделенным от места вывода чистого продукта (в случае головной колонны цикла - экстракта урана) всей высотой колонны.

Опыт, полученный при пуско-наладочных работах и эксплуатации экстракционных колонн второго цикла, был в полной мере использован при создании колонн для первого цикла, в которых были сконструированы и верхняя, и нижняя отстойные зоны. В дальнейшем было принято решение о замене тяжелого экстрагента на легкий. Однако, независимо от используемого экстрагента, уровень радиоизлучения по оси колонного экстрактора показывает ярко выраженный максимум в районе границы раздела фаз.

Таким образом, работа по определению причин и механизма образования межфазных осадков, выполненная в Радиевом институте еще в начале 60-х годов, получила достаточно убедительное подтверждение в процессе промышленной реализации экстракционной переработки облученного урана.

Очень большая и методически сложная работа была выполнена В. М. Короткевичем (ныне - зам. главного инженера СХК) при определении факторов, влияющих на очистку урана от продуктов деления. Было убедительно показано, что при любых изучавшихся режимах процесса (температура, интенсивность перемешивания) очистка определяется количеством механически захваченной водной фазы в виде микроэмульсии ("микроуносом"). Это наблюдение послужило основой для создания аппарата, обеспечивающего очистку любого раствора от микроэмульсии другой фазы, находившейся в контакте с данным раствором. Такой аппарат (авторы изобретения - В. А. Белов, В. И. Волк, В. М. Короткевич, В. И. Мельников, Л. Б. Шпунт), названный сепаратором, по форме аналогичен фильтру с насыпным слоем из

инертного материала. При определенных режимах работы сепаратор способствует коалесценции микрокапель дисперсной фазы и тем самым обеспечивает очистку от нее сплошной фазы. Установка сепараторов на промежуточных (экстракт урана) и продуктовых (резэкстракты урана и плутония) растворах как первого, так и второго циклов обеспечила высокоэффективную и стабильную работу технологической схемы.

Можно полагать, что очистка урана и плутония от продуктов деления определяется механическим захватом микроэмульсии только потому, что экстракционные колонны работают в режиме обращенных эмульсий. Это, однако, далеко не очевидно. Механизм образования и коалесценции микрокапель в зоне интенсивного массопереноса весьма сложен и обусловлен не только работой механических перемешивающих устройств, но и, в частности, турбулентностью, возникающей на поверхности раздела фаз в процессе массопереноса, вследствие высокой экзотермичности реакций комплексообразования солей металлов с экстрагентом.

Эффект накопления радионуклидов необходимо учитывать при расчете радиационной нагрузки на экстрагент в процессах переработки облученного урана, поскольку мощность излучения радионуклидов в зоне концентрирования межфазных осадков на границе раздела фаз в отстойной зоне экстрактора во много раз превышает мощность излучения равного по объему исходного раствора. При этом надо иметь в виду, что в отстойной зоне каждой ступени смесителя-отстойника имеется граница раздела фаз.

Представленный выше механизм образования межфазных осадков достаточно хорошо объясняет то обстоятельство, что в центробежных экстракторах они практически не образуются. Действительно, для адсорбции поверхностно-активных агентов на границе раздела капля - сплошная фаза необходимо достаточно длительное время существования капли. В смесителях-отстойниках и экстракционных колоннах коалесценция капель происходит под действием силы гравитации, а, следовательно, скорость расслаивания эмульсии невысока в сравнении с тем же процессом в центробежных экстракторах, где коалесценция происходит под действием центробежной силы. В центробежном экстракторе время жизни капли так мало, что на ее поверхности не успевает сформироваться сколь-нибудь заметный слой поверхностно-активных веществ. В смесительной камере центробежного экстрактора реализуется ситуация, при которой массообмен происходит через постоянно обновляющуюся поверхность. Скорость массообмена в процессе экстракции урана ТБФ, которая определяется скоростью диффузии реагентов из объема раствора к поверхности раздела, в центробежном экстракторе во много раз превышает эту скорость в смесителе-отстойнике или колонне. Сравнение этих трех типов оборудования показывает, что время контакта растворов при использовании центробежных экстракторов можно уменьшить во много раз при одной и той же производительности экстракционного каскада. Уменьшение времени контакта водного раствора с экстрагентом уменьшает также вероятность образования в системе межфазных осадков.

Рассмотренные особенности процесса переработки облученного урана в зависимости от типа экстракционного оборудования установлены с помощью экспериментальных данных, полученных на реальном оборудовании, реальных растворах, в реальных производственных условиях. Это обстоятельство позволяет поставить резонный вопрос: все ли задачи может решать моделирование экстракционного процесса переработки облученного урана в горячих камерах? Значительные трудности в моделировании этого процесса обусловлены тем, что это непрерывный процесс, и его стационарное состояние по многим показателям устанавливается в течение достаточно продолжительного времени. Подробное рассмотрение основных технологических показателей процесса (таких как полнота разделения, коэффициенты очистки от радионуклидов, степень деградации экстрагента под действием облучения и многих других) показывает, что они не могут моделироваться в экспериментах, проводимых в горячих камерах, как вследствие явно недостаточного отношения объемов реального раствора и оборудования, смонтированного в горячей камере, так и из-за практической невозможности соблюсти все условия подобия (геометрического, гидродинамического, теплового, радиационных полей и др.). Может быть, основное достоинство моделирования процесса

состоит в его функции обучения персонала. Во время работы на реальных растворах с использованием лабораторного оборудования работник вводится в круг основных понятий, характеризующих процесс, получает представление о взаимном влиянии различных параметров, осознает особенности контроля и управления. Кроме того, наличие лабораторной установки в горячей камере позволяет проводить работы по совершенствованию процесса, помогает исследовать возможные причины нарушений, возникающих в реальном технологическом процессе.

Однако автор полагает, что в настоящее время уровень знаний о технологических процессах переработки облученного урана достаточно высок для того, чтобы проектировать и создавать реальные технологические установки непосредственно в промышленном масштабе, минуя стадию испытания в горячих камерах.

ОКИСЛИТЕЛЬНОЕ РАСТВОРЕНИЕ МЕТАЛЛИЧЕСКОГО ПЛУТОНИЯ И ЕГО ОКИСЛЕННЫХ ФОРМ

Г. П. Никитина

С созданием производства стратегического плутония возникла необходимость извлечения плутония из отходов и оборотных продуктов плутониевых производств. Доля плутония в отходах и оборотных продуктах химико-металлургического передела достигает 2-3 % от перерабатываемой массы плутония. В этой связи проблема растворения двуокиси плутония из отходов перед направлением на экстракционную переработку с целью возвращения плутония в производственный процесс была более чем актуальна. Обычно используемое фторидно-азотнокислородное растворение - достаточно медленный процесс, в котором коррозионно-опасными являются не только растворы, но и газовые сбросы. Извлечение плутония из получаемых в этом процессе растворов связано с определенными трудностями из-за высокой концентрации фторид-ионов. Кроме того, часть плутонийсодержащих материалов растворять этим способом нецелесообразно или практически невозможно.

В 1967 г. группой сотрудников Радиевого института (Е. В. Комаров, Г. П. Никитина, В. Г. Шумков) было предложено растворять PuO_2 , обрабатывая ее горячей азотной кислотой (4 моль/л), содержащей 0,01-0,02 моль/л иона металла переменной валентности с высоким редокс-потенциалом (Ag^+ , Co^{2+} , Ce^{3+} и т. п.), при барботаже раствора озон-кислородной смесью. При этом в растворе или на границе раздела газ/раствор озон окисляет катион-катализатор до высшего состояния окисления, после чего окисленная форма катализатора отбирает электрон у двуокиси плутония, переводя ее в растворимое состояние. Таким образом, для успешной реализации окислительного растворения необходимо было осуществить подачу озона к границе раздела газ/раствор и эффективный массоперенос озона через эту границу, а также быстрый транспорт окисленной формы катиона-катализатора к поверхности двуокиси плутония. И, прежде всего, насколько возможно, увеличить скорости редокс-реакций окисления катиона-катализатора озоном и взаимодействия окисленной формы катализатора с двуокисью плутония.

В ту пору (1964-1967 гг.) этот процесс был мало изучен. Первая попытка использовать его для перевода плутония в раствор из плутонийсодержащих отходов Сибирского химкомбината была неудачной. Мы столкнулись с коррозией нержавеющей стали в условиях окислительного растворения. Использование титанового сплава ВТ1-0 вместо нержавеющей стали 12Х18Н10Т в качестве конструкционного материала для аппарата-растворителя позволило преодолеть это затруднение.

В начале 70-х годов возникла необходимость использовать окислительное растворение с озоном в технологии получения высокочистой двуокиси плутония-238 биомедицинского назначения.

В условиях мощного радиолиза в растворах, содержащих граммовые концентрации плутония-238, можно было ожидать существенного усложнения процесса растворения. Таким образом, необходимость тщательного исследования процесса с двумя гетерогенными стадиями стала очевидной.

В этой связи были исследованы наиболее важные его стадии: распределение озона между газовой фазой и растворами азотной кислоты (0,1-11 моль/л) и распад озона в этих растворах, массоперенос озона через межфазную границу газ/раствор, окисление озоном катионов-катализаторов, устойчивость окисленной формы катиона-катализатора Ag(II) , Ce(IV) в растворах азотной кислоты и взаимодействие окисленной формы катализатора с двуокисью плутония. Все исследование проводилось с использованием двуокиси плутония-239.

Изучение окислительного растворения слабопрокаленной и высокопрокаленной двуокиси плутония в широком диапазоне исходных масс двуокиси (от $5 \cdot 10^{-3}$ до 0,5 моль PuO_2), приходящейся на литр растворителя, позволило определить области, в которых скорость процесса контролируется либо скоростью межфазной реакции $\text{PuO}_2 + \text{Ce(IV)} \rightarrow$, либо массопереносом озона через границу раздела газ/раствор, осложненным взаимодействием озона с катионом-катализатором. В первом случае интенсификация процесса могла быть осуществлена путем ускорения реакции $\text{PuO}_2 + \text{Ce(IV)} \rightarrow$, во втором - увеличением массового потока озона через границу раздела газ/раствор и ускорением окисления катиона-катализатора.

На базе этих исследований были найдены промоторы окисления церия(III) озоном и катализаторы взаимодействия церия(IV) с двуокисью плутония.

Оказалось, что если к азотнокислomu раствору, содержащему церий(III), добавить немного (не более 10 % от количества церия) кобальта(II) и серебра(I), то скорость окисления $\text{Ce(III)} \rightarrow \text{Ce(IV)}$ озоном можно увеличить в три-четыре раза. Таким образом, в области загрузок двуокиси плутония $\{\text{PuO}_2\}_0$, превышающих 0,1 моль/л, когда скорость процесса контролируется скоростью регенерации Ce(IV) в растворе, продолжительность растворения можно существенно сократить, используя смешанный катион-катализатор $[5 \cdot 10^{-2} \text{ моль/л Ce} + 5 \cdot 10^{-3} \text{ моль/л (Co+Ag)}]$.

Кроме того, было показано, что введение в растворитель небольших добавок серной кислоты ($\sim 1 \cdot 10^{-2}$ моль/л) вызывает ускорение реакции $\text{PuO}_2 + \text{Ce(IV)} \rightarrow$ в 100-200 раз. Механизм этого ускорения был не совсем понятен и требовал расшифровки. В связи с тем, что технологи возражали против использования серной кислоты в процессе, дальнейшее совершенствование метода окислительного растворения было направлено на поиск анионов-катализаторов, способных заменить сульфат-ион. Поиск был осуществлен на базе координационной модели поверхности двуокиси плутония в предположении специфической сорбции анионов-катализаторов на поверхности PuO_2 . Была исследована каталитическая активность анионов высших кислородных кислот пятой, шестой и седьмой групп периодической системы, а также некоторых алкил- и арил-карбоновых кислот, способных образовывать прочные комплексы с четырехвалентным плутонием. При этом оказалось, что те кислоты, константы ионизации которых достаточно высоки, например хлорная, бромная, марганцевая, рениевая, и для которых трудно ожидать образования прочных комплексов с плутонием(IV), не катализируют взаимодействие $\text{PuO}_2 + \text{Ce(IV)} \rightarrow$. Те же кислоты, которые имеют pK_a от 1,2 и выше, эффективно катализируют реакцию окисления двуокиси плутония церием(IV). Они образуют две группы. Одна группа кислот, H_2SO_4 , H_2SeO_4 , $\text{H}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$, имеет близкую каталитическую активность в одном и том же диапазоне концентрации. Другая группа, H_2SeO_3 , H_3PO_4 , H_2MoO_4 , H_5IO_6 , - каталитически активна в области существенно более низких концентраций: H_2SeO_3 ($1 \cdot 10^{-4}$ - $2 \cdot 10^{-3}$ моль/л), H_3PO_4 ($2,2 \cdot 10^{-5}$ - $1,2 \cdot 10^{-2}$ моль/л), H_2MoO_4 ($1,2 \cdot 10^{-5}$ - $2 \cdot 10^{-3}$ моль/л), H_5IO_6 ($1,7 \cdot 10^{-5}$ - $5 \cdot 10^{-4}$ моль/л). Каталитически активными являются и некоторые органические кислоты, в частности бензолгексакарбоновая и трихлоруксусная. Так,

$\text{C}_6(\text{COOH})_6$ и CCl_3COOH ускоряют растворение в 13 и 8 раз при концентрациях $2 \cdot 10^{-5}$ и $4 \cdot 10^{-4}$ моль/л.

Концентрационная зависимость каталитической активности кислот проходит через достаточно острый максимум, так что ортоиодная кислота, ускоряющая процесс при $[\text{H}_5\text{IO}_6] = 7,6 \cdot 10^{-5}$ моль/л, существенно замедляет его в области концентраций $0,5-1,5 \cdot 10^{-2}$ моль/л. При более высоких концентрациях ортоиодной кислоты процесс прекращается вовсе.

Таким образом, введение в растворитель аниона-катализатора позволяет настолько ускорить взаимодействие двуокиси плутония с церием(IV), что практически до полного растворения процесс контролируется не взаимодействием $\text{PuO}_2 + \text{Ce(IV)} \rightarrow$, а реакциями на межфазной границе газ/раствор, и скорость его остается, по существу, постоянной.

Достаточно продолжительное время окислительное растворение с озоном успешно использовалось в технологии получения двуокиси плутония-238 биомедицинского назначения на химкомбинате "Маяк", пока на смену ему не пришло электрохимическое окислительное растворение (ЭХОР), работающее и по сей день.

С 1980 г. было предложено осуществлять анодное окисление катиона-катализатора вместо окисления озоном. Было показано, что использование церия(IV) с анионами-катализаторами или серебра(II) без анионов-катализаторов (при температуре не выше 50°C) равно эффективно при растворении некондиционной двуокиси плутония-239. Однако при растворении двуокиси плутония-238 целесообразно использовать церий, а не серебро, поскольку серебро(II) восстанавливается продуктами радиолиза водного раствора (H_2 , H_2O_2 , HO_2 и т. п.) с большой скоростью, и его стационарная концентрация настолько низка, что при плотностях анодного тока до 1 А/дм^2 процесс практически не идет.

Углубленная проверка электрохимического окислительного растворения двуокиси плутония проведена на опытных установках плутониевых производств химкомбината "Маяк" и Сибирского химкомбината. Показано, что некондиционная двуокись плутония-239 при объемно-массовом отношении растворитель/ PuO_2 , равном $(20-5)/1$, плотности анодного тока $\sim 1 \text{ А/дм}^2$ и температуре $90-95^\circ\text{C}$ может быть растворена полностью за 1,5-4 часа. Двуокись от сжигания кусков металлического плутония в тех же условиях растворяется на 97-99,9 % за 4-8 часов.

Электрохимическое окислительное растворение достаточно эффективно при переведении в раствор плутония-239 из разнообразных отходов, содержащих окисленные формы плутония (сметок, счинок прокаточных печей, возгонов из камер, нерастворимых остатков, в том числе нерастворимых остатков анодного растворения металлического плутония, золы от сжигания каландров, бумаги, ветоши и т. п.).

В результате электрохимического окислительного растворения получают азотно-кислые ($2-4$ моль/л HNO_3) растворы плутония(VI) ($50-200 \text{ г/л}$), не содержащие фтора, переработка которых не представляет затруднений. Восстановление плутония(VI) до плутония(IV) перед экстракционным переделом осуществляется в том же аппарате-растворителе бессолевым методом (реверсом тока) без внесения в раствор каких-либо реагентов.

Для проведения ЭХОР разработано, изготовлено и испытано несколько конструкций аппаратов-растворителей, рассчитанных на единовременные загрузки двуокиси плутония от 200 до 500 г. В конструкции аппаратов предусмотрено максимальное отношение площади поверхности анода к объему раствора и создание условий парения частицы двуокиси в ходе растворения. Кроме того, Свердловский химический завод разработана конструкция ядерно-безопасного опытно-промышленного аппарата, рассчитанного на 4-х килограммовые загрузки двуокиси плутония.

Параллельно разработкам практической направленности проводилось исследование кинетики и, насколько позволяла оснащенность соответствующим оборудованием, механизма взаимодействия двуокисей трансураниевых (NpO_2 , PuO_2) и редкоземельных элементов (CeO_2) с ионами металлов переменной валентности M^{n+} ($\text{M}^{n+} = \text{Ce}^{4+}$, Ag^+ , U^{4+} , Fe^{2+}).

Сопоставление формальной кинетики $\text{CeO}_2 + \text{Fe(II)} \rightarrow$, $\text{NpO}_2 + \text{Ce(IV)} \rightarrow$, $\text{PuO}_2 + \text{Ce(IV)} \rightarrow$, $\text{PuO}_2 + \text{U(IV)} \rightarrow$ показало, что она характеризуется одними и теми же особенностями. Здесь

уместно остановиться на одной из них - возможности формального описания скорости процесса пропорционально текущей массе двуокиси плутония. Эта особенность противоречит общепринятым представлениям теории гетерогенных процессов и требует специального исследования. Тем не менее, такое описание удобно, поскольку массу контролировать легко, поверхность же контролируется с трудом и с достаточной степенью неопределенности.

На основании проведенных исследований предложена качественная модель взаимодействия двуокисей трансурановых и редкоземельных элементов с ионами металлов переменной валентности (M^{n+}), удовлетворительно описывающая особенности взаимодействия $MO_2 + M^{n+} \rightarrow$.

Кроме того, показано, что поверхность двуокиси в сильноокислом растворе несет положительный заряд около 65 мКл/см^2 , обусловленный протонированием основных гидроксильных групп поверхности двуокиси. Этот заряд соответствует приблизительно $1,3 \cdot 10^{-4}$ моль H^+ , находящегося на поверхности $1 \text{ г } PuO_2$. При введении в раствор анион-катализаторов, специфически сорбируемых поверхностью двуокиси плутония, происходит вытеснение протонированных основных групп и уменьшение положительного заряда поверхности. При некоторой концентрации анион-катализатор (максимальная сорбция анион-катализатора составляет около $1,1 \cdot 10^{-4}$ моль/г PuO_2) замещает все протонированные основные группы поверхности кристалла и заряд поверхности становится близким к нулю. При этом скорость переноса катионных и анионных фрагментов решетки становятся равными и общая скорость процесса достигает максимума. Дальнейшее увеличение концентрации анион-катализатора, по-видимому, приводит к блокированию поверхности двуокиси.

Проведенное исследование позволило более глубоко понять общий процесс окислительного растворения, на этой основе усовершенствовать его, успешно провести укрупненную проверку метода ЭХОР (на некондиционной двуокиси плутония-239 и отходах с окисленными формами плутония) на опытных установках химкомбината "Маяк" и Сибирского химкомбината. Всего в ходе этих исследований переведено в раствор около 5 кг двуокиси плутония-239. Кроме того, удалось внедрить окислительное растворение с озоном, а затем и ЭХОР как часть технологической схемы получения плутония-238 биомедицинского назначения.

Новизна и практическая целесообразность разработок подтверждена выдачей авторских свидетельств и патентов.

Этот цикл работ проведен под руководством Г. П. Никитиной группой сотрудников Радиевого института: Ю. Е. Ивановым, В. П. Егоровой, И. Н. Жуковой, А. А. Листопадовым, Г. Г. Гридасовым, В. В. Яковлевым, С. В. Ковылковым. В аппаратурное оформление процесса основной вклад внес Ю. Е. Иванов.

Второе направление разработок связано с извлечением плутония из оборотных продуктов и отходов химико-металлургического производства, содержащих металлический плутоний. Это направление, как и предыдущее, достаточно актуально сегодня в связи с проблемой утилизации накопленного энергетического и снимаемого с вооружения металлического плутония. Существует несколько концепций утилизации энергетического и оружейного плутония. Согласно одной из них предлагается использовать плутоний для изготовления МОХ-топлива и дожигать его в энергетических реакторах и реакторах на быстрых нейтронах. Кроме того, рассматривается возможность использования плутониевого топлива в минералоподобных матрицах (ZrO_2 , или $ThO_2-Al_2O_3-MgO$). В любом случае для изготовления топлива необходимо осуществить растворение и перечистку плутония.

В этой связи с 1984 г. группой сотрудников Радиевого института (Ю. Е. Иванов, М. Ю. Киршин, В. В. Яковлев, Г. П. Никитина, А. А. Листопадов, Д. А. Шевяков) осуществлялась оптимизация анодного растворения металлического плутония в азотной кислоте. Было проверено анодное растворение металлического плутония в разных режимах: в контактном и в поле тока. В контактном режиме растворяемый металл физически присоединяется к аноду или используется принцип вентильного металла. Растворение в поле тока основано на электростатической индукции. Оба метода имеют недостатки. Растворение в

контактном режиме характеризуется трудностью поддержания хорошего высокопроводящего контакта и связанным с нарушением контакта искрением, особенно опасным для металлического плутония. При растворении в поле тока необходимо создавать условия преимущественного прохождения тока по пути "электрод - раствор - растворяемый металл - раствор - электрод", что существенно усложняет конструкцию электролизера. М. Ю. Киршин предложил проводить растворение в совмещенном режиме, основанном на объединении контакта через металл с контактом через раствор. Плутоний помещают в корзину из вентильного металла (Ta, Nb), соединенную электрическим контактом с Pt-анодом. До тех пор, пока существует контакт растворяемого металла с анодом, идет растворение в условиях контакта через металл. При нарушении этого контакта растворение продолжается в поле тока. Было показано, что при совмещении контакта через металл с контактом через раствор скорость практически не зависит от плотности тока и достигает максимального значения при полностью загруженной корзине. Выход по току для чистого металлического плутония составляет 1-1,4 г/А·ч (такой же выход по току наблюдается и в условиях контактного растворения). Искрение практически исключено. В результате анодного растворения получают азотнокислые растворы плутония, в которых плутоний находится в состоянии окисления IV. В ходе укрупненной проверки анодного растворения на Сибирском химкомбинате было переведено в раствор около 10 кг плутония.

В 1987 г. была предпринята попытка изучить механизм анодного растворения плутония (М. Ю. Киршин) в широком диапазоне концентраций азотной кислоты (0,1-7 моль/л) и температур (20-80 °С) с использованием вращающегося электрода с диском из металлического плутония. При этом оказалось, что в исследуемых растворах азотной кислоты поверхность плутониевого электрода покрыта слоем окисла. Зависимость тока поляризации от потенциала в области потенциалов анода от +1,5 до 1,85 В (сила тока увеличивается на четыре порядка величины) подчиняется уравнению Тафеля. Анализ зависимости коэффициентов уравнения Тафеля от концентрации азотной кислоты и температуры показал, что анодное окисление металла до двуокиси Pu (тв.) + 2H₂O - 4e → PuO₂(тв.) + 4H⁺ происходит достаточно быстро и не лимитирует общую скорость процесса растворения. Замедленной стадией является одноэлектронный переход при окислении двуокиси пассивирующего слоя до плутоноил-иона, растворимого в азотной кислоте: PuO₂(тв.) - e → PuO₂⁺(раств.). Образовавшийся плутоноил-ион легко окисляется до плутонил-иона на аноде и/или восстанавливается (при большом перенапряжении) до плутония(IV) и (III) на катоде. Наличие всех этих форм плутония в растворе вызывает автокаталитическое разложение азотистой кислоты (продукта катодного восстановления азотной кислоты) с переводом всех ионов плутония в состояние окисления IV.

Был предложен и альтернативный способ растворения материалов с металлическим плутонием, включающий сожжение металла до двуокиси с последующим растворением двуокиси плутония электрохимическим окислительным методом с использованием анионокатализаторов. Способ проверен только на чистом металлическом плутонии. Сожжение металлического плутония, разрезанного на небольшие куски, осуществлялось путем прокаливания в воздушной атмосфере. При этом получалась двуокись, насыпная масса которой варьировала от 3,6 до 5,3 г/см³. Растворить эту двуокись фторидно-азотнокислым методом практически невозможно. Напротив, в оптимальных условиях ЭХОР эта двуокись растворяется на 97-99,9 % за 4-8 часов при Ж:Т, равном 20 л растворителя на 1 кг PuO₂.

В настоящее время электрохимическое окислительное растворение с Ag(II) или Ce(IV) в присутствии анионокатализаторов является наиболее прогрессивным методом растворения окисленных форм нептуния, плутония и трансплутониевых элементов. Сфера применения этого метода может быть существенно расширена. Его можно использовать для дезактивации загрязненного радиоактивными веществами оборудования, для минерализации отработавших органических соединений (сорбентов, экстрагентов) и т. п.

Л и т е р а т у р а

1. Комаров Е.В., Никитина Г.П., Пушленков М.Ф., Усачев В.Н., Шумков В.Г. Способ окислительного растворения прокаленных до 800-1000 °С окисей трансурановых элементов. Авт. свид. СССР №440879. Заявлено 04.01.67. Опубл. 10.11.78: Б.И., 1978, N 41.
2. Никитина Г.П., Иванов Ю.Е., Шумков В.Г., Егорова В.П. Окисление катионов переменной валентности озоном. // Препринт РИ-48. Л.: Радиевый ин-т им. В.Г. Хлопина, 1975.
3. Иванов Ю.Е., Никитина Г.П. // Радиохимия, 1995, т. 37, вып. 3, с. 197-202.
4. Иванов Ю.Е., Никитина Г.П., Егорова В.П. // Радиохимия, 1995, т. 37, вып. 3, с. 221-227.
5. Никитина Г.П., Иванов Ю.Е., Егорова В.П., Жукова И.Н., Шумков В.Г. Способ каталитического окислительного растворения двуокисей трансурановых элементов. Заявка №93043812/26/044901 от 03.09.93. Решение ВНИИГПЭ о выдаче патента от 27.03.95.
6. Nikitina G.P., Ivanov Yu.E., Kirshyn M.Yu., Listopadov A.A., Shpunt L.B. // in: Disposal of Weapon Plutonium. Approaches and Prospects./ Ed. Er.R. Mertz and C.E. Walter. NATO ASI Series. Kluwer Acad. Publ. Dordrecht/ Boston/ London, 1996, vol. 4, p. 59-64.
7. Никитина Г.П., Егорова В.П., Жукова И.Н., Иванов Ю.Е. Способ получения раствора азотнокислой соли четырехвалентного плутония. Патент РФ №2031979. Заявлено 29.03.91. Опубл. 27.03.95.
8. Никитина Г.П., Егорова В.П., Жукова И.Н. // Радиохимия, 1995, т. 37, вып. 3, с. 205-209.

РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ НЕСТАЦИОНАРНОГО ЭЛЕКТРОЛИЗА ДЛЯ СТАБИЛИЗАЦИИ ВАЛЕНТНЫХ ФОРМ АКТИНИДОВ

**Г. В. Алексенко, В. Г. Васильев, Б. Я. Галкин, В. Н. Романовский,
В. А. Старченко**

Исследования электрохимических методов стабилизации валентных форм актинидов применительно к процессам экстракционной переработки ОЯТ АЭС были начаты в НЭК^{*)} во второй половине 70-х годов и фактически свернуты с началом "перестройки" в 1985-1986 гг. по известным причинам. Решение руководства института во главе с Л. Н. Лазаревым и отдела о развитии работ в этом направлении было связано с разработкой технологии для проекта радиохимического завода РТ-2.

За указанный сравнительно непродолжительный период времени был осуществлен значительный объем научно-технической (конструкторской, проектной) и организационной работы, позволившей включить разработанные методы в технический проект радиохимического завода. Необходимо отметить, что в самом Радиевом институте эту работу проводил небольшой коллектив ученых и инженерно-технических работников, не превышавший 6-8 человек. Основу этого коллектива составляла группа Г. В. Алексенко и В. Г. Васильева. Работа проводилась в содружестве с другими предприятиями отрасли и АН СССР: ФЭИ (Э. Я. Сметанин, Н. А. Нерозин), СвердНИИХИММАШ (В. А. Чемезов, В. В. Оглоблин и др.), ГХК (Л. П. Прохоров, Ю. А. Ревенко, Н. Н. Егоров и др.), а также ИЭЛАН СССР (П. М. Нассонов и др.).

Анализ накопленной к началу работ научно-технической информации показал, что за рубежом ведутся интенсивные лабораторные исследования электрохимических процессов восстановления-окисления актинидов применительно к процессам экстракционной переработки ОЯТ. Проводится также разработка электрохимического оборудования (совмещенного в ряде случаев с экстракционным) как для лабораторного, так и для опытно-промышленного масштаба работ.

^{*)} НЭК - научно-экспериментальный комплекс Радиевского института. Радиохимический комплекс НЭК расположен в г. Гатчина Ленинградской области.

Работы в этом направлении проводились и в СССР. В первую очередь здесь следует отметить работы сотрудников ВНИИНМ (В. И. Марченко, А. К. Полунин), которые разработали конструкцию лабораторного электрохимического смесителя-отстойника.

Все перечисленные работы проводились с использованием методов постоянно-токового электролиза.

Одновременно в ФЭИ группой А. Г. Козлова, Э. Я. Сметанина и Н. А. Нерозина проводились исследования процесса восстановления урана в водных азотнокислых растворах переменным током. Было показано, что прямой процесс восстановления урана до четырехвалентного состояния имеет примерно в три раза большую скорость, чем обратный процесс окисления урана(IV) до шестивалентного состояния; этим и обусловлена возможность использования переменного тока.

В гатчинском отделении НПО "Радиевый институт" работы были начаты в направлении исследований методов нестационарного электролиза применительно к процессам экстракционной переработки.

Работа началась с подготовки аппаратуры. Были разработаны конструкции и изготовлены лабораторные электролизеры и электрохимические смесители-отстойники различного назначения, а также электролизеры для проведения восстановительных и окислительных процессов в водных азотнокислых растворах, в водно-органических системах, в камерах отстаивания лабораторных смесителей-отстойников, а также в водно-органических эмульсиях (в камере смешения лабораторного смесителя-отстойника). Было изготовлено значительное количество платинированных электродов различной конфигурации (плоских, фигурных, коробчатых, стержневых, цилиндрических, полуцилиндрических и т. д.).

Исследования процесса восстановления урана(VI) в водных азотнокислых растворах в емкостных и проточных электролизерах (в статическом и динамическом режимах) с неразделенным катодным и анодным пространством подтвердили основные результаты, полученные в ФЭИ. Кроме того, эти исследования позволили уточнить режимы и ряд параметров электрохимических процессов (влияние на скорость процесса и накопление четырехвалентного урана концентрации азотной кислоты, начальной и конечной концентрации гидразина, времени электролиза, объемной плотности тока, температуры процесса, наличия и интенсивности перемешивания и других параметров). Была изучена также устойчивость растворов урана(IV) в зависимости от условий и времени хранения.

Затем были проведены аналогичные исследования процессов электрохимического окисления и восстановления ионов плутония и нептуния переменным током в водных азотнокислых растворах. Исследования проводили как в присутствии уранил-ионов, так и в их отсутствие. Была показана возможность стабилизации плутония в трех- и четырехвалентном состоянии и нептуния в четырех- и пятивалентном состоянии, а также стабилизации валентных пар нептуний(IV) - плутоний(III) и нептуний(V) - плутоний(IV), что имеет важное значение для процессов экстракционной переработки ОЯТ. Было также установлено, что нептуний невозможно окислить до шестивалентного состояния в электрохимической ячейке с неразделенными катодным и анодным пространствами. Причиной этого является частичное электрохимическое восстановление азотной кислоты до азотистой и накопление ее в растворе. Последняя служит стабилизатором пятивалентной формы нептуния. Процесс электрохимического разложения (восстановления) азотной кислоты и накопления азотистой кислоты был исследован в отдельной серии экспериментов.

Одновременно проводились исследования процессов электрохимического разрушения переменным током некоторых органических примесей (комплексообразователей), которые могут присутствовать в растворах экстракционной переработки ОЯТ. Так, были исследованы процессы электрохимического окисления щавелевой кислоты, карбамида, диэтилентриаминпентаацетата натрия (ДТПА), ацетогидроксамовой кислоты и т. д. Определены оптимальные режимы процесса - плотность тока, напряжение, отношение площади поверхности электродов к объему раствора, время электролиза, температура и ряд других. Определен состав газовой фазы и исследовано поведение ряда радионуклидов в процессе электрохимического окисления органических примесей.

Все вышеперечисленные исследования проводили с использованием переменного тока промышленной частоты (50 Гц). Ряд литературных данных указывал на то, что скорость и эффективность некоторых электрохимических (в частности, гальванических) процессов зависят от частоты и формы импульсов переменного тока. С учетом этих данных возникло предположение, что частота и форма импульсов переменного тока могут влиять и на электрохимические процессы без выделения металлов на электродах, в частности на процессы окисления-восстановления актинидов в азотнокислых растворах и на процессы окисления органических примесей. Это предположение было проверено на примере реакций электрохимического восстановления урана(VI) до урана(IV), нептуния(VI) до нептуния(V) и нептуния(V) до нептуния(IV), а также процессов окисления щавелевой кислоты и ДТПА. Исследования проводили в диапазоне частот от 0,5 до $5 \cdot 10^3$ Гц. Было установлено, что в диапазоне частот 1-10 Гц скорости реакций увеличивались в 3-5 раз. Было показано также, что определенное влияние на скорость реакций оказывает и форма импульсов тока.

На следующем этапе работы исследовали влияние материала электродов на скорость электрохимических окислительно-восстановительных процессов и скорость коррозии электродных и конструкционных материалов с целью подбора наиболее устойчивых и эффективных материалов. Исследовали скорость коррозии электродов из платины, платинированного титана, титана, тантала, ниобия, циркония, графита разных марок, стеклографита и силицированного графита.

Исследовали скорость коррозии нержавеющей стали и титана, которые использовались в качестве конструкционных материалов. В качестве переменных параметров использовали напряжение, объемную плотность тока, частоту и форму импульсов тока, потенциал электродов, температуру, время электролиза, состав и окислительно-восстановительный потенциал растворов. Было установлено, что минимальной скоростью коррозии и максимальной эффективностью во всех исследованных растворах обладает электродная пара платинированный титан - титан (тантал), а из конструкционных материалов - титан.

Этими исследованиями был завершен определенный этап работ, связанный с исследованием в водных растворах основных электрохимических окислительно-восстановительных процессов, используемых в экстракционной технологии переработки ОЯТ. Была показана не только принципиальная возможность осуществления этих процессов методами нестационарного электролиза, но и их достаточно высокая эффективность и конкурентоспособность с методами постоянно-токового электролиза. Были определены режимы электрохимических процессов, хотя они требовали уточнения при проведении процессов в двухфазных водно-органических системах.

Следующий этап работы был связан с исследованием процессов нестационарного электролиза применительно к операциям экстракционной переработки ОЯТ. Опыты проводили в статических и динамических условиях в отдельных электрохимических смесителях-отстойниках и в экстракционно-электрохимическом блоке смесителей-отстойников. При проведении опытов в блоке из шести экстракционных ступеней, три из которых были электрохимическими, показано, что в зависимости от условий проведения экспериментов концентрация урана(IV) в водной фазе на выходе из блока может составлять от 15 до 110 г/л, а в органической - от 1,5 до 6,0 г/л.

Проведенные в лабораторном масштабе эксперименты показали достаточно высокую эффективность этой технологии для процесса восстановительной рекстракции плутония и позволили перейти к экспериментам на полномасштабном промышленном экстракционном аппарате.

По техническому заданию специалистов Радиевого института и Горно-химического комбината Свердловского химического завода при непосредственном участии специалистов вышеуказанных предприятий разработал конструкцию и изготовил два электродных блока с 9 электродами в каждом, при этом использовали электроды из платиновой сетки, платинированного титана и электродную пару платинированный титан - титан.

Электродные блоки были установлены в отстойной зоне двух ступеней промышленного экстрактора ЭСО-0.220/1-2 на опытном стенде Горно-химического комбината. Серия

проведенных экспериментов полностью подтвердила результаты, полученные в лабораторных условиях, в том числе более высокую эффективность электродной пары платинированный титан - титан по сравнению с электродами из платины или платинированного титана.

Проведенные эксперименты создали предпосылки для разработки процессов электрохимической резкстракции плутония и нептуния. Ввиду невозможности проведения таких экспериментов на опытном стенде ГХК они были проведены в лабораторном масштабе в Радиевом институте.

Работа проводилась на модельных и реальных растворах.

Было проведено пять серий экспериментов, соответствовавших пооперационной проверке циклов резкстракции плутония и нептуния в рамках Пурекс-процесса:

- электрохимическая восстановительная резкстракция плутония в условиях цикла его аффинажа;
- электрохимическая восстановительная резкстракция плутония в условиях цикла аффинажа урана;
- электрохимическая восстановительная резкстракция плутония в условиях первого (разделительного) цикла;
- электрохимическая восстановительная резкстракция нептуния в условиях цикла его аффинажа;
- электрохимическая восстановительная резкстракция нептуния в условиях цикла разделения урана, плутония и нептуния (I цикл).

Все эксперименты проводили с использованием переменного тока.

Эксперименты показали возможность эффективного проведения этих процессов, в том числе в условиях аффинажных циклов. Так, степень извлечения плутония в резкстракт на трех электрохимических ступенях составляла 99,5-99,9 %, а нептуний резкстрагировался количественно (при концентрациях азотной кислоты в резкстрагирующем растворе не выше 1,5 моль/л).

В результате проведенных экспериментов было показано, что коэффициент очистки урана от плутония за два цикла (цикл разделения и цикл аффинажа урана) составляет 10^6 - 10^7 при электрохимической резкстракции плутония переменным током на трех ступенях в первом цикле и электрохимической отмывке экстракта урана от плутония в цикле аффинажа урана. Коэффициент очистки плутония от урана за два цикла (цикл разделения и цикл аффинажа плутония) составляет 10^3 - 10^4 при электрохимической резкстракции плутония переменным током на трех ступенях в каждом цикле.

Исследования процесса электрохимической восстановительной резкстракции нептуния в условиях первого цикла проводили применительно к так называемой схеме "с селективной резкстракцией нептуния". При этом из совместного экстракта первым резкстрагировали нептуний, за ним - плутоний и затем - уран.

Исследование процесса электрохимической резкстракции нептуния (1-й блок резкстракции) показало, что степень извлечения нептуния в его резкстракт составляет 95,0-99,0 %. При этом в резкстракт нептуния количественно переходит весь технеций, находившийся в экстракте. Последний результат представляется весьма существенным, поскольку при всех других построениях схемы первого цикла и других способах резкстракции нептуния, технеций проходил по всей схеме (включая аффинажные операции) и значительно осложнял проведение всех окислительно-восстановительных экстракционных процессов.

Выполненный комплекс исследований позволил предложить и включить в проект завода РТ-2 ряд электрохимических процессов. Так, в проект были включены операции восстановительной резкстракции плутония, восстановительной (электрохимической) промывки экстракта урана второго цикла, стабилизации валентных пар плутоний(IV) - нептуний(V) и нептуний(IV) - плутоний(III) перед соответствующими циклами аффинажа, электрохимического разложения щавелевой кислоты и, в качестве резервного, аппарат для получения запасных растворов урана(IV).

Кроме того, была разработана бессолевая схема стабилизации валентных форм акти-
нидов при переработке ОЯТ с использованием электрохимических операций.

При нашем участии сотрудниками Свердловского НИИХИММАШ была полностью разрабо-
тана конструкторская документация на соответствующие аппараты и устройства, включая
токоподводы, шины и т. д., подобраны агрегаты для электропитания установок.

Работы в этом направлении продолжались еще несколько лет, и затем, как сказано
выше, были практически свернуты, хотя их перспективность представляется очевидной и в
настоящее время.

УЧАСТИЕ В ЯДЕРНО-ВЗРЫВНЫХ ПРОГРАММАХ СССР

В. Н. Ушатский, Ю. В. Дубасов

После окончания Великой Отечественной войны сотрудники Радиевого института вернулись из Казани в Ленинград и по решению Правительства и Президиума АН СССР РИАН был привлечен к выполнению чрезвычайно ответственных задач по созданию атомной промышленности, в том числе проблем получения плутония, а также испытания будущей атомной бомбы. В данном сообщении мы постараемся кратко рассказать об участии сотрудников Радиевого института им. В. Г. Хлопина в радиохимических исследованиях, связанных с испытанием ядерных зарядов в атмосфере и под землей, а также при проведении подземных ядерных взрывов в мирных целях. Рассматриваемый период охватывает большой промежуток времени - с 1947 г. по настоящее время.

За 50-летний период в работах участвовало два поколения научных сотрудников, инженеров, техников, лаборантов и рабочих. К нашему счастью, многие из ветеранов ныне здравствуют и находятся в поредевших рядах сотрудников нашего института, отмечающего в этом году свое 75-летие. Как видим, работы, связанные с ядерными взрывами, по времени занимают 2/3 прожитой жизни Радиевого института им. В. Г. Хлопина.

1. Разработка радиохимического метода определения коэффициента полезного использования ядерного горючего (КПИ) при взрывах.

В начале 1947 г. в Радиевом институте АН СССР было получено Постановление СНК СССР за подписью И. В. Сталина с заданием на разработку радиохимического метода определения КПД при ядерных взрывах. Ответственным исполнителем работы в этом постановлении был назван Г. М. Толмачев. Кандидат технических наук Г. М. Толмачев в то время был старшим научным сотрудником в лаборатории академика В. Г. Хлопина [1]. Задание Правительства было предельно ясным: нужно было разработать прямой метод определения энерговыделения при ядерных взрывах. Радиохимический метод определения КПД и является именно таким прямым методом, позволяющим получить непосредственно данные о массе разделившегося, например, плутония-239, а следовательно и о величине энерговыделения. При делении одного ядра плутония-239 выделяющаяся энергия составляет 179 МэВ; если разделится 55,6 г, то мгновенно выделившаяся энергия будет эквивалентна взрыву 1000 т тротила (это так называемый "тротиловый эквивалент ядерного взрыва").

Радиохимический метод определения КПД (или, как мы позже назвали этот термин - КПИ - коэффициент полезного использования) непосредственно связан с результатами количественного анализа проб продуктов ядерных взрывов на содержание в них радионуклидов осколочного происхождения и оставшегося, неразделившегося при взрыве, ядерного горючего, например плутония-239. При этом КПИ, обозначенный ϕ , по определению можно представить следующим выражением:

$$\phi = \frac{N_{\text{fiss}}}{N_{\text{fiss}} + N_{\text{rem}}} \quad (1),$$

где N_{fiss} - количество разделившихся при взрыве ядер в расчете на всю пробу, которое вычисляется по полному числу атомов избранного осколочного радионуклида (например молибдена-99), найденных в этой же пробе - N_{frag} . Величина N_{frag} определяется по измерению абсо-

плотной величины бета-активности осколочного радионуклида, отнесенной к моменту взрыва (t_0), т. е. с учетом его распада за интервал времени от момента взрыва до момента измерения. Тогда, при известном выходе осколочного радионуклида (η , в %%) в процессе деления плутония-239 на нейтронах спектра деления

$$N_{\text{fiss}} = \frac{N_{\text{frag}}}{\eta} \times 100 \quad (2).$$

Величина N_{rem} в формуле (1) - это число неразделившихся атомов плутония-239, найденных в той же пробе продуктов взрыва. В результате, величина КПИ, выраженная в %%, может быть записана следующим образом:

$$\varphi = \frac{N_{\text{frag}}/\eta \times 100}{N_{\text{frag}}/\eta \times 100 + N_{\text{rem}}} \times 100 \quad (3).$$

Из формулы (3) следует, что для определения КПИ необходимы данные о содержании в пробах атомного взрыва не менее двух радионуклидов - осколочного и остаточного горючего. Поэтому основой метода является предположение о наличии идеального перемешивания всех продуктов реакции и о сохранении постоянства соотношений количеств атомов этих продуктов в любой пробе, независимо от места ее отбора. Предполагалось, что это условие будет соблюдаться, если проба для исследований будет отбираться непосредственно из облака продуктов атомного взрыва, например, с помощью авиационных средств.

Таким образом, для реализации возможности расчета КПИ по формуле (3) необходимо было:

- разработать методы определения полных (кумулятивных) выходов ряда осколочных радионуклидов при делении урана и плутония на нейтронах спектра деления и более быстрых (~14,6 МэВ);
- определить величины этих выходов;
- разработать методики количественного выделения и радиохимической очистки осколочных радионуклидов из растворов;
- разработать способы измерений абсолютной бета-активности, по которой рассчитываются количества атомов, содержащихся в анализируемых пробах;
- разработать методы количественного выделения из проб продуктов взрыва в радиохимически чистом состоянии, без носителей остаточного ядерного горючего (плутония-239, урана-235); разработать способы определения его содержания в этих пробах, в том числе, например, по абсолютной альфа-активности плутония-239. Исследования, связанные с определением энерговыделения при ядерных взрывах, усложнялись в соответствии с изменением конструкций испытываемых специзделий, с использованием, кроме плутония-239, радионуклидов урана-235 и -238, компонентов термоядерных реакций синтеза - дейтерия и трития, при которых образуются быстрые нейтроны с энергией ~14,6 МэВ: $T(d, n)^4\text{He} + Q$ (17 МэВ); при этом 3 МэВ расходуется на альфа-частицу ^4He ; ~14,6 МэВ - на нейтрон. На быстрых нейтронах с энергией 14,6 МэВ, как известно, делится и основной изотоп природного урана - уран-238.

Для определения потока быстрых нейтронов использовались так называемые пороговые (индикаторные) позитронно-активные радионуклиды, образующиеся из природных изотопов по ядерной реакции $(n, 2n)$. В связи с этим в продуктах ядерных взрывов определялось содержание не только осколочных радионуклидов и остаточного ядерного горючего, но и ряда других радионуклидов, например ^{55}Co , ^{74}As , ^{196}Au , ^{237}U и др.

Для выполнения большого объема работ, предписанных Правительственным заданием, связанных с созданием методик и образцов аппаратуры физического, химического и ра-

диохимического назначения, в институте были привлечены сотрудники из лабораторий, руководителями которых были: академик В. Г. Хлопин, член-корр. АН СССР И. Е. Старик, Г. М. Толмачев, Д. М. Зив, Ю. А. Немилов, К. А. Петржак, Б. С. Желепов, Г. В. Горшков, А. Н. Протопопов, В. Н. Ушатский.

С 1948 по 1960 гг. выполнялись исследования с целью определения кумулятивных выходов ряда выбранных осколочных радионуклидов, образующихся при делении ядер ^{235}U , ^{238}U и ^{239}Pu нейтронами спектра деления и быстрыми нейтронами с энергией $\sim 14,6$ МэВ. Определялись выходы следующих осколочных радионуклидов: ^{89}Sr , ^{90}Sr , ^{95}Zr , ^{97}Zr , ^{99}Mo , ^{101}Mo , ^{102}Mo , ^{103}Ru , ^{105}Ru , ^{106}Ru , ^{111}Ag , ^{112}Ag , ^{115}Cd , ^{131}I , ^{140}Ba .

Эта работа выполнялась большим коллективом сотрудников под руководством К. А. Петржака, Г. М. Толмачева, А. Н. Протопопова, Б. С. Желепова, В. Н. Ушатского, Д. М. Зива, Г. В. Горшкова. Основными исполнителями были: Ю. М. Артемьев, Л. И. Абрамова, А. Н. Аполлонова, М. А. Бак, Н. И. Блинова, С. С. Бугорков, Н. А. Власов, Р. В. Венедиктова, Л. И. Геденов, Л. В. Драпчинский, Т. А. Ильинская, Р. Б. Иванов, И. Т. Крисюк, В. Б. Колычев, Н. М. Казаринов, М. И. Кузнецов, Г. П. Лепнев, Э. А. Москалькова, Л. З. Малкин, Ю. А. Немилов, В. В. Осипова, А. К. Пермькова, Н. А. Павлова, Н. Б. Платунова, Д. К. Попов, Ю. Г. Петров, Л. П. Родионова, А. Г. Самарцева, Г. С. Сеницына, С. М. Соловьев, В. М. Солнцев, А. Н. Силантьев, В. В. Смирнов, А. В. Сорокина, Г. В. Филатова (Яковлева), Л. П. Чернышева, Н. С. Шиманская, Б. М. Ширяев, Л. В. Ширяева, В. Б. Ядринцев, В. А. Яковлев, М. И. Якунин.

Использованные методики, техника экспериментов и полученные результаты содержатся в ряде публикаций [2-6].

Все перечисленные выше сотрудники Радиевого института участвовали и в исследованиях, непосредственно связанных с результатами испытаний ядерного оружия в 1949-1962 гг.

В работах [5, 6] приведены разработанные в Радиевом институте методики радиохимического определения содержания в растворах как при определении выходов осколочных радионуклидов, так и при анализе продуктов взрывов многих осколочных и индикаторных радионуклидов: ^{89}Sr , ^{90}Sr , ^{95}Zr , ^{99}Mo , ^{101}Mo , ^{102}Mo , ^{103}Ru , ^{105}Ru , ^{106}Ru , ^{111}Ag , ^{112}Ag , ^{112}Pd , ^{115}Cd , ^{125}Sb , ^{132}Te , ^{131}I , ^{132}I , ^{139}Ba , ^{140}Ba , ^{140}La , ^{45}Ca , ^{55}Co , ^{74}As , ^{196}Au , ^{198}Au , ^{202}Tl , ^{204}Tl , ^{237}U , а также ^{210}Po . Особенностью этих методик является использование в количественном анализе метода изотопного разведения, при котором, как известно, не требуется 100 %-го выделения искомого радионуклида с его стабильным изотопным носителем. Это давало возможность получать радионуклид в радиохимически чистом виде, что достигалось путем многократных очисток от посторонних радиоактивных примесей. Радиохимическая чистота давала возможность определить количество атомов определяемого радионуклида в пробе по его абсолютной радиоактивности, причем потери при радиохимической очистке легко определялись по выходу вводимого стабильного носителя с помощью весового анализа.

Для каждого из названных осколочных радионуклидов химические операции по выделению их из растворов проводятся в рассчитанные промежутки времени, обусловленные скоростью их образования и выходом в цепочках радиоактивного распада продуктов деления. Это имеет значение и при анализе реальных проб продуктов ядерных взрывов. Так, например, рассчитано, что определение содержания ^{99}Mo можно начинать не ранее, чем через 5 часов, ^{111}Ag - через 4,2 ч, ^{89}Sr и ^{90}Sr - через 4 дня, ^{95}Zr - через 14 дней, ^{95}Nb - через 1 месяц после взрыва и т. д.

Следует особо подчеркнуть, что все радиохимические и радиометрические методики были разработаны в РИАН самостоятельно и независимо. Американская книга "Radiochemical Studies of Fission Products" появилась у нас уже после 1952 года. Попытка использования некоторых американских методик закончилась неудачей, ввиду, вероятно, неполной информации. Разработанные в РИАН методики были переданы в КБ-11 (ВНИИЭФ, Арзамас-16), на полигоны, в институты Минобороны и еще долгое время успешно применялись в отечественных испытаниях.

Большое внимание в Радиевом институте уделялось разработкам и совершенствованию методов измерения абсолютной бета-активности радионуклидов осколочного проис-

хождения и других бета-активных нуклидов. В 1948 г. был разработан способ измерения абсолютных величин бета-активности методом определенного телесного угла, в котором по измеренному числу бета-частиц, попадающих в счетчик в соответствии с геометрией счетного устройства, находят полное число частиц, испускаемых препаратом во все стороны.

В этом методе для рабочих измерений бета-активности в "толстых" препаратах (толщиной > 2 мг/см²) использовались стандартные счетчики типа ТМ-20 заводского изготовления. Счетчики были прокалиброваны по каждому измеряемому радионуклиду с помощью специальной установки для эталонирования, на которой предварительно измерялась абсолютная бета-активность препаратов радионуклидов в тонком слое (0,2-0,3 мг/см²). Таким образом, для каждого измеряемого бета-активного нуклида на стандартных счетчиках ТМ-20 устанавливался коэффициент пересчета от измеренной бета-активности в толстом слое к ее абсолютной величине.

Метод разработан сотрудниками лаборатории Б. С. Желепова: А. В. Сорокиной, Н. А. Власовым, К. П. Артемовым и В. А. Юргенсоном [7].

В дальнейшем, с 1956 г., измерения абсолютных величин бета- и альфа-активности выполнялись методом полного телесного угла в геометрии 4π в тонких слоях радиоактивных препаратов, нанесенных на тонкие органические пленки, и в геометрии 2π, в случае, когда исследуемый препарат наносился на металлическую (обычно платиновую) подложку. Эти измерения выполнялись с помощью проточных 4π-счетчиков с рабочим газом - метаном или даже бытовым газом - пропан-бутановой смесью. Прототипом конструкции разработанного в Радиовом институте 4π-счетчика является счетчик С. А. Баранова и Р. М. Полевого [8]. Важным достоинством этих 4π-счетчиков является практически 100 %-ная эффективность регистрации альфа- и бета-частиц и возможность измерения альфа-активности в присутствии бета-активности в соотношении до 1:10⁶.

Для непосредственного определения содержания в пробах продуктов ядерных взрывов некоторых осколочных радионуклидов и других бета-активных нуклидов без предварительной химической подготовки проб мы использовали методы ионизационной гамма-спектрометрии. Так, по предложению М. И. Кузнецова, сотрудника лаборатории В. Н. Ушатского, был использован разработанный в Радиовом институте способ непосредственного определения бета-активных (и позитронно-активных) нуклидов, излучающих при распаде каскадные гамма-кванты [9]. Им же был изготовлен двухкристальный (с кристаллами NaJ) спектрометр гамма-совпадений с управлением суммарной амплитудой. В этом спектрометре селективно регистрируются только совпадающие во времени каскадные гамма-кванты, имеющие заданную суммарную энергию от избранного радионуклида. Главное достоинство этого метода заключается в практически полном отсутствии комптоновского излучения в выбранной области гамма-спектра, которое и является основной помехой при определении содержания радионуклидов с помощью обычных гамма-спектрометров. Этим методом у нас определялось содержание в пробах продуктов ядерных взрывов таких радионуклидов, как ⁹⁹Mo, ¹⁴⁰Ba, ¹⁴⁰La, ¹⁰⁶Ru, ¹⁴⁴Ce, ¹⁹⁶Au, ¹³⁴Cs.

Для измерения альфа-активных препаратов плутония и урана, выделенных из проб продуктов ядерных взрывов количественно методом эфирной экстракции без носителей и в радиохимически чистом виде, у нас использовались ионизационные камеры, а также методы ионизационной альфа-спектрометрии; в этом случае ионизационная камера представляла собой двухсеточный вариант плоскоэлектродной камеры с электронным собиранием. Однако разрешающая способность ионизационных камер, составляющая ~ 50 кэВ, не позволяла разрешить основные альфа-линии ²³⁹Pu и ²⁴⁰Pu, поскольку энергия их различается только на 15 кэВ. ²⁴⁰Pu образуется при атомных и особенно много при термоядерном взрыве. При измерении спектров смеси изотопов плутония получалось только соотношение альфа-активности ²³⁸Pu и суммарной альфа-активности ²³⁹Pu и ²⁴⁰Pu. В связи с этим содержание ²³⁹Pu и ²⁴⁰Pu (и ²³⁵U) определялось по числу делений при облучении мишеней с плутонием (или ураном) в нейтронном потоке ядерного реактора при помощи двойной ионизационной камеры. Во вторую половину этой камеры помещалась образцовая мишень с известным ко-

личеством атомов ^{239}Pu (или ^{235}U). При наличии данных о суммарной активности изотопов плутония, измеренных с помощью ионизационной камеры 4π-счетчика, и данных о соотношении альфа-активности плутония с атомными массами 239 и 240 задача о содержании названных радионуклидов плутония решается просто.

2. Участие в ядерных испытаниях 1949-1962 гг.

К выполнению своей задачи при первом ядерном взрыве на Семипалатинском полигоне группа сотрудников Радиевого института была подготовлена; все необходимое оборудование, материалы, химические реактивы и технические устройства для измерений радиоактивности были доставлены в лабораторный корпус полигона. Предполагалось, что представительные пробы для радиохимического анализа с целью определения величины КПИ плутония будут отобраны непосредственно из облака продуктов атомного взрыва. Для этого были подготовлены беспилотные самолеты, оборудованные гондолами с фильтрами Петрянова типа ФПА-15. Эти самолеты, управляемые по радиосигналам с двух других пилотируемых самолетов сопровождения, должны были взлететь, пройти через облако взрыва, отобрать пробу и совершить посадку непосредственно на полигоне.

Первый отечественный атомный взрыв был произведен на башне высотой 30 м ранним утром 29 августа 1949 г. в очень ненастную погоду. В связи с этим самолет-пробоотборник не мог быть использован. Пробы из облака взрыва не было. Тогда было принято решение отобрать пробу застывшего шлака в районе эпицентра взрыва. Пробы были отобраны и подготовлены к выполнению количественных анализов на содержание в них плутония и осколочных радионуклидов. "Остаточный" плутоний был выделен из долей растворов проб шлака фторидным и сульфатным методами. Из этих же проб были выделены и осколочные радионуклиды: ^{99}Mo , ^{140}Ba и ^{140}La . Абсолютная величина альфа-активности плутония была измерена на ионизационной камере, а бета-активность осколочных радионуклидов - на калиброванных торцевых счетчиках ТМ-20 методом определенного телесного угла. Рассчитанные величины КПИ плутония для ряда исследованных проб шлака согласовывались между собой в пределах погрешностей измерений. Мощность взрыва составила 22 кт ТНТ.

Разработанный в Радиевом институте метод определения КПИ ядерного горючего сработал.

С целью подтверждения полученных результатов был отобран ряд проб шлака из эпицентра взрыва и в зоне 200 м от него, через каждые 20 м (всего 12 проб).

Анализ этих проб выполнялся уже в стенах Радиевого института. В пробах определялось содержание плутония и осколочных радионуклидов: ^{95}Zr , ^{95}Nb , $^{144}\text{Ce}+^{144}\text{Pm}$, $^{89}\text{Sr}+^{90}\text{Sr}$ и ^{90}Y .

При этом данные по КПИ плутония, рассчитанные по ^{95}Zr , ^{95}Nb , $^{144}\text{Ce}+^{144}\text{Pm}$, согласовывались с первичными данными, полученными на полигоне. Данные по КПИ плутония, рассчитанные по содержанию в этих же пробах $^{89}\text{Sr}+^{90}\text{Sr}$ и ^{90}Y , были сильно заниженными относительно полученных по перечисленным выше осколочным радионуклидам. В этих же пробах определялось содержание ^{210}Po . Полученные данные по соотношению чисел атомов плутония и осколочных радионуклидов имели большой разброс.

В результате анализа полученных данных был сделан вывод о том, что шлаковые пробы могут быть использованы для определения КПИ атомного горючего при взрывах по соответствующим осколочным радионуклидам. Заниженные данные, полученные с использованием осколочных радионуклидов $^{89}\text{Sr}+^{90}\text{Sr}$ и ^{90}Y , были понятными, поскольку предшественниками этих радионуклидов в цепочках распада являются легколетучие и газообразные изотопы брома и криптона.

Это явление Г. М. Толмачевым тогда было названо сепарацией, а позднее стали называть фракционированием. С этой точки зрения был понятен и разброс данных по относи-

тельному содержанию в пробах шлака ^{210}Po : в разных пробах он частично улетучивался при застывании шлака.

Непосредственно на Семипалатинском полигоне при проведении первого отечественного атомного взрыва 29 августа 1949 года принимали участие следующие сотрудники Радиевого института:

Старик И. Е.	Самарцева А. Е.
Толмачев Г. М.	Сорокина А. В.
Джелепов Б. С.	Яковлев В. А.
Никитин Б. А.	Абрамова Л. И.
Горшков Г. В.	Соколов А. М.
Зив Д. М.	Ядринцев В. Б.
Власов Н. А.	

Второй и третий атомные взрывы на Семипалатинском полигоне, в проведении которых также непосредственно участвовали сотрудники Радиевого института, были произведены в 1951 г.

При втором взрыве 24.09.51 г., мощностью 38 кт, который как и первый, был наземным, пробу продуктов взрыва из его облака, тоже по техническим причинам, отобрать не удалось. КПИ плутония определили также, как и при первом взрыве 1949 г., с использованием проб радиоактивного шлака из эпицентра взрыва.

Третий атомный взрыв 18.10.51 г., мощностью 42 кт был произведен в атмосфере на высоте ~ 300 м. Это было первое воздушное испытание со сбросом авиабомбы. В этом случае удалось отобрать фильтровую пробу с высоты ~3500 м. Проба была сильно запылена. При ее радиохимическом анализе обнаруживалась сепарация некоторых осколочных радионуклидов. Однако КПИ атомного горючего был определен.

В этих атомных взрывах на Семипалатинском полигоне непосредственно участвовали следующие сотрудники Радиевого института:

Старик И. Е.	Павлова Н. А.
Толмачев Г. М.	Самарцева А. Е.
Джелепов Б. С.	Синицына Г. С.
Немилов Ю. А.	Соколов А. М.
Ушатский В. Н.	Сорокина А. В.
Абрамова Л. И.	Шиманская Н. С.
Бугорков С. С.	Ширяева Л. В.
Власов Н. А.	Ядринцев В. Б.
Геденов Л. И.	Яковлева Г. В.
Дмитриев В. Н.	

Первый в мире термоядерный взрыв транспортабельного заряда был произведен на Семипалатинском полигоне 12 августа 1953 г. Он был наземным. Специзделие было установлено на башне высотой более 30 м.

В этом случае были отобраны воздушные пробы продуктов взрыва с помощью пилотируемых самолетов типа ИЛ-28, оборудованных гондолами с фильтрами Петрянова ФПА-15. Фильтровые пробы были отобраны непосредственно из облака взрыва до его размывания воздушными течениями с высоты 3, 5, 8 и 10 км, всего 17 проб. Были также отобраны наземные пробы шлака на расстояниях от эпицентра взрыва до 50 м.

В результате выполненных радиохимических анализов многих проб продуктов термоядерного взрыва были получены данные о количественном содержании в них следующих радионуклидов: ^{46}Sc , ^{57}Ni , ^{95}Zr , ^{99}Mo , ^{102}Rh , ^{111}Ag , ^{115}Cd , ^{125}Sb , ^{140}Ba , ^{196}Au , ^{210}Po , ^{237}U , ^{239}Np , ^{239}Pu .

При обсуждении полученных данных был сделан вывод, что наиболее представительными пробами являются воздушные фильтровые пробы продуктов взрыва, отобранные на высотах 8-10 км (для ^{210}Po - только с высоты не менее 10 км).

В связи с предстоящим очень большим объемом исследований непосредственно на полигоне в этом испытании принимали участие следующие сотрудники Радиевого института:

И. Е. Старик	Г. В. Горшков	Г. С. Сеницына
Г. М. Толмачев	К. Я. Громов	А. М. Соколов
Б. С. Джелепов	В. Н. Дмитриев	Л. П. Чернышова
А. Н. Протопопов	Р. Б. Иванов	Л. В. Ширяева
Ю. А. Немилов	И. Т. Крисюк	В. А. Юргенсон
В. Н. Ушатский ^{*)}	Э. А. Москалькова	В. Б. Ядринцев
Л. И. Абрамова	Д. К. Попов	В. А. Яковлев
С. С. Бугорков	А. Е. Самарцева	Г. В. Яковлева
Н. А. Власов	А. Н. Силантьев	

Следует отметить, что все работы, связанные с исследованиями продуктов ядерных взрывов, были организованы таким образом, что часть их выполнялась на полигоне с оформлением там экспресс-отчетов, а другая - в Радиевом институте. При этом необходимые пробы для исследований доставлялись в институт самолетами.

После успешного испытания термоядерного специзделия 12 августа 1953 г., большая группа сотрудников Радиевого института им. В. Г. Хлопина - более тридцати человек - были награждены орденами и медалями СССР, а 12 сотрудников института стали лауреатами Государственных (тогда - Сталинских) премий 1953 года.

Государственных премий были удостоены:

II степени - Н. А. Власов, Б. С. Джелепов, И. Е. Старик, Г. М. Толмачев, В. Н. Ушатский, А. В. Сорокина, В. А. Яковлев.

III степени - Л. И. Геденов, Г. В. Горшков, Д. М. Зив, К. А. Петржак, А. Е. Самарцева.

Были награждены:

орденом Ленина - В. М. Вдовенко;

орденом Трудового Красного Знамени - Г. В. Горшков, А. Н. Протопопов, А. Е. Самарцева, Г. М. Толмачев, В. Н. Ушатский, В. А. Яковлев;

орденом Знак Почета - Б. С. Джелепов, Н. А. Власов, А. В. Сорокина.

С 1954 г. пробы продуктов ядерных взрывов с Семипалатинского полигона доставлялись для исследований непосредственно в Радиевый институт.

С 1955 г. были начаты ядерные испытания на Новоземельском полигоне. В них непосредственно участвовали сотрудники Радиевого института:

В 1955 г.:

В. М. Вдовенко	В. П. Касаткин
Б. С. Джелепов	Э. А. Кондакова
В. Н. Ушатский	А. М. Соколов
К. К. Аглинцев	В. В. Смирнов
А. Н. Власова	

В 1957 г.:

^{*)} В. Н. Ушатский был на полигоне в составе руководимой им радиохимической группы сотрудников ВНИИЭФ.

Б. С. Джелепов
В. Н. Ушатский
К. К. Аглинцев

Г. П. Лепнев
Э. С. Кондакова
А. М. Соколов

В 1958 г.:

Б. С. Джелепов
В. Н. Ушатский
Л. Ф. Антушев
С. С. Бугорков
Г. П. Лепнев

Э. А. Москалькова
В. П. Стацевич
Л. П. Чернышова
В. А. Юргенсон

Отличительной особенностью первых атомных испытаний на Новоземельском полигоне являлись подводные атомные взрывы.

Перечисленные выше сотрудники Радиевого института непосредственно принимали участие в двух таких испытаниях: в 1955 и в 1957 гг. В 1955 г. атомный заряд был взорван на небольшой глубине в одной из бухт Новой Земли (губа Черная), а в 1957 г. также был выполнен взрыв торпеды с ядерным зарядом. При этом торпеда была запущена с моря.

Практически во всех пробах, отобранных после подводных ядерных взрывов, обнаруживалась сильная сепарация радионуклидов. Это относится и к пробам, отобранным в 1955 г. самолетами с фильтрами ФПА-15 на высоте 1500 м (выше облако взрыва не поднялось). В 1957 г. проба была отобрана с высоты 3500 м. Почти во всех пробах, отобранных самолетами, наблюдалась сильная сепарация осколочных радионуклидов. При этом сепарация была необычной по сравнению с той, которая наблюдалась на Семипалатинском полигоне в шлаковых и воздушных пробах на высоте 3 и 5 км. В то время, как в последних пробах наблюдался относительный дефицит по сравнению с ^{99}Mo таких осколочных радионуклидов, как ^{140}Ba , ^{89}Sr , ^{90}Sr , в пробах, отобранных после подводных взрывов на полигоне Новой Земли, ^{89}Sr , ^{90}Sr и особенно ^{140}Ba , было почти в 10^3 больше, чем ^{99}Mo . Однако все же были найдены пробы с продуктами взрывов, в которых сепарация осколочных радионуклидов была сравнительно небольшой, о чем свидетельствовали экспериментально полученные величины в сравнении с ожидаемыми в соответствии с их выходами при делении ^{239}Pu и ^{235}U на нейтронах спектра деления. По таким пробам были определены КПИ атомного горючего.

Фильтровые пробы с продуктами ядерных взрывов, отбираемые самолетами на больших высотах, высылались в Радиевый институт для выполнения радиохимических анализов с обоих ядерных полигонов вплоть до заключения Международной конвенции о запрещении ядерных испытаний в трех средах (под водой, наземных и атмосферных), т. е. до 1963 г. В последующих атомных и термоядерных испытаниях сотрудники Радиевого института непосредственно в полигонных работах не участвовали.

Радиевый институт участвовал в проведении радиохимических анализов на 40 ядерных испытаниях (наземных, подводных, надводных и воздушных), осуществленных в период с 1949 по 1962 гг. Таким образом, сотрудники института с честью выполнили Задание Правительства СССР^{*)}. Работы проводились под руководством и непосредственным участии Ю. М. Толмачева, В. Н. Ушатского, И. Е. Старика, Б. С. Джелепова, К. А. Петржака, А. Н. Протопопова, исполнителями работ являлись многие ученые и сотрудники нескольких лабораторий института, а также прикомандированные в РИАН офицеры из военных институтов.

При этом следует отметить большую заслугу Радиевого института в подготовке кадров Советской Армии и Военно-морского флота для воинских частей и научно-исследова-

^{*)} В РИАН были созданы научные основы и разработаны методики радиохимического определения параметров испытываемых ядерных зарядов, и эти разработки были реализованы на практике.

тельских организаций, принимавших участие в ядерных испытаниях. Так, уже при подготовке к проведению первого атомного взрыва в 1949 г., в лабораториях Б. С. Желепова, К. А. Петржака и Г. М. Толмачева проходили стажировку армейские офицеры, которые принимали участие в этом испытании. Стажировки продолжались и в последующие годы.

Кроме того, в 1954-1955 гг. А. П. Ратнер, К. К. Аглинцев и В. Н. Ушатский читали лекции и проводили практические занятия по основам радиоактивности, радиохимии и дозиметрии для большой группы морских офицеров в Военно-морской академии им. А. Н. Крылова. Обучение офицеров проводилось и на спецкафедре химического факультета Ленинградского государственного университета, которой руководил заместитель директора Радиевого института И. Е. Старик.

3. Подземные ядерные взрывы

10 октября 1961 г. на Семипалатинском полигоне в горном массиве Дегелен был осуществлен первый в Советском Союзе подземный ядерный взрыв (ПЯВ) в штольне В-1. Таким образом началась подготовка к заключению договора о запрещении ядерных испытаний в трех средах и переходу от атмосферных испытаний к подземным. Следует сказать, что к этому моменту в США было проведено около 20 подземных испытаний.

В 1961-1962 гг. Радиевый институт подключился к работам по программам подземных ядерных испытаний и подземных ядерных взрывов в народнохозяйственных целях. Сначала это были лабораторные исследования, связанные с изучением поведения трансурановых элементов в различных горных породах. Руководителями исследований были В. М. Вдовенко и А. С. Кривохатский. Еще многие годы, до конца своей жизни (октябрь 1993 г.), Анатолий Сергеевич оставался научным руководителем этого направления.

Первое знакомство со штольней В-1 состоялось в октябре 1963 г., когда Л. И. Геденов, Д. С. Николаев и Ю. В. Дубасов (молодой сотрудник лаборатории В. М. Вдовенко) специально выехали на полигон. В этот период в ПромНИИПроекте (директор - профессор Б. И. Нифонтов) разрабатывали проект вскрытия штольни и обследования центральной зоны и полости взрыва. Сотрудники Радиевого института В. А. Блинов, К. Н. Дорогин, Ю. В. Дубасов, И. Н. Максимов, В. Г. Савоненков и Я. М. Цовбун в июле-августе 1964 г. вместе с сотрудниками ПромНИИПроекта и офицерами в/ч 52605 (полигон № 2) проводили изучение радиационной обстановки, распределения радиоактивных продуктов, состояния горного массива по мере приближения к полости взрыва. Все эти вопросы имели принципиальное значение для программ подземных ядерных испытаний и мирных ядерных взрывов. Бригада проходчиков, а вслед за ней и бригада исследователей достигли центра полости 6 августа. Полость оказалась обрушенной и заваленной крупными глыбами породы, поэтому пришлось дважды проводить маркшейдерскую съемку, чтобы убедиться в том, что центр взрыва достигнут.

Исследование радиоактивного материала, полученного при проходке в полость взрыва в штольне В-1, проводилось в лабораториях В. М. Вдовенко, Л. И. Геденова, Л. В. Комлева, Д. С. Николаева и В. Н. Ушатского. Была получена ценная информация о поведении и распределении радионуклидов, о загрязнении горного массива, о физико-химическом и петрографо-минералогическом изменении гранита при подземном ядерном взрыве. С 1965 по 1988 гг. ученые и сотрудники института активно участвовали в реализации программы мирного применения ядерных взрывов.

15 января 1965 г. на Семипалатинском полигоне был проведен первый мирный подземный ядерный взрыв в скважине 1004, чаще называемый "Чаган" по имени рядом находящейся реки. Взрыв был экскавационным с целью создания большого котлована, который впоследствии будет заполнен водой, объемом около 6,5 млн. м³. В изучении радиационной обстановки в центральной зоне взрыва принимали участие сотрудники института И. Н. Максимов, Н. В. Скирда и Л. Ф. Антушев. Сотрудники лаборатории В. Н. Ушатского проводили радиохимические анализы шлакового материала.

В этом же 1965 г. сотрудники лабораторий Л. И. Геденова, Д. С. Николаева, А. М. Трофимова и В. Н. Ушатского приняли активное участие в проведении трех мирных ПЯВ с целью интенсификации нефтяных месторождений в Башкирии на Грачевском месторождении (объекты "Бутан"). На Радиевый институт были возложены задачи обеспечения радиационной безопасности в момент проведения взрыва и в первый период после взрыва, а также исследования нефти и воды на содержание радионуклидов. В лабораторных условиях изучались вопросы перехода радионуклидов в нефть (Г. Н. Нечай, Н. И. Никитина), была доказана возможность получения чистой нефти при увеличении нефтеотдачи месторождения. Следует отметить, что уже при первых взрывных экспериментах были получены обнадеживающие результаты, заключающиеся в том, что дебит скважин увеличился в 1,5-2 раза и текущий коэффициент нефтеотдачи возрос на 5-8 %. Эти первые работы и взрывы явились экспериментальной основой для расширения и дальнейшего развития работ по интенсификации нефтяных и газовых месторождений [11].

В 1966 г. сотрудники лабораторий В. Н. Ушатского и А. М. Трофимова выехали в Узбекистан, где на газовом месторождении Урта-Булак участвовали в тушении неуправляемого газового фонтана. Ежедневно из недр земли вырывалось и сгорало 12 млн. м³ газа, что было бы достаточным для обеспечения Ленинграда. Все ранее известные методы тушения факела не давали положительного результата в течение трех лет, и поэтому Правительством и руководством Минсредмаша и Мингео было решено ликвидировать аварийную скважину с помощью камуфлетного ядерного взрыва на глубине 1,5 км. Сотрудники Радиевого института обеспечивали контроль радиационной обстановки в момент взрыва и в течение нескольких месяцев после взрыва. Эксперимент прошел с большим успехом - ствол скважины был пережат, и бушевавший в течение 3-х лет огромный факел погас через 20 секунд. С участием сотрудников нашего института 09.07.72 г. был выполнен еще один взрывной эксперимент "Факел" по тушению газового фонтана в Харьковской области вблизи г. Краснограда на Крестинском месторождении газа.

1966 год положил начало большому комплексу работ по проведению ПЯВ в соляных формациях. Этим работам предшествовали большие лабораторные исследования поведения трансурановых и осколочных элементов в каменной соли. Указанные исследования продолжались в течение 1963-1988 гг. в лабораториях В. М. Вдовенко, Л. И. Геденова, В. И. Гребенщиковой, Ю. В. Дубасова, В. Р. Клокман, Л. В. Комлева, Д. С. Николаева, К. А. Петржака, Ю. Г. Петрова, Ю. М. Рогозина, В. Г. Савоненкова, Г. С. Синицыной, А. М. Трофимова.

Первый подземный ядерный взрыв в каменной соли был осуществлен 22 апреля 1966 г. в Западном Казахстане в соляном куполе Западного Азгира, вблизи поселка Б. Азгир Гурьевской области. В куполах Б. Азгира в период с 1966 по 1979 гг. было проведено 17 взрывов мощностью от 1,1 до 100 кт, причем один повторный взрыв мощностью ~10 кт - в ранее созданной взрывом полости, 5 повторных взрывов мощностью до 0,5 кт - в полости, заполненной водой. Были проведены взрывы нескольких ядерных зарядов в одной скважине с целью получения полости с большой осью по вертикали, в которой радиоактивный расплав собирался в нижней полости, а верхние полости оставались чистыми (взрывы А-VII и А-VIII). Солянокупольное поднятие Большой Азгир как место для проведения многопрофильных подземных ядерных взрывов в уникальной геологической среде - каменной соли было предложено Радиевым институтом в 1961 г. Первоначальные идеи ориентировались на синтез трансплутониевых элементов (ТПЭ) и получение энергетического пара (к тому времени уже были известны основные задачи и результаты американского ПЯВ "Гном"), но уже после проведения здесь первого взрыва А-I возник комплекс задач, связанных с возможностями создания подземных емкостей различного назначения, получения других изотопов, помимо ТПЭ, захоронения радиоактивных отходов и др.

Исследование последствий первого взрыва показало, что в каменной соли образуется устойчивая полость, и руководством Минсредмаша было принято решение о создании опытно-промышленных подземных емкостей для хранения нефтепродуктов. Все ПЯВ в каменной соли проводились при непосредственном участии сотрудников Радиевого института, решавших задачи радиационной безопасности как в момент проведения взрыва, так и при

вскрытии и эксплуатации полостей. Помимо площадки "Галит", взрывы проводились в Оренбургской области (3 взрыва мощностью от 2,3 до 15 кт на глубине от 700 до 1140 м), вблизи Карачаганакского газоконденсатного месторождения (Уральская область в республике Казахстан) было создано 6 подземных емкостей, в Астраханской области - 15 емкостей для хранения газоконденсата и других технологических нужд Астраханского газохимического комбината. Руководителями работ по радиационной безопасности на этих экспериментах были В. И. Кацапов, В. А. Соколов, А. И. Кетов, Ю. Г. Петров. Многие из созданных емкостей в настоящее время находятся в промышленной эксплуатации. Всего в каменной соли на территории СССР был осуществлен 41 ПЯВ. В ходе реализации этой программы сотрудниками Радиевого института изучили физико-химические процессы подземного ядерного взрыва и распределение радионуклидов в расплаве соли и окружающем массиве, образование новых минералов; были разработаны основы технологии извлечения радионуклидов из радиоактивного сырья, изучены процессы распределения радионуклидов между каменной солью и хранящимися в полостях углеводородами. Основными исполнителями и руководителями этих направлений являлись Ю. В. Дубасов, В. Г. Савоненков, Е. А. Смирнова, В. Г. Потапов, Г. В. Яковлева, Н. В. Сковородкин, И. Н. Максимов, Г. Н. Нечай, Р. В. Брызгалова, Ю. М. Rogozin, С. В. Бутомо, Е. И. Бирюков, В. И. Матвиенко и др.

Огромный комплекс проектных и исследовательских работ был выполнен сотрудниками ПромНИИПроекта (теперь ВНИПИПромтехнологии (Москва)), ВНИИЭФ (Арзамас-16), КБ АТО (г. Мытищи Московской области) и многими другими.

В период с 1971 по 1988 гг. сотрудники института принимали участие в большой программе сейсмондирования земных недр с целью разведки полезных ископаемых. Зондированием была охвачена практически вся территория СССР, суммарная протяженность 14-ти профилей составила 70000 км. Взрывы проводились на глубинах от 500 до 1000 м. Всего было осуществлено 39 взрывных экспериментов, из них институт участвовал в четырех, обеспечивая контроль радиационной безопасности и объектов окружающей среды [12].

Начиная с 1970 г., сотрудники института начали подготовку к проведению опытно-промышленного взрыва на апатитовом месторождении в Мурманской области вблизи г. Кировска. Основными исполнителями работы по подготовке и проведению взрыва были ПромНИИПроект, комбинат "Апатит", ВНИИТФ (Челябинск-70), Радиевый институт и Институт горно-химического сырья (ГИХС, Москва). В горном массиве рудника "Новый" в горе Куэльпор было пройдено много сотен метров специальных выработок для решения как исследовательских, так и технологических задач, направленных на увеличение эффективности дробления руды. Взрыв на объекте "Днепр-1" мощностью 2,1 кт был осуществлен 04.09.72 г. Контроль радиационной обстановки в начальный период осуществляли совместно Радиевый институт и ПромНИИПроект. Контроль за радиоактивностью внешней среды в течение многих лет вели сотрудники лабораторий Л. И. Геденова и Ю. В. Дубасова.

В ноябре 1975 г. была вскрыта полость взрыва, и затем началась проходка в камеру захоронения, где должна была находиться основная масса радиоактивных продуктов, выведенная через специальное устройство из полости взрыва и таким образом удаленная от дробимого рудного тела. В 1976 и затем в 1978 гг. камера захоронения была тщательно обследована, дано ее описание и отобрано большое количество проб. В обследовании камеры принимали участие Ю. В. Дубасов, В. М. Осетров, Б. О. Шагин, Ю. Н. Громов и от ПромНИИПроекта - В. М. Кольцов и А. П. Коренков. Этот эксперимент был своего рода новаторским по многим позициям, и, в частности по системе выведения радиоактивных продуктов из полости взрыва, что вызывало среди специалистов различных институтов серьезные дискуссии по качеству работы системы. (Технология самозахоронения радиоактивных продуктов предварительно испытывалась на Семипалатинском полигоне в штольнях 148/1 и 148/5, о чем мы расскажем ниже). Поэтому тщательные радиохимические лабораторные анализы представительных образцов радиоактивной породы имели большое научное значение. Проведенные в лаборатории Ю. В. Дубасова радиохимические (Н. В. Сковородкин, Ю. И. Баранов, Н. С. Куракина и др.), гамма-спектрометрические (В. И. Васильев) и петрографо-минералогические (В. М. Осетров) анализы доказали эффективность работы системы выве-

дения радионуклидов и позволили изучить этот самый сложный газогидродинамический процесс. В этом опыте из полости взрыва было выведено ~84 % оставшегося ядерного горючего и тугоплавких осколочных радионуклидов. Была также доказана радиохимическая чистота раздробленной руды.

Второй эксперимент, "Днепр-2", на этом же руднике, но с одновременным подрывом двух зарядов мощностью по 1,7 кт и с выводом радионуклидов в две отдельные камеры захоронения, был осуществлен 27.08.84 г. Перед возведением забивочного комплекса сотрудники института изготовили и установили по системе выведения радионуклидов специальные радиоактивные индикаторы (около 10 наименований) для последующего анализа быстропротекающих процессов.

К прежним участникам эксперимента присоединились сотрудники КБ АТО. Вскрытие двух полостей взрывов и камер захоронения было осуществлено горнопроходческими бригадами комбината "Апатит" под руководством А. Соболевского в апреле 1987 г. Сотрудники нашего института Ю. В. Дубасов, П. Б. Малахов и В. А. Князев вместе с сотрудниками ПромНИИПроекта В. М. Кольцовым, В. Д. Ахуновым и Б. П. Мамоновым через узкий образовавшийся проход-нору проползли в сохранившуюся измерительную выработку, и затем двое из них вошли в камеры захоронения. Их взору представилась совершенно фантастическая картина. Стены, основание и потолки (кровля) были покрыты застывшими потоками лавового радиоактивного стекла причудливых форм и окраски. Обследование выработок продолжалось в течение 2-х дней с перерывами на отдых. В последующие дни сотрудники ВНИИТФ также проникли в камеры захоронения и сняли видеофильм. В результате обследования было составлено подробное описание, фотодокументирование выработок и отобрано для лабораторных исследований огромное количество радиоактивного материала. Лабораторные анализы и исследования показали, что из полостей каждого взрыва было выведено 94-95 % оставшегося горючего и тугоплавких радионуклидов. Исследования, которые выполнили сотрудники ПромНИИПроекта, ПО "Апатит" и ГИХС, позволили выпустить 400 тыс. тонн раздробленной ядерными взрывами руды и установить, что качество дробления выше, чем при обычной технологии на рудниках ПО "Апатит". Раздробленная руда свободно истекала из выпускных отверстий. Содержание искусственных радионуклидов в раздробленной руде было на уровне чувствительности применяемых методик и на много порядков ниже допустимых концентраций.

В 1979 г. в шахтерском поселке Юный коммунар Донецкой области, на шахте "Юнком" (объект "Кливаж") с участием многих организаций Минсредмаша, Министерств угольной промышленности СССР и УССР был проведен уникальный взрывной эксперимент по проверке эффективности регионального мероприятия по борьбе с внезапными выбросами угля и газа путем обработки ударной волной ядерного взрыва наиболее взрывоопасных угольных пластов. Заряд мощностью 0,3 кт был подорван на глубине 900 м от земной поверхности. Сотрудники лабораторий Ю. В. Дубасова, Ю. Г. Петрова и А. А. Палладиева под непосредственным руководством А. С. Кривохатского и В. И. Кацапова обеспечивали дистанционный радиационный контроль как в подземных выработках, так и на дневной поверхности. Осуществлялся контроль газовой компоненты и радиоактивности образцов внешней среды, включая сбросные шахтные воды. Шахта "Юнком" заработала через 3 дня после ядерного взрывного эксперимента. Если на данной шахте к концу 70-х годов, т. е. до проведения эксперимента, произошло 200 внезапных выбросов угля и газа с человеческими жертвами, то после 1978 г. характер выбросов резко сократился и уменьшился по силе, что позволило избежать человеческих жертв. Радиационная обстановка как на шахте, так и за ее пределами контролировалась вплоть до 1991 г. и не отличалась от фоновой. И напрасно некоторые "зеленые" пытаются преуменьшить эффективность данного эксперимента, позволившего сохранить не одну шахтерскую жизнь. Готовился аналогичный эксперимент и на одной из шахт г. Горловки, однако политические обстоятельства (разделение России и Украины на самостоятельные государства) и антиядерные настроения после катастрофы на ЧАЭС не позволили продолжить эти работы. Особо следует подчеркнуть, что все мирные подземные ядерные взрывы проводились по заказам министерств и госкомитетов и с согла-

сия республиканских и областных организаций. Минсредмаш выступал как исполнитель специальной части проекта.

Всего же за период с 1965 по 1984 гг. сотрудники Радиевого института принимали непосредственное участие в проведении 55 мирных подземных ядерных взрывах на территории СССР.

В период с 1963 по 1989 гг. сотрудники Радиевого института провели большой комплекс исследований на Семипалатинском и Новоземельском полигонах.

Эти исследования были связаны как с разработкой научных вопросов мирного применения ядерных взрывов, так и с испытаниями ядерных зарядов. В 1966 и 1975 гг. экспедиция института участвовала в экспериментах ВНИИЭФ, проводившихся в штольнях массива Дегелен Семипалатинского полигона. Задачей экспериментов был синтез трансплутониевых радионуклидов с экспрессным извлечением проб для анализа короткоживущих радионуклидов сначала в лабораториях полигона, а затем в лабораториях института.

В 1971-1972 гг. сотрудники нашего института вместе с сотрудниками полигона и ИПГ им. Федорова обследовали полость взрыва, проведенного 29 октября 1968 г. в штольне 504. Обходная горная выработка соединилась с полостью через 457 дней зимой 1970 г. Первое обследование механических и радиационных параметров было выполнено специалистами полигона и ПромНИИПроекта. К удивлению и радости, исследователи увидели почти сохранившуюся полость. Она оказалась наполовину засыпанной обрушенной со стенок и свода породой. Высота свода составляла в наивысшей точке 12,6 м от центра взрыва. В экваториальной плоскости полость оказалась несколько асимметричной. Без учета асимметрии радиус полости составлял $8 \pm 0,2$ м. По данным, полученным через разведывательную скважину с отбором керна, пройденную в 1972 г. под углом 20° в полость взрыва, радиус полости в нижней ее полусфере составлял 7,5 м.

Детальное обследование полости взрыва в штольне 504 с отбором проб проводилось Ю. В. Дубасовым, В. Н. Костровым, А. С. Кривохатским, Н. В. Сковородкиным, В. П. Стацевичем, Ю. И. Барановым в 1971 и 1972 гг. Нижняя часть полости на высоту 3 м оказалась заполненной радиоактивным монолитным темным стеклом с зеленоватым отливом, напоминающим обсидиан. Шаровой сегмент с застывшим расплавом был прикрыт мощным слоем обрушенной породы. В своде полости прослеживались трещины мощностью до нескольких сантиметров, заполненные расплавом породы. Большая часть видимой поверхности полости на высоту до 4 м от экваториальной плоскости была покрыта расплавом, имеющим вид сталактитовых натеков в виде застывших потоков и сосулек. Мощность корки стекла варьировала в пределах 1-20 см от белого, светло-серого, зеленоватого до темно-зеленого с участками коричневого и черного цветов. Встречались образцы голубого стекла. Мощность экспозиционной дозы вплотную к оплавленным стенкам варьировала от 20 до 40 мР/час, на навале обрушенных пород - около 20 мР/час.

За пределы полости расплав вышел в виде единичных отдельных тонких прожилок на расстояние не более 7 м от границы полости. Обследование полости и всесторонний лабораторный анализ радиоактивных материалов из сохранившейся полости взрыва в штольне 504 позволили решить многие проблемы физико-химических процессов подземного ядерного взрыва в граните и поведения при этом радионуклидов.

При обследовании в 1976-1977 гг. полости взрыва в штольне 148/5 (16.12.74 г.), проводившегося в массиве Дегелен с целью отработки технологии выведения радионуклидов из полости взрыва в специальные горные выработки, т. е. разработки технологии управления поведением радионуклидов при взрыве, была вскрыта камера захоронения с тыльной стороны и пробурено 8 скважин под различными углами и в разных направлениях. Бурение проводилось из обходной штольни с отметки 19 м от центра взрыва. Полость оказалась заполненной обрушенной породой.

Основной интерес, безусловно, представляла камера захоронения. В ее обследовании принимали участие Ю. В. Дубасов, В. М. Осетров, Н. В. Сковородкин, Ю. В. Быков, сотрудники полигона Р. С. Блинов и В. Н. Ищенко. Здесь впервые стало понятно явление вывода

радионуклидов из полости взрыва в специальную выработку, причем установлено, что с высокой скоростью вытекала высокоактивная порода, имевшая двухфазовое состояние. Стенки, кровля и основание камеры были покрыты слоем застывшего расплава, в торцевой части достигавшим 1 м. Уровни радиации достигали 0,4 Р/час. Камера захоронения оказалась доступной для обследования на протяжении 120-130 м из первоначальных 205 м. Как показали результаты радиохимических анализов, из полости взрыва было выведено ~99 % оставшегося горючего и тугоплавких осколочных элементов. Таким образом, благодаря многолетним усилиям многих институтов Минсредмаша, удалось разработать технологию управления поведением и локализацией радиоактивных продуктов взрыва, с выводением их из полости в нужном направлении и захорониванием в специальных выработках.

Были обследованы полости взрыва в штольнях 103 и 190. При взрыве в штольне 103 (20.11.81) произошел проброс через первый участок забивки больших количеств радиоактивного шлака так, что через неделю после взрыва у конца первого участка забивки, в котором образовалось отверстие диаметром 1,5 м, мощность дозы достигала 400 Р/час. Примерно через год после взрыва удалось проползти по первому участку забивки и увидеть полость взрыва, а через нее проникнуть в следующую выработку по направлению к полости другого взрыва, осуществленного совместно с первым. В обследовании штольни 103 принимали участие сотрудники Радиевого института - Ю. В. Дубасов, В. А. Князев, Н. В. Сковородкин, сотрудник ВНИИЭФ - С. П. Весновский, сотрудники полигона - Р. С. Блинов, О. К. Гавриков и В. Брюхов.

После вскрытия штольни 190, в которой 15.04.84 г. был проведен взрыв, было обнаружено, что там также сохранилась полость, стенки которой выстланы радиоактивным расплавом на многие десятки метров. Таким образом, при взрывах в штольнях массива Дегелен сохранилось значительное количество частично обрушенных полостей. Отсутствие финансирования на исследовательские программы в последующие годы не позволило в полной мере исследовать многие интересные явления. Этим можно было бы заняться сейчас, когда прекращены испытания, однако полигон перешел под юрисдикцию республики Казахстан, и там сейчас идут работы по программе демилитаризации Семипалатинского полигона, включающие в себя работу по закрытию и запечатыванию штолен. Например, штольня 190 уже запечатана.

Большой комплекс работ и исследований вместе с сотрудниками ВНИИЭФ и полигона провели сотрудники Радиевого института на физических экспериментах по облучению специальных объектов, исследованию центральных зон этих взрывов с целью изучения работы быстродействующих систем защитных сооружений. Уникальные исследования были проведены в штольне после проведения взрыва 175-ПП, где была тщательно обследована начальная часть системы вывода излучения. В этих работах принимали участие Ю. В. Дубасов, Н. В. Сковородкин, В. А. Князев, В. Б. Николаев, П. Б. Малахов, Б. О. Шагин, В. А. Голубев, Ю. С. Савченков, Е. Л. Лебедев, В. В. Мордвинов.

Совместные исследования центральных зон и выработок позволили в конечном итоге создать быстродействующие надежные сооружения, пропускающие мгновенное излучение ядерного взрыва и отсекающие выход даже газообразных радионуклидов на облучаемые позиции, что не осложняло радиационную обстановку. Вместе с нами работали сотрудники ВНИИЭФ - А. К. Чернышев, Г. В. Бебенин, А. А. Тюпанов, С. П. Весновский, А. А. Дружинин, В. Я. Семенов и другие.

Всего за период с 1963 по 1991 гг. сотрудники Радиевого института приняли участие в 20 ПЯВ и провели различные радиохимические и геолого-минералогические исследования в центральных зонах 40 наземных и подземных ядерных взрывов на Семипалатинском и Новоземельском ядерных полигонах.

Большой научный и профессиональный опыт сотрудников отдела 30 при проведении подземных ядерных взрывов оказался востребованным и очень ценным и полезным при ликвидации последствий аварии на Чернобыльской АЭС. Сотрудники отдела 4 мая 1986 г. в составе радиационной автомобильной колонны выехали к месту аварии, где и проработали с перерывами до конца 1990 г. Но это тема для отдельного сообщения.

С 1990 г. Радиевый институт им. В. Г. Хлопина был определен головным исполнителем в комплексной НИР по радиоэкологическому обследованию Семипалатинского и Ново-земельского полигонов. Руководителями работы были выбраны А. С. Кривохатский и Ю. В. Дубасов. За минувшие годы сотрудниками отдела выполнен большой комплекс работ по обследованию территории Южного острова архипелага Новая Земля, обследованы заливы Карской стороны Новой Земли, где были проведены захоронения различных радиоактивных отходов и материалов ВМФ и Минсудпромом. На основе детальных анализов воды и донных отложений развеян миф о "радиоэкологической катастрофе" как на Новой Земле, так и вокруг нее. Под редакцией профессора В. Н. Михайлова осуществлен выпуск сборников серии "Ядерные взрывы в СССР". В 1992 и 1993 гг. Радиевым институтом изданы два выпуска из этой серии, посвященные Северному испытательному полигону. Сейчас готовится второе, дополненное, издание на основе этих выпусков, а также выпуск № 3, посвященный Семипалатинскому полигону. Полигон посещали многие отечественные и международные комиссии, в том числе и эксперты США с Невадского полигона. В последние годы совместно с норвежскими орнитологами и сотрудниками ВНИИ охраны природы ведется учет и наблюдение за "птичьими базарами". Подтверждено, что наиболее многочисленная популяция кайр не уменьшилась по сравнению даже с довоенным периодом. Полученные результаты неоднократно представлялись на международных конференциях.

Не менее пристальное внимание уделялось также бывшему Семипалатинскому полигону, на котором было проведено около 30 наземных ядерных испытаний различного спектра мощности. Наземные испытания оставляют значительный след на территории полигона. Поначалу, в течение 2-3 лет, сотрудники института совместно с другими институтами проводили радиационное обследование прилегающих к полигону территорий и поселков, которые в наибольшей степени были подвержены выпадению радиоактивных осадков, специалисты Семипалатинского мединститута провели обследование населения, специалисты Института биофизики В. А. Логачев и Л. А. Михалихина подняли архивные материалы и восстановили картину дозовых нагрузок и заболеваемости населения в период 1956-1961 гг.

В 1993-1994 гг. к исследованию Семипалатинского полигона подключились эксперты МАГАТЭ и США. Результаты и выводы в отношении загрязнения и радиоэкологической опасности на прилегающих к полигону территориях, полученные нашими сотрудниками и экспертами МАГАТЭ, совпали и свидетельствуют о том, что дозы от искусственных радионуклидов, инкорпорированных в окружающую среду, вряд ли превосходят ~ 50 мкЗв/г. Основным вкладчиком является цезий-137. Определенная доля этого вклада обусловлена глобальными выпадениями от атмосферных испытаний ядерного оружия. Полученную величину уместно сравнить с дозовой нагрузкой, обусловленной естественными радионуклидами. Последняя составляет около 2,4 мЗв/г.

Совместно с экспертами США и сотрудниками Национального ядерного центра республики Казахстан в 1994 г. проведено выборочное обследование территории Семипалатинского полигона, в результате чего было показано совпадение результатов измерений методами полевой гамма-спектрометрии, их совпадение с результатами лабораторных радиохимических анализов и данными аэро-гамма-спектрометрической съемки 1990-1991 гг., выполненной по заказу Минобороны СССР и Радиевого института. В 1996 г. проводилось радиационное обследование штолен массива Дегелен, подлежащих закрытию и запечатыванию. Эти работы, по всей вероятности, будут продолжены.

В настоящем очерке, имеющем в большей степени историческую, чем научную направленность, очень трудно изложить все достижения большого коллектива, работавшего в течение 50 лет в таком необычном и новом научном направлении, которое формировалось в результате работ нашего института и еще многих прославленных научных коллективов нашей огромной и великой страны.

За прошедшие годы сотрудники отдела 30 и других лабораторий, работавшие в этих направлениях, защитили 8 докторских и 7 кандидатских диссертаций, двум работам совместно с другими коллективами присуждены Государственные премии СССР. Лауреатами Государственной премии стали А. С. Кривохатский (дважды), Ю. В. Дубасов, В. Г. Савонен-

ков, Н. В. Сковородкин. Многие сотрудники награждены орденами и медалями. Всего за период с 1961 по 1996 гг. сотрудниками института по тематике ядерных взрывов выпущено около 700 научных отчетов. В заключение считаем своим долгом привести список сотрудников института, участвовавших в ядерных испытаниях и мирных подземных ядерных взрывах.

Список сотрудников Радиевого института, принимавших непосредственное участие в испытаниях

М. Е. Абрамов, Л. И. Абрамова, Г. В. Авдзейко, В. М. Адамов, В. Н. Аксенов, Б. М. Александров, И. А. Александровский, О. Л. Аляпышев, В. Б. Андреев, Б. В. Андронов, А. А. Антонов, В. А. Антонов, Л. Ф. Антушев, Ю. М. Артемьев, А. В. Бабенко, М. В. Бакин, Ю. И. Баранов, Л. Я. Бедарева, Г. А. Безносков, Л. М. Белов, Э. А. Белова, Г. В. Бибикина, Е. И. Бирюков, В. А. Блинов, М. В. Блинов, В. М. Блохин, А. А. Блюдзин, А. И. Бобров, С. А. Богданов, Ю. В. Богданов, Н. А. Большикова, Д. Ю. Бондаренко, Н. Ф. Борисенко, Р. В. Брызгалова, П. Г. Буев, А. А. Буйницкий, А. Э. Булохов, С. В. Бутото, А. А. Буханцев, В. Н. Быков, Ю. В. Быков, В. И. Васильев, Н. В. Васильева, П. Н. Вениг, В. К. Виноградова, С. С. Гаврилин, В. М. Гаврилов, Г. И. Гайдук, В. Б. Гевирц, В. Г. Головлев, В. А. Голубев, Е. П. Горбачева, О. П. Григорьев, З. Г. Гритченко, А. В. Громов, Ю. Н. Громов, Д. Н. Гурин, Л. И. Гусев, Л. И. Густова, М. С. Гюббенет, Л. В. Драпчинский, Ю. В. Дубасов, В. С. Дубровин, А. В. Евдокимов, И. М. Елисеева, М. Е. Елистратов, В. К. Ермилов, С. П. Ерофеев, А. В. Ершаков-Альмари, Е. И. Ефимова, Б. Ф. Жабров, В. Г. Жерехов, М. И. Жилкина, Г. И. Жуков, Н. А. Журавлев, З. А. Журавлева, В. Н. Иванов, В. Ю. Иванов, К. С. Иванова, Ю. В. Игнатович, Н. Н. Ильин, Ю. Н. Казанкин, Г. В. Калинин, В. П. Касаткин, Е. Н. Касаткина, В. И. Кацапов, В. И. Качалова, В. А. Князев, В. А. Ковалевич, С. С. Коваленко, Е. А. Ковалова, Е. Н. Коварская, А. Е. Козлов, И. В. Козырев, П. Г. Колгушкин, О. А. Колесов, З. Я. Колкер, В. Б. Колычев, А. Г. Комаров, В. О. Константинов, Р. И. Корнилова, В. А. Корсунский, А. Ф. Корчевцева, М. П. Костина, В. Н. Костров, В. П. Котлин, С. А. Кочергин, С. М. Кочергин, А. С. Кривохатский, М. И. Кузнецов, В. В. Купреенков, Н. С. Куракина, Н. В. Куценко, Л. Р. Кюбарсепп, К. Ф. Лазарев, Л. Н. Лазарев, Н. А. Лазарев, Е. Л. Лебедев, В. К. Легин, Г. П. Ловцюс, Б. А. Лукинов, Ю. А. Мазалов, И. Ф. Макарова, В. Ф. Максимов, И. Н. Максимов, Л. М. Максимова, П. Б. Малахов, И. М. Маликов, А. Л. Малкин, Г. Н. Марасанов, В. В. Марков, Ю. С. Мартынов, В. И. Матвиенко, О. Д. Михайлов, В. В. Мордвинов, М. Н. Москалев, Г. Н. Нечай, А. В. Никитин, Н. И. Никитина, С. М. Никифоров, В. Б. Николаев, Д. С. Николаев, Г. А. Носков, Н. С. Окунев, М. Г. Омельченко, А. И. Орлов, В. М. Осетров, А. А. Палладиов, Г. Ф. Панов, В. П. Парменов, С. В. Парфенов, С. А. Пахомов, А. П. Переведенцев, В. Е. Петров, С. А. Петров, Ю. Г. Петров, Л. Ф. Петрова, В. В. Петухов, Н. Б. Пластинин, Ю. С. Попов, Л. Д. Преображенская, А. П. Простяков, В. А. Прохоров, Е. А. Пурина, О. П. Роговский, Ю. М. Рогозин, Л. П. Родионова, С. П. Росянов, В. Я. Рулев, Б. В. Румянцев, Н. Н. Рыжов, В. Г. Савоненков, Ю. С. Савченков, А. А. Сапожников, В. Н. Селифонов, Б. В. Сергеев, А. А. Сименев, Г. С. Синицына, Н. В. Скирда, Н. В. Сковородкин, А. Н. Скоробогатов, В. А. Смирнов, В. В. Смирнова, В. А. Соколов, И. А. Соколов, Н. В. Соколов, А. А. Солдатов, В. Соловьев, М. С. Соловьев, В. П. Стацевич, А. В. Степанов, В. К. Стерлядкин, Л. Н. Сысоева, Б. И. Тарлер, М. А. Татур, Д. В. Терентьев, Г. К. Тетервин, Н. П. Топорков, А. М. Трофимов, И. И. Тютюгин, Б. С. Усиков, В. Н. Ушатский, В. Ю. Федосов, В. М. Флегонтов, И. О. Фоменко, И. М. Цариковская, Я. М. Цовбун, В. В. Чекалова, А. А. Черепанов, В. И. Чернышев, И. В. Чубаров, А. А. Чугунов, Б. О. Шагин, В. А. Шамсутдинов, А. А. Шилов, Э. А. Шлямин, В. И. Шпаков, А. З. Шпунт, Н. В. Щепетильникова, А. М. Эпштейн, Г. В. Яковлева.

Сотрудники Радиевого института, выезжавшие на полигоны и места проведения МЯВ, уже на вторых и третьих этапах после самого взрыва, а также на протяжении долгих лет проводившие исследования в лаборатории, внесли достойный вклад в выполнение про-

грамм ядерных испытаний и подземных ядерных взрывов в народнохозяйственных целях. В знак глубокой благодарности считаем необходимым представить и их в этом юбилейном очерке.

Вот они:

Принимали участие при II-III этапах и эксплуатации:

В. А. Авдеев, В. А. Алексеев, С. А. Аршанский, Ю. Н. Бабенко, В. В. Богаев, С. И. Богачев, Б. Н. Волков, И. Б. Воробьев, А. Ю. Громов, А. И. Дмитриев, А. Ю. Донец, А. В. Дубровин, А. В. Евдокимов, Д. А. Ершов, Э. А. Залецкий, В. Ф. Захаренков, А. А. Каменцев, С. В. Кацапов, М. В. Князев, А. Ю. Козлов, В. В. Колин, В. Е. Копченков, С. А. Листратенко, А. А. Лумпов, Е. С. Моисеенко, В. А. Николаев, Э. М. Пазухин, Э. А. Панова, В. Б. Подкаменева, В. Г. Потапов, В. В. Преловский, В. А. Прохоров, Ю. И. Родионов, Ю. А. Сазонов, О. П. Смирнов, Е. А. Смирнова, В. А. Трифонов, В. И. Хентов, Л. А. Цветкова, С. В. Ярмийчук.

Принимали участие в лабораторных работах:

Н. А. Алексеева, Л. А. Ананьева, Н. Р. Андреева, А. Н. Аполлонова, М. А. Бак, Н. И. Блинова, Л. С. Буляница, Н. А. Варламова, Р. В. Венедиктова, В. Н. Воронцова, Е. И. Высторобская, М. М. Гербаневская, В. И. Гребенщикова, Е. С. Гугель, Н. С. Дементьева, Н. А. Дубасова, З. А. Журавлева, В. С. Зив, Н. Г. Иванова, А. А. Илларионов, Т. А. Ильинская, В. Р. Клокман, М. П. Ковальская, Ю. В. Коровин, С. М. Куликов, А. А. Листопадов, Т. И. Мазина, С. И. Малимонова, Л. З. Малкин, Л. П. Малышева, Б. М. Марков, З. Е. Морозова, Н. А. Николаева, В. В. Осипова, Л. А. Острцова, Ю. Л. Пазухина, А. К. Пермякова, Н. Б. Платунова, Т. И. Потапова, Л. Д. Преображенская, Л. П. Родионова, Ю. Ф. Романов, Л. Г. Савоненкова, В. В. Смирнова, Р. И. Соколова, И. В. Суханова, С. Ю. Сухарева, Я. С. Хворостин, Н. Н. Храмов, О. В. Чеплагина, Ю. Я. Чернышева, Н. Б. Чернявская, З. А. Шаргаева, Е. В. Ширвинский, М. И. Якунин.

Л и т е р а т у р а

1. Архив НПО Радиевый институт им. В. Г. Хлопина, фонд I - НТ - N 2956, 1989.
2. Протопопов А. Н., Толмачев Г. М., Ушатский В. Н., Венедиктова Р. В., Крисюк И. Т., Родионова Л. П., Яковлева Г. В. // Атомная энергия, 1958, т. 5, N 2, с. 130-134.
3. Нейтронная физика. Сборник / Под ред. П. А. Крупчицкого, М.: 1961, с. 217-223.
4. Радиевый институт им. В. Г. Хлопина. К 50-летию со дня его основания. / Под общей ред. акад. Б. П. Никольского. Л.: Наука, 1972, с. 168-176.
5. Бак М. С., Бугорков С. С., Ильинская Т. А., Петров Ю. Г., Петржак К. А., Солнцев В. М., Сорокина А. В., Ушатский В. Н. // Атомная энергия, 1959, т. 6, N 5, с. 577-578.
6. Радиохимический анализ продуктов деления. Сборник / Под ред. Г. М. Толмачева. Л.-М.: Изд. АН СССР, 1960, с. 136.
7. Труды Радиевого института имени В. Г. Хлопина: Сборник / Под ред. акад. П. И. Лукирского и члена-корр. АН СССР Б. С. Желепова. Изд. АН СССР, 1956, т. VII, вып. 1, с. 130-165.
8. Баранов С. А., Полевой Р. М. // ПТЭ, 1957, N 3, с. 32-36.
9. Блинов В. А., Дмитриев В. Н., Кузнецов М. И. // Атомная энергия, 1965, т. 19, N 4, с. 342-346.

10. Дубасов Ю. В., Думик В. П., Зеленцов С. А., Каримов В. М., Матущенко А. М., Филипповский В. И., Струков В. Г., Филонов Н. П., Харитонов К. В., Цырков Г. А., Чернышов А. К., Шумаев М. В. Хронология ядерных испытаний, проведенных в СССР в атмосфере, космическом пространстве и под водой (1949 - 1962). // Бюллетень ЦОИ по атомной энергии, 1994, N 2, с. 36-43.
11. Кедровский О. Л., Иванов И. Я., Мясников К. В. и др. Основные технические аспекты использования подземных ядерных взрывов в народном хозяйстве. - В кн.: Атомные взрывы в мирных целях / Под ред. И. Д. Морохова. М.: Атомиздат, 1970.
12. Ядерные взрывы в СССР. Выпуск 4. Мирное использование подземных ядерных взрывов / Под ред. О. Я. Кедровского и А. С. Кривохатского. М., 1994.

РАДИОХИМИЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ. ОБРАЩЕНИЕ С РАДИОАКТИВНЫМИ ОТХОДАМИ

Ю. В. Кузнецов, В. К. Легин, А. С. Алой, В. П. Тишков

Использование ядерной энергии, применение радионуклидов и источников на их основе в промышленности, медицине, науке, сельском хозяйстве приводит к неизбежному проникновению в окружающую среду (особенно в аварийных ситуациях) искусственных и, в меньшей степени, естественных радионуклидов. Более интенсивное загрязнение биосферы естественными радионуклидами, сравнимое по своим масштабам с загрязнением искусственными радионуклидами, имеет место при сжигании громадных количеств ископаемого органического топлива - угля, нефти, сланцев, природного газа.

Свою лепту в общее радиоактивное загрязнение природной среды вносит и использование в сельском хозяйстве различных видов удобрений, содержащих уран, торий и продукты их распада.

Разработка новых, более эффективных методов и средств защиты окружающей среды, включая перспективные технологии локализации радионуклидов в устойчивых формах радиоактивных отходов (матрицах), обеспечивающих их надежную изоляцию от биосферы в глубоких геологических формациях, использование в перспективе явления трансмутации долгоживущих радионуклидов и пр., несомненно, снизят (но не исключат полностью) масштабы радиоактивного загрязнения среды обитания человека.

Воспринимая этот факт как объективную реальность, общество должно иметь возможность адекватно оценивать масштабы, характер и последствия радиоактивного загрязнения природной среды. Корректная информация по этому вопросу в сочетании с реализацией мероприятий по предотвращению поступления радионуклидов в окружающую среду будут способствовать созданию надежной системы охраны окружающей среды от радиоактивных загрязнений.

В данной статье в краткой форме изложены основные результаты работ, выполненных в Радиовом институте отделом радиоэкологического мониторинга окружающей среды и обращения с радиоактивными отходами в указанных выше двух основных направлениях. В соответствии с этим, в статье выделены два взаимосвязанных раздела: радиохимия окружающей среды и обращение с радиоактивными отходами. Как будет показано ниже, работы, проводимые в рамках этих разделов, имеют одну общую направленность - защиту окружающей среды от проникновения в нее радиоактивных загрязнений. Общим для этих работ является единый методологический подход, в основе которого лежит получение информации о физико-химическом состоянии и поведении радионуклидов в исследуемых системах и процессах.

I. РАДИОХИМИЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

Для получения информации о процессах, управляющих миграцией радионуклидов в природных системах, недостаточно располагать данными об уровнях содержания радионуклидов в зонах воздействия источников загрязнений. В дополнение к этой предварительной информации необходимо иметь сведения о физико-химических формах нахождения радионуклидов в природной системе, подвергшейся загрязнению, о процессах, вызывающих трансформацию исходных форм радионуклидов под воздействием таких факторов, как, например, реакции восстановления-окисления, комплексообразование с органическими и не-

органическими лигандами, сорбция, химическая и биологическая экстракция и пр. Иначе говоря, необходимо обладать тем минимумом сведений, который дает возможность понять сущность физико-химического поведения радионуклидов внутри конкретной природной системы в настоящее время и позволит составить прогноз их возможной миграции за ее пределы. Таким образом, комплекс этих сведений может быть использован для корректной оценки радиозэкологической ситуации в исследуемой системе в данный момент и ее изменении в ближайшем и отдаленном будущем. Подобная информация по сути дела является радиохимической основой для оценки последствий воздействия радиоактивных загрязнений на природные биоценозы и человека, оценки риска.

Изложенный выше комплекс проблем составляет предмет исследований радиохимии окружающей среды - нового, самостоятельного раздела радиохимии.

Быстрое развитие, а по сути дела формирование радиохимии окружающей среды как самостоятельного научного направления приходится на конец 50-х - 60-е годы, хотя своими истоками оно уходит в 20-е - 30-е годы, когда в Радиевом институте были предприняты широкие по тем временам исследования распространенности естественных радионуклидов в природных водах, осадочных формациях, горных породах и минералах (В. И. Вернадский, В. Г. Хлопин, И. Е. Старик, Л. В. Комлев). Особенностью этих работ, отличающих их от подобных исследований за рубежом, было стремление не только изучить распределение радионуклидов в различных природных системах, но и проникнуть в сущность процессов, ответственных за это распределение (И. Е. Старик). Подобные исследования впоследствии сыграли важную роль при поиске урановых месторождений.

Идеи В. И. Вернадского о важности изучения "форм нахождения" радионуклидов в природе (этот термин впервые был введен именно им) в более поздних исследованиях сыграли важную роль при изучении процессов миграции радионуклидов и в настоящее время являются ключевым разделом радиохимии окружающей среды.

Следует отметить, что основы методологии радиохимии окружающей среды, наиболее четко сформулированные в более поздних исследованиях (середина 60-х годов), были разработаны при изучении поведения естественных радионуклидов в различных природных системах. Поскольку с начала 50-х годов в Радиевом институте большое внимание уделялось также изучению поведения в объектах окружающей среды искусственных радионуклидов, указанная выше методология успешно использовалась и в этой области исследований.

Для первого этапа развития радиохимии окружающей среды характерным является накопление массива экспериментальных данных по распределению естественных и искусственных радионуклидов в различных природных средах.

Первым шагом в этом направлении является цикл работ по изучению ураноносности природных вод (И. Е. Старик, Д. С. Николаев и др.). Этими исследованиями были охвачены все крупнейшие реки и ряд озер Советского Союза: было установлено влияние процессов выветривания горных пород и климатической зональности на содержание урана в изученных водных системах.

С середины 50-х годов проводятся интенсивные исследования распределения целого ряда естественных радионуклидов в Черном и Азовском морях (И. Е. Старик, Д. С. Николаев, Ю. В. Кузнецов, В. К. Легин, К. Ф. Лазарев, С. М. Гращенко, Л. Б. Колядин, М. С. Ламбет). Впервые были определены концентрации изотопов урана, радия, тория в водах и донных отложениях этих водоемов. Изучение вертикальных профилей радионуклидов в морских осадках Черного моря позволило впервые оценить скорости накопления, возраст осадков и время существования сероводородного заражения этого водоема. Применение радиоуглеродного метода датирования водных масс дало возможность определить скорость их перемешивания. Наиболее интересным с позиций радиохимии окружающей среды явилось установление физико-химической формы существования урана в водах Черного моря (И. Е. Старик, Л. Б. Колядин) в виде уранилтрикарбонатного комплекса. Это оказалось возможным благодаря тому, что уран является единственным радионуклидом, концентрация которого в водах гидросферы достаточно высока (10^{-6} г/л), что позволяет применять для

установления его физико-химического состояния такие классические методы, как ультра-фильтрация, сорбция, ионный обмен, электромиграция.

Важным моментом для последующих исследований поведения тория-230 и тория-232 в морской среде явилась выполненная впервые оценка времени пребывания этих радионуклидов в водах Черного моря. Было показано, что время пребывания тория-230 в водах Черного моря в 6 раз больше, чем тория-232. Позднее этот факт нашел объяснение в цикле исследований, посвященных изучению механизмов поступления тория-230 и тория-232 в донные отложения морей и океанов (Ю. В. Кузнецов, В. К. Легин, З. Н. Симоняк, А. Н. Елизарова).

С конца 50-х - начала 60-х годов начинаются широкие комплексные исследования естественной радиоактивности Мирового океана. К этому моменту завершается начальный описательный этап радиохимии окружающей среды, и основное внимание уделяется изучению поведения радионуклидов в природных процессах.

Поскольку для прямого изучения форм нахождения и физико-химического поведения радионуклидов в реальных природных средах большинство из классических методов изучения состояния не может быть применено из-за крайне низких концентраций радионуклидов, необходимо было изыскать другие пути. С этой целью была разработана методология комплексного решения этой проблемы (И. Е. Старик, Ю. В. Кузнецов, В. К. Легин и др.). Следует заметить, что дальнейшее развитие и совершенствование методологии осуществлялось в лаборатории, руководимой Ю. В. Кузнецовым (1963-1976 гг.), а затем (с 1976 г. и по настоящее время) в возглавляемом им же отделе.

Сущность методологии наиболее полно сформулирована в монографии Ю. В. Кузнецова "Радиохронология океана". Методология была впервые реализована для изучения физико-химического поведения изотопов тория, урана, радия и протактиния и механизмов их удаления в осадки в одном из наиболее удобных для этой цели районов Мирового океана - южной части Индийского океана. Основной чертой, отличающей южную часть Индийского океана от других районов Мирового океана, является практически полное отсутствие жидкого речного стока и наличие ледового стока как главного источника осадочного материала, играющего важную роль в процессах осадкообразования, в которые вовлекаются радионуклиды в океане. Отсутствие речного стока упрощает изучение сложнейших процессов, управляющих поступлением радионуклидов из морских вод в осадки, поскольку в этом случае практически устраняются неопределенности, связанные с необходимостью учета радионуклидов, переносимых в жидкой и твердой фазе речного стока и вклад которых в общее содержание радионуклидов в морской среде может быть значителен.

Принципиальная сложность изучения поведения радионуклидов в морской среде и механизмов их осаждения в донные отложения заключается не только в том, что океан предстает перед нами как гетерогенная физико-химическая система, в которой на протекание процессов осаждения, комплексообразования, ионного обмена, экстракции и др. влияют многочисленные биохимические реакции, обусловленные проявлением различных форм органической жизни; но и в том, что поступление и распределение в океане самих радионуклидов весьма специфично.

Изложенное выше было учтено при разработке методологии изучения физико-химического поведения радионуклидов в морской среде. Методология базируется на комплексном применении различных путей получения информации, основными из которых являются следующие:

- изучение пространственного распределения радионуклидов в водах и донных отложениях водоемов, отличающихся по своим физико-химическим условиям среды и механизмам осадконакопления;
- изучение корреляций между количеством радионуклидов и химическим, гранулометрическим и минералогическим составом взвешенной фазы и донных отложений водоема;
- одновременное изучение в одном и том же вертикальном разрезе распределения всех исследуемых радионуклидов между водной фазой, взвесями и донными отложениями;
- изучение вертикального распределения радионуклидов в донных отложениях, имеющих выраженную зональность окислительно-восстановительных условий среды;

- применение перспективных (с позиций реальных концентраций радионуклидов в объектах окружающей среды) методов изучения форм нахождения радионуклидов в объектах окружающей среды; метода ультрафильтрации - для жидкой фазы водоемов и методов селективного выщелачивания и фракционирования минералов - для донных отложений;

- применение моделирования реальных процессов, протекающих в водоемах, с участием исследуемых радионуклидов.

В последнее время получили развитие исследования механизмов взаимодействия радионуклидов с природными органическими веществами, в основном с гуминовыми и фульвокислотами. В этих работах применялись классические методы физико-химических исследований, таких как инфракрасная спектроскопия, рентгеноструктурный анализ (Д. Н. Суглобов, Е. К. Легин и др.).

Важным условием успешного применения разработанной методологии на практике являлась необходимость создания специальной методики радиохимического анализа исследуемых объектов, позволяющей осуществлять одновременное определение всех изучаемых радионуклидов (изотопов урана, тория, радия и протактиния) из одной и той же навески. Это особенно важно для изучения генетически связанных радионуклидов (уран-234 - торий-230, уран-235 - протактиний-231, торий-230 - радий-226 и др.). Такая методика была разработана и реализована на практике (Ю. В. Кузнецов, В. К. Легин, З. Н. Симоняк, Ю. Н. Поспелов).

Успешному применению разработанной методологии для изучения поведения радионуклидов в морской среде и механизмов их удаления в осадки способствовало предоставление для этих исследований великолепно охарактеризованных представительных образцов (водных концентратов, проб взвешенных веществ, поверхностных донных отложений и осадочных колонок), отобранных Институтом океанологии (Москва) в южных и центральных частях Индийского океана во время антарктических экспедиций. Для большинства образцов исследуемых взвесей и донных отложений были осуществлены анализы химического и гранулометрического состава, минералогические определения, анализы на содержание и состав биофауны и биофлоры, произведены определения величин pH и окислительно-восстановительных потенциалов. Кроме того, в наше распоряжение было предоставлено полное описание геологических, географических, физико-химических и биологических характеристик исследуемых регионов. Все эти многочисленные данные были использованы нами при изучении и описании механизмов, управляющих поведением радионуклидов в морской среде и удалением их в донные отложения.

Кратко основные итоги этих крупномасштабных исследований сводятся к следующему:

- впервые исследовано пространственное (в горизонтальном и вертикальном профилях) распределение изотопов урана, тория, радия и протактиния в водах, взвешенном веществе и донных отложениях южной части Индийского океана;

- установлено, что формы нахождения двух изотопов тория - ^{230}Th и ^{232}Th - в исследованной морской среде и механизмы их поступления в донные отложения различны. Этот парадоксальный, казалось бы, факт находит свое объяснение в различии источников поступления в морскую среду того и другого радионуклида. Так, основное количество ^{230}Th в морской среде образуется из растворенного в морской воде урана, который является для ^{230}Th радиоактивным предшественником. ^{232}Th , не имеющий радиоактивных предшественников, поступает в морскую среду, главным образом, в составе терригенных минералов, мельчайшие частицы которых разносятся в морской среде на гигантские расстояния, достигая центральных районов морских и океанических бассейнов. Поскольку ^{232}Th локализован в узлах кристаллических решеток этих минералов, которые весьма устойчивы и сохраняют неизменной свою структуру в физико-химической обстановке морской среды, переход ^{230}Th в окружающую среду крайне незначителен, и основное его количество концентрируется в составе осадков, а не в морской воде. Это и является причиной различия в поведении двух изотопов тория в морской среде;

- показано, что формы нахождения в морской среде и механизмы поступления ^{230}Th и ^{231}Pa в донные отложения идентичны. Так, установлено, что поступление этих радионуклидов в донные отложения определяют процесс их извлечения тонкодисперсными фракциями взвесей (прежде всего коллоидными сгустками оксигидратов железа и марганца) и процессы биологической экстракции ^{230}Th и ^{231}Pa планктонными организмами в составе их протоплазмы;

- на основе изучения вертикального распределения изотопов тория и протактиния в донных отложениях и привязки этого распределения к временной шкале в совокупности с комплексом сведений о механизмах поступления ^{232}Th , ^{230}Th и ^{231}Pa в донные отложения сделано допущение, что механизмы поступления этих радионуклидов в морские осадки в настоящее время мало отличаются от таковых в прошлые эпохи;

- показано, что распределение урана на океаническом дне зависит от механизма его поступления в составе материалов терригенного генезиса или процессов экстракции урана из океанической воды мертвым органическим веществом;

- установлено, что одним из основных процессов, контролирующих поступление ^{226}Ra из океанических вод в осадки, является его катионообменное извлечение глинистыми минералами взвесей и осадков.

Информация, полученная при изучении физико-химического поведения ^{230}Th , ^{232}Th , ^{231}Pa , ^{226}Ra и ^{238}U в морской среде и механизмов их удаления в осадки, была использована при проверке ведущих теоретических предпосылок четырех неравновесных методов датирования морских и океанических осадков: иониевого, протактиниево-иониевого, радиево-иониевого и иониево-ториевого. Было установлено, что:

- ведущие теоретические предпосылки иониевого и протактиниево-иониевого методов экспериментально обоснованы, и эти методы могут быть использованы для практического определения абсолютного возраста и скоростей образования глубоководных морских и океанических осадков. Для случаев, когда кривые вертикального распределения иония (^{230}Th) в осадках имеют сложный вид, затрудняющий датирование, разработан (на основе исследованного нами механизма накопления иония в океанических осадках) метод нормализации сложных иониевых кривых, приводящий их к экспоненциальной форме, пригодной для возрастных определений;

иониево-ториевый метод датирования донных отложений морей и океанов несостоятелен и его дальнейшее применение на практике нецелесообразно, о чем свидетельствуют результаты изучения форм нахождения изотопов тория в морской среде и механизмов их накопления на морском дне;

- современное состояние радиево-иониевого метода датирования дает возможность осуществлять с его помощью определение только средних скоростей образования осадков.

Применение исследованных неравновесных методов на практике позволило осуществить обширные определения абсолютного возраста и скоростей образования донных отложений, отобранных в Тихом, Индийском, Северном Ледовитом океанах, Черном, Охотском, Беринговом и Каспийском морях.

Следует отметить, что разработанная методология, включающая, среди прочих путей изучения поведения радионуклидов в природных системах, методы моделирования, требует весьма корректного применения этих методов. Так, нами было показано, что обычно применяемый на практике метод внесения радиоактивных индикаторов в форме кислых растворов в исследуемые в лабораторных условиях системы, моделирующие протекающие в природе процессы (например моделирование механизмов удаления радионуклидов из морской воды в донные отложения), не всегда адекватен реальному пути поступления радионуклидов в морскую среду. Не всегда существует уверенность в том, что вносимая в исследуемую систему форма радионуклида (обычно в виде кислого раствора с последующей регулировкой pH до природного уровня и достижением равновесного состояния) полностью идентична той физико-химической форме, в которой исследуемый радионуклид существует в природной системе. Многообразие факторов, воздействию которых подвергаются радионуклиды в реальной природной обстановке (воздействие биоса, образование радионуклида в самой природ-

ной системе при радиоактивном распаде его предшественника и пр.) и которые в полной мере практически невозможно моделировать в лабораторных условиях, дает основание для подобных соображений.

Другим важным разделом радиохимии окружающей среды, который был предметом многолетних исследований в Радиовом институте, является изучение распределения и поведения в объектах окружающей среды искусственных радионуклидов.

Информация, полученная нами при исследовании физико-химического поведения естественных радионуклидов в морской среде, весьма важна не только для понимания закономерностей их распределения в морях и океанах, механизмов накопления в донных отложениях и пр., но может быть использована также для прогнозирования поведения в морской среде ряда искусственных радионуклидов.

Так, одной из важнейших проблем морской радиоэкологии является в настоящее время проблема изучения поведения в морской среде плутония - элемента, входящего в состав радиоактивных выпадений от испытаний ядерного оружия, жидких радиоактивных сбросов радиохимических перерабатывающих предприятий, в состав радиоактивных отходов, захороненных в морской среде.

Крайне низкие концентрации плутония в морских и океанических водах и осадках исключают, как и в случае большинства естественных радионуклидов, применение прямых классических методов изучения его физико-химического состояния в этих системах. Радиохимические методы определения плутония в компонентах морской среды еще более сложны, чем соответствующие методы определения естественных радионуклидов, химических аналогов плутония.

Тем самым, изучение поведения плутония в морской среде и, что не менее важно, прогнозирование этого поведения в будущем, вырастает в сложнейшую проблему, требующую использования трудоемких, дорогостоящих и продолжительных во времени радиохимических исследований. Однако, даже в случае получения информации о поведении плутония в морской среде в настоящее время, трудно только на основе этой информации прогнозировать его поведение в будущем. Подобное заключение очевидно на основании ряда соображений.

Поступление плутония в морскую среду происходило в течение периода времени, отсчитываемого от начала атомной эпохи, и не сравнимого по своей протяженности со временем существования морских и океанических бассейнов и (в меньшей степени) со временем протекания в них процессов седиментации, диагенетических преобразований осадков и пр. Можно предположить, что в силу своего недавнего "вхождения" в морскую среду плутоний еще не успел пройти через целый ряд протяженных во времени физических, химических и биологических циклов, через которые уже прошли "извечно" присутствующие в океанах и морях химические элементы (в том числе долгоживущие естественные радионуклиды). Это "преимущество" долгоживущих естественных радионуклидов может быть использовано для прогнозных оценок их поведения в морской среде в будущем.

Если принять во внимание ту информацию, которая была получена нами по формам нахождения в морской среде и механизмам накопления на дне (в настоящее время и в прошлые эпохи) ряда этих радионуклидов (изотопов тория, урана, протактиния) и предположить, что некоторые из них являются химическими аналогами плутония, то весь обширный массив данных, полученный с помощью разработанной нами методологии, может быть реализован при решении проблемы изучения поведения плутония в морской среде.

Важно было определить, какие из исследованных нами радионуклидов наиболее близки по своему физико-химическому поведению в условиях морской среды к поведению в ней плутония, иначе говоря, выбрать химический аналог плутония.

Рассмотрение многочисленных данных по поведению и формам нахождения плутония в различных водных растворах (И. Е. Старик), а также достаточно ограниченных сведений о поведении плутония в реальных природных системах и сопоставление их с большим массивом данных по поведению урана-238, тория-230 и протактиния-231 в тех же системах позволило нам определить поведение тория-230 и протактиния-231 в качестве химических анало-

гов плутония в окислительной обстановке морской среды. Поскольку нами было установлено, что поведение тория-230 и протактиния-231 в морской среде одинаково, а радиохимическое определение тория-230 в компонентах морской среды проще, чем протактиния-231, нами в дальнейших исследованиях в качестве химического аналога плутония рассматривался торий-230 (Ю. В. Кузнецов, В. К. Легин, Ю. Н. Поспелов). В пользу справедливости подобного выбора говорят и выполненное нами сравнительное изучение подвижности тория-230 и плутония-239, 240 в морских и океанических осадках, и исследование аккумуляции тория-234 и плутония-239, 240 гидрофитами: было показано, что исследованные радионуклиды ведут себя в этих процессах одинаково (Ю. В. Кузнецов, В. К. Легин и др.).

С использованием описанного выше приема как источника информации о поведении плутония в морской среде нами были определены основные черты физико-химического поведения плутония в морских и океанических водоемах.

Подобно торию-230, плутоний должен эффективно поглощаться взвешенной фазой морской воды и накапливаться в донных отложениях со скоростью, соответствующей скорости осаждения взвешенных частиц. Основными концентраторами плутония во взвесах и осадках являются оксигидраты железа и марганца, тонкодисперсные глинистые частицы, обладающие высокой поверхностью сорбции. Определенную роль в извлечении плутония из морской воды и переносе его в осадки может играть биологическая экстракция плутония планктонными организмами. Однако решающую роль в механизме распределения плутония в морской среде должны играть процессы разнosa и распределения в ней тонкодисперсных материалов терригенного происхождения. Океанические и морские донные отложения являются основным депо плутония в морской среде, заключая в себе свыше 99 % плутония, поступающего в моря и океаны из различных источников. Прочная фиксация плутония в структуре донных отложений делает маловероятным его ремобилизацию в осадках и обратный переход в окружающую морскую среду (Ю. В. Кузнецов, В. К. Легин, Ю. Н. Поспелов).

Радиовый институт широко изучает поведение в окружающей среде и других искусственных радионуклидов. Практически подобные исследования проводятся в институте параллельно с изучением поведения естественных радионуклидов, начиная с 50-х годов. Первые работы в этом направлении были выполнены специально созданной Радиометрической лабораторией, расположенной на берегу Финского залива в 50 км от Санкт-Петербурга (г. Зеленогорск). Задачами лаборатории являлись отбор и радиохимический и гамма-спектрометрический анализ проб аэрозолей приземного воздуха и атмосферных выпадений, а впоследствии и изучение радиоактивной загрязненности почв, растительности, донных отложений и воды, отобранных в экспедиционных условиях в регионе Балтийского моря (В. П. Шведов, Л. И. Геденов, З. Г. Гритченко, В. М. Флегонтов, Л. М. Иванова, С. П. Росянов, В. А. Блинов, Ан. В. Степанов, В. П. Тишков, В. М. Гаврилов, О. С. Цветков и др.).

За более чем 40-летний период исследований накоплен большой объем информации по содержанию целого ряда радионуклидов в исследованных объектах, обусловленному как глобальными, так и локальными источниками радиоактивных загрязнений, включая периоды экстремального поступления радионуклидов в окружающую среду при интенсивных испытаниях ядерного оружия в атмосфере и после аварии на Чернобыльской АЭС.

Исследования выявили широкую вариабильность радионуклидного состава аэрозолей и атмосферных выпадений (так, концентрации радионуклидов в исследованных пробах изменялись на 3-6 порядков величины, а число радионуклидов - от десятков до единиц). Искусственные радионуклиды были представлены продуктами деления, ураном, плутонием и трансплутониевыми элементами, радионуклидами наведенной активности. Изучены связи радионуклидов с химическими компонентами аэрозолей, что позволило получить представление о процессах поступления радионуклидов на земную поверхность и об их поведении в природных условиях. Важную информацию в этом плане представляло исследование вариаций во времени содержаний отдельных радионуклидов в конкретных объектах окружающей среды. Для расшифровки путей поступления одних и тех же радионуклидов в исследуемый объект из разных источников был разработан метод изучения вариаций отношений отдель-

ных пар радионуклидов. Для случая же, когда исследуются отношения радиоактивных изотопов одного и того же элемента, вариации отношений их активностей могут помочь выявлению особенностей образования этих изотопов, их поступления в окружающую среду и последующей миграции. Если же это радионуклиды различных химических элементов одного и того же происхождения (например, образующиеся при проведении ядерных взрывов), то можно получить информацию о влиянии химических свойств того или радионуклида на процессы миграции в окружающей среде (Л. И. Геденов, З. Г. Гритченко и др.).

В качестве примера можно привести приложение разработанного метода к определению источников поступления в окружающую среду изотопов цезия применительно к пробам, отобранным в Радиометрической лаборатории в г. Зеленогорске. Как известно, цезий-137 мог поступать в атмосферу г. Зеленогорска из разных источников: от испытаний ядерного оружия, при штатной и нештатной эксплуатационной ситуации на ЛАЭС, в результате аварии на ЧАЭС (начиная с 1986 г.) и др. Изучение соотношений активностей пар радионуклидов, например цезий-137/бериллий-7, позволяет оценить долю цезия-137, обусловленную штатной эксплуатационной ситуацией на ЛАЭС.

После аварии на ЧАЭС с конца апреля 1986 г. отношение активностей цезий-134/цезий-137 показывало, что в аэрозолях приземной атмосферы Санкт-Петербурга преобладали продукты этой аварии.

Важным выводом этого цикла исследований является обнаружение явления вторичного переноса цезия-137 на большие расстояния за счет явления ветрового подъема этого радионуклида с сильно загрязненных территорий. Это следует из факта повышенной (по сравнению с периодом до аварии на ЧАЭС) концентрации цезия-137 в приземном воздухе и в атмосферных выпадениях вплоть до настоящего времени (З. Г. Гритченко и др.).

Одновременно с изучением поведения радионуклидов в атмосфере в институте велись комплексные исследования загрязненности искусственными радионуклидами гидросферы (В. П. Шведов, Л. И. Геденов, Л. М. Иванова, В. П. Тишков, Ан. В. Степанов и др.).

С начала 60-х годов выполняются исследования распределения и поведения искусственных радионуклидов в морской среде. Этому в значительной мере способствовала разработка в институте методик одновременного определения в одной и той же пробе морской воды стронция-90, цезия-137 и цезия-144, что позволило сократить количество требуемых для анализов проб и повысить информативность и корректность получаемых результатов. В совместных экспедиционных исследованиях с Институтом океанологии (Москва), Морским гидрофизическим институтом (Севастополь) получены данные по распределению этих радионуклидов в Атлантическом, Тихом и Индийском океанах.

К числу наиболее значимых результатов этих работ следует отнести обнаружение трех максимумов в концентрациях стронция-90 и цезия-137 в поверхностных водах Атлантического океана. Было показано, что эти максимумы симбатны с распределением интенсивности атмосферных осадков над океаном, и тем самым доказана определяющая роль атмосферных осадков в вымывании радионуклидов из атмосферы и в формировании найденных максимумов.

Другой важный вывод касается близости физико-химического поведения стронция-90 и цезия-137 в океанических водах (соотношения концентраций этих радионуклидов в атмосферных осадках и океанических водах близки: для тех и других эта величина соответствует 1,8).

Исследование соотношения цезий-137/стронций-90 иногда дает возможность обнаружить источник поступления радионуклидов в морскую среду. Так, например, в районе выхода в океан р. Колумбия зафиксировано повышение радиоактивной загрязненности, при этом наблюдалось уменьшение соотношения цезий-137/стронций-90 от 1,8 до 0,8, что свидетельствовало о воздействии другого источника загрязнения на фоне глобального, в данном случае - воздействия Хэнфордского завода по производству оружейного плутония (Л. И. Геденов, Л. М. Иванова и др.).

В 1970 г. были начаты широкомасштабные исследования радиоактивной загрязненности Балтийского моря. Важно отметить, что в этот период воды Балтийского моря еще не

использовались для охлаждения реакторов атомных электростанций. Было установлено, что уровень загрязнения мелководного и полужамкнутого Балтийского моря изотопами цезия и стронция значительно выше, чем Атлантического и даже Тихого океана. При этом соотношение активностей цезий-137/стронций-90 не превышало 1, а с уменьшением солёности в заливах заметно уменьшалось. В устьях рек, впадающих в Балтийское море, это соотношение составляло доли единицы. Дальнейшие исследования показали, что это связано с различиями в сорбционном поведении этих радионуклидов в системе вода - твердая фаза водосборных площадей, обусловленном, в основном, специфической сорбцией цезия-137 глинистыми минералами. По этой причине воды рек обогащены стронцием-90 и обеднены цезием-137. Исследования прибалтийских рек, а также Дуная однозначно свидетельствовали об очень низких концентрациях цезия-137 в их водах (Л. И. Геденов, В. М. Гаврилов, З. Г. Гритченко, Л. М. Иванова и др.).

В период 1975-1985 гг. в ходе исследований, проводимых институтом совместно со специалистами ГДР и Польши, было отслежено и проанализировано состояние динамического равновесия в поведении цезия-137 в водах собственно Балтийского моря. Это равновесие возникло в условиях поступления солёных, обогащенных цезием-137 вод из Северного моря в западную часть Балтийского моря, а также пресных (обедненных цезием-137) речных вод в его восточной части. В результате в течение длительного периода времени содержание цезия-137 в водах собственно Балтийского моря удерживалось на одном уровне, снижение которого определялось только радиоактивным распадом цезия-137. Если бы техногенный цезий-137 не поступал из Северного моря в Балтийское, уровень содержания цезия-137 в водах последнего был бы существенно ниже.

В апреле 1986 г. регион Балтийского моря подвергся радиоактивному загрязнению в результате аварии на Чернобыльской АЭС. Загрязнение Балтийского моря было неравномерным, в силу различной интенсивности радиоактивных атмосферных выпадений, что, как уже было показано на примере Атлантического океана, связано с интенсивностью выпадения атмосферных осадков. Одним из наиболее загрязненных оказался район центральной части Финского залива, включая район расположения Ленинградской АЭС - Копорскую губу. Доминирующим нуклидом в этом загрязнении оказался цезий-137. Как и следовало ожидать (на основании проведенных ранее исследований), снижение содержания цезия-137 началось с восточных районов Финского залива, где реки, в основном Нева и Нарва, обеспечивают приток пресных вод с низким содержанием этого радионуклида.

Сложный комплекс гидрологических процессов, воздействию которых подвергся поступивший на поверхность моря цезий-137, явился причиной перераспределения первоначально сформировавшихся участков радиоактивного загрязнения. К настоящему времени содержание цезия-137 в водах Финского залива меньше, чем в водах собственно Балтийского моря, в то время как до 1986 г. эта часть моря была наименее загрязнена. В этом факте заключается один из наиболее важных выводов исследований радиоактивной загрязненности Балтийского моря: загрязнение вод Финского залива, в том числе и Копорской губы, не только не остается локальным, но приводит к его распространению и сосредоточению в водах собственно Балтийского моря (Л. И. Геденов, З. Г. Гритченко, В. М. Гаврилов, Л. М. Иванова, Л. Н. Лазарев, Т. Е. Орлова, Ю. А. Пантелеев, В. П. Тишков и др.).

В 1970 и 1977 гг. в связи с Кыштымской аварией были выполнены исследования речной системы: Теча - Исеть - Тобол - Иртыш - Обь. Важным результатом этих исследований является вывод о поведении основных загрязняющих эту систему радионуклидов - цезия-137 и стронция-90. Было показано, что основная часть цезия-137 мигрирует в речной системе в составе взвешенного материала, осаждаясь в донные отложения. Повышенные содержания этого радионуклида в водной фазе фиксировались на расстояниях, не превышающих 100 км от источника загрязнений. Стронций-90, напротив, мигрирует, в основном в составе водной фазы. Повышенные по сравнению с глобальным уровнем содержания стронция-90 в воде наблюдались на расстояниях свыше 1000 км (Иртыш, Обь и далее) от источника загрязнений (Л. И. Геденов, З. Г. Гритченко, В. М. Флегонтов, О. С. Цветков, Л. М. Иванова и др.).

Необходимость изучения форм нахождения и поведения радионуклидов в водоемах как ключевого момента для понимания текущей радиационной обстановки и ее прогнозирования в будущем была продемонстрирована после аварии на Чернобыльской АЭС при изучении радиоактивной загрязненности Киевского водохранилища и питающей его речной системы.

В радиохимических исследованиях этого водоема нами использовались методы пространственного распределения (в вертикальном и горизонтальном профиле вод и донных отложений) радионуклидов, их распределения между водами, взвесями и осадками, крупномасштабная ультрафильтрация и метод селективного выщелачивания донных отложений. Совокупность всех этих приемов позволила установить, что:

радиоактивные продукты аварии (изотопы плутония, трансплутониевые радионуклиды, церий-144, цирконий (ниобий)-95, рутений-106 и другие гидролизующиеся элементы) присутствуют, в основном, в твердой (взвеси и осадки) фазе водоема;

- жидкая фаза концентрирует основную часть стронция-90 и более 50 % цезия-137;
- гидролизующиеся радионуклиды прочно связаны со структурой осадков и взвесей и при миграции последних не склонны к ремобилизации и обратному переходу в водную фазу;
- основную опасность для водопользования представляет взвешенная фаза Киевского водохранилища, поэтому при организации водоснабжения основное внимание должно быть обращено на интенсификацию процессов коагуляции для очистки воды от взвешенного материала (Л. И. Геденов, Ю. В. Кузнецов, В. П. Тишков, О. С. Цветков, Ан. В. Степанов, Ю. Н. Пospelов и др.).

Методология изучения форм нахождения радионуклидов была успешно применена также при исследовании миграции радионуклидов в системе р. Енисей - Карское море. Необходимость подобного рода исследований обусловлена рядом причин.

Как известно, на протяжении ряда лет Баренцево и Карское моря использовались для захоронения в них радиоактивных материалов и отходов (ядерные реакторы с выгруженным и невыгруженным топливом, загрязненное оборудование и пр.). Поскольку со временем в результате коррозии защитных контейнеров может произойти выход радионуклидов из затопленных отходов и материалов, необходимо оценить возможные последствия подобного загрязнения морской среды для морской экосистемы и человека. Чтобы изучить эту проблему в "чистом" виде, необходимо иметь информацию о возможном вкладе других источников загрязнения арктических морей (поступление с морскими течениями радионуклидов из жидких сбросов ядерных центров Западной Европы в Ирландское и Северное моря, в составе речного стока от радиохимических предприятий Урала и Сибири, в составе продуктов аварии на Чернобыльской АЭС и пр.).

По этой причине важно было иметь информацию о радиоактивной загрязненности р. Енисей, находящейся под воздействием Красноярского горно-химического комбината (ГХК), исследовать устье р. Енисей и прилегающую к нему часть Карского моря.

В этих исследованиях нами были использованы данные многолетних экспедиционных обследований и модельных экспериментов по радиоактивной загрязненности р. Енисей, выполненных Радиевым институтом (Ю. В. Кузнецов, В. К. Легин, Д. И. Гусев и др.) совместно с ГХК (Ю. А. Ревенко, В. В. Жидков, Ю. В. Савицкий, А. Е. Шишлов, А. И. Червонный), а также результаты радиохимического изучения устья р. Енисей и Карского моря в ходе экспедиций на НИС "Дм. Менделеев" и "Дм. Овцын" (1993-1994 гг.).

Кратко итоги этих работ сводятся к следующему:

- показано, что влияние ГХК на р. Енисей (повышенные по сравнению с глобальным уровнем содержания цезия-137, стронция-90 и плутония-239, 240 в водах, осадках и, особенно в пойменных отложениях) проявляется в ближней зоне, охватывающей расстояния до 300 - 400 км ниже по течению реки. На расстояниях, превышающих 1000 км от источника загрязнения и далее, вплоть до впадения р. Енисей в Карское море и в собственно Карском море (дальняя зона), содержание этих радионуклидов практически совпадает с глобальным уровнем;

- основная часть стронция-90 мигрирует в составе водной фазы, цезия-137 и плутония-239, 240 - в составе речных взвесей;

- установлена прочная, практически необратимая фиксация цезия-137 и плутония-239, 240 на взвесах и донных отложениях;

- радиоактивное загрязнение пойменных отложений ближней зоны является наиболее значимым проявлением воздействия ГХК на водную систему р. Енисей.

Таким образом, установлено, что вклад радионуклидов, обусловленный многолетней эксплуатацией ГХК, в общее содержание их в Карском море не существен. Основную роль в переносе радионуклидов в составе речного стока в Карское море играют радионуклиды глобального происхождения, поступающие с огромной водосборной площади р. Енисей (Ю. В. Кузнецов, В. В. Жидков, В. К. Легин, Ю. В. Савицкий, Ю. Н. Поспелов, Ю. Н. Егоров, В. Н. Струков и др.).

Примером других исследований, представляющих, как и описанные выше, международный интерес, является комплекс работ, выполненных Радиевым институтом совместно с рядом российских и международных организаций по изучению радиационной обстановки в районе гибели атомной подводной лодки (АПЛ) "Комсомолец" (в апреле 1989 г.) в Норвежском море. Внимание международной общественности к этому событию обусловлено тревогой в отношении возможного выхода радионуклидов в морскую среду из систем АПЛ (торпеды с ядерными боеголовками, реакторный отсек).

Эти исследования, проводимые, как и прежде, с применением разработанной методологии, позволили установить, что:

- содержание наиболее потенциально-опасных радионуклидов (цезия-137, стронция-90, плутония-239, 240) в воде, донных отложениях и биоте, отобранных в ближней и дальней зонах в регионе гибели АПЛ, не превышает соответствующих глобальных уровней содержания этих радионуклидов, что указывает на отсутствие заметного выхода их в морскую среду из систем АПЛ в настоящее время;

- морские взвеси и донные отложения являются эффективными аккумуляторами плутония-239, 240 и, в определенной степени, цезия-137 в морской среде региона. Методами селективного выщелачивания установлена их прочная фиксация осадками;

- в случае выхода радионуклидов из АПЛ основными процессами, определяющими радиационную обстановку в регионе в настоящее время и в будущем, будут являться как рассеяние в водной фазе и соответствующее разбавление до безопасных уровней стронция-90, так и прочная аккумуляция в донных отложениях плутония-239, 240 и цезия-137;

- полученная база данных является радиохимической основой для проведения конкретных расчетов при оценке возможных экологических последствий гибели АПЛ (Д. И. Гусев, Ю. В. Кузнецов, Ан. В. Степанов, В. К. Легин, В. П. Тишков, Н. А. Тишкова, А. А. Осокина, Ю. Н. Поспелов, В. А. Плехов и др.).

Одним из важнейших прикладных направлений исследований в области радиохимии окружающей среды является подготовка научно обоснованных баз данных для радиоэкологической оценки последствий эксплуатации предприятий ядерного топливного цикла как в настоящее время, так и в будущем. Так, на основе многочисленных исследований "фоновых" содержаний радионуклидов в объектах окружающей среды (аэрозолях, почвах, грунтах, водной фазе, донных отложениях, биоте водоемов) получена информация, являющаяся основой базы для радиоэкологических оценок: для расчета индивидуальных и коллективных доз на население, оценки риска в зонах воздействия ядерно-опасных объектов.

С применением этих данных и разработанной методологии радиоэкологической оценки воздействия предприятий ЯТЦ на природную среду (Д. И. Гусев) был выполнен комплекс работ по научному обеспечению проектирования и строительства завода регенерации отработавшего топлива реакторов ВВЭР-1000 (РТ-2), включающий:

- обоснование предельно допустимых выбросов иода-129, углерода-14, трития, а также коэффициентов удержания этих радионуклидов;

- характеристики допустимого радиоактивного загрязнения объектов природной среды в санитарно-защитной и наблюдаемой зонах ГХК (Д. И. Гусев, Л. И. Геденов,

Ю. В. Кузнецов, В. К. Легин, В. П. Тишков, Ю. Н. Поспелов, В. П. Рамзаев, З. С. Шулепко, В. В. Жидков, Ю. В. Савицкий, А. Е. Шишлов и др.).

Выполнение изложенных в данной статье исследований в области радиохимии окружающей среды стало возможным благодаря разработке и постоянному совершенствованию методического обеспечения практической реализации этих работ. Основой методического обеспечения является разработка методик радиохимического и радиометрического (альфа-, гамма-спектрометрия) анализа природных объектов.

Основными методологическими принципами при разработке методик радиохимического анализа, когда необходимо из образцов почв, донных отложений массой в десятки и сотни граммов и объемов воды в сотни литров выделить следовые количества радионуклидов, очистить их от макрокомпонентов и выделить в радиохимически чистом виде, являются:

- контроль химического выхода с использованием радиоактивных и стабильных изотопов определяемого радионуклида. Так, для определения химического выхода плутония был синтезирован совместно с ОИЯИ (Ю. Ц. Оганесян) радиоактивный изотоп плутония - плутоний-236, соответствующий требованиям определения изотопов плутония на глобальном уровне;

- обеспечение полной гомогенизации исследуемых образцов и достижения изотопного обмена;

- определение (по возможности) интересующего набора радионуклидов из одной и той же пробы (Ю. В. Кузнецов, В. К. Легин, Л. М. Иванова, З. Г. Гритченко, С. П. Росянов, В. П. Тишков, Ю. Н. Поспелов и др.).

Важным элементом методического обеспечения является выполнение комплекса работ по Программе качества определений, которая включает:

- разработку и создание набора сертифицированных стандартных образцов удельной активности радионуклидов на основе природных матриц;

- метрологическое обеспечение измерений;

- организацию и проведение внутренних (в рамках СССР и Российской Федерации) и международных интеркалибрационных проверок точности и надежности используемых методик радиохимического и гамма-спектрометрического анализа природных объектов (В. П. Тишков, Ю. А. Пантелеев, О. С. Цветков, З. Г. Гритченко, В. М. Гаврилов и др.).

В результате выполнения многолетних исследований по методическому обеспечению методологии изучения форм нахождения и поведения радионуклидов в различных объектах окружающей среды был разработан комплекс радиохимических и радиометрических методов анализа, включающий:

- методики определения содержаний изотопов урана, радия, тория и протактиния из одной и той же навески анализируемого материала;

- методики определения протактиния, изотопов тория, радия и урана в водных пробах;

- методики определения изотопов цезия, стронция и церия в водных пробах из одного объема;

- методики определения плутония, америция и нептуния в пробах воды, почв и донных отложений;

- методики определения трития, радиоуглерода и иода-129 в объектах окружающей среды;

- методики определения изотопов цезия в морских водах с использованием селективных сорбентов;

- методики определения полония-210 и свинца-210 в объектах окружающей среды (Ю. В. Кузнецов, В. К. Легин, З. Н. Симоняк, А. Н. Елизарова, Ю. Н. Поспелов, С. М. Гращенко, К. Ф. Лазарев, Л. И. Геденов, Л. М. Иванова, С. П. Росянов, В. П. Тишков, Н. А. Тишкова, О. С. Цветков, В. М. Гаврилов, В. А. Блинов, В. А. Плехов и др.).

Важным инструментом радиохимии окружающей среды является разработанный метод низкофоновой прецизионной гамма-спектрометрии природных объектов, применение

которого в условиях подземной лаборатории института (станция метро "Гостинный двор") обеспечило достижение рекордно низких фоновых характеристик (О. С. Цветков, В. П. Тишков, З. Г. Гритченко, Э. И. Альтерман, А. И. Ильин, В. А. Анисимов).

II. ОБРАЩЕНИЕ С РАДИОАКТИВНЫМИ ОТХОДАМИ

Информация о формах нахождения радионуклидов в различных природных системах имеет не только фундаментальное научное значение, но необходима также для решения многих практических задач. Иллюстрацией этому служит выполненный нами комплекс работ по созданию новых и оптимизации существующих технологий очистки вод от радиоактивных загрязнений (Ю. В. Кузнецов, В. Н. Щebetковский, В. К. Легин, З. Н. Симоняк, А. Н. Елизарова, Н. И. Никитина и др.).

Так, на основе исследования форм нахождения радионуклидов в поверхностных водах, подлежащих очистке, были разработаны и оптимизированы эффективные технологии очистки этих вод в малых (транспортабельные установки) и больших (централизованное водоснабжение) масштабах. В этих работах была успешно реализована идея интенсификации удаления из загрязненных вод на оксигидратах железа и алюминия, гидролизующихся радионуклидов с введением в процесс объемной коагуляции добавок природных и синтетических сорбентов. В результате эффективность очистки воды от широкого спектра радионуклидов была увеличена в десятки раз, а образующиеся осадки обладали удовлетворительной плотностью и легко могли быть переработаны для последующего захоронения.

Наиболее полно эти исследования и их результаты обобщены в монографиях Ю. В. Кузнецова, В. Н. Щebetковского, А. Г. Трусова "Основы дезактивации воды" (1968 г.) и "Основы очистки воды от радиоактивных загрязнений" (1974 г.).

Подобный подход был реализован также при разработке технологий переработки жидких радиоактивных отходов (В. Н. Щebetковский, В. Е. Вяткин, Д. М. Гуревич, Н. Н. Калинин и др.), загрязненной радионуклидами нефти (В. К. Легин, Н. И. Никитина, З. Н. Симоняк и др.) и других сред.

Поскольку задачей радиохимии окружающей среды является, в частности, разработка мероприятий по предотвращению загрязнений, большое внимание в институте было уделено разработке методов локализации долгоживущих радионуклидов, входящих в состав радиоактивных отходов, в устойчивых матрицах, обеспечивающих надежную изоляцию радионуклидов от биосферы. Среди этих методов особое место заняли процессы остекловывания для жидких высокоактивных отходов (ЖВАО), битумирования и цементирования - для низко- и среднеактивных отходов в виде растворов, пульп, шламов и твердых остатков.

К середине 70-х годов стало ясно, что наряду с развитием и совершенствованием вышеуказанных технологий и их инженерного воплощения необходимо расширить исследования с целью поиска иных технологических решений, новых материалов и оборудования.

С этой целью в институте были организованы исследования, направленные на разработку научных и технологических основ отверждения жидких ВАО путем включения их в керамические материалы, в том числе на основе глин, и в стеклометаллические (СМ) композиции (Е. А. Шашуков, А. С. Алой, Б. С. Кузнецов, А. В. Стрельников и др.).

Процесс фиксации РАО в глинах предполагал использование относительно дешевого и легкодоступного сырья и позволял в условиях единой аппаратно-технологической схемы решить проблемы иммобилизации как жидких и пульпообразных отходов, так и золы от сжигания твердых РАО. К достоинствам глинистых материалов следует отнести их уникальные сорбционные и гидроизоляционные свойства; обожженная керамика на основе глин не подвержена радиолузу, деградации микроорганизмами, термически и механически весьма устойчива.

Были проведены всесторонние исследования физико-химических свойств исходных, промежуточных и конечных продуктов, а также опытная отработка параметров процесса по операциям и стадиям. Для заключительных операций вместо используемых ранее печей сопротивления был реализован СВЧ- или микроволновый способ нагрева, который имеет ряд

достоинств применительно к радиохимической практике. При таком способе нагрева верхний предел температур лимитируется лишь качеством теплоизоляции и мощностью источника.

Разрабатываемая технология включения РАО в глинистые материалы была ориентирована на следующие виды РАО:

- золевые остатки от сжигания горючих РАО,
- гидроокисные шламы и пульпы,
- отработавшие неорганические сорбенты и фильтрующие материалы,
- кубовые остатки от упарки ЖРО АЭС.

Процесс получения керамических образцов включал стадии смешивания подготовленных РАО с шихтой, формования полученной смеси, сушки и обжига изделий. Полученные образцы керамики всесторонне исследовались путем определения открытой пористости, кажущейся плотности, предела прочности при сжигании, химической стойкости при выщелачивании. Исследовались также химические взаимодействия компонентов РАО с глинами в процессе обжига с помощью рентгенофазового анализа. Так, было установлено, что при взаимодействии глин с золевыми остатками при температуре 1000 - 1500 °С образуется соединение типа лейцита, в котором калий может изоморфно замещаться на натрий, цезий и кальций, а алюминий - на железо; при введении соединений натрия в шихту, содержащую перлит и глину, в процессе обжига часть натрия переходит в фазу нефелина (А. Г. Тутов, Т. И. Колычева, Б. С. Кузнецов).

На модельных составах было показано, что, используя определенные сорта глин и регулируя параметры керамической технологии, можно стимулировать направленный синтез весьма устойчивого и, следовательно, перспективного для включения РАО натрийсодержащего соединения со структурой типа нефелина. Итогом этих комплексных исследований явилась технология включения различных видов РАО в керамику на основе глин, при реализации которой получались стабильные отходные формы, надежно изолирующие радионуклиды от биосферы.

Результаты лабораторных исследований послужили основой для проектирования и изготовления опытной укрупненной установки по включению отходов в керамику (ВОК), размещенную и запущенную в эксплуатацию на Ленспецкомбинате (г. Сосновый Бор). Керамическая технология была успешно использована для отверждения не только РАО, но и отходов гальванических производств.

Развитие технологии включения ВАО в СМ-композиции представлялось особенно перспективным для концентратов долгоживущих радионуклидов, характеризующихся повышенными уровнями радиоактивности и, соответственно, тепловыделения. Сочетание данного процесса с работами института в области экстракционного фракционирования ВАО обусловило переход к качественно новому подходу к проблеме обращения с жидкими ВАО, независимо от природы их образования. Реализация этого подхода позволяет существенно уменьшить габариты оборудования, сократить объемы вторичных отходов и при необходимости использовать излучения и/или тепловыделение радионуклидов в радиационной технике.

Поисковые исследования по технологии отверждения ВАО в форме стеклометаллических композиций проводились на специально созданной лабораторной установке СМК-1 (А. С. Алой, В. В. Шорин, А. В. Трофименко). Протекающие процессы изучались методами физико-химического анализа (ДТАБИК-спектроскопия, РФА и др.) в различных температурных режимах. Это позволило установить условия процесса, наиболее благоприятные с точки зрения уменьшения газовых и аэрозольных уносов, предотвращения вспенивания расплава и получения кондиционных стекол.

При изучении условий синтеза фосфатных стекол с высоким содержанием цезия впервые было установлено образование нового соединения $\text{CsAlLi}_{0.5}\text{P}_{1.5}\text{O}_6$ со структурой типа поллуцита (А. С. Алой, А. Г. Тутов, А. В. Трофименко). Также впервые установлен и запатентован тип изоморфного замещения по схеме $\text{Si}(\text{P} + \text{Li})$, что открывает возможность синтезировать разнообразные соединения с заданными структурами и свойствами.

Научная проработка всех стадий процесса и опыт, накопленный в ходе эксплуатации установки СМК-1, позволили перейти к созданию более крупного оборудования, предназначенного для проверки технологии на реальных ВАО в условиях горячих камер радиохимического производства (установка "Гром - 1").

В период 1990 - 1995 гг. в производственных условиях ПО "Маяк" была проведена комплексная проверка технологии остекловывания концентратов стронция-цезия в форме алюмофосфатных и боросиликатных стекол.

При исследовании алюмосиликатных стекол с высоким содержанием оксида цезия было установлено, что взаимодействие синтезированных стекол с водой определяется совокупностью двух сопряженных процессов: растворением сетки стекла и выщелачиванием цезия, натрия и калия с образованием измененного поверхностного слоя. Показано, что эти процессы протекают с весьма незначительной скоростью, что позволило рекомендовать такие стекла в качестве активной части источников ионизирующего излучения на основе цезия-137, отвечающих требованиям экологической безопасности и длительного срока эксплуатации (А. С. Алой, А. В. Трофименко, О. А. Исхакова).

Был проведен также цикл исследований с целью разработки составов, изучения химической и радиационной стойкости боросиликатных стекол с повышенным содержанием стронция-90 и цезия-137, которые планируется использовать в технологии завода РТ-2 на стадии остекловывания ВАО.

Полученные результаты убедительно доказывают правомерность заключения о ведущей роли ионизационных процессов в радиационно-стимулированной деградации стекломатриц. Впервые был зарегистрирован эффект необратимого разрушения борно-кислородного дырочного центра в процессе облучения стекол. Предложенная модель образования атомарного кислорода путем последовательного захвата двух дырок околоборным анионом кислорода позволяет объяснить совокупность известных экспериментальных данных и, в случае подтверждения корректности принятых допущений, открывает новые возможности для прогнозирования надежности изолирующих материалов.

АНАЛИТИЧЕСКАЯ ХИМИЯ

А. В. Степанов

В подготовке материала принимали участие:

Г. А. Акопов, Г. С. Марков, В. П. Попик, Б. Я. Зильберман, Б. Н. Беляев,
В. А. Смирнов

Развитие методов аналитической химии в Радиевом институте всегда стимулировалось необходимостью решения практических задач, связанных с изучением свойств радиоактивных элементов и их соединений, с созданием новых или усовершенствованием уже известных технологий их получения, изучением процессов, протекающих при облучении ядерного топлива, изучением миграции радиоактивных элементов в окружающей среде, поисками способов их длительного хранения или захоронения. Одной из характерных черт работ Радиевского института в области аналитической химии является широкое использование принципов и методов исследования, развитых в радиохимии и ядерной физике, что, однако, не исключало использования достижений в других областях науки.

Большое внимание в Радиевом институте уделялось и метрологическим аспектам аналитической химии, поскольку одной из главных ее задач является измерение количества вещества. В этой связи нужно отметить создание и широкое использование в аналитических исследованиях стандартных образцов различных ядерных материалов, развитие методов статистической обработки результатов и стандартизации методик аналитических измерений. Работы Радиевского института внесли также весьма существенный вклад в инструментализацию и автоматизацию методов аналитической химии, особенно за последние десятилетия.

Характер аналитических исследований Радиевского института за последние два десятилетия удобно проследить на примере деятельности в этой области гатчинского отдела прикладной радиохимии. В начале 70-х годов в связи с его организацией были созданы две аналитические лаборатории: лаборатория радиохимического анализа, руководителем которой стал Р. И. Любцев и лаборатория ядерно-физических методов анализа под руководством В. В. Бердикова. С 1973 г. лабораторию радиохимического анализа возглавил Г. А. Акопов, а лабораторию ядерно-физических методов анализа - В. И. Орлов.

Основным направлением этих аналитических лабораторий была разработка методов и средств, обеспечивающих аналитическим контролем исследования в области технологии переработки отработавшего ядерного топлива (ОЯТ) и их укрупненные стендовые испытания, проводимые в отделе с использованием реального топлива реакторов типа ВВЭР и РБМК.

Поскольку методы пробоотборного контроля технологических процессов на действующих в отрасли радиохимических предприятиях по производству оружейного плутония не могли быть непосредственно использованы для аналитических целей при переработке ОЯТ АЭС вследствие высокой радиоактивности проб, требовалась модернизация существующих, разработка новых методов и автоматизированных устройств, позволяющих выполнять анализы в условиях защитных камер и боксов, снабженных манипуляторами. Работа в данном направлении проводилась в лаборатории радиохимического анализа под руководством Г. А. Акопова при активном участии Н. А. Малышева, И. Г. Егоровой, М. К. Абдулахатова, А. П. Криницына. Совместно со специалистами Свердловского горнорудного предприятия Венгерской Народной Республики были разработаны и изготовлены опытные образцы фотометра на основе волоконной оптики и автомати-

зированной фасовочного устройства, позволяющего дистанционно проводить прецизионную расфасовку проб высокоактивных растворов и измерение оптической плотности в условиях защитных камер. Опытные образцы прошли успешные испытания в гатчинском отделе и на некоторых предприятиях отрасли.

В течение 1990-1992 гг. в лаборатории радиохимического анализа были проведены стендовые испытания роботизированного комплекса, разработанного в Институте трансурановых элементов (Германия), предназначенного для подготовки проб радиоактивных растворов к масс-спектрометрическому определению в них содержания урана и плутония. Испытания проводились по программе МАГАТЭ, где предполагалось использовать робот в Системе гарантий по нераспространению ядерного оружия. Результаты испытаний показали высокую надежность и эффективность использования роботизированной системы в процессе проведения рутинных операций по выделению, разделению и очистке урана и плутония экстракционным методом в процессе их подготовки к масс-спектрометрическому и радиометрическому анализу.

Проблеме дистанционного выполнения аналитических операций в условиях защитных камер и боксов были посвящены исследования в области создания и использования ион-селективных электродов. В результате таких исследований были созданы пленочные цезий- и стронций-селективные электроды на основе дикарболлида кобальта и жидкостной технеций-селективный электрод, изучена их радиационно-химическая устойчивость. Кроме Тс-селективного электрода, были разработаны рентгенофлуоресцентный и фотометрический методы определения технеция. Разработанные методы анализа позволили провести детальное изучение поведения технеция в экстракционной технологии переработки ОЯТ как в процессе стендовых испытаний в гатчинском отделе Радиевого института, так и на заводе РТ-1 химкомбината "Маяк". На основе выполненных исследований была разработана сорбционная технология выделения технеция из сбросных растворов завода РТ-1. В результате испытаний разработанной технологии в полупромышленных масштабах на заводе РТ-1 наработано более сотни килограммов технеция в виде пертехнетата натрия высокой радиохимической чистоты.

В лаборатории ядерно-физических методов анализа с момента ее организации под руководством В. В. Бердикова были начаты работы по автоматизации обработки гамма- и альфа-спектрометрической информации. Впоследствии работы в этом направлении развивались под руководством В. И. Орлова, имевшего большой опыт применения ядерно-физических методов анализа на химкомбинате "Маяк". Практически впервые в отрасли группой сотрудников, Э. Я. Лузяниным, В. М. Мосяжом, А. А. Завороткиным и др., решались вопросы по сопряжению спектрометра с ЭВМ, методические вопросы автоматизированной обработки спектров и соответствующего программного обеспечения. Решения указанных вопросов в соединении с радиохимическими методами дали возможность осуществлять оперативный пробоотборный аналитический контроль в ходе стендовых испытаний технологических процессов переработки ОЯТ, проводимых в гатчинском отделе. Разработанные автоматизированные спектрометрические тракты на основе модернизированного серийного оборудования были внедрены на химкомбинате "Маяк", Ленинградской и Нововоронежской атомных станциях.

В той же лаборатории успешно проводились разработки приборов и методов дистанционного контроля технологических процессов. Так, Ф. Э. Гофманом и А. Г. Евдокимовым были разработаны гамма-абсорбциометр для определения макроконцентраций урана в водных и органических растворах, высокочастотный бесконтактный кондуктометр для определения концентрации кислоты и уровнемер для определения границы раздела фаз в колонных экстракторах. По материалам разработок на радиохимических предприятиях отрасли с участием Радиевого института были выполнены опытно-конструкторские разработки и организован мелкосерийный выпуск указанных приборов, которые и в настоящее время широко используются на этих и многих других предприятиях.

С началом проектирования завода РТ-2 в лаборатории радиохимического анализа гатчинского отдела проводились работы, связанные с решением научно-технических задач,

обеспечивающих проектирование контрольной лаборатории завода. Были разработаны схемы аналитического контроля технологических процессов практически всех отделений - от рубки и растворения топлива до изготовления смешанного уран-плутониевого топлива и переработки радиоактивных отходов. Выработаны рекомендации по методическому и приборному обеспечению, совершенствованию технологии пробоотборного анализа с использованием современных аналитических методов, приборов и средств вычислительной техники и созданию на их основе автоматизированной системы аналитического контроля.

Существенный вклад в развитие методов аналитического контроля внесли и другие отделы Радиового института, в которых одновременно с разработкой новых технологических процессов выделения и очистки плутония из облученного урана проводились работы по совершенствованию и созданию новых эффективных методов определения Pu, Np, Th, U и продуктов деления. После проверки в реальных условиях они использовались в системе аналитического контроля производства плутония и урана на радиохимических заводах. Основой этих методов служили осаждение и соосаждение, экстракция, ионный обмен, электромиграция и другие методы выделения и очистки определяемых элементов. В этом прослеживается глубокая связь между фундаментальными работами в области радиохимии, которые проводились в Радиовом институте на протяжении многих лет, и практическим приложением результатов этих работ.

Говоря об осадительных методах, следует вспомнить, что еще в 60-е - 70-е годы под руководством Б. П. Никольского были синтезированы и изучены ацидокомплексные соли типа $R_2[M(NO_3)_6]$, где R - органический катион четвертичного аммониевого основания, а M - Th, U(IV), Np(IV), Pu(IV), Ce(IV). В результате изучения физико-химических свойств синтезированных солей было показано, что растворимость этих солей в азотнокислых растворах может быть представлена в виде функциональной зависимости концентраций комплексного аниона $[M(NO_3)_6]^{2-}$ и катиона R^+ от активности ионов NO_3^- в растворе. При этом, если концентрация аниона $[M(NO_3)_6]^{2-}$ возрастает с ростом активности ионов NO_3^- , то концентрация катионов R^+ выражается убывающей функцией от активности ионов NO_3^- , что связано, прежде всего, с образованием соединений вида $RNO_3 \cdot HNO_3$ и $RNO_3 \cdot 2HNO_3$ в растворе. В общем случае зависимость растворимости солей типа $R_2[M(NO_3)_6]$ выражается кривой с минимумом, положение которого определяется величинами констант комплексообразования центрального иона актинида(IV) и органического катиона с ионами NO_3^- . Более глубокое понимание особенностей растворимости солей типа $R_2[M(NO_3)_6]$ способствовало выявлению аналогии между процессами осаждения актинидов(IV), сорбции их аминосолями и экстракции аминами. Полученные результаты позволили также полуколичественно оценивать растворимость еще не синтезированных солей, проводить целенаправленный поиск наиболее подходящих осадителей и выбирать оптимальные условия для выделения актинидов(IV) из растворов. Так, было найдено, что соли типа $R_2M(NO_3)_6$, где R - катион N-бензилхинолиния, N,N-диметил- или N,N-добензил-аммония пригодны не только для выделения актинидов из азотнокислых растворов с достаточной полнотой и высокой степенью очистки от сопутствующих примесей, но могут быть использованы и в качестве весовой формы (М. В. Посвольский, Г. С. Марков). Это позволило создать селективные и весьма быстрые методы гравиметрического определения Th, U, Pu и Np, Ce, отличающиеся простотой операций и малой продолжительностью анализа от большинства известных методов: оксалатного, иодатного, фениларсонатного осаждения. Высокая молекулярная масса весовой формы заметно повышала нижний предел определения концентрации элемента. Существенные достоинства этих методов позволили применять эти методы в арбитражных анализах, проводимых под руководством Б. Н. Никольского. В частности, бензилхинолиниевый метод выделения плутония с последующим спектрофотометрическим или радиометрическим измерением был применен для определения содержания плутония в исходных растворах, получаемых после растворения облученных урановых блоков, а также для изучения каналов потерь плутония с выводимыми из технологической схемы растворами. Исторически последние работы были связаны с исследованиями, проводившимися, начиная с 60-х годов в ЦЗЛ ПО "Маяк", по уточнению коэффициентов взаиморасчета по плутонию между физическими и химическими

заводами. В системе аналитического контроля технологических процессов радиохимического завода Сибирского химического комбината (СХК) нашел применение ряд методов определения нептуния в растворе на фоне граммовых количеств плутония и урана. В этих случаях была использована возможность соосаждения нептуния (IV) с гексанитратными солями урана (IV) (М. В. Посвольский, Г. С. Марков - от Радиевого института и Д. Б. Шуйский - от СХК).

Важную роль в обеспечении аналитического контроля переработки облученного урана сыграли экстракционные методы выделения и очистки побочных актинидов и продуктов деления с последующим их определением методами радиометрии и спектрофотометрии. К числу определяемых элементов относятся, в частности, нептуний и изотопы тория, а также палладий. Для их выделения оказалось полезным введение в экстракционные системы ряда комплексообразующих добавок. Такого рода исследования были проведены в последние годы в лаборатории экстракционной переработки отработавшего топлива АЭС под руководством Б. Я. Зильбермана.

Для серийного определения нептуния в технологических продуктах при его концентрации 0,1 мг/л и выше в присутствии превосходящих количеств урана, плутония, циркония, технеция, следов протактиния, а также в присутствии некоторых других элементов предложено использовать экстракцию $Np(IV)$ раствором ТТА (теноилтрифторацетон) в ксилоле (Л. В. Сытник). Водные растворы корректируются по азотной кислоте после предварительного разрушения сильных комплексообразователей (если таковые присутствуют). Для стабилизации $Np(IV)$ в раствор добавляется раствор нитрата $Fe(II)$, который используется также и для промывки экстракта. Резэкстракция Np осуществляется 8 моль/л HNO_3 . Конечное определение Np производится α -радиометрически.

Определение микроконцентраций тория на фоне превосходящих количеств урана также основано на экстракционном методе подготовки пробы. Для этого проводят щелочное осаждение U и Th из азотнокислого раствора, после чего осадок растворяют в 5-6 моль/л HCl . Уран отделяют от Th экстракцией в 100 % ТБФ, причем торий количественно остается в рафинате. Определение тория проводят колориметрически с арсеназо III или тороном, а при наличии больших количеств ^{228}Th - радиометрически. При наличии мешающих примесей в исходном водном растворе возможна предварительная экстракция U и Th в 100 % ТБФ, в том числе из восстановительной среды, с последующими резэкстракцией в карбонат аммония и раскислением.

Наряду с изложенным выше, в конце 80-х годов были проведены исследования экстракционного выделения молибдена и палладия из растворов сложного состава и их последующего определения (Ю. С. Федоров, Е. Н. Инькова). Наиболее успешным оказалось извлечение указанных элементов из растворов, содержащих азотную кислоту, с помощью раствора смеси алифатических гидроксамовых кислот (ГК) с радикалом C_6-C_8 (ИМ-50) в 30 % ТБФ, разбавленном предельными углеводородами. В частности, молибден извлекается равным объемом такого экстрагента более чем на 99 % из 1-4 моль/л HNO_3 в виде сольвата $MoO_2(GK)_2TBF_2$ независимо от концентрации кислоты. Резэкстракция Mo осуществляется любым щелочным раствором, после чего проводится спектрофотометрическое определение по роданидной методике.

Палладий, как и молибден, может быть извлечен тем же экстрагентом, но при более низкой концентрации азотной кислоты. Так, коэффициент распределения в 1-1,5 моль/л HNO_3 равен ~ 10 , а в 4 моль/л HNO_3 ~ 3 , что может быть использовано для предварительного разделения Mo и Pd . Последний резэкстрагируют и одновременно определяют спектрофотометрически с помощью тиомочевины.

Помимо определения невысоких содержаний поливалентных металлов необходимо анализировать продукты химических реакций, имеющих место при экстракционной переработке ОЯТ. К их числу относится хорошо экстрагируемая азотистоводородная кислота, являющаяся продуктом каталитического окисления гидразина азотной кислотой. С этой целью был усовершенствован метод, основанный на образовании окрашенных комплексов HN_3 с

Fe(III). Основным условием этого метода является строгое соблюдение постоянства pH анализируемых проб (Л. В. Сытник). Для этого пробу нейтрализуют до щелочной реакции по фенолфталеину, а затем переводят в кислую среду с помощью 0,1 N H₂SO₄. К полученному раствору добавляют небольшое количество раствора Fe(III) в слабой серной кислоте. Раствор с конечным значением pH=2,2 фотометрируют при $\lambda=460$ нм. При анализе органических растворов или растворов, содержащих поливалентные металлы, проводится предварительная щелочная обработка.

Дальнейшим развитием аналитических методов определения Pu, Np, Th, связанных с образованием ацидокомплексных соединений, можно считать разработанные в Радиевом институте совместно с Сибирским химкомбинатом методы экстракционной хроматографии, основанные на использовании растворов солей четвертичных аммониевых оснований в качестве жидкой неподвижной фазы (Г. С. Марков, М. М. Мошков - от Радиевского института и В. Д. Беляев - от СХК). Обычно в качестве экстракционной фазы применяли нитрат метилтриоктиламмония, который наносили на высокопористый фторопласт. Способ приготовления пористого фторопласта был еще в 60-е годы разработан в Радиевом институте Б. К. Преображенским. Разработанные методы обеспечивали высокую селективность выделения Pu, Np и Th из концентрированных растворов урана. Впоследствии методики определения Pu, Np и Th были унифицированы, внедрены на СХК, а также внесены в ОСТы. Ряд указанных методов анализа используется в аналитической практике на СХК и других радиохимических предприятиях и в настоящее время.

Реконструкция радиохимических заводов и переход в середине 70-х годов на экстракционную технологию выделения и очистки плутония из облученного урана привели к необходимости решения целого комплекса новых аналитических задач, связанных с образованием и влиянием продуктов радиолиза органических компонентов экстрагента на технологические процессы. В этот период был выполнен большой объем исследований по отработке различных методик определения продуктов радиолиза в производственных растворах (В. Г. Воден, Л. И. Котович, М. С. Поляков, А. Ю. Шильников, С. А. Кокина и др.). Ряд этих методик был затем передан в контрольные лаборатории радиохимических предприятий.

К этому же времени следует отнести и основные работы по изучению радиационной устойчивости и определению продуктов радиолиза ионообменных смол и других сорбентов, используемых или предлагаемых для использования в радиохимических процессах (Н. Б. Высокоостровская, В. П. Попик, С. А. Стрелков, В. М. Калашников и др.).

В 80-е годы в Радиевом институте под руководством В. И. Андреева и Г. С. Маркова были выполнены работы по идентификации продуктов радиолиза и выяснению механизма радиационно-химических процессов, протекающих при облучении экстракционных систем с экстрагентом на основе три-н-бутилфосфата (ТБФ) в различных разбавителях (В. М. Адамов, М. С. Поляков, А. Ю. Шильников, М. М. Мошков и др.). В результате этих работ были определены радиационно-химические выходы всех основных продуктов радиолиза ТБФ и разбавителя и показано, что воздействие ионизирующих излучений на экстракционные системы приводит к протеканию двух параллельных взаимосвязанных видов реакций:

- реакции окисления и нитрования органических компонентов;
- реакции конденсации.

При проведении этих работ были использованы современные физико-химические методы анализа: спектрометрические методы (УФ-, ИК-, ЯМР-, ЭПР- и масс-спектрометрия), газовая, жидкостная хроматография и др.

В середине 70-х годов М. К. Абдулахатовым и М. Ю. Дрожжиным был выполнен цикл работ по исследованию воздействия альфа-излучения плутония-238 и америция-241 на экстракционную систему ТБФ - ГХБД - азотная кислота в лабораторных условиях. Было изучено влияние условий облучения на выход продуктов радиолиза для расслаивающихся и диспергированных систем при однократном и многократном облучении и концентрировании альфа-излучателя как в водной, так и органической фазах. Разработанная в процессе исследований методика облучения экстракционных систем, их последующей обработки и

анализа позволили впервые идентифицировать ряд ранее неизвестных продуктов радиационно-химического разложения ТБФ и ГХБД, используемых в производственных условиях. Для определения продуктов радиолитиза, характера их распределения по потокам экстракционного цикла были разработаны оригинальные методики, основанные на использовании ионоселективных электродов. На основании полученных экспериментальных результатов сделаны выводы о том, что за удержание плутония и америция в органической фазе ответственны не только бутилфосфорные кислоты, но и продукты радиолитиза, имеющие большую полярность, чем ТБФ. Выяснение природы этих продуктов требует проведения дальнейших исследований.

В последние годы в Радиовом институте проводятся работы по определению состава так называемого "красного масла", образование и накопление которого связано с процессами деструкции ТБФ и может приводить к аварийным ситуациям при работе на промышленных установках (Г. С. Марков, В. Н. Усачев, В. А. Щербаков и др.).

Одним из направлений, которые традиционно развивались в Радиовом институте, является разработка новых методов хроматографического разделения актинидных элементов и продуктов деления как с целью создания технологических процессов выделения этих элементов из растворов отработавшего ядерного топлива, так и с целью их последующего количественного определения. Начало этим работам было положено в 50-х годах Б. П. Никольским и В. И. Парамоновой, а в 70-е - 80-е годы продолжались Н. Б. Высокоостровской, В. П. Попиком, В. Я. Заманским, И. В. Рыжковой и Ю. А. Копалкиным.

В связи с этими работами большое внимание было уделено синтезу и исследованию новых сорбентов и ионообменных смол. Это направление работ сосредоточено в группе синтеза под руководством Ю. А. Копалкина. Сорбенты и ионообменные смолы, применяемые для разделения радиоактивных элементов, должны обладать рядом специфических свойств, основными из которых являются высокая радиационная и химическая стойкость и высокая избирательность по отношению к выделяемым элементам. Исходя из этих требований, в качестве основных объектов исследований были выбраны комплексообразующие ионообменные смолы на основе сополимеров 2,5-метилвинилпиридина и дивинилбензола и гетерогенные сорбенты, так называемые твэкссы на основе сополимеров стирола и дивинилбензола.

Комплексообразующие ионообменные смолы были получены химической модификацией макропористых сополимеров 2,5-метилвинилпиридина и дивинилбензола, при этом удалось получить сорбенты, сочетающие в элементарной ячейке две функциональные группы различной природы, связанные через систему сопряженных двойных связей пиридинового кольца, что обуславливало сильное взаимное влияние функциональных групп и их высокую способность к комплексообразованию с различными элементами и, соответственно, высокую избирательность по отношению к ним. Применение винилпиридиновой матрицы обеспечивает этим смолам высокую радиационную и химическую стойкость.

Использование ионообменных смол этого типа позволило разработать ряд эффективных процессов выделения и очистки различных радионуклидов. Так, на основе использования аминокарбоксильного амфолита АНКБ-2 разработан метод разделения трансплутониевых и редкоземельных элементов, который не требует применения для разделения этих элементов таких комплексообразователей, как ДТПА. Раздельное элюирование ТПЭ и РЗЭ осуществляется растворами азотной кислоты различной концентрации. Введение в состав этих смол комбинации карбоксильных и N-оксидных групп позволило получить смолы, обладающие исключительной избирательностью по отношению к 4-валентным актинидным элементам. Использование смол такого типа позволило разработать процесс селективного извлечения микроколичеств плутония из концентрированных растворов уранилнитрата.

Интересные возможности для создания эффективных методов выделения и разделения актинидных элементов дает возможность применения для этой цели твэкссов, которые получают путем сополимеризации стирола и дивинилбензола в присутствии различных экстрагентов. Таким образом удастся синтезировать сорбенты, содержащие до 50 % (масс.) экстрагента (Б. Н. Зайцев).

Использование твэксов позволило создать ряд методов выделения различных элементов из растворов сложного состава, которые могут быть использованы в аналитических целях. В качестве примеров можно привести ряд методов разделения, основанных на использовании твэкса, содержащего в качестве экстрагента фосфиноксид разнорадикальный (ФОР):

- выделение палладия из высокоактивных отходов;
- выделение урана из растворов сложного состава;
- выделение плутония из азотнокислых растворов циркониевых оболочек твэлов, содержащих до 1 моль/л фторида циркония.

Приведенные примеры не охватывают всего многообразия методов хроматографического выделения и разделения радионуклидов, которые были разработаны в Радиовом институте, они лишь иллюстрируют возможности, которые открываются при рациональном выборе сорбентов, используемых в процессах разделения.

Начало новому большому направлению работ - разработкам прецизионных методов определения U и Pu в различных ядерных материалах - было положено в Радиовом институте в первой половине 70-х годов, благодаря организации Аналитического отдела под руководством А. А. Липовского (с 1986 г. начальником отдела стал Е. А. Шашуков). Стимулами для развития работ в этом направлении послужили несколько обстоятельств:

- предложение со стороны МАГАТЭ о создании сети Национальных аналитических лабораторий для выполнения работ в рамках программы гарантий МАГАТЭ нераспространения ядерного оружия;
- необходимость создания методической базы для проведения аттестационных анализов стандартных образцов ядерных материалов для нужд отрасли;
- необходимость внедрения прецизионных методов анализа на предприятиях отрасли для решения задач, связанных с точным учетом материалов, проведением балансовых операций, взаиморасчетами между предприятиями и т. д.

Критическое рассмотрение многих традиционных методов анализа, подкрепленное тщательными экспериментальными исследованиями, позволило определить наиболее перспективные направления работ в области усовершенствования ряда электрохимических, спектрофотометрических, масс-спектрометрических и радиометрических методов определения концентрации и изотопного состава актинидных элементов. В частности, в 1975 г. А. В. Степановым и М. В. Рыжинским был создан прототип лабораторного полуавтоматического титратора для определения концентрации урана с относительной погрешностью не более 0,1 %. В тот же период Л. С. Буляницей, Н. А. Алексеевой и другими под руководством А. А. Липовского были внедрены кулонометрические методы прецизионного определения плутония и нептуния в растворе. С. А. Никитиной под руководством А. А. Липовского был разработан прецизионный дифференциальный спектрофотометрический метод определения урана со средним относительным квадратическим отклонением результатов 0,25 %. В 1974-1976 гг. усилиями А. А. Липовского, Л. М. Крижанского, А. В. Степанова, Б. Н. Беляева, Л. Д. Преображенской, Л. С. Буляницы, А. В. Ловцюса, Т. П. Макаровой и других было положено начало широкому использованию метода изотопного разбавления в масс-спектрометрии для определения U, Pu, Am и Cm в различных ядерных материалах, в том числе и в отработавшем топливе АЭС. Был достигнут весьма высокий уровень точности определения этих элементов. Например, для плутония относительное среднее квадратическое отклонение значений концентраций составило 0,2-0,3 % при содержании плутония в анализируемой пробе 1-3 мкг.

В тот же период А. А. Липовским, Ю. С. Егоровым, А. М. Гейдельманом и другими был разработан комплексный масс-спектрометрический и альфа-спектрометрический метод определения концентрации плутония в растворе. В этом методе масс-спектрометрия использовалась для определения изотопного состава плутония, а альфа-спектрометрия - для определения концентрации плутония методом изотопного разбавления с использованием в качестве изотопных меток растворов плутония-238 или плутония-239, аттестованных по абсолютной альфа-активности. Достигнутая при этом точность определения концентрации плутония составляла 0,3 отн. %. Такой уровень точности был подтвержден результатами межла-

лабораторного эксперимента IDAS-90, организованного Радиевым институтом. В этом эксперименте участвовали многие зарубежные лаборатории.

В качестве составных частей методик прецизионного определения актинидных и редкоземельных элементов получили развитие и многие методы разделения их смесей, в особенности экстракция, ионообменная и распределительная хроматография (В. Н. Ушатский, Б. К. Преображенский, Л. Д. Преображенская и др.). Оригинальным направлением работ Радиевого института явилось развитие электромиграционного метода разделения сложных смесей, в частности смесей урана, плутония, трансплутониевых и редкоземельных элементов (А. В. Степанов, Т. П. Макарова). Разделение проводится в растворах реагентов, с которыми определяемые элементы образуют комплексные соединения различной устойчивости. Для каждой из групп близких по свойствам элементов были изучены и выбраны наиболее эффективные комплексообразующие вещества. В частности, для разделения редких земель или трехвалентных актинидов оказались наиболее пригодными реагенты из группы комплексонов.

Использование указанных выше методов позволило Радиевому институту успешно участвовать в международных межлабораторных экспериментах Pafex-1 и Pafex-2 по определению концентрации плутония (1973-1975 гг.), а с 1976 г. активно включиться в работы МАГАТЭ по осуществлению гарантий нераспространения ядерного оружия.

Большой вклад в развитие этого направления внесли А. А. Липовский, А. В. Степанов, Л. М. Крижанский, Ю. М. Толмачев, Б. Н. Беляев, Л. Д. Преображенская, Т. П. Макарова, М. В. Рыжинский, А. В. Ловцюс, В. М. Андреев-Савельев, В. С. Мухин и многие другие сотрудники института.

С 1976 г. Радиевый институт был включен в сеть Национальных аналитических лабораторий МАГАТЭ по гарантиям. В задачу института стал входить анализ контрольных образцов ядерных материалов, отбираемых инспекторами МАГАТЭ на установках, находящихся под гарантиями. Вначале в Радиевом институте проводилось только определение урана, а с 1986 г. институт стал одной из 8 лабораторий сети, которым поручался анализ контрольных образцов отработавшего топлива АЭС на изотопный состав и массовую долю урана и плутония. В 1987 г. статус Радиевого института как Национальной лаборатории по разрушающим методам анализа для целей гарантий был подтвержден приказом по Министерству среднего машиностроения СССР.

Наличие в Радиевом институте комплекса прецизионных методов анализа позволило осуществить в течение 1978-1996 гг. обширную программу по изучению состава отработавшего топлива АЭС с реакторами типов ВВЭР-365, ВВЭР-440, ВВЭР-1000 и РБМК-1000. Эти исследования проводились во взаимодействии с Институтом атомной энергии (ныне Российским научным центром "Курчатовский институт"), Нововоронежской и Ленинградской атомными электростанциями, Научно-исследовательским институтом атомных реакторов. Со стороны Радиевого института в этих работах активное участие принимали А. В. Степанов, Т. П. Макарова, Л. Д. Преображенская, Б. Н. Беляев, А. В. Ловцюс, Б. А. Бибишев, А. М. Фридкин и др. Были исследованы многие десятки образцов топлива, вырезанных из твэлов, отличающихся местоположением в активной зоне реактора, начальным обогащением урана и степенью выгорания. В результате были накоплены наиболее полные в России экспериментальные данные по изотопному составу урана, плутония, нептуния, америция, кюрия и некоторых редкоземельных элементов и их массовых долей в отработавшем топливе. На основе этого материала в Курчатовском институте была проведена корректировка соответствующих программ расчета накопления в топливе изотопов тяжелых элементов во время кампании облучения. Кроме того, полученные данные позволили установить ряд практически важных корреляционных соотношений между значениями выгорания топлива и массовыми (или молярными) долями изотопов актинидных элементов и некоторых продуктов деления или их удельной активностью. Такие корреляции оказались, например, полезными для установления характеристик топлива, выброшенного в окружающую среду во время аварии на Чернобыльской АЭС. Уже в первые дни после аварии специалисты Радиевого института, имея в своем распоряжении пробы почвы и воздуха из района

аварии, установили среднее значение степени выгорания выброшенного топлива, равное 10,5 кг/т U, а также получили некоторые другие его характеристики. Для этой цели было использовано корреляционное соотношение между выгоранием и отношением альфа-активности плутония-238 и плутония-239+240. Использование корреляционного отношения между активностями плутония-239+240 и церия-144 позволило производить экспрессную оценку степени загрязненности плутонием территории, прилегающей к аварийной станции.

Прецизионные методы анализа оказались крайне необходимыми и для реализации в Радиевом институте очень важной программы создания стандартных образцов ядерных материалов. Работы в этом направлении начались в 1981 г., и к настоящему времени уже выпущено более ста наименований стандартных образцов на основе урана, нептуния, плутония и трансплутониевых элементов, аттестованных по концентрации, изотопному составу, содержанию примесей и т. д. Эти стандартные образцы пользуются широким спросом как в России, так и за рубежом. В частности, Радиевый институт является одним из основных поставщиков стандартных образцов для Департамента гарантий МАГАТЭ. Активное участие в работах по реализации этой программы принимали А. В. Степанов, М. В. Рыжинский, Л. Д. Преображенская, Л. С. Буляница, Т. П. Макарова, Б. Н. Беляев, А. В. Ловцюс, М. Ю. Витинский, П. А. Бронзов, Л. Ф. Солнцева и другие.

Аттестация стандартных образцов немыслима без использования высокочувствительных методов определения в них примесных элементов. Большой вклад в создание спектральных методов внесла группа сотрудников Радиевого института под руководством В. М. Александрюка, внедрившая в практику большое число методик химико-спектрального анализа. Это обеспечило возможность определения содержания примесей около 30 элементов в уране, плутонии и нептунии с пределом обнаружения 10^{-3} - 10^{-5} %.

Одним из важных достижений института в разработке инструментальных методов анализа, в том числе на примесные элементы, является комплекс работ, связанных со становлением и развитием метода рентгенофлуоресцентного анализа (РФА) в кристалл-дифракционном и бескристалльном его вариантах.

Эти работы восходят к концу 70-х - началу 80-х годов. Основная их направленность в институте связана с потребностями определения в растворах на различных стадиях ядерного топливного цикла урана, нептуния и плутония.

Привлекательной стороной метода РФА является возможность экспрессной идентификации и количественного определения большинства элементов независимо от их валентного состояния и без какой-либо подготовки раствора. Метод позволяет определять содержание элементов в растворах сложного состава.

Основными участниками разработки бескристалльного варианта метода были В. В. Бердилов, Б. С. Иохин, П. А. Гальцев и другие. В результате проведенных работ был создан бескристалльный спектрометр, основными достоинствами которого являются:

- высокая чувствительность; экспериментально достигнутые рекордные значения чувствительности определения широкого круга элементов, находящиеся в диапазоне от 10^{-6} до 10^{-5} %;
- возможность прямого анализа радиоактивных проб.

Эти достоинства явились результатом разработанной в институте и защищенной многими авторскими свидетельствами оригинальной конструкции спектрометра. Ее центральным компонентом является светосильный брэгговский фильтр из пирографита, позволяющий, с одной стороны, выделить аналитическое излучение элементов, а с другой стороны - подавить фоновое излучение.

Созданные серийные приборы в Риге и Челябинске, а также появившиеся на рынке спектрометры EX-12000 фирмы BAJRD (США), включают в качестве основного узла светосильный брэгговский отражатель, разработанный в Радиевом институте. Прибор успешно используется на ряде предприятий отрасли и в других областях народного хозяйства.

Одновременно в институте при участии В. В. Бердилова, В. И. Стомбура, О. А. Авдеева и других происходило развитие кристалл-дифракционного варианта метода РФА. Результатом сотрудничества с НПО "Буревестник" (Санкт-Петербург) стало создание спектрометра

с высоким разрешением, обеспечивающим прецизионный анализ компонентов в высокоактивных растворах сложного элементного состава. Разработанный прибор был успешно внедрен на ряде предприятий отрасли.

Большой вклад в развитие люминесцентных методов анализа внесли работы Радиевого института, выполненные группой сотрудников: А. В. Степановым, В. М. Александрюком, С. А. Никитиной, Т. А. Демьяновой. Эти методы используются для определения примесей в конечных продуктах радиохимического производства, при аттестации стандартных образцов и для анализа различных объектов окружающей среды с использованием аппаратуры, созданной в Радиевом институте. Возбуждение люминесценции производится ультрафиолетовым лазером. Традиционно определяемыми элементами являются уран и редкоземельные металлы. В 1983-1984 гг. в Радиевом институте была обнаружена способность нептуния, внедренного в матрицу фторида кальция, люминесцировать в видимой области спектра при охлаждении образца до температуры жидкого азота. Это явление послужило основой для создания люминесцентного метода определения нептуния в различных объектах - технологических растворах, конечных продуктах переработки отработавшего топлива и в окружающей среде с пределом обнаружения нептуния в измеряемом образце 0,05 нг. Метод был защищен авторским свидетельством. В дальнейшем на этой основе был создан автоматизированный анализатор нептуния с лазерным возбуждением, управляемый с помощью компьютера. Эти приборы находят применение как на отечественных предприятиях, так и в МАГАТЭ.

Для повышения чувствительности масс-спектрометрических методов анализа объектов с низким содержанием определяемых изотопов в Радиевом институте были проведены работы по улучшению параметров серийного масс-спектрометра МИ-1201 за счет установки позиционно-чувствительного детектора ионов (ПЧДИ) в фокальной плоскости прибора (Б. Н. Беляев, В. Д. Домкин и др.). Это позволило одновременно регистрировать массовые спектры до 7 соседних изотопов. Такой метод позволяет измерять изотопный состав проб, содержащих 10^{-9} - 10^{-13} г определяемого элемента даже на масс-спектрометре с небольшим коэффициентом использования проб. В Радиевом институте было проведено большое число анализов на определение изотопного состава урана и плутония в образцах почвы, воды и донных отложений. В частности, были проанализированы пробы почвы и воды из зоны затопления атомной подводной лодки "Комсомолец" с целью выяснения радиационной обстановки, пробы почвы в ближней зоне Чернобыльской АЭС, в дальней зоне - Гомельской области, а также образцы почвы, полученные из МАГАТЭ. Установка с ПЧДИ использовалась и для метрологической аттестации стандартных образцов почвы.

Говоря о масс-спектрометрии, нельзя не упомянуть об использовании этого мощного метода в исследовательских целях. В 1981 г. в Радиевом институте был введен в действие комплекс, состоящий из масс-спектрометра MS-30, хроматографа PYE-104 в сочетании с ЭВМ NOVA. Масс-спектрометр такого типа позволяет измерять массы ионов с точностью до 10^{-6} от атомной массы при разрешении 10^4 . Это оказалось достаточным для определения брутто формул фрагментных ионов и структуры соединений по измеренным массам. Примером таких исследований явилось масс-спектрометрическое изучение летучих бета-дикетонатов актинидов и их аддуктов, позволившее получить информацию о состоянии этих соединений в газовой фазе, о закономерностях фрагментации их молекулярных ионов, а также изучить взаимосвязи между направлениями фрагментации и химическими свойствами центрального катиона. Такая информация необходима при решении задач разделения актинидов методами газовой хроматографии, фракционной сублимации и получения покрытий, содержащих актиноидные элементы, а также в теории химии координационных соединений. Активное участие в запуске комплекса и проведении исследований принимали Б. Н. Беляев, В. М. Адамов, А. Э. Ритарь, С. О. Березинский, Г. А. Фирсанов.

Другим направлением использования масс-спектрометрии в исследовательских целях было изучение изотопных распределений и изотопических эффектов в реакциях расщепления и деления ядер. Для этой цели были сконструированы и изготовлены два масс-спектрометра в "линию" с ускорителем протонов. Один из них был установлен на протонном пучке син-

хроциклотрона СПБИЯФ им. Б. П. Константинова, а другой на синхроциклотроне Радиевого института. На этих установках был проведен цикл работ по исследованию механизма реакций расщепления и деления ядер протонами промежуточных энергий (0,07-1) ГэВ для разных изотопных мишеней в диапазоне массовых чисел от 12 до 238. Определялся изотопный состав ядер-продуктов в широком диапазоне их времен жизни (до 0,01 с) и сечений образования (до 0,1 мкбарн). Был также сконструирован и изготовлен призменный масс-спектрометр, установленный на масс-сепараторе ИРИС в СПБИЯФ для измерения масс короткоживущих изотопов. Использование оригинальной методики с применением стабильных изотопов в качестве реперов в сочетании с разделением изобарных ядер продуктов существенно повысило точность измерения масс короткоживущих радиоактивных ядер с $T_{1/2} > 0,1$ с. Основными участниками работ на масс-спектрометре в "линию" были Б. Н. Беляев, В. Д. Домкин, Ю. Г. Коробулин, В. С. Мухин, Ю. А. Коробулин.

Основой для развития в Радиевом институте методов газового анализа послужили фундаментальные работы Б. А. Никитина, выполненные в 30-е - 40-е годы. С начала 60-х годов в лаборатории А. М. Трофимова начали разрабатывать методы контроля за состоянием систем газоочистки сначала на радиохимических предприятиях отрасли, а позднее и на ряде АЭС - Ленинградской, Смоленской, Кольской, Курской, Хмельницкой и др. В частности, был разработан переносный анализатор "ПУРГА-1" для радиохроматографического определения объемной активности трития и радиоактивных изотопов криптона и ксенона в газоздушных смесях. Методика проведения измерений состояла во введении в хроматографическую колонку анализатора пробы газовой смеси. Разделенные компоненты детектировались проточным пропорциональным счетчиком и регистрировались в виде отдельных пиков на радиохроматограмме. Для калибровки прибора используются аттестованные калибровочные газовые смеси. Прибор рассчитан на определение объемных активностей в диапазоне $3,8 \cdot 10^6 - 1,85 \cdot 10^9$ Бк/м³. Аналогичная методика использовалась при определении газообразных радионуклидов в теплоносителе первого контура энергетических реакторов, технологических газовых выбросах, а также при проведении контроля герметичности оболочек твэлов. В этих работах активное участие принимали Ю. Н. Казанкин, А. А. Палладиев, В. А. Смирнов, И. В. Чубаров, Г. К. Тетервин, В. Б. Гевирц.

Краткий обзор деятельности Радиевого института в области аналитической химии показывает, что эта наука, вбирающая в себя достижения в различных областях знания, нашла хорошую почву в Радиевом институте, в котором традиционно, со дня его основания, развивались многие направления химии и физики.

ФУНДАМЕНТАЛЬНАЯ РАДИОХИМИЯ

Д. Н. Суглобов

С самого начала основания Радиевого института исследования фундаментального характера неизменно занимали значительное место в его деятельности. При организации работы нового института один из его основателей, В. Г. Хлопин, будучи ученым, мыслящим широко и основательно, хорошо понимал, что он стоит у истоков новой, обширной и трудной науки - радиохимии и что прогресс в ее разработке невозможен, если в научном исследовании, наряду с ответом на вопрос "как", не отвечать на вопрос "почему". Одновременно с прикладными задачами В. Г. Хлопин наметил широкую программу работ фундаментального характера по разработке методов химической идентификации и выделения радиоэлементов, которые в исходном состоянии находятся в микроконцентрациях. К ним, прежде всего, относилось изучение закономерностей межфазового распределения радиоэлементов в зависимости от их природы и природы среды и изучение химических свойств радиоэлементов. Эта программа, расширяясь и видоизменяясь, обогащаясь новыми методами исследования, переходя в другие институты и лаборатории, по существу сохранилась действующей до наших дней.

Нужно сказать, что научная деятельность радиохимиков Радиевого института так или иначе всегда инициировалась запросами прикладной радиохимии. Но, в соответствии с указанным подходом, намеченным В. Г. Хлопиным, работы, как правило, ставились и проводились шире, чем это требовалось для решения конкретных задач. Исследования включали изучение форм существования радиоэлементов в различных средах, а позже - состава и строения химических соединений радиоэлементов в растворах и в индивидуальном состоянии, изучение их реакционной способности и других физико-химических свойств, анализ изменения этих свойств в гомологических рядах элементов. Подобный подход поднимал общий уровень знаний о радиоэлементах и помогал находить новые, оригинальные решения прикладных задач, давать новые предложения.

В рамках небольшой статьи едва ли возможно последовательно изложить историю развития фундаментальных исследований по радиохимии в Радиевом институте за 75 лет его существования, имея в виду отражение конкретного исторического плана, переименование направлений и, с другой стороны, последовательность процесса познания. В статье предполагается показать, как развивались исследования по отдельным направлениям межфазного распределения радиоэлементов, по комплексообразованию радиоэлементов и по строению комплексов, по синтезу металлоорганических соединений радиоэлементов.

Распределение радиоэлементов между кристаллами и раствором. На первых порах (с 1925 г.) в связи с задачей производства радия и других естественных радиоэлементов В. Г. Хлопин и его ученики М. А. Пасвик-Хлопина, П. И. Толмачев, А. Г. Самарцева, Б. А. Никитин, А. Е. Полесицкий, А. П. Ратнер, М. С. Меркулова изучали сокристаллизацию солей радия-бария, бария-свинца и других пар микро- и макрокомпонентов и показали, что при определенных условиях микрокомпонент равновесно распределяется между кристаллической фазой и насыщенным раствором по закону, аналогичному закону распределения вещества (неэлектролита) между двумя несмешивающимися жидкостями (закон Бертло-Нернста). Самым удивительным здесь оказалось то, что равновесное распределение микрокомпонента сравнительно легко достигается в твердой фазе, чего не могло быть при диффузионном механизме выравнивания концентраций. Школой В. Г. Хлопина было надежно показано, что равновесие достигается за счет многократной перекристаллизации субмикрости-

сталлов твердой фазы. Более того, в дальнейшем было показано, что межфазный обмен подобного рода может происходить и в системах с гидроксидами металлов.

С другой стороны, без перекристаллизации наблюдается логарифмическое распределение концентрации микрокомпонента по кристаллу (распределение Дернера-Госкинса). Таким образом, В. Г. Хлопиным и сотрудниками было показано, что изучение закономерностей распределения изоморфного микрокомпонента в кристаллической фазе может служить мощным методом исследования динамики фазовых процессов в солевых (и, вообще говоря, любых) системах.

Термодинамическая теория изоморфной сокристаллизации была разработана А. П. Ратнером (30-е годы). В тот же период в работах А. Н. Мурина были найдены системы (например, хлорид серебра - раствор), в которых диффузия ионов в кристаллах вносит заметный вклад в установление равновесия кристалл - раствор. В последующие годы А. Н. Мурин создал целое направление по изучению ионной и электронной проводимости в ионных кристаллах, которое развивалось в Радиевом институте и затем в Ленинградском университете.

На основе данных по межфазному распределению В. Г. Хлопин сформулировал правило (его следует рассматривать как одну из формулировок закона Хлопина), согласно которому если коэффициент распределения микрокомпонента между твердой фазой и раствором сохраняет постоянное значение от самых малых до больших концентраций микрокомпонента, то это является доказательством сходства химического состава и молекулярного строения микро- и макрокомпонента. Позже это правило В. Г. Хлопин и А. Г. Самарцева применили для доказательства существования двухвалентного полония (1934 г.).

Расширив исследования на системы, в которых заведомо невозможен истинный изоморфизм, В. Г. Хлопин и Б. А. Никитин (40-е годы) и в дальнейшем В. И. Гребенщикова с сотрудниками (Р. В. Брызгалова, Н. Б. Чернявская, А. Ф. Прокудина, Ю. П. Давыдов, Ю. М. Рогозин, Э. М. Пазухин, А. С. Першин) обнаружили и изучили большое число систем с огромным разнообразием видов сокристаллизации. В частности, были найдены системы, в которых коэффициент сокристаллизации в широком интервале концентраций микрокомпонента постоянен, но наблюдается нижняя граница смешиваемости (аномально-смешанные кристаллы), что интерпретировалось как признак замещения в решетке не ион на ион, а более крупными структурными образованиями.

В связи с задачей выделения трансурановых элементов осадительными методами подробно изучалась сокристаллизация разновалентных ионов, например плутония(IV) с оксалатом лантана или плутония(IV) с двойным сульфатом лантана-калия. Если для первой системы наблюдалась корреляция коэффициента сокристаллизации с соотношением растворимостей компонентов, характерная для истинных смешанных кристаллов, то для второй преимущественное концентрирование плутония в осадке не соответствовало большей растворимости двойного сульфата плутония-калия по сравнению с сульфатом лантана-калия. Существенно, что для ряда подобных систем не удалось обнаружить нижней границы смешиваемости. Таким образом, для этих систем критерий отличия истинных смешанных кристаллов от аномально смешанных по отсутствию или наличию нижней границы смешиваемости не работает. Этот пример показывает, что закон Хлопина действует лишь в определенных границах, и его применение без дополнительных сведений об изучаемых системах может привести к ошибочным выводам. К таким сведениям относится, например, зависимость коэффициента сокристаллизации от концентрации конкурирующего катиона или общего аниона.

В последние годы молекулярный механизм сокристаллизации и вообще процессов кристаллизации и растворения глубоко и подробно изучался в работах группы И. В. Мелихова (Московский университет), а закон Хлопина широко использовался для доказательства существования и изучения свойств двухвалентных актинидов и лантанидов в работах Н. Б. Михеева и др. (Институт физической химии РАН); были определены окислительные потенциалы этих ионов, оценены их ионные радиусы и определено наличие или отсутствие d-конфигурации их электронных оболочек.

Распределение радиоэлементов между кристаллами и солевым расплавом. История изучения закономерностей распределения микрокомпонента между твердой фазой и солевым расплавом тесно связана с именем В. Р. Клокман, которая начала эти исследования под руководством В. Г. Хлопина в 1943 году. В последующие годы она вместе с сотрудниками (В. А. Алексеев, В. С. Зив, Н. С. Колесникова, А. А. Мельникова, К. Г. Мякишев, Ю. И. Родионов, А. С. Алой) получила в этом направлении обширный и интересный материал. Было установлено, что сокристаллизация микро- и макрокомпонентов из расплавов солей имеет ряд особенностей, связанных с высокой температурой и комплексующими свойствами растворителя - обычно галогенида щелочного металла. К ним, прежде всего, относится значительно бо́льшая скорость установления равновесного распределения микрокомпонента между кристаллами и жидкой фазой, хотя и в случае солевых расплавов на время перекристаллизации существенное влияние оказывают размеры кристаллов. Было также найдено, что, несмотря на высокую температуру, вклад диффузии ионов в твердой фазе остается незначительным, и скоростьюопределяющим процессом по-прежнему является перекристаллизация.

Другой особенностью является то, что если при истинной изоморфной сокристаллизации в водных растворах микрокомпонент обычно концентрируется в кристаллах, то для кристаллизации из расплавов характерно его концентрирование в жидкой фазе. Было также отмечено, что при неизоморфной сокристаллизации с образованием аномальных смешанных кристаллов (например радия с фторидом лантана) не обнаруживается нижняя граница смешиваемости.

Очень сильно на коэффициент сокристаллизации влияет замена "растворителя" - щелочного металла, что обусловлено различиями в комплексующей способности аниона в разных солях (например, в LiF комплексующая способность фторид-иона существенно ниже, чем в RbF). Наконец, большое влияние на коэффициент сокристаллизации может оказать состав газовой фазы.

Вышеупомянутые закономерности дают возможность регулировать процессы соосаждения в солевых расплавах, т. е. производить преимущественное обогащение микрокомпонентом твердой или жидкой фазы путем подбора растворителя, температуры и газовой среды.

Большой комплекс работ по химии фторидных расплавов солей актинидных и осколочных элементов был выполнен в последующие (70-е) годы в связи с проработкой идеи гомогенного жидкосолевого энергетического реактора (Ю. И. Родионов, В. А. Алексеев).

Распределение радиоэлементов между кристаллами и газовой фазой. С целью создания методов выделения радиоактивных благородных газов Б. А. Никитин с 1936 г. начал развивать оригинальное научное направление по изучению закономерностей их распределения между газовой и твердой фазами. Используя близкие по размерам и ван-дер-ваальсовским силам молекулы газов H_2S , HBr , SO_2 в качестве макрокомпонентов, он впервые получил кристаллогидрат радона. Поскольку радон распределяется между газовой фазой и кристаллическими $SO_2(H_2O)_6$ и $H_2S(H_2O)_6$ по закону Хлопина, то кристаллогидрату радона был приписан аналогичный состав. В конце 40-х годов Б. А. Никитин, вместе с М. П. Ковальской и Э. М. Иоффе получил молекулярные соединения (клатраты) благородных газов (включая радон) с фенолом и показал, что при изоморфном соосаждении с гидратом диоксида серы можно произвести количественное разделение смеси благородных газов за счет различия в упругости диссоциации гидратов.

В 60-х - 70-х годах это направление развивалось в работах А. М. Трофимова и Ю. Н. Казанкина, которые обстоятельно исследовали корреляцию между структурными особенностями замещенных фенола и их способностью давать клатраты с благородными газами. Изучение кинетики насыщения гидрохинона криптоном позволило получить в "мягких" условиях (80 °C, 14 ат) высокообогащенный клатрат состава $0,6Kr[C_6H_4(OH)_2]_3$.

Жидкостная экстракция радиоэлементов. Б. А. Никитин стоял у истоков еще одного, исключительно важного направления исследований - жидкостной экстракции солей металлов. С 1945 г. с целью поиска эффективных методов выделения плутония и урана из облучен-

ных материалов он совместно с В. М. Вдовенко и Т. В. Ковалевой начал изучение эфирной экстракции нитратов металлов. С 1948 г. к ним присоединились М. П. Ковальская, М. Ф. Пушленков и М. М. Гербаневская. В дальнейшем к этому направлению подключались более молодые исследователи. Важные научные результаты были получены по всем основным типам экстракционных систем.

Исторически первыми изучались системы с сольватным механизмом экстракции, в которых в качестве экстрагента использовались простые эфиры и, несколько позже, нейтральные фосфорорганические соединения (фосфаты, фосфонаты, фосфинаты, фосфиноксиды). Наряду с накоплением феноменологического материала (расширение набора экстракционных систем, изучение зависимости коэффициента распределения от кислотности, солевого фона, синергетных добавок и т. д.) актуальной задачей было выяснение механизма экстракции и сил, формирующих экстрагируемый комплекс. В этом направлении оказалось эффективным изучение полных диаграмм растворимости соль металла - вода - органический растворитель, в которых область жидкостной экстракции составляет лишь небольшую часть поля диафрагмы, а также инфракрасных спектров растворов и выделяемых комплексов (В. М. Вдовенко, Е. А. Смирнова, Л. Г. Маширов). В конце 50-х и в 60-е годы для определения типа химических связей начали широко использоваться колебательные спектры. В частности, было установлено, что при экстракции эфирами нитрат уранила переходит в фазу органического растворителя в форме нейтрального дигидрата-динитрата с бидентатно координированными нитратными группами и связан с молекулами растворителя через первую или даже вторую гидратную оболочку водородными мостиками (Д. Н. Суглобов, 1960 г.). Указанная роль водородной связи в дальнейшем была подтверждена весьма значительным изотопным эффектом экстракции: коэффициент распределения нитрата уранила при экстракции из D_2O эфиром оказался в 2,5 раза больше, чем из H_2O . Определенную роль в эффекте играет большая структурированность жидкой тяжелой воды по сравнению с H_2O , что было продемонстрировано более слабой растворимостью радона в тяжелой воде (Е. К. Легин, 1965 г.).

В силу большой практической значимости особенно подробно изучались в Радиовом институте в качестве экстрагентов фосфорорганические соединения (М. Ф. Пушленков, В. Г. Шумков, Г. П. Никитина, О. Н. Шувалов, В. Г. Воден, Е. В. Комаров, В. И. Землянухин, Г. А. Куманева, Б. Я. Зильберман, В. Н. Комаров, Н. Н. Щепетильников, Н. С. Тихонов, В. Н. Усачев, Л. Б. Шпунт, В. С. Федоров и др.). Было установлено, что последние, как более сильные основания, вытесняют воду из координационной сферы иона металла, и экстрагируемый комплекс переходит в органическую фазу в виде безводного сольвата, который связан с растворителем через алкильные радикалы экстрагента в основном силами Ван-дер-Ваальса. Было надежно показано, что молекула трибутилфосфата (ТБФ) связывается с ионом металла или протоном именно фосфорильным кислородом. Получено много данных о составе конкретных экстракционных комплексов, об изменении их состава в зависимости от концентрации кислоты и ее природы (HNO_3 , HCl , $HClO_4$). На основе анализа большого числа экстракционных систем удалось получить уравнения, связывающие молекулярные параметры экстрагентов (молекулярная масса, структура, основность функциональной группы) с константами равновесия реакции экстракции, а также проанализировать границы применимости корреляционных уравнений типа уравнения Гаммета-Тафта при оценке экстракционной способности конкретного экстрагента, исходя из его состава и строения.

Из всех этих исследований стало также ясно, что при сольватном механизме экстракции анион соли металла, с одной стороны, должен давать довольно прочные комплексы с ионом металла, а с другой стороны, плотность отрицательного заряда на нем не должна быть слишком высокой, иначе это обусловит большую прочность кристаллической решетки соли и сильную гидратацию аниона. Нитрат-ион в этом отношении близок к оптимуму. На основании этих позиций было предсказано, что близкими к нитрату по указанным характеристикам окажутся галогенацетаты. И действительно, трихлорацетат уранила характеризуется даже более высоким коэффициентом распределения, чем нитрат. Коэффициент распределения резко падает при переходе к незамещенному ацетату (Д. Н. Суглобов, Л. Г. Маши-

ров, 1971 г.). В дальнейшем весьма подробно была изучена химия и термодинамика галоген-ацетатов уранила и лантанидов, в том числе, в плане экстракции (А. В. Балуев, с 1972 г.).

Существенно усложняется характер экстракции в области высоких (близких к насыщению) концентраций солей металлов и кислоты. В процесс формирования экстрагируемых форм включаются дополнительная сольватация металлосольвата молекулами азотной кислоты и конкурентные реакции образования анионных комплексов. При экстракции трибутилфосфатом были, например, найдены такие экзотические формы как $[\text{Th}(\text{NO}_3)_3(\text{ТБФ})_n] \cdot \text{UO}_2(\text{NO}_3)_3$ (Ю. С. Федоров, Б. Я. Зильберман). Явление диспропорционирования на ионные пары обнаружено и для нейтральных галогенидных комплексов уранила (А. А. Липовский).

Серия работ была выполнена по кинетике экстракции и реэкстракции нитрата уранила в системе с ТБФ. В частности, было установлено, что при совместной экстракции урана и азотной кислоты последняя сначала опережает уран, но затем, по мере экстракции урана, происходит реэкстракция избыточной кислоты. Скорость экстракции нитрата уранила описывается уравнением первого порядка и существенно возрастает с ростом температуры (М. Ф. Пушленков, В. С. Федоров, А. Р. Колкер).

В последнее время экстракция нейтральными фосфорорганическими веществами развивается в направлении изучения бидентатных диалкил (арил) фосфиноксидов и карбамоилов, которые способны количественно извлекать актинидные и редкоземельные элементы из кислых водных растворов. Проблема здесь состоит в создании разбавителя, обеспечивающего достаточную растворимость комплексов (В. А. Бабаин, Б. Н. Зайцев, В. Н. Романовский, И. В. Смирнов).

Много усилий было затрачено на изучение радиационной деградации экстракционных систем с ТБФ с использованием самых современных методик, включая хромато-масс-спектрометрию. Были идентифицированы основные продукты радиолитического распада ТБФ, представляющие собой нитрованные и ненитрованные полимеры. Был также сделан существенный шаг в понимании химической природы межфазных образований ("медуз"), растущих на границе раздела фаз: они имеют органосиликатную основу (Г. С. Марков, М. М. Мошков). Сходного типа работы были проведены по изучению химических последствий радиолитического распада ионообменных смол (Н. Б. Высокоостровская, В. А. Калашников).

Большое внимание было уделено изучению систем с ионообменным механизмом экстракции. Наиболее распространенными экстрагентами с экстракцией по катионообменному механизму являются β -дикетоны и алкилфосфорные кислоты, а среди них для экстракции РЗЭ и актинидов чаще всего используется ди-2-этилгексилфосфорная кислота (ДЭГФК, НА). Она относится к ассоциированным экстрагентам и образует экстрагируемый комплекс состава $\text{An}(\text{III})(\text{НА})_2$. Проведенные в Радиовом институте исследования показали, что этот комплекс имеет островное строение и образуется только при значительном избытке экстрагента. При меньших отношениях могут быть получены $\text{AnA}(\text{НА})_2$, $\text{AnA}_2\text{НА}$ и AnA_3 , представляющие собой линейные координационные полимеры, соответственно, с одной, двумя и тремя мостиковыми группировками $\text{M} \dots \text{O}-\text{P}-\text{O} \dots \text{M}$. Жесткие стержни AnA_3 кристаллизуются в шестигранные призмы и в инертном растворителе образуют жидкие кристаллы-нематики (Е. К. Легин, Д. Н. Суглобов, Ю. И. Трифонов).

Исключительно интересное направление в экстракции металлов в последнее время интенсивно развивается А. Ю. Шадриним, В. А. Старченко и А. А. Мурзиным. Речь идет о флюидной экстракции (экстракция сжиженными газами). В частности, было найдено, что β -дикетонаты поливалентных металлов хорошо извлекаются сверхкритическим диоксидом углерода.

В Радиовом институте изучаются также экстракционные системы, рассчитанные на выделение щелочных и щелочноземельных элементов (Cs, Sr). В свое время (60-е годы), для этой цели достаточно подробно изучались в качестве экстрагента растворы иода в полярных растворителях, в которых экстрагируемыми комплексами являются полииодиды металлов, или смешанные полигалогениды (Л. С. Буляница). В наши дни большое практическое значение приобрела система, в которой в качестве аниона выступает хлорированный дикарболлид

кобальта, и на базе этой системы разработана технология выделения цезия и стронция из хвостовых растворов переработки облученного топлива (Л. Н. Лазарев, В. М. Есимантовский, В. Н. Романовский и др.). Химия процесса экстракции в этой системе пока изучена недостаточно.

Наиболее важные сведения о химии анионообменной экстракции были получены группой А. А. Липовского на основе спектроскопических данных (М. Г. Кузина, С. А. Никитина, Т. А. Демьянова, 60-е - 70-е годы), где был исследован состав и строение алкиламмониевых солей с комплексными металлосодержащими анионами. По сдвигу частоты $\nu(\text{N-H})$ катиона триоктиламмония была определена относительная основность простых и комплексных анионов, которая возрастает в ряду: $\text{BF}_4^- < \text{FeCl}_4^- < \text{Cl}_4^- < \text{PtCl}_6^{2-} < \text{UO}_2(\text{NO}_3)_3^- < \text{UO}_2\text{Cl}_4^{2-} < \text{UO}_2(\text{SO}_4)_3^{4-} < \text{NO}_3^- < \text{I}^- < \text{HCl}_2^- < \text{Br}^- < \text{NCS}^- < \text{HF}_2^- < \text{Cl}^- < \text{CF}_3\text{COO}^- < \text{CCl}_3\text{COO}^- < \text{F}^- < \text{CH}_3\text{COO}^-$.

Установлено, что при избытке соли алкиламмония R_3NA происходит перераспределение водородных связей и образование ионных ассоциатов, состоящих из двух и более катионов R_3NH^+ , связанных с одним анионом A^- , а также комплексного аниона, содержащего металл. Найдено, что экстракция металлов аминами из смесей кислот улучшается за счет образования смешанных комплексов, например $(\text{R}_3\text{NH})_3\text{UO}(\text{C}_2\text{O}_4)_2\text{NO}_3$, и что такие трудно-растворимые соли, как $\text{UF}_4(\text{H}_2\text{O})_n$ или $\text{U}(\text{C}_2\text{O}_4)_2(\text{H}_2\text{O})_3$, хорошо растворяются в растворах соответствующих солей триалкиламмония с образованием комплексов $(\text{R}_3\text{NH})_2\text{UF}_6$ и $(\text{R}_3\text{NH})_4\text{UC}_2\text{O}_4$, соответственно.

Сорбция и ионный обмен. На начальных этапах развития радиохимии в Радиовом институте большое внимание уделялось сорбционному поведению радиоэлементов, что было связано и с чисто практическими запросами. Незнание особенностей такого поведения нередко приводило к ошибкам в определении концентраций микрокомпонента и даже к его полной потере.

Первые систематические исследования сорбции следовых количеств радиоэлементов на разных материалах были выполнены И. Е. Стариком и его школой (Л. Д. Шейдина, Ф. Л. Гинзбург, И. А. Скульский, Н. И. Ампелогова, Б. С. Кузнецов, Л. Б. Колядин, Л. И. Ильменкова, А. В. Косицын, А. И. Юртов, Ю. В. Кузнецов, В. Н. Щebetковский, Н. Г. Розовская и др.). Начиная с 30-х годов И. Е. Старик развил адсорбцию как метод определения форм существования радиоизотопов в растворе (ионно-дисперсное, полимерное, коллоидное, псевдоколлоидное состояния). Изучая зависимость сорбции полония ($\sim 10^{-12}$ М) на стекле как функции рН раствора, он установил, что с ростом рН сорбция растет, проходит максимум при рН 5-6 и затем падает почти до нуля. Это падение было объяснено образованием несorбирующихся коллоидных частиц гидроокиси полония(IV). В дальнейшем, в комбинации с ультрафильтрацией, центрифугированием, электрофорезом и другими методами адсорбция была использована для изучения химического состояния большого числа радионуклидов, взятых в микроконцентрациях - актиния, протактиния, урана, плутония, америция и многих других.

Это направление сыграло и играет исключительно важную роль при анализе поведения радионуклидов в природных условиях и в окружающей среде под влиянием антропогенных факторов и в настоящее время развивается под общим руководством Ю. В. Кузнецова. Одна из проблем, которая решается в рамках направления, - закономерности миграции и накопления радионуклидов в окружающей среде. Задачи фундаментальной радиохимии здесь состоят в выяснении химических механизмов миграции или, наоборот, закрепления радионуклидов в грунтах и почвах, в создании моделей этого сложнейшего процесса. В указанном аспекте в 70-х годах рассматривались сорбционные свойства гумусовых веществ (В. Н. Щebetковский). В продолжение выполненных исследований сейчас изучаются сложные фазовые равновесия (раствор, гель-фазы, осадки) с участием гуминовой и фульвокислот, их солей с почвенными металлами (Al, Ca, Fe, Mn) и радионуклидов (Е. К. Легин, М. Л. Хохлов, Ю. И. Трифонов, В. К. Легин, А. П. Бочков) и, с другой стороны, сорбцион-

ные свойства различных минералов по отношению к радионуклидам (Ю. М. Рогозин, Р. В. Брызгалова).

С другой стороны, начиная с конца 40-х годов в Радиевом институте развивались работы по использованию неорганических сорбентов и сорбентов органической природы (ионообменные смолы, органические волокна, твэкс) для выделения из растворов отдельных радиоэлементов. Особенно широко для этой цели использовались ионообменные смолы.

Разработка химии ионного обмена в Радиевом институте связана с именами Б. П. Никольского, В. И. Парамоновой и их соратников (А. М. Трофимов, В. П. Попик, Е. Л. Мордберг, Н. Б. Высокоостровская, Е. И. Ильенко, Л. А. Кочеванова, Н. А. Абрамова, С. А. Бартенев, Л. Н. Степанова, Г. А. Акопов, В. Б. Колычев и др.). Б. П. Никольский записал уравнение ионного обмена, лежащее в основе любого ионообменного процесса, в которое входят заряды обменивающихся ионов. На этой основе А. М. Трофимов разработал метод определения заряда катиона микроэлемента, нашедший в дальнейшем широкое применение. В. И. Парамонова разработала метод кривых относительного поглощения металло-содержащих ионов катионитами и анионитами для определения состава и констант устойчивости комплексов в растворе, который использовался при изучении многих систем с радиоэлементами. Трудami большой группы сотрудников были выполнены исследования по определению состояния в растворе и условий избирательного поглощения различных радиоэлементов - урана, нептуния, плутония, нитрозорутения и др. - по хроматографическому разделению элементов, по кинетике сорбционных процессов, по радиационной устойчивости сорбентов. Полученные здесь результаты многие годы широко и успешно используются в радиохимическом производстве.

Широкие исследования были проведены по синтезу и изучению свойств неорганических сорбентов - цеолитов, амфиболов, металлоцианидов, фосфатов, антимонатов, гидроксидов - по отношению к урану, плутонию, осколочным элементам в зависимости от состава водной фазы, состава и структуры сорбентов и других факторов (В. И. Парамонова, Н. Б. Высокоостровская, В. К. Самров, А. И. Клемина, С. А. Стрелков, В. Н. Крылов, Н. Б. Чернявская, В. С. Дубровин и др.).

Окислительно-восстановительные реакции. Применительно к процессам выделения и разделения радионуклидов активно изучались редокс-реакции радиоэлементов. Еще в 40-х годах В. Г. Хлопин и А. М. Гуревич определили потенциал пары $U(IV)/U(VI)$ (+0,407 В). В дальнейшем большая группа исследователей (Б. П. Никольский, Д. М. Зив, А. Г. Самарцева, Г. С. Сеницына, Г. М. Суходолов, М. Л. Яценко, Л. И. Абрамова, Б. И. Шестаков, С. Л. Фаддеев, В. Г. Рогозовец, Н. С. Колесникова, В. С. Зив и др.) изучали электрохимическое поведение (потенциал выделения на электроде, окислительные потенциалы валентных переходов, стандартные окислительные потенциалы ионов и т. д.) большого числа радиоизотопов (U , Tu , Po , Sb , Bi , и др.) в различных средах с использованием различных материалов электродов. Работами А. А. Гринберга и сотрудников (Б. В. Птицын, Ф. М. Филинов, Д. Н. Быховский, Е. А. Шашуков, Г. И. Петржак, Л. Е. Никольская, В. Е. Вяткин и др.) в обиход радиохимиков был введен такой мощный окислитель как озон и такой эффективный восстановитель как ронгалит. Было обнаружено много интересных реакций и отмечены их особенности. Например, было найдено, что скорость окисления $Pu(IV)$ определяется скоростью его гидролиза, или что в 0,2 М HNO_3 $Ce(IV)$ может быть количественно восстановлен при озонировании. В работах Б. П. Никольского, М. В. Посвольского, Г. С. Маркова, И. И. Цирлина изучались индуцированные реакции, в которых эффективность процесса обеспечивалась участием посредника - индуктора, роль которого обычно играл ион металла переменной валентности.

Накопленный опыт был эффективно реализован при разработке процессов окислительного растворения прокаленной двуокиси плутония, а затем и металлического плутония, которая проводилась с 1967 г. Е. В. Комаровым, В. Г. Шумковым, Г. П. Никитиной, а затем в группе Г. П. Никитиной (Ю. Е. Иванов и др.). Этой работе в настоящем сборнике посвящена специальная статья.

Следует упомянуть также работы по окислению и восстановлению радиоиода для разработки форм его хранения. В гатчинском отделении института была разработана оригинальная методика окисления иода смесью азотной кислоты и перекиси водорода (Б. Я. Галкин, В. К. Исупов, П. Н. Москалев). Позже Е. К. Легин и М. Л. Хохлов (1986 г.), изучая термодинамику растворов элементарного иода в ТБФ, попутно нашли, что иод может быть количественно выделен из этих растворов в форме периодата при окислении перманганатом калия или в форме иодидов при восстановлении гидразином.

Комплексные соединения радиоэлементов, характеристики химических связей.

В 20-х - 30-х годах в Радиовом институте изучались химические свойства радона, солей радия (хлорида, сульфата, хромата), некоторых соединений полония и актиния. После 1943 г. интерес в изучении химии радиоэлементов быстро смещался к соединениям урана, тория, нептуния, плутония, других актинидов, а также ряда осколочных элементов, хотя не были забыты и первые из перечисленных элементов. Так, были определены некоторые ранее неизвестные физико-химические свойства хлорида и бромидра радия - магнитная восприимчивость, показатели преломления и плотность их растворов, вычислены ионная рефракция, электронная поляризуемость и диамагнитная восприимчивость иона радия (В. М. Вдовенко, Ю. И. Дубасов). Подробно изучено сорбционное поведение радия на смолах (Б. П. Никольский, Н. Б. Высокоостровская).

В 50-х - 60-х годах актуальной была задача определения состояния ионов радиоэлементов в растворах (закомплексованность, ядерность, устойчивость комплексов и т. д.). В Радиовом институте был разработан ряд оригинальных методов изучения комплексообразования в растворах. О методе определения заряда иона металла в растворе и сорбционном методе изучения комплексообразования уже говорилось выше. Упомянем также электромиграционный метод, разработанный А. В. Степановым (этим методом, в частности, было исследовано комплексообразование актиния с комплексонами). Ю. А. Барбанель разработал дифференциальный спектрофотометрический метод изучения комплексообразования в растворе. Проведенный им теоретический анализ состояния радиоэлементов как функции концентрации и свойств лигандов указал на многовариантность предельных форм, а предложенный метод "относительного выхода" позволял определять абсолютные значения стехиометрических коэффициентов комплекса $MnAm$. В. А. Щербаков, В. Б. Колокольцов, Г. А. Романов, О. Б. Стебунов исследовали возможности нового тогда метода ЯМР для изучения комплексообразования ионов металлов в растворах.

Систематическое изучение комплексообразования урана было начато А. А. Гринбергом и сотрудниками (Б. В. Птицын, Ф. М. Филинов, и др.) в 1943 г. с синтеза и определения состава оксалатных и смешанных оксалатно-нитратных, оксалатно-ацетатных и др. комплексов урана(IV) в индивидуальном состоянии и их состава в растворе. Позднее сходные исследования были выполнены для плутония (Д. Н. Быховский). Принципиальной явилась неудачная попытка синтеза карбонила урана. Это показало, что последний не является представителем 6-й группы элементов. С конца 40-х годов, в связи с разработкой и оптимизацией ацетатной осадительной схемы выделения плутония и, позднее, экстракционной схемы переработки облученных материалов проводилось интенсивное изучение комплексообразования урана, плутония и ряда осколочных элементов в водных растворах. В лабораториях Б. П. Никольского и В. И. Парамоновой было исследовано комплексообразование с ацетат-, карбонат- и гидроксид-ионами (Н. А. Николаева, Л. Н. Кочеванова и др.). Обстоятельно было изучено состояние нитрозорутения в растворе в области нитратного комплексообразования и гидролиза (Е. И. Ильенко). Группой А. П. Ратнера (А. М. Гуревич, Л. П. Положенская, Е. В. Комаров) было изучено комплексообразование уранила с пероксид-ионом, выделены индивидуальные комплексы, включая смешаннолигандные, и определены константы их образования в растворе. Позже в группе Б. П. Никольского изучался состав и растворимость анионных нитратных и галогенидных комплексов урана(IV) с катионом бензилхинолиния (М. В. Посвольский, Г. С. Марков).

Много внимания было уделено фторидному комплексообразованию. Из раствора были выделены новые соединения $UOF(OH)(H_2O)_{0.5}$ и $UOF_2(H_2O)$ (Г. А. Романов,

Л. В. Солнцева). Изопиестическим методом было установлено, что в системе $\text{UO}_2\text{F}_2\text{-H}_2\text{O}$ существует твердый раствор воды в решетке UO_2F_2 (до состава $\text{UO}_2\text{F}_2 \cdot 0.5\text{H}_2\text{O}$), $\text{UO}_2\text{F}_2(\text{H}_2\text{O})_{1.5}$ и $\text{UO}_2\text{F}_2(\text{H}_2\text{O})_2$ (В. А. Михалев, Д. Н. Суглобов). Были определены составы и константы устойчивости фторидных комплексов U, Np, Pu(IV) и (VI) (Е. В. Комаров). Получены комплексные кислоты $\text{H}_2[\text{Np}(\text{NO}_3)_6]$ и $\text{H}_2[\text{Pu}(\text{NO}_3)_6]$. Путем измерения магнитной восприимчивости ряда соединений Np(VI) и (VII) подтверждено существование семивалентного нептуния (А. А. Чайхорский).

В 60-х - 70-х годах группой В. М. Вдовенко (Д. Н. Суглобов, Л. Г. Маширов, В. А. Водоватов, И. Н. Ладыгин, Н. Г. Горшков) подробно изучались нитратные, перхлоратные, галогенидные и др. комплексы урана(VI) в индивидуальном состоянии и в органических растворах, в основном, спектроскопическими методами. Было показано, что значения частот валентных колебаний уранильной группы коррелируют со степенью координационного насыщения уранил-иона и, соответственно, основностью экваториальных лигандов. Ряд основности лигандов, построенный по этим данным, практически совпадает с рядом замещения Черняева-Щелокова и приведенным выше рядом прочности водородной связи. Он позволяет прогнозировать условия образования координационных полимеров в кристаллических решетках и в растворах. Далее были найдены количественные соотношения между силовой постоянной, длиной и энергией связи U-O и на основе предположения постоянства суммы кратностей связей, образуемых ураном (ковалентная модель), оценены кратности и абсолютные энергии связей урана с экваториальными лигандами. В наши дни этот подход нашел развитие в работах В. Н. Сережкина (Самарский университет) на базе новых рентгеноструктурных данных.

В дальнейшем (70-е годы) исследования были распространены на актинидные аналоги урана - нептуний, плутоний и америций (VI) и (V) - и на электронновозбужденные состояния ионов AnO_2^{n+} . Было показано, что в ряду U, Np, Pu, Am кратность связи в ионах AnO_2^{n+} немонотонно понижается, что ассоциируется с разрыхляющим влиянием неспаренных 5f-электронов и разной ориентацией разрыхляющих орбиталей относительно оси O-An-O. Из полученных данных, в частности, следовало, что атомы кислорода ионов AnO_2^+ должны обладать ярко выраженной электрондонорной и протонакцепторной функцией. Этот прогноз был подтвержден последующими рентгеноструктурными исследованиями группы Н. Н. Крота (ИФХ РАН).

Работами группы Ю. А. Барбанеля (В. В. Колин, В. П. Котлин, Р. Б. Душин и др.) было установлено, что параметры выбранных спектров f-электронов могут быть эффективно использованы для характеристики состояния ионов актинидов и лантанидов в конденсированных фазах. В частности, нефелоксетический сдвиг полос показывает, что при переходе тригалогенидов f-элементов из кристаллического состояния в расплав межионные расстояния сокращаются, и ион металла меняет свое координационное число с 9 до 6. Координационное число 6 характерно и для расплавов галогенидов M(III) в солях щелочных металлов. К важным достижениям группы относится также создание эффективного метода расчета параметров кристаллического поля ионов f-элементов, измерение и отнесение тонкой структуры спектров поглощения и люминесценции f-электронов (Р. Б. Душин, Г. П. Чудновская).

Достойны упоминания работы по лигандному и электронному обмену в растворах комплексов урана. Первые из них, выполненные А. А. Гринбергом и сотрудниками в 50-х годах, показали, что в водных растворах оксалатных комплексов U(IV) и U(VI) идет очень быстрый лигандный обмен, несмотря на высокую прочность комплексов. Быстро протекает и электронный обмен между U(IV) и U(VI) через промежуточное состояние U(V). Тридцать лет спустя был выполнен цикл работ (Д. Н. Суглобов, Л. Г. Маширов, С. А. Газиев) по кинетике кислородного обмена в ураниле с водой. Этот обмен быстро протекает в нейтральной среде через гидролизные формы. В кислой среде он не идет, однако может быть инициирован светом или восстановителями за счет образования UO_2^+ . В этом случае обмен протекает по цепному механизму и оба атома кислорода уранильной группы обмениваются одновременно.

В группе А. В. Балужева (В. С. Митяхина, А. А. Евдокимов и др.) разработаны оригинальные методы твердофазного синтеза комплексов f-элементов с участием соли легколетучей или легкоразлагающейся кислоты. Эти методы характеризуются более низкими температурами процесса, чем при синтезе из соответствующих оксидов.

Говоря об изучении химии радиоэлементов в Радиевом институте, нельзя не упомянуть классические работы группы Ю. М. Толмачева (Н. И. Блинова, Т. А. Ильинская, В. И. Беляев, Г. В. Калинин, В. М. Солнцев, В. Н. Ушатский, Э. А. Москалькова и др.) в области химии оксидов актинидов, которые проводились с 1960 г. Эти исследования показали, что при неполном растворении U_3O_8 в разбавленных кислотах в осадке остается оксид урана(V), который ранее не был выделен в чистом виде. Он получается также при мягком восстановлении закиси-оксида урана ураном(IV) или гидросульфитом. Было также показано, что моногидрат и дигидрат трехоксида урана на самом деле являются гидроокисью уранила и гидратом гидроокиси уранила, соответственно. Очень обстоятельно была изучена химия оксидов нептуния и построена термодинамическая теория устойчивости оксидов актинидов в различных состояниях окисления.

Металлорганические соединения. Это направление работ в Радиевом институте берет начало с работ группы П. Н. Москалева (работа начиналась в ЛИЯФ в 60-х годах), в которой были впервые синтезированы дифталоцианины лантанидов и актинидов(III) а также Am(IV). Было найдено, что эти соединения обладают рядом необычных свойств - летучестью, термо- и электрохромизмом, высокой термостабильностью. В группе Д. Н. Суглобова (1980 г.) прямым синтезом высокодисперсного металлического урана с циклооктатетраеном был синтезирован другой тип сэндвичевых комплексов - дициклооктатетраенил урана(IV) и изучены его свойства (это направление позже развивалось в ИОНХ РАН Н. Т. Кузнецовым и В. Г. Севастьяновым).

Другое направление такого рода - изучение летучих металлокомплексов актинидных и редкоземельных элементов. Оно начиналось работами по изучению газотранспортных реакций галогенидных комплексов актинидов в группе Г. С. Сеницыной с 70-х годов (Б. И. Шестаков и др.), затем перешло на металлохелаты, изучавшиеся сначала в гатчинском отделении института (Е. В. Рубцов, В. Я. Мишин), а затем с 80-х годов в группе Д. Н. Суглобова (Е. К. Легин, Г. В. Сидоренко, Н. Р. Гребенщиков, Н. И. Горшков). За несколько лет работы была весьма обстоятельно разработана химия β -дикетонатов актинидов(III), (IV) и (VI) и лантанидов (III), их аддуктов с нейтральными и заряженными лигандами, а также некоторых других хелатов, охарактеризованы основные структурно-химические факторы, определяющие летучесть и термостабильность этих хелатов, синтезированы соединения, обладающие рекордными летучестью и термостабильностью, найдены такие хелаты, термолит паров которых дает металлосодержащие неорганические пленки, состоящие из чистых фаз (оксидов, фосфатов, фторидов, оксифторидов, оксисульфидов). Характерной структурной особенностью десольватированных β -дикетонатов уранила является вовлечение в координационную связь атома кислорода соседней уранильной группы с соответствующим образованием координационных олигомеров $[UO_2A_2]_n$.

В связи с задачей получения пленок металлического технеция путем термолит его летучих комплексов были разработаны оригинальные методы синтеза пентакарбонилгалогенидов технеция(I), подробно изучена координационная химия карбонильных комплексов этого элемента, установлены закономерности замещения лигандов и структура наиболее типичных соединений, определены пути термолит их паров (Д. Н. Суглобов, Г. В. Сидоренко, Е. К. Легин, А. Е. Мирославов, 80-е - 90-е годы). Для изучения возможности использования данного класса соединений технеция в ядерной медицине в настоящее время синтезируются и исследуются водорастворимые формы карбонильных комплексов технеция.

Поиск сверхтяжелых элементов (СТЭ) в природных объектах. В конце 60-х годов, после того, как физиками-теоретиками было высказано предположение о возможности существования "острова стабильности" элементов в районе элементов с $Z=108-118$, в различных странах мира начались работы по поиску СТЭ в природных объектах.

Такие работы начались и в нашей стране в рамках научных исследований АН СССР. Общее руководство ими возглавил академик Г. Н. Флеров.

Радиевый институт по инициативе В. М. Вдовенко принял активное участие в исследованиях по поиску СТЭ. Эти работы с перерывами продолжались с 1969 по 1986 г. Всего было проведено более 10 экспедиций, большая часть из которых проводилась совместно с ЛЯР ОИЯИ.

В 1969 и 1971 гг. были организованы две экспедиции в Приэльбрусье (научный руководитель В. М. Вдовенко, руководители работ Ю. В. Кузнецов, А. С. Кривохатский, О. С. Цветков). Работы проводились на высокогорных ледниках Терскол и Гарабаши. Высокогорные ледники являются огромными аккумуляторами космической пыли и космогенных изотопов. Талые ледниковые воды имеют ультрамалую минерализацию (0,1-1,0 мг/л) и незначительное содержание взвешенных частиц, что облегчает возможность переработки больших объемов ледниковых вод с целью извлечения и концентрирования тяжелых космогенных элементов. В ходе этих экспедиций было переработано около 5000 т талой воды. С использованием методов сорбции, коагуляции и соосаждения с гидроксидами железа и никеля получены три пробы концентратов из 440 т ледниковой воды (коэффициент концентрирования ~1010). Были отработаны условия выделения из концентратов свинца, таллия и висмута как возможных аналогов СТЭ.

Одним из перспективных объектов для поиска сверхтяжелых элементов считаются геотермальные воды в районах разломов земной коры. Такими, в частности, являются районы Прикаспия, Прибайкалья, озера Иссык-Куль и некоторые другие районы.

В начале 70-х годов с целью поиска СТЭ была проведена экспедиция в район залива Кара-Богаз-Гол (Д. С. Николаев). Позднее совместно с сотрудниками ЛЯР ОИЯИ в работах по поиску СТЭ в термальных водах полуострова Челекен, районах Прибайкалья и озера Иссык-Куль принимали участие сотрудники Радиевого института (Г. П. Акулов, С. А. Бартев, А. М. Клемина, Н. Г. Фирсин и др.). Научными руководителями от Радиевого института были В. И. Парамонова и Б. П. Никольский.

Выделение и концентрирование легких аналогов СТЭ из гидротерм и поиск СТЭ в термальных водах велись сорбционными методами с использованием большого набора сорбентов. Несмотря на высокое содержание солей в гидротермах Челекена (до 250 г/л), удалось достичь концентрирования легких аналогов СТЭ (Zn, Cd, Pb, Au, Bi, Te) до 104 при их содержании в исходном растворе ~1 мг/л. Были переработаны десятки м³ рассола различных скважин.

Кроме задачи выделения и концентрирования элементов при поиске СТЭ существует задача их обнаружения. Методы обнаружения СТЭ могут быть основаны либо на измерении α -распада нуклидов, либо на регистрации нейтронов спонтанного деления. Специально для этих целей в Радиевом институте были разработаны счетчики α -частиц (М. И. Якунин) и метод нейтрон-нейтронных совпадений (О. С. Цветков, Н. Г. Триумфов). Измерения образцов с целью обнаружения в них СТЭ проводились в низкофоновой лаборатории Радиевого института, расположенной в метро.

Хотя до настоящего времени не удалось с уверенностью обнаружить нуклиды, которые относятся к области СТЭ, в Радиевом институте в результате проведенных работ были созданы методы химического выделения и концентрирования легких аналогов СТЭ из природных вод, необходимые при поиске СТЭ, и разработаны некоторые физические методы регистрации СТЭ, позволяющие их обнаружить.

В заключение следует сказать, что в наши дни исследования по фундаментальной радиохимии развиваются в следующих направлениях: химия новых экстракционных систем, химия процессов радиолитической экстракционной системы с ТБФ, моделирование миграционных процессов с участием радиоэлементов в почвенном поглощающем комплексе, химия твердофазных реакций радиоэлементов, химия карбонильных комплексов технеция, химия летучих

комплексов f-элементов и спектроскопия высокого разрешения комплексных соединений f-элементов.

Л и т е р а т у р а

1. Старик И. Е. Основы радиохимии, 2-е изд. Л. : Наука, 1969.
2. Вдовенко В. М. Современная радиохимия, М. : Атомиздат, 1969.
3. Радиевый институт имени В. Г. Хлопина. К 50-летию со дня основания. / Под общ. ред. акад. Б. П. Никольского. Л. : Наука, 1972.

ПРЕМИИ СОТРУДНИКОВ РАДИЕВОГО ИНСТИТУТА ПО ФУНДАМЕНТАЛЬНОЙ РАДИОХИМИИ

Хлопинская премия АН СССР (РФ) по радиохимии (присуждается один раз в 3 года)

1. И. Е. Старик. За монографию "Основы радиохимии, 1959.
2. В. И. Гребенщикова, Э. М. Иоффе, В. Р. Клокман, М. С. Меркулова. За цикл работ по сокристаллизации радиоэлементов, 1962.
3. В. М. Вдовенко. За монографию "Современная радиохимия", 1971.
4. Б. П. Никольский. За цикл работ по радиохимии, 1980.
5. Д. Н. Суглобов, Г. В. Сидоренко, Е. К. Легин. За цикл работ "Летучие комплексы f-элементов (уран, нептуний, плутоний, лантаниды) и технеция", 1995.

Государственная премия СССР (РФ)

1. Д. Н. Суглобов (в составе коллектива авторов). За цикл работ "Соединения металлов в ранее неизвестных состояниях окисления, исследование их свойств и применение", 1986.

ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Е. Б. Андерсон, В. Г. Савоненков

Великий геохимик и гражданин В. И. Вернадский глубоко чтит нашу планету, превратившую простейшие живые организмы в мыслящее существо - человека. Быстро и глобально распространившись по поверхности земли, человечество превратило ее в среду обитания. Последующий научно-технический прогресс вооружил человека такими средствами, которые по своим разрушительным последствиям стали сопоставимы с восстановительными возможностями природы и даже превалируют над ними. Для того чтобы сохранить свой дом, человек разумный должен с предельной глубиной изучить наиболее критичные проблемы, определяющие стабильность среды обитания, научиться ограничивать свои неумные стремления.

Ряд таких критичных проблем изучается геохимией - наукой, созданной в нашей стране академиком В. И. Вернадским, организатором и руководителем Радиевого института. Геохимики института много лет изучали процессы экстремального воздействия на литосферу и биосферу. В первую очередь, это относится к проведению ядерных взрывов, проблеме захоронения радиоактивных отходов в геологические формации и ликвидации последствий тяжелой радиационной аварии на IV блоке Чернобыльской АЭС.

Геохимия - наука комплексная, объединяющая ученых как геологического, так и химического профиля. Радиогеохимия подключает к решению проблем специалистов физических наук, в частности ядерной физики. Радиевый институт был организован как специальный центр комплексных исследований, дающих наиболее эффективный научный выход. Выделить из обширного пласта научных работ Радиевого института чисто геохимическое, или, вернее, радиогеохимическое направление и перечислить всех сотрудников, участвовавших в этих работах, весьма сложно. Тем не менее, авторы для этого приложили все свои усилия.

Содержание и уровень развития любого научного направления может существенным образом измениться за одно-два десятилетия человеческой истории. Это в полной мере относится к геохимии как к науке в целом, так и конкретно к научному направлению исследований в Радиевом институте. Рассматриваемый нами временной интервал составляет более 25 лет. В 1972 г. к 50-летию со дня основания института вышла книга - прекрасно изложенная монография, в которой подробно и широко представлены геохимические исследования ученых Радиевого института и, в том числе основателей современной геохимии - В. И. Вернадского, В. Г. Хлопина, А. Е. Ферсмана, Д. И. Щербакова, И. Е. Старика, Л. В. Комлева [1].

Естественно, что за прошедшее время геохимическая тематика института не только трансформировалась, но и плодотворно развивалась. В 70-80-х годах были продолжены традиционные исследования в области геохимии радиоактивных элементов и ядерной геохронологии. Кроме того, появились новые направления радиогеохимического профиля, имеющие как общенаучное, так и прикладное значение. Весьма существенно, что публикации многих работ стали возможны лишь в последнее время.

Среди геохимических исследований Радиевого института за последние 30 лет можно выделить следующие основные направления:

- 1) геохимия радиоактивных элементов и ядерная (изотопная) геохронология;
- 2) геохимия и геотехнология подземных ядерных взрывов;
- 3) геохимические проблемы захоронения радиоактивных отходов в геологические формации;
- 4) радиогеохимические исследования при ликвидации аварии на Чернобыльской АЭС.

Геохимия радиоактивных элементов и ядерная геохронология

Проблема сырьевых источников радия, стоявшая перед институтом в 20-х годах, в 1940 г. перешла в проблему сырьевых источников урана. План созданной Комиссии, возглавляемой В. Г. Хлопиным, включал на 1941 г. "поиски богатых источников урановых руд в СССР" [2]. С этого времени начинаются региональные поисково-исследовательские работы по выявлению ураноносных формаций, рудных провинций и месторождений урана. Для рентабельности и эффективности проведения поиска и разведки ранее редко используемых урановых руд потребовалась фундаментальная теоретическая база. Поставленные вопросы нашли самую благоприятную почву для своего разрешения в стенах Радиевого института, где начало новой науки - радиогеологии было ознаменовано еще в 1935 г. выходом книги В. И. Вернадского. Уже тогда в институте проводились работы по изучению радиоактивности горных пород, нацеленные на создание "радиоактивной карты" поверхности нашей планеты. Проведенные комплексные радиохимические и геохимические исследования позволили вскрыть закономерности распределения радиоактивных элементов в земной коре и отдельных тектоно-магматических комплексах, получить средние кларковые значения для урана и тория, оценить перспективы рудоносности отдельных районов и прогнозировать поиски месторождений радиоактивного сырья. До настоящего времени сохраняют свою научную ценность результаты многолетних исследований Л. В. Комлева, связанные с выявлением закономерностей распределения урана и тория в гранитоидных породах. Л. В. Комлев начал чтение первого курса по геохимии радиоактивных элементов на тогда еще "закрытой" (1950 г.) спецкафедре геологического факультета Ленинградского государственного университета, позднее - кафедре поисков и разведки редких и радиоактивных элементов. Было положено начало формированию кадров квалифицированных специалистов в области радиогеохимии. Выпускники кафедры составили основной контингент отдела специсследований крупнейшего геологического учреждения страны - Всесоюзного геологического института (ВСЕГЕИ) в Ленинграде.

Школа Радиевого института легла в основу изучения проблемы миграции радиоактивных элементов, исследованию которой посвятили свои работы И. Е. Старик, В. И. Баранов, Л. В. Комлев и их ученики. Это направление в настоящее время является ключевым при оценке безопасности захоронения радиоактивных отходов в геологические формации.

С предельной остротой вопрос о сырьевой базе урана встал в послевоенный период. Начиная с 1943 г., реализуется предложение В. И. Вернадского и В. Г. Хлопина о накоплении запасов урана на Табашарском руднике в Таджикистане. В конце 1944 г. принято правительственное решение о создании в Средней Азии (в северо-западной части Таджикистана) крупного уранодобывающего предприятия на базе месторождений Таджикистана, Киргизии и Узбекистана. В 1946-1947 гг. в древних железорудных формациях Украинского кристаллического щита открыты месторождения урана - Первомайское и Желтореченское. На Северном Кавказе, вблизи г. Пятигорска, обнаружено урановое месторождение гор-лакколитов Бештау и Бык. В 60-е годы определились несколько крупных урановых рудных районов: Кировоградский на Украине, Северо-Казахстанский и Мангышлакский в Казахстане, Кызыл-Кумский в Узбекистане, Стрельцовский в Забайкалье [3].

Соответственно, в 50-70-е годы интенсивно развернулась экспедиционная деятельность Радиевого института. В сферу исследований геохимиков вошли практически все перечисленные ураноносные районы. Экспедиционные работы продолжались до полугода. На Украине они начинались после подсыхания грунтовых дорог в апреле, в Северном Казахстане заканчивались после первых снегопадов в октябре. Пробег экспедиционных автомашин за полевой сезон мог составлять до 15 000 км. Разнообразие геохимических исследований не ограничивалось множеством географических регионов страны. Ураноносные провинции исследовались на различных стадиях освоения.

Изучение геохимических особенностей и изотопной геохронологии гранитов Побужья на Украине позволило Л. В. Комлеву сделать заключение о "потенциальной металло-

ности" этих пород. Региональные процессы метаморфизма гранитоидов создают условия для мобилизации подвижных форм урана, его миграции и формирования месторождений. Как известно, именно здесь была обнаружена урановая минерализация промышленных масштабов.

Иные задачи решались при исследовании разведочных и эксплуатируемых шахт Северного Казахстана и Средней Азии. Здесь изучалась возможность расширения перспективных площадей с использованием для этого геохимических методов. Возможность отбора многочисленных проб урановых руд и минералов из различных месторождений давала реальную возможность исследований по выделению во времени основных эпох уранового оруженения на фоне сложной истории формирования земной коры и ее отдельных регионов.

Исследования отдельных месторождений, начатые в лаборатории Л. В. Комлева (С. И. Данилевич, К. С. Иванова, А. Н. Комаров, В. Г. Савоненков, М. С. Филиппов), были успешно продолжены в 70-80-е годы Е. Б. Андерсоном, который существенно расширил географию урановорудных провинций, включив в нее, наряду с месторождениями Советского Союза, месторождения сопредельных европейских стран. При этом существенным образом были усовершенствованы аналитические методы изотопной геохимии, в частности методы анализа микроколичеств минералов и их изотопного состава. Результаты исследований по геохимии и изотопной геохронологии крупнейших урановых провинций и эпох обобщены Е. Б. Андерсоном в докторской диссертации и являются основой для разработки фундаментальных вопросов теории рудообразования, используются в практической деятельности производственных геологических организаций.

В настоящее время на территории Российской Федерации полностью прекращено использование природного урана для ядерного оружия. Однако для обеспечения топливом АЭС рентабельных месторождений урана в России недостаточно, и поисково-разведочные работы вскоре станут насущной необходимостью ядерной энергетики [3].

Геохимия и металлогения урана и других радиоактивных элементов тесно связаны с исследованиями в области ядерной геохронологии - изотопного датирования или геохронометрии. В 50-60-е годы работы в области геохронологии геологических формаций составляли преобладающую, если не основную часть исследований Геохимического отдела Радиевого института.

Общепризнано, что наш институт на протяжении долгого ряда лет являлся базовым, ведущим и наиболее авторитетным центром Советского Союза по данной проблеме. В стенах Радиевого института были разработаны методики ядерной геохронологии, проведена сложная организационная работа по созданию территориальных геохронологических лабораторий в стране, организована и успешно действовала под руководством И. Е. Старика Комиссия по определению абсолютного возраста геологических формаций. Специалисты института представили громадный объем фактических данных для различных минералов, различных пород и регионов нашей планеты. Проводились совместные работы с учеными Китая, Чехословакии, Болгарии, ГДР, Венгрии. Результаты проведенных многочисленных разноплановых исследований регулярно печатались в Трудах Комиссии, периодических отечественных и зарубежных журналах, материалах Международного геологического конгресса и т. д. В 1960 г. опубликована первая советская геохронологическая шкала. В 1962 г. выходит сразу же ставшая классической монография И. Е. Старика "Ядерная геохронология".

Работы, выполненные сотрудниками Радиевого института в области ядерной геохронологии, чрезвычайно разнообразны и объемны. Только одно перечисление публикаций представляет длительный экскурс в историю всего научного коллектива с весьма сложными и интересными коллизиями, поисками, заблуждениями, преодолениями трудностей и заработанными тяжким трудом победами. Совершенно необходимо выделить исключительный энтузиазм, работоспособность, истинный научный талант и полную самоотдачу основоположников - корифеев ядерной геохронологии: В. И. Вернадского, В. Г. Хлопина, И. Е. Старика, Л. В. Комлева, Э. К. Герлинга. Кроме громадного личного вклада в отечественную и мировую науку эти ученые создали школу, воспитали целое поколение сначала аспирантов и молодых специалистов, а потом крупных геохимиков - питомцев Радиевого института, док-

торов и кандидатов наук: Г. В. Авдзейко, В. М. Александрюка, С. М. Гращенко, С. И. Данилевича, К. С. Иванову, А. Я. Крылова, Ю. В. Кузнецова, Е. П. Петряева, В. Г. Савоненкова, Э. В. Соботовича, М. С. Филиппова и др.

Известно, что в человеке живет ученый, пока он не перестает удивляться. Поколение 60-х годов щедро насытило "рынок" научных знаний не только результатами своих трудов, но и оставило удивительные вопросы, поставленные природой. Например, изотопная геохронология подтвердила наличие в истории Земли металлогенических эпох, во время которых формировались различные рудные месторождения. Какой механизм регулировал подачу сырья и цикличность эпох рудообразования?

В Радиевом институте были впервые вскрыты процессы "омоложения" древних формаций Украинского кристаллического щита. В гранитоидах и мигматитах одновременно существовали разновозрастные минералы: монацит, образовавшийся 1,9-2,1 млрд. лет назад, и биотит, с возрастом 1,50-1,75 млрд. лет. Что было в основе грандиозных превращений, охватывающих значительные участки земной коры в докембрийское время, избирательно метаморфизуя горные породы?

Нет минерала более благодатного для исследователя геохронологии минерала, внесшего заметный вклад в построение геохронологической шкалы, чем ортофосфат редких земель - монацит. Для получения 1 г этого акцессорного минерала приходилось вручную промывать до тонны измельченных пород. Но затраты полностью оправдывались! Кристаллическая структура монацита "ухитрялась" полностью сохранять радиоактивные ряды урана и тория в течение более 2-х млрд. лет. Полная изоляция радионуклидов наблюдалась в минералах из россыпей и зоны выветривания, даже когда содержащие монацит граниты превращались в каолиновые глины - конечный продукт поверхностной трансформации. Что способствует столь длительному удержанию совершенно различных по свойствам радионуклидов в кристаллической матрице ортофосфата? Как использовать эти свойства для создания матриц при захоронении радиоактивных отходов?

Вопросы можно продолжить, но для их решения, по-видимому, необходимы иные условия состояния науки, чем существующие в наше время. Рассмотрение проблемы ядерной геохронологии нам бы хотелось завершить в более жизнеутверждающем тоне - цитатой великого оптимиста в науке и в жизни профессора Л. В. Комлева из его доклада на торжественном заседании, посвященном 75-летию академика В. Г. Хлопина: "Ядерная геохронология - это сложнейшая область проникновения методов и идей ядерной физики, радиохимии, кристаллохимии, физики твердого тела в наиболее сложные проблемы геологии, планетологии и космохимии. Впервые человечество получило в руки метод для уверенной оценки длительности геологических процессов планетарных масштабов. Координаты времени надежно подчинились человеку, по крайней мере в пределах $(5-5,5) \cdot 10^9$ лет".

Подземные ядерные взрывы

В Радиевом институте авторами и активными инициаторами постановки геохимических исследований подземных ядерных взрывов были его директор В. М. Вдовенко и А. С. Кривохатский. Необходимость проведения таких работ определялась тем, что все факторы взрыва воздействовали и существенным образом изменяли природные геологические объекты - горные породы. Кроме того, в измененных взрывом породах - твердых новообразованиях распределялись и стабилизировались в различных формах радионуклиды: продукты деления, остатки делящегося вещества, изотопы с наведенной активностью. Открывалось широкое поле деятельности для изучения искусственных радиоэлементов в природных условиях - научного направления, выделенного В. Г. Хлопиным еще в 1938 г. По-видимому, первая радиогеохимическая публикация, посвященная исследованиям продуктов взрыва, была напечатана в журнале "Радиохимия" в 1968 г. и называлась "Об искусственных аналогах тектитов" (В. М. Вдовенко, А. С. Кривохатский, В. Г. Савоненков и А. Н. Комаров). В статье описаны минерало-структурные особенности, физико-химические свойства оплавленных минеральных фрагментов и стеклянных капель - гранул, образовавшихся при наземных

ядерных взрывах. Для автордиографии использовались ядерные фотоэмульсии, разработанные в лаборатории А. П. Жданова.

Летом 1964 г. впервые было произведено вскрытие центральной зоны подземного ядерного взрыва, проведенного в гранитах Дегеленского массива на Семипалатинском полигоне. Проходка горных выработок сопровождалась геологическим документированием, отбором проб и изучением распределения уровней радиоактивности, то есть исследованиями, проводимыми обычно при разведке радиоактивных рудопоявлений. Результаты работ были достаточно впечатляющими: удалось выделить и охарактеризовать последовательность структурно-геохимических зон взрыва; определить роль первичной трещиноватости пород в распределении взрывного расплава; изучить и классифицировать твердые радиоактивные продукты (стекломассы, шлаки, стеклобрекчии и пр.); установить фракционирование макро- и микрокомпонентов. Успеху проведенных исследований способствовал комплексный подход к сложному, ранее неизвестному объекту, привлечение к работам специалистов различных научных направлений - физиков, радиохимиков, геохимиков (В. А. Блинов, Ю. В. Дубасов, И. Н. Максимов, В. Г. Савоненков, В. Н. Ушатский и др.). Организаторами и руководителями исследований были В. М. Вдовенко и А. С. Кривохатский. Радиогеохимические исследования на Семипалатинском полигоне были продолжены в дальнейшем при вскрытии центральных зон и полостей взрывов, а также после проведения взрывов на выброс.

В 1969 г. в Советском Союзе была опубликована программа мирного научно-технического использования ядерных взрывов. Ее основные направления включали строительство, геотехнологию, энергетику, производство материалов и научные исследования. Существовала серьезная проблема - противоречие между гигантскими возможностями ядерного взрыва и неумением управлять его полезными и вредными эффектами для безопасного и экономически выгодного применения в народном хозяйстве. Началось проведение ядерных взрывов различного целевого назначения в различных горных породах: песчаниках, глинах, сланцах, каменной соли, известняках. Естественно, что геохимические исследования проводились при вскрытии зоны взрыва, проходке горных выработок, разрубании скважин и отборе проб. Пробоотбор упрощался для взрывов наружного действия, при которых образовывалась воронка, и твердые радиоактивные продукты можно было собирать на поверхности: дне, склонах и бруствере воронки.

Для исследований этого периода весьма характерным и постоянным определением было слово "впервые", поскольку ранее, не имея ядерных зарядов, ученые еще не воздействовали так интенсивно и масштабно на литосферное пространство. Впервые после взрывов, подземного в глинах и на выброс в осадочной толще, были обнаружены стеклянные гранулы, ранее наблюдавшиеся как характерные продукты наземных взрывов. Известно, что формирование гранул происходит с участием конденсирующейся фазы испаренных взрывом алюмо-силикатных пород. В своем составе они заметно концентрируют радиоактивные продукты деления - изотопы тугоплавких элементов и делящееся вещество. Образование же при взрыве в известняках своеобразного "карбонатного расплава" вызвало удивление самих исследователей: ранее известный своими миграционными способностями в этих же породах рутений вел себя как типичный тугоплавкий металл (В. М. Гаврилов, В. Г. Савоненков). Таких "впервые" можно перечислить множество.

Особое место в работах Радиевого института занимают исследования при проведении подземных ядерных взрывов в каменной соли. Особое по широте охвата проблемы, глубокой детализации отдельных разработок, длительности проведения натурных (экспедиционных) и лабораторных исследований, по количеству привлеченных специалистов. Руководил этим сложным научно-техническим "агрегатом" и приводил его в действие А. С. Кривохатский, на всех направлениях, на всех уровнях, на всех взрывах.

Первоначальная, чисто прикладная цель ядерных взрывов в каменной соли - создание устойчивых, свободных от обрушившейся породы герметичных резервуаров, в первую очередь, для нужд нефтегазовой отрасли. Как известно, стальные резервуары не выдерживают конкуренции по сравнению с подземными полостями по целому ряду причин.

Для проведения первых экспериментальных взрывов был выбран (А. С. Кривохатский, Д. С. Николаев) Большой Азгир - крупная солянокупольная структура в Западном Казахстане в 75 км восточнее станции "Харабалинская". Два соляных купола перекрыты здесь осадочными породами мощностью 200-300 м, а небольшой солевой шток даже выходит на поверхность земли.

Проведение взрывов в каменной соли решало и чрезвычайно сложную научную проблему - изучение возможности получения изотопов трансурановых элементов. Предпосылки для ее проведения были. Ранее известные эйнштейний и фермий были в 1952 г. обнаружены в продуктах термоядерного американского взрыва "Майк". Легкая растворимость солей упрощала добычу и переработку исходного сырья. Всей научной программой руководил академик Ю. Б. Харитон. К работам были привлечены, кроме Радиевого института, несколько крупных ведущих организаций страны, в том числе ВНИЭФ (Арзамас-16), Всесоюзный институт промышленной технологии (ВНИПИПТ), специализированные буровые и технологические организации. Полевые работы проводились на базе специально созданной "Южной сейсмической экспедиции". Сотрудники Радиевого института участвовали и выполняли многие этапы экспедиционных работ: предварительное изучение пород и участка будущего взрыва, радиационный контроль на всех этапах и операциях, пробоотбор, аналитические, химические и радиометрические работы, строительство лабораторий, экспериментальных технологических установок и их эксплуатацию, экологические исследования и пр. Фантастическая энергия и энтузиазм А. С. Кривохатского, постоянного и заслуженного "экспедиционера", с взрывной силой воздействовала на сотрудников, сменивших институтские лаборатории на неустроенность и трудности круглогодичных работ в пустынно-степном районе. В их число входили многие ведущие специалисты института: Б. М. Александров, Е. И. Бирюков, Ю. В. Дубасов, В. И. Кацапов, И. Н. Максимов, Д. С. Николаев, Ю. Г. Петров, Э. М. Пазухин, В. Г. Потапов, Ю. М. Рогозин, Ю. И. Родионов, В. Г. Савоненков, Е. А. Смирнова, В. А. Смирнов, В. А. Соколов, И. А. Соколов, Г. В. Яковлева и многие другие.

Азгир был не просто местом работы сотрудников Радиевого института. Азгир - это история борьбы за новые знания, это пылевые бури и бездорожья в Рын-песках, периодические землетрясения в несейсмичном районе, работы за пределами дозиметрических и физических возможностей, победы и поражения, отупляющая жара и поэзия весенних тюльпанных степей:

Стоит над Азгиром Капелла,
Купается в звездной купели.
Но кто Капелле скажет,
Зачем под Азгиром скважины
Землю пробили сталью
Сотней соленых сажен...

В начале 90-х годов работы в Азгире еще продолжались. К сожалению, созданные взрывом подземные полости оказались невостребованными. Большие надежды сменились большими разочарованиями. Азгирская "Илиада" достойна, но все еще ждет своего героического описания, чтобы по праву войти в историю Радиевого института.

С геохимических позиций проблема взрывной наработки тяжелых изотопов была конкретизирована задачей создания искусственного месторождения, в котором целевой радионуклид находится в компактном объеме новообразованных продуктов, может быть извлечен на поверхность и обогащен. Но для этого было необходимо научиться управлять распределением и формами стабилизации отдельных радионуклидов при взрыве.

До проведения первого экспериментального взрыва в солях сравнительно простыми лабораторными опытами было показано, что примесные силикатные и карбонатные минералы солей при высоких температурах могут образовать шлаки, состоящие из новых минералов группы пироксенов и оливинов. Эти шлаки могут сконцентрировать в своем составе такие радионуклиды как плутоний и америций (К. С. Иванова, А. С. Кривохатский,

В. Г. Савоненков). Такое предположение подтвердил первый взрыв. Плутоний и радионуклиды (изотопы тугоплавких элементов) сконцентрировались в железисто-силикатных гранулах и шлаках, образовавших компактную линзу на дне полости под основной массой переплавленной соли.

Первый взрыв в каменной соли, проведенный на небольшой глубине (161 м) на участке выхода солевых пород на поверхность земли, был изучен наиболее подробно. Надполостная и центральная зона взрыва разбурена несколькими скважинами с полным отбором керна. Три вертикальные скважины и одна наклонно-горизонтальная вошли в полость взрыва и обеспечили представительный отбор проб. Позднее в полости была смонтирована эрлифтная установка для извлечения радиоактивного материала, по проектам и силами сотрудников института сооружены опытные установки для обогащения и выделения шлака, химического выделения из него модельного целевого изотопа - плутония. Решался комплекс задач, определяющих возможность добычи и обогащения техногенных руд искусственного месторождения.

После проведения второго взрыва (А-II) отобрать пробы из полости оказалось весьма сложно. Взрыв был произведен на глубине 600 м, достаточно мощный заряд образовал обширную полость со свободным пролетом (высотой полости по вертикали) более 50 м. Ранее известными техническими средствами осуществить представительный пробоотбор дна полости не удалось. Отбор проб из полостей взрывов А-III и А-IV производили специально сделанными буровыми устройствами.

Изучение продуктов взрывов А-II и А-III показало, что в случаях отсутствия или крайне низкого содержания в солях примесных силикатно-железистых минералов шлаковая линза не образуется. Следовательно, вблизи заряда необходимо разместить соответствующие добавки - макронесители целевых радионуклидов. Такой вариант осуществлен при взрыве А-IV. Под застывшим солевым расплавом в донной части полости взрыва была обнаружена узкая высокорadioактивная линза пород и шлаков, содержащих новые, ранее в каменной соли не присутствующие, высокотемпературные минералы. Полученная информация о физико-химических и минералого-петрологических процессах в экстремальных условиях служила обоснованием для создания новых ядерно-взрывных технологий.

Взрывы в каменной соли дали обширную и крайне интересную геохимическую информацию, определившую основные закономерности процессов ударно-термального метаморфизма галитовых пород. К наиболее важным результатам следует отнести следующие:

- выделены структурно-геохимические зоны, закономерно располагающиеся вокруг, вблизи полости, различающиеся по структурно-минералогическим особенностям и присутствию характерных радионуклидов;
- при взрывах в солях образуется несколько групп минералов: унаследованных и новообразованных. К последним относятся простые и сложные окислы, ортосиликаты, диортосиликаты, сульфиды. Порядок выделения новых минералов согласуется с процессом кристаллизации природных силикатных расплавов;
- минералообразование при взрыве проходит через стадию конденсации высокотемпературных окислов в микрокапли (3-5 мкм), их слияния, укрупнения и последующей кристаллизации в солевом расплаве;
- минералы группы магнетита являются основными, если не исключительными, носителями плутония.

После проведения последних взрывов в Азгире, в 1986-1987 гг. был проведен отбор проб из полостей взрывов на Сеитовском соляном куполе вблизи Астраханского газоконденсатного месторождения. Исследования подтвердили минералого-геохимические особенности распределения и образования новых минералов, установленных для взрывов в солевых куполах Большого Азгира.

Сеитовский купол предназначался для сооружения взрывным методом парка подземных емкостей. Породы этого купола были исследованы особенно тщательно, в первую очередь, как среда "захоронения" радиоактивных отходов ядерно-взрывной технологии. До и после проведения серии взрывов (последовательный подрыв 6-ти зарядов) совместно с со-

трудниками ВНИИпромгаз были проведены гелиевые съемки всего участка строительства подземных емкостей (С. В. Бутомо, Д. Н. Гурин, А. И. Кетов, Г. Н. Нечай, В. Г. Савоненков). Весьма чувствительный метод не выявил разрывных нарушений в солевом массиве.

Исключительно сложная и трудоемкая исследовательская работа была выполнена для определения "возрастной метки" пород купола аргон-калиевым методом. Первоначально изучались газы, выделяющиеся и образующиеся при плавлении солевых пород в полостях взрывов. Исследования показали существование процессов газового обмена между полостью и вмещающим солевым массивом, что подтверждалось, в частности, присутствием в атмосфере полостей избыточного количества аргона-40. Одновременно для пород купола проводились минералогические, дериватографические и вакуумно-декрипитационные анализы. Для сравнения использовались образцы различных соляных формаций, том числе формации Верра (Германия), формации Соладо (США). Анализ полученных изотопно-геохронологических данных свидетельствовал о "закрытости" Сеитовского купола в целом для радиогенного аргона в течение геологического времени. При этом устанавливалось не только состояние геологической системы (солевого массива), но и предполагался метод оценки солевых пород как среды для захоронения отходов (Е. Б. Андерсон, Б. Е. Бураков, В. Г. Савоненков, Ю. И. Силин).

Изучение возможной миграции радиоактивных отходов ядерно-взрывной технологии проводились на законсервированных и дезактивированных промплощадках Большого Азгир до 1992 г. (В. С. Дубровин, Ю. М. Рогозин, В. А. Соколов). Исследования миграции на Сеитовском куполе проводятся в настоящее время специалистами Научно-испытательной станции НПО "Радиовый институт им. В. Г. Хлопина", возглавляемой Д. Н. Гуриным.

Глубокое сожаление вызывает сложившееся негативное отношение населения и некоторых ученых, как правило, неспециалистов в области радиогеохимии и ядерных взрывов, к проведенным по программе мирного использования экспериментальным или промышленным взрывам ядерных зарядов. Появляются тенденциозные обращения и публикации об "экологических катастрофах", "дестабилизации недр", со взрывами ухитряются связывать колебания уровня Каспия. Большинство таких заявлений носит конъюнктурно-меркантильный характер (желание соорудить дополнительные наблюдательные полигоны, контрольные станции, научно-исследовательские институты для радиационно-экологических наблюдений и пр.). Неоднократно проведенные исследования независимых экспертов и экспедиций показали отсутствие загрязненных объектов внешней среды и увеличения дозовых нагрузок на население в результате проведения взрывов и на Сеитовском куполе, и на куполе Большой Азгир. Положительным фактором является возможность широкой публикации результатов исследований специалистов в полном смысле этого слова: серии "Ядерные взрывы в СССР" под редакцией В. Н. Михайлова, выпуски ЦНИИатоминформ, журнальные статьи и препринты.

Наиболее эффективным результатом ядерно-взрывной технологии следует признать создание подземных емкостей в каменной соли для Оренбургского газодобывающего комплекса в 1970-1973 гг. Эти емкости переданы в промышленную эксплуатацию. Специалистами института проводилась подготовка подземных хранилищ, разрабатывался технологический регламент, разрабатывалась и внедрялась специальная радиационно-контролирующая аппаратура, расширялись функции крупных (около 30 000 м³) герметичных резервуаров (С. В. Бутомо, А. А. Каменцев, В. И. Кацапов, А. С. Кривохатский, Г. Е. Нечай, Н. В. Скирда). За эти работы А. С. Кривохатскому с коллективом была присуждена Государственная премия СССР. Резервуары на Оренбургском месторождении эксплуатируются более 20 лет.

В 1983-1984 гг. произведены взрывы в соляном куполе вблизи Карачаганакского газоконденсатного месторождения (Северо-Западный Казахстан). Два дополнительных взрыва проведены в районе Астраханского месторождения. Это были промышленные взрывы и "разведка" с отбором керна не предусматривалась. Производилась подготовка резервуаров к эксплуатации (стравливание паро-газовой смеси, продувка полостей, обустройство оголовков скважин и пр.), позволявшая подробно изучить внутриформационные газы солевых массивов. Всего за период 1970-1985 гг. на трех крупнейших газоконденсатных месторожде-

ниях - Оренбургском, Астраханском и Карачаганакском - сооружено 23 емкости с проектным объемом 866 000 м³. Комплексные геохимические исследования подземных ядерных взрывов выделили самостоятельное научно-прикладное направление - ядерно-взрывную геотехнологию (С. В. Бутомо, А. С. Кривохатский, Г. Н. Нечай).

Проблемы захоронения радиоактивных отходов

Геохимические исследования специалистов Радиевого института в области удаления и захоронения радиоактивных отходов известны значительно лучше, чем изучение ядерных взрывов. Даже перечень публикаций мог бы представить самостоятельный интерес. Мы лишь кратко изложим последовательность и содержание наиболее интересных геохимических работ.

Подключение к проблеме захоронения отходов было достаточно быстрым и энергичным. Естественно, что первой средой, которую можно было рассматривать как наиболее перспективную, была каменная соль, солевые формации. В 1973 г. начинается сотрудничество со специалистами ГДР, подготовившими для захоронения отходов отработавшую солевую шахту в Морслебене, вблизи г. Магдебурга. Впоследствии это хранилище эксплуатировалось более 10 лет. В 1980 г. на семинар по проблемам захоронения отходов, организованный КАЭ Франции, был представлен доклад "Каменная соль как среда для захоронения радиоактивных отходов", авторы: Г. С. Сеницына, А. С. Кривохатский, В. Г. Савоненков, Г. Н. Нечай. В конце 70-х годов МАГАТЭ разрабатывало основополагающие рекомендации по захоронению радиоактивных отходов в геологические формации, в частности базовый документ - "Критерии подземного захоронения твердых отходов". Подготовка материалов для этого документа и его обсуждение проходило при активном участии специалистов Радиевого института (А. С. Кривохатский, В. Г. Савоненков). С этого времени можно считать, что геохимии не только "вошли" в проблему изоляции отходов, но и достойно утвердились в ней.

Захоронение радиоактивных отходов, особенно высокоактивных и долгоживущих радионуклидов в геологические формации - проблема предельной сложности, требующая для реализации и комплексного, поэтапного подхода, и разработки принципиально новых научно-технических решений. Для геологов и геохимиков, наряду с весьма трудоемкими исследованиями по выбору площадок захоронения, очень сложно прогнозировать состояние всей системы подземной изоляции на длительные периоды времени - сотни тысяч лет. В настоящее время никакая наука не может гарантировать безопасность захоронения на такие времена. Во-первых, в течение нескольких столетий может произойти полная научно-техническая революция, в ходе которой взаимоотношение человеческого общества и природы может измениться принципиально. Во-вторых, безопасность - не только техническое, но и социальное понятие, определяемое уровнем социально-экономического и гуманистического развития конкретного общества. Тем не менее, прогнозировать состояние участка литосферы на длительный отрезок времени возможно геологическими методами, поскольку требуемые временные интервалы охватывают крупные циклы эволюции поверхности Земли и биосферы. Перспективы развития геологических формаций оцениваются на основе знаний истории и закономерности их развития в прошлом с использованием критериев прогнозирования, разработанных на современном научно-техническом уровне.

В начале 90-х годов Е. Б. Андерсон, А. С. Кривохатский и В. Г. Савоненков обосновали возможность использования геохимических и изотопно-геохронологических данных для прогнозирования возможностей пространственно-временной изоляции отходов в солевых формациях и представили эти данные на Международную конференцию в США. Предварительно многие вопросы захоронения радионуклидов в каменной соли неоднократно публиковались, обсуждались на конференциях различного ранга (Е. Б. Андерсон, Р. В. Брызгалова, В. С. Дубровин, А. С. Кривохатский, Г. Н. Нечай, Ю. М. Рогозин, В. Г. Савоненков, Ю. И. Силин, Г. С. Сеницына). Полученные результаты исследований явились основанием для проведения захоронения отходов в полость, созданную ядерным взрывом в солевом ку-

поле Большой Азгир на глубине 1000 м (В. С. Дубровин, А. С. Кривохатский, Ю. Г. Петров, В. А. Соколов).

Одновременно с каменной солью проводятся исследования глинистых пород как среды изоляции радиоактивных отходов. Интерес к глинам возник в связи с проблемой размещения отходов Ленинградского региона и предполагаемым строительством централизованного могильника. С геохимических позиций была проанализирована вся система изоляции в глинах, и особенно ключевая проблема безопасности - миграция. Геолого-геохимические вопросы решались одновременно с разработкой концепции локализации отходов Северо-Западного региона, кадастра радиоактивных отходов, обоснования требований к хранилищам различного типа и т. п. (Р. В. Брызгалова, В. С. Дубровин, А. С. Кривохатский, Г. Н. Нечай, Ю. М. Рогозин, В. Г. Савоненков, В. А. Соколов). В связи с исключительной важностью проблемы А. С. Кривохатский предложил ставить благоприятные для изоляции отходов геологические формации в положение национальных ресурсов.

С полной остротой проблема радиоактивных отходов встала перед специалистами института в связи со строительством завода РТ-2, предназначенного для переработки облученного ядерного топлива реакторов ВВЭР-1000. Завод строился вблизи г. Железногорска (Красноярск-26).

В 1992 г. Радиевый институт организует большой коллектив специалистов - геологов, геофизиков, геохимиков для проведения работ по геологическому обоснованию безопасности захоронения высокоактивных отвержденных отходов в геологических формациях Енисейского кряжа. К исследованиям привлечены крупные институты и организации Российской Федерации: Санкт-Петербургский государственный университет, Геологический институт и Институт геологии и геохронологии докембрия РАН, Горно-химический комбинат (Красноярск-26), красноярские научно-исследовательские и проектные институты, Институт комплексного проектирования (ВНИПИПТ). Руководит комплексными научно-исследовательскими работами доктор геолого-минералогических наук Е. Б. Андерсон.

В общем виде задача сводится к поиску перспективных геологических формаций, свойства которых предельно удовлетворяют требованиям изоляции фракционированных высокоактивных отвержденных отходов завода. В рассматриваемом регионе (южная оконечность Енисейского кряжа) имеются несколько перспективных формаций, но наиболее полно отвечает необходимым требованиям Нижнеканский гранитоидный массив. Текущие работы сосредоточены в основном на поисках конкретных блоков однородных, малопроницаемых гранитоидов, имеющих необходимые размеры.

Одновременно, в связи с высокими требованиями к потенциально опасным объектам, требуется проведение комплексных исследований, подтверждающих научную обоснованность безопасности всей системы изоляции высокоактивных долгоживущих отходов. При этом направленность таких работ и перечень анализируемых факторов должны соответствовать международным рекомендациям и нормам и, что немаловажно, научные доказательства должны быть понятными и убедительными для населения.

Современный уровень наук о Земле раздвинул границы необходимых исследований весьма широко. Например, надо изучить сорбцию конкретных радионуклидов на конкретных микропримесях вторичных минералов гранитов. Одновременно надо понимать, что, захоранивая долгоживущие радионуклиды, мы их не полностью изолируем, а включаем в сложный геохимический кругооборот. Параметры такого кругооборота существенным образом зависят от цикличности геологических процессов, определяющих геохимические условия литосферного пространства. Циклы, как известно, контролируются более высокими по рангу планетарными процессами, которые также надо учитывать при прогнозе состояния подземного могильника.

Несмотря на все, казалось бы, неразрешимые трудности, проблема решается. Пути решения дают науки о Земле. Например, наиболее убедительным и доступным методом подтверждения долгосрочных прогнозов изоляции отходов являются природные аналоги. Одним из аналогов являются урановые месторождения, сохраняющие свою компактность и изолированность в течение сотен миллионов лет. Радиогеохимики Радиевого института,

имеющие богатый опыт изучения месторождений урана, в полном объеме используют свои знания (Е. Б. Андерсон, Б. Е. Бураков, В. Г. Савоненков, С. И. Шабалев).

Многолетние исследования миграционных процессов показали, что для их реализации необходимо одновременное выполнение целого ряда условий, а отсутствие хотя бы одного из них может процесс исключить. Установлено, что зоны выветривания и дробления горных пород являются не только каналами миграции, но одновременно и мощными геохимическими барьерами, препятствующими миграции радионуклидов благодаря присутствию мелкодисперсных минералов - природных сорбентов (Е. Б. Андерсон, Б. Е. Бураков, С. В. Ушаков, С. И. Шабалев).

Результаты исследований, свои предположения, сомнения геохимии института постоянно выносят на обсуждение с отечественными и зарубежными специалистами. Результаты комплексных геологических исследований по выбору площадок для захоронения высокоактивных отходов в Красноярском крае получили должное признание участников крупных конференций в США, Франции, Японии.

Отсутствие в настоящее время подземных могильников высокоактивных отходов нельзя связывать с колебаниями или неуверенностью специалистов, в том числе геохимиков, практически изучающих проблему захоронения. Во всем мире существуют негативные психологические и этические предпосылки для неприятия радиации и тем более радиоактивных отходов. Подлинно научное экологическое сознание населения еще формируется. Сооружение объектов, представляющих потенциальную опасность не только настоящему, но и будущему поколению людей, - процесс длительный и требует значительных затрат, даже если придерживаться принципа "разумной достаточности". Вполне очевидно, что отсутствие или нехватка финансирования не только остановит, но и отбросит далеко назад российских специалистов, решающих глобальную проблему захоронения радиоактивных отходов в глубокие геологические формации.

Работы на Чернобыльской АЭС

Для всех, кто пишет о чернобыльской аварии, достаточно сложно разделить научно-технические данные человека-специалиста от эмоционально-психологических восприятий просто человека. Даже на профессионалов, работающих вплотную с высокорadioактивными веществами, видевших последствия радиационных аварий и ядерных взрывов, Чернобыльская зона и пустой город Припять производили оглушающее впечатление. На выполнении заданий это не сказывалось. Для участников изучения ядерных взрывов радиационные уровни в несколько тысяч рентген могли считаться "штатной" обстановкой, а отбор проб в ограниченных пространствах полуобвалившихся штолен или в свежих, "парящих" воронках взрыва на выброс требовали устойчивой психики и полного отсутствия пессимистических фантазий. Но именно профессионалы должны писать о Чернобыле! С одной стороны, необходимо показать, что наша планета слишком мала, чтобы, казалось бы, человек разумный мог позволять себе крайне неразумные эксперименты. С другой - в многочисленных произведениях на чернобыльскую тему, наряду с объективным отражением событий, есть и завеса ложь, особенно в популярных и газетных публикациях. Анализ прессы, проведенный президентом Ленинградского союза по безопасности деятельности человека, профессором О. Н. Русаком, показал, что на Украине в 1991 г. более чем из тысячи публикаций о последствиях аварии только 30 подготовлены специалистами и написаны со знанием дела.

Большое число чисто научных статей и докладов сотрудников Радиевого института в какой-то степени освобождают от перечисления всех работ только одного геохимического направления. Целесообразно отметить наиболее важные этапы и выделить основные результаты геохимических исследований.

С максимальными трудностями были связаны работы в зоне и вблизи аварийного блока в мае 1986 г. Первый отбор проб проходил в сложной радиационной обстановке и осуществлялся руководителями лабораторий Радиевого института Ю. В. Дубасовым и Ю. Г. Петровым со своими сотрудниками. Проведенный в институте анализ показал, что в

поверхностном почвенном слое присутствуют радиоактивные частицы диспергированного облученного топлива и загрязненный радионуклидами реакторный графит.

Осенью 1986 г. начались систематические геохимические исследования ближней зоны и наиболее впечатляющего по количеству выпадений западного следа. Общая ситуация была такова: наряду с газообразными и летучими радионуклидами из реактора выброшено значительное количество диспергированного облученного топлива и его трансформированных высокотемпературным аварийным процессом модификаций и компонентов. Распространение и последующая миграция частиц и выщелоченных радионуклидов может привести к загрязнению биосферы, в первую очередь водоемов и источников водоснабжения. Цель геохимических исследований первого этапа - наиболее полно охарактеризовать попавшие в зону обитания человека источники радиоактивного загрязнения (частицы выпадений), изучить возможности их перемещения, изменения, миграцию отдельных радионуклидов и определить условия, ограничивающие или, наоборот, способствующие распространению радиоактивного загрязнения.

Первоначально требуемый объем пробоотборных работ вблизи аварийного блока провести не удалось. Однако именно из проб, отобранных осенью 1986 г., были выделены наиболее крупные (до 1,2 мм) частицы облученного топлива, прошедшие аварийную трансформацию, транспортировку в аэрозольно-газовом термодинамическом канале, но еще не измененные атмосферными факторами выветривания. Количество выпавших топливосодержащих частиц в 0,5 км от блока (база Гидроэлектромонтаж) составило около 60 кг/га. Это были базовые пробы выпадений в ближней зоне.

Для проведения систематических комплексных исследований необходимо было определить места и создать контролируемые полигоны - земельные участки площадью до 1 га с характерным рельефом и почвами, желательными захватывающие водоемы или окраины населенных пунктов. Радиевым институтом было организовано шесть наблюдательных полигонов, на которых велись систематические исследования вплоть до 1992 г. (Ю. В. Дубасов, Ю. Г. Петров, В. Г. Савоненков, Г. С. Сеницына).

Знания основных свойств радиоактивных частиц выпадений дали возможность выбрать наиболее представительный и эффективный метод их выделения и концентрирования из почвенно-грунтовых проб - шлиховой. Из первоначальной пробы весом до 20-25 кг хорошо известными геологам операциями ручной промывки выделялся тяжелый концентрат весом 5-10 г. Обогащение по тяжелым радиоактивным частицам составляло 50-500 раз (О. А. Аляпышев, В. Н. Костров, В. Г. Савоненков). Систематическое шлиховое опробование охватило внутри 30-км зоны площадь более 400 км².

В процессе дальнейших исследований индивидуальная частица массой не менее 10 мкг проводилась по стандартной информационно-аналитической цепочке, включающей оптическую и растрово-электронную микроскопию, рентгеноспектральное микрозондирование, гамма- и альфа- спектрометрические анализы. На большом количестве проб показано, что в выпадениях в 30-км зоне присутствуют два основных типа топливосодержащих частиц, различающиеся составом, структурой и генезисом (Ю. В. Дубасов, А. С. Кривохатский, В. Г. Савоненков, Е. А. Смирнова).

В 1988 г. Комплексная экспедиция ИАЭ им. И. В. Курчатова проводила разбуривание помещений IV блока и шахты реактора, что давало возможность отбора проб новообразованных радиоактивных продуктов - различных стекломасс. Классификация этих стекломасс оказалась близкой с классификацией твердых радиоактивных продуктов ядерных взрывов. Позднее, в 1995 г., систематизация всех радиоактивных техногенных образований 30-км зоны и IV блока легли в основу радиохимической модели аварии (Ю. В. Дубасов, В. Г. Савоненков, Е. А. Смирнова). Оптико-микроскопический и микрозондовый анализы показали, что при высокотемпературной переработке твэлов в силикатном расплаве происходит их полная трансформация с последующей стабилизацией компонентов (урана и циркония) в виде двух новообразованных (техногенных) минералов: уранинита и циркона (Ю. В. Дубасов, А. С. Кривохатский, Э. М. Пазухин, В. Г. Савоненков).

Введенное И. Е. Стариком понятие "выщелачивание" радионуклидов и разработанные в институте методы исследования этого процесса явились научно-экспериментальной базой для широких исследований радиоактивных продуктов чернобыльской аварии. Это, по существу, самостоятельное научное направление организовала, возглавила и активно исполняла Е. А. Смирнова. Выщелачивание - это первые шаги радионуклида по длинному пути миграции, на котором его могут подхватить транспортирующие среды или поглотить сдерживающие барьеры. В 30-км зоне такими барьерами являются почвы, глинистые и железосодержащие осадочные породы. В течение ряда лет на полигонах, в лаборатории на острове реки Припять вблизи Чернобыля, в Радиевом институте проводилась чрезвычайно трудоемкая, требующая больших физических сил и крайней "чистоты" натурного опыта научно-исследовательская работа по изучению миграции радионуклидов, роли природных барьеров, прогнозированию обстановки в районе аварии. Руководителем и постоянным исполнителем комплексных исследований являлся заведующий лабораторией института Ю. М. Рогозин, исполнителями - сотрудники лаборатории: В. А. Авдеев, Р. В. Брызгалова, В. Ф. Захаренков, И. Ю. Зудова, А. А. Куксов, Е. А. Смирнова, В. А. Трифонов, А. М. Шатилов.

Уникальными по объектам изучения, используемым методам анализа и полученным результатам являются комплексные радиогеохимические исследования продуктов аварии, проведенные Е. Б. Андерсоном. Наряду с частицами выпадений, для детального минералогорadioхимического анализа проведен отбор проб радиоактивных стекломасс ("чернобыльских лав") - продуктов взаимодействия при высоких температурах ядерного топлива с материалами и конструкциями аварийного блока. Радиогеохимические исследования сочетались с техногенной петрологией - изучением особенности кристаллизации и минералогии искусственных расплавов. Основной задачей исследований явилась разработка геохимических аспектов сценария чернобыльской аварии (Е. Б. Андерсон, Б. Е. Бураков, Э. М. Пазухин, С. В. Ушаков, С. И. Шабалев).

Особый интерес для геохимиков и минералогов представляет новообразованный циркон с исключительно высоким содержанием урана, ранее не наблюдавшимся для аналогичного природного минерала. Опубликованные результаты привлекли внимание Комиссариата по атомной энергии Франции, где в 1992 г. были проведены совместные исследования высокоурановых цирконов (Е. Б. Андерсон, Б. Е. Бураков). Результаты радиогеохимических исследований искусственных радиоактивных расплавов IV блока широко публикуются в ведущих отечественных и зарубежных журналах, представлены во многих докладах на крупных международных конференциях в США, Франции, где получают заслуженное признание.

Очевидно, что авария реактора представляет настолько сложную картину переплетенных причинно-следственных связей и новых, ранее не встречавшихся явлений и процессов, что построить какую-то адекватную модель или сценарий невозможно. Тем не менее, радиогеохимические исследования позволили в значительной мере восстановить по конечным продуктам основные факторы, метаморфизующие вещество, определить последовательность высокотемпературных процессов и, что весьма важно, сделать прогноз состояния новообразованных продуктов и миграции радионуклидов.

Не вызывает удивления, что продолжением и развитием исследований высокорadioактивных стекломасс и кристаллических новообразований чернобыльской аварии явились работы по изучению кристаллических матриц - наиболее оптимальных форм отверждения высокоактивных отходов (Е. Б. Андерсон, Б. Е. Бураков).

— • —

В кратком обзоре геохимических исследований Радиевого института не ставилась задача изменить общественное мнение относительно ядерных взрывов, радиоактивных отходов или каким-то образом смягчить "чернобыльский синдром". Общеизвестно, что одним из техногенных факторов воздействия на биосферу и ее мыслящую компоненту является радиация. Но не все знают, что эта же радиация является вечным спутником жизни на нашей планете. Не исключено, что вне радиационного фона жизнь невозможна, либо она существенным образом замедлится и радикально трансформируется. Природная радиация, непрерывно облучающая биоту Земли, является необходимым физическим фактором ее существова-

ния и нормального развития. Живое вещество участвует в миграции радиоактивных веществ в пределах биосферы (В. И. Вернадский). Радиационный фактор несет определенную информацию, а информация является "содержанием, полученным из внешнего мира в процессе нашего приспособления к нему" (Н. Винер).

Если современное человечество думает не только о своем благосостоянии, но и о выживании на планете Земля, необходимо с предельной глубиной познать пользу и вред целого ряда явлений, в том числе и радиации. Развитие ядерной энергетики неизбежно, но одновременно требуется адекватная защита людей и окружающей человека среды от негативных и опасных последствий этого развития.

Современная геохимия и радиогеохимия способны решать жизненно важные проблемы, требуя, естественно, для реализации своих возможностей достойного внимания и средств. Это необходимо и специалистам Радиевого института, имеющим исключительно богатую научную историю и опыт проведения уникальных, захватывающих своей сложностью экспериментов.

Л и т е р а т у р а

1. Радиевый институт им. В. Г. Хлопина. К 50-летию со дня основания. /Под общ. ред. акад. Б. П. Никольского. Л.: Наука, 1972. - 243 с.
2. Комлев Л. В., Синицына Г. С., Ковальская М. П. Урановая проблема. В кн.: Академик В. Г. Хлопин: Очерки, воспоминания современников. Л.: Наука, 1987, с. 37-68.
3. Круглов А. К. Как создавалась атомная промышленность в СССР. М.: ЦНИИАтоминформ, 1994. - 380 с.

РАДИОНУКЛИДЫ И ИЗДЕЛИЯ ИЗ НИХ ДЛЯ НАУКИ, ТЕХНИКИ, МЕДИЦИНЫ

Настоящий очерк подготовлен авторским коллективом:

**С. А. Бартенев, М. П. Зыков, А. Г. Кавецкий, Ю. Л. Каминский, Л. И. Крылов,
А. А. Михайлов, Б. И. Рогозов, В. А. Соколов, Л. М. Солин, С. Л. Фаддеев,
В. В. Федоров, В. П. Чечев, Б. И. Шестаков**

ВВЕДЕНИЕ

Хорошо известно, что возникновение и становление Радиевого института напрямую связано с потребностями народного хозяйства России в радии. Именно этому сугубо прикладному делу, связанному с разработкой способов выделения радия из природного сырья и курированием работы первого в стране радиевого завода, была посвящена в первые годы своего существования основная деятельность ученых Радиевого института. Но и в последующие годы, когда усилия ученых сконцентрировались на фундаментальных вопросах радиохимии, ядерной физики и геохимии, вопросы практического использования радия, радона, урана, тория не выпадали из их поля зрения. Достаточно сказать, что многие клиники страны были снабжены радиевыми препаратами, изготовленными руками сотрудников института.

Развитие ядерной энергетики, появление значительного количества исследовательских реакторов и ускорителей заряженных частиц, комплексная переработка облученного ядерного топлива (ОЯТ) стали прочной технической базой для получения и широкого использования многих радиоактивных нуклидов в самых различных областях науки, техники, медицины. В связи с этим в химических и физических лабораториях Радиевого института стали появляться отдельные исследовательские группы, проводившие работы по так называемой радионуклидной тематике. В 1949 г. в институте была создана лаборатория препаративной радиохимии (рук. В. М. Пермяков), в которой готовились препараты радия, радиотория, полония, радия D, радоновые ампулы. В 1954 г. была организована вторая лаборатория, которую возглавил Д. М. Зив, один из основателей большого научного направления в использовании радионуклидов. Именно в его лаборатории были разработаны промышленные процессы получения полония, актиния и созданы принципиально новые типы источников альфа-, бета-, гамма- и нейтронного излучения, с которых и начался впоследствии промышленный выпуск закрытых радионуклидных источников излучения. В 1963 г. появилось еще три лаборатории радионуклидного направления, и уже к 1970 г. общий объем исследовательских работ радионуклидного направления в Радиевом институте составлял 30-35 %. Ниже приведены основные итоги работ, выполненных в этих лабораториях, и названы основные их участники.

РАДИОНУКЛИДНЫЕ ИСТОЧНИКИ ИЗЛУЧЕНИЙ

Большое внимание изготовлению различного рода радиоактивных препаратов и мишеней в Радиевом институте уделялось с момента его образования. Однако их применение и изготовление носило, как правило, лабораторный характер. Работы по созданию безопас-

ных в обращении источников альфа- и бета-излучения, пригодных как для лабораторного, так и для массового промышленного изготовления, были начаты в Радиовом институте с 1954 г., когда Д. М. Зивом и сотрудниками (Е. А. Волкова, Г. С. Сеницына, И. А. Эфрос) было предложено использование неорганических эмалей в качестве фиксирующего материала для связывания и удержания радиоактивных нуклидов. Первые источники, изготовленные путем впаивания радия-226 в слой неорганической эмали, были использованы при создании первого отечественного α -ионизационного манометра.

Дальнейшее развитие этого метода фиксации радионуклидов в сочетании с предложенным Ю. В. Мазурком и Л. Е. Драпкиной методом нанесения герметизирующих покрытий в виде пленок диоксида титана, получаемых парофазным гидролизом четыреххлористого титана, позволило разработать технологию изготовления альфа- и бета-источников для снятия зарядов статического электричества и успешно осуществить их промышленное производство на химкомбинате "Маяк" (источники типа АИП-Н). В дальнейшем этот метод изготовления источников был успешно использован при разработке технологии и промышленном производстве целого ряда альфа- и бета-источников, предназначенных, в основном, для приборов технологического контроля (источники типов АИП-МИР, АИП-РИГ, АИП-ЭДГХ, БИП). В разработке технологии изготовления источников данного типа принимал участие большой коллектив сотрудников (Д. М. Зив, Ю. В. Мазурек, Д. Н. Мясоедов, В. А. Качалов и др.). Работа проводилась в тесном взаимодействии с ВНИИНМ и химкомбинатом "Маяк", на котором с 1962 г. и начался промышленный выпуск источников данного типа. Массовое применение источников убедительно показало, что разработанная технология обеспечивает высокую степень их надежности, радиационную безопасность и долговечность.

Развитие атомной промышленности, широкое использование радиоизотопных методов в научных исследованиях, технике, медицине и сельском хозяйстве потребовали промышленного выпуска различных видов градуировочных и контрольно-комплектующих источников альфа-излучения. Ввиду массового использования эти источники должны быть безопасны в обращении, не менять свои характеристики в течение всего срока эксплуатации, в ряде случаев выдерживать значительные перепады температуры, влажности и давления.

В 1964-1966 гг. была разработана (Д. М. Зив, Е. А. Волкова, А. А. Михайлов и др.) и внедрена в производство термооксидная технология изготовления градуировочных альфа-источников с малоискаженным спектром излучения на основе радионуклидов плутония-239, урана-234 и урана-238 с площадью активной поверхности от 1 до 160 см² и активностью от 4 до 1·10⁵ Бк/см². Массовый промышленный выпуск источников данного типа осуществляет химкомбинат "Маяк" с 1966 г.

В 1965 г. на основе термооксидного метода изготовления тонкослойных источников была разработана технология изготовления незманируемых спектрометрических альфа-бета-источников на основе радия-226 и тория-228 для градуировки аэрозольных радиометров, применяющихся для определения концентрации аэрозолей на урановых и ториевых производствах (Д. М. Зив, Е. А. Волкова, А. А. Михайлов). Эти источники позволили создать новые методы определения радиоактивных аэрозолей в воздухе (ВНИИФТРИ).

Широкое использование спектрометров ядерных излучений потребовало создания единых для страны образцовых спектрометрических источников.

В 1965-1968 гг. в Радиовом институте на основе термооксидного метода фиксации радионуклидов были разработаны технология изготовления образцовых спектрометрических альфа-источников (ОСАИ) с прочно фиксированным слоем радиоактивного вещества и методика определения их параметров. По разработанной технологии были изготовлены ОСАИ на основе нуклидов ²³³U, ²³⁸Pu, ²³⁹Pu, ²⁴¹Am, ²⁴²Cm, ²¹⁰Pb + ²¹⁰Po, ²⁴⁴Cm, ²²⁶Ra, ²²⁸Th. Активность источников составляла от 0,1 до 10 мКи. Для ряда нуклидов удалось получить источники с полушириной альфа-спектра, равной 3-7 кэВ. С 1969 г. разработанная технология изготовления ОСАИ была внедрена в промышленное производство. В разработке технологии изготовления ОСАИ и методики определения их параметров принимали участие

Д. М. Зив, Ю. В. Хольнов, Е. А. Волкова, А. А. Михайлов, В. Г. Недовесов, А. Ф. Беляцкий, Н. А. Самойлов, Э. С. Фатеева и др. В 1969 г. этим же коллективом была начата разработка технологии изготовления образцовых спектрометрических источников конверсионных электронов (ОСИКЭ), пригодная для промышленного выпуска источников. В 1971 г. был завершен первый этап разработки ОСИКЭ и изготовлена первая опытная партия источников на основе кадмия-109, кобальта-57, церия-139. В дальнейшем эта технология была доработана, что позволило в 1991 г. осуществить выпуск образцовых спектрометрических источников бета-излучения с электропроводящим покрытием (ОРИБИ) на основе радионуклидов: ^{63}Ni , ^{14}C , ^{147}Pm , ^{60}Co , ^{204}Tl и $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$, предназначенных для проверки радиометров и радиометрических установок, а также для проверки зависимости чувствительности радиометров от энергии внешнего бета-излучения. Источники выпускаются двух типоразмеров с площадью активной части 1 и 4 см² и тремя номинальными значениями внешнего бета-излучения: 1·10², 1·10³, 1·10⁴ с⁻¹. В работе принимали участие В. Г. Шумков, В. Г. Недовесов, Е. А. Волкова, А. А. Михайлов, В. Г. Рогозовец, В. Ф. Фатеев, Ю. Г. Покровский, М. Б. Евстафьев, Г. Е. Щукин, Э. С. Фатеева и др.

На основе термооксидного метода фиксации ^{238}Pu и нового метода герметизации источников путем нанесения пленок пиролитического хрома в 1979-1984 гг. был разработан новый тип источников альфа-излучения, предназначенных для ионизации газовых сред - типа "Альфа". Технология, разработанная в Радиовом институте для источников типа "Альфа", легла затем в основу создания источников типа АИП8-5М, -Д, -6М, дополнивших унифицированный ряд контрольно-комплектующих источников типа АИП8 (В. Г. Шумков, А. А. Михайлов, Е. А. Волкова, Ю. Г. Покровский, Э. С. Фатеева и др.).

В 1977 г. была завершена и внедрена в производство на заводе "Авангард" (г. Арзамас-16) разработка интенсивных альфа-источников из полония-210 типа "Факт-1" активностью 1,8-2,5 ГБк, предназначенных для комплектации приборов экспрессного рентгенофлуоресцентного определения легких элементов (С. Л. Фаддеев, В. Н. Терин, О. Г. Феофилов и др.). Для альфа-радиационной обработки интегральных микросхем и полупроводников в 1983-1984 гг. разработаны специальные альфа-источники на основе полония-210 (источники "Факт-2") с площадью активной поверхности 18 см² и поверхностной активностью 4-6 ГБк/см² (С. Л. Фаддеев, О. Г. Феофилов, С. В. Грищенко и др.) и совместно с ВНИИНМ - на основе плутония-238 - источники типа АИПЭЛ с поверхностной активностью до 740 МБк/см² (А. А. Михайлов, Ю. Г. Покровский).

В течение 1981-1985 гг. совместно с ВНИИНМ была проведена работа по созданию и внедрению в производство унифицированного ряда источников рентгеновского характеристического излучения для рентгенофлуоресцентного анализа (РФА), построенного на использовании девяти радионуклидов: железа-55, плутония-238, олова-119, кадмия-109, кобальта-57, самария-145, америция-241, гадолиния-153 и трития (В. В. Федоров, Г. Е. Щукин, В. Ф. Фатеев, В. Г. Рогозовец и др.). Наибольшее применение получили высокоинтенсивные закрытые источники рентгеновского излучения с энергией 5,9 кэВ на основе радионуклида железо-55, которые выпускаются в широком диапазоне типоразмеров, различных габаритов, формы (диски и кольца) и поверхностной активности - от 1 мкКи/см² до 10 Ки/см² (В. Ф. Фатеев, В. Г. Рогозовец, Г. В. Шахетов и др.).

Кроме того, на основе термооксидного метода фиксации железа-55 была разработана и внедрена в 1981 г. на химкомбинате "Маяк" технология изготовления реперных источников рентгеновского излучения, предназначенных для калибровки и стабилизации рентгеновских счетчиков.

Совместно с химкомбинатом "Маяк" была предложена и разработана керамическая технология изготовления сердечников - источников гамма-излучения на основе радионуклида америция-241. Разработанная технология обеспечивает возможность эксплуатации источников при температуре до 1000 °С (В. Н. Комаров, В. А. Качалов, А. П. Серый и др.). Технология изготовления на основе силикатной керамики с применением фосфатных связующих позволила создать унифицированный ряд источников гамма-излучения типа

"ИГИА" с жесткой фиксацией активной части, отвечающих всем требованиям, предъявляемым веществу особого вида.

Реперные источники альфа-, гамма-излучения для блоков детектирования различного назначения были разработаны на основе термооксидного метода фиксации и использования защитных пленочных покрытий из диоксида титана (источники типа АРИА-241-3) и пиролитического хрома (источники типа Ам-241Р) (В. Г. Шумков, Е. А. Волкова, А. А. Михайлов, Ю. Г. Покровский, Л. А. Мильцова и др.).

РАДИОНУКЛИДНЫЕ ИСТОЧНИКИ ТЕПЛА

Развитие космической техники, усложнение космических экспериментов, увеличение их продолжительности и планирование экспедиций на другие планеты Солнечной системы остро поставили перед создателями этой техники проблему обеспечения летательных аппаратов источниками электрической энергии. Широко используемые в настоящее время солнечные батареи при всех их достоинствах обладают существенным недостатком: они требуют постоянной ориентации относительно Солнца и чувствительны к удалению от него. Теоретические исследования и расчеты показали, что преобразование с помощью полупроводниковой батареи тепла, сопутствующего радиоактивному распаду, в электричество может дать энергоемкий, с большим сроком службы, автономный и надежный источник бортового питания. Среди известных радионуклидов для изделий космического назначения со сроком службы более пяти лет наилучшими характеристиками обладает плутоний-238 - альфа-излучатель с периодом полураспада 87,74 лет и удельным энерговыделением 0,58 кВт/кг.

Первые работы по созданию радионуклидных термоэлектрических генераторов (РИТЭГ) были начаты в США (1952 г.)

В Радиовом институте этой проблемой в части создания источников тепла начали заниматься систематически 10 лет спустя - с 1962 г. Решением ГКИАЭ для этой цели в мае 1963 г. была организована лаборатория тепловых блоков N 24 (руководитель В. В. Федоров).

Радионуклидный источник тепла (РИТ), находящийся многие тысячи часов при высокой температуре и содержащий килокурйные количества плутония-238, представляет собой объект потенциально высокой радиационной опасности. Разгерметизация РИТ при любых ситуациях, включая экстремальные (взрыв ракетносителя, аэродинамический нагрев при сходе космического объекта с орбиты, высокоскоростной удар о твердую поверхность Земли), должна быть сведена практически к нулю.

Сложность решаемых задач, отсутствие аналогов, недостаточность, закрытость и недоступность информации потребовали организации в Радиовом институте многопрофильного коллектива исследователей и инженеров, а также привлечения к работам специалистов различных организаций Минатома и других ведомств СССР.

Не затрагивая здесь проблемы получения плутония-238 в необходимых для применения в РИТ количествах, представляющей самостоятельную и очень сложную задачу, следует указать, что работы по созданию конструкции источников тепла велись в Радиовом институте по четырем основным направлениям:

- поиск и выбор химической и физической форм радионуклидного топлива;
- поиск и исследование конструкционных материалов, пригодных для использования в условиях эксплуатации РИТ;
- разработка конструкции и технологии источника, способного противостоять температурным и механическим воздействиям в экстремальных ситуациях;
- метрологическое сопровождение технологических процессов изготовления и аттестации конечной продукции.

Естественно, что все вышеперечисленные направления исследований жестко взаимосвязаны и подчинены единой задаче: созданию высоконадежного изделия.

Высокая температура плавления и высокое объемное энерговыделение диоксида плутония предопределили его первоначальный выбор в качестве материала радионуклидного топлива РИТ. Изучение его растворимости в различных средах показало высокую устойчивость диоксида плутония в морской и пресной воде (Г. П. Никитина, Ю. Е. Иванов). Изучение кинетики выделения радиогенного гелия позволило установить температурную зависимость консервирующей способности диоксида плутония-238, падающей до нуля при высоких температурах (В. М. Окаминов, А. А. Панферов), и рационально использовать полученные результаты при конструировании РИТ различного назначения.

Проблема длительной совместимости материала ампулы и радионуклидного топлива - одна из центральных и сложных проблем в создании высокотемпературного РИТ. Разработка и освоение в Радиовом институте методики испытаний на совместимость различных отечественных конструкционных материалов с топливом с последующим микронзондовым анализом образцов позволили отобрать наиболее перспективные из них и наметить пути продвижения в высокотемпературную область (выше 1000 °C) (В. Б. Старых, Л. М. Чернаенко, П. П. Мурин). Огромная работа по высокотемпературным длительным испытаниям различных конструкционных материалов для РИТ была проведена специалистами завода "Авангард" (Г. И. Антонов, Б. В. Дербунович и др.). Установленное в ходе исследований окисление тантал-вольфрамового сплава TaW10 стехиометрическим диоксидом плутония потребовало разработки и внедрения оригинальной технологии получения гипостехиометрического диоксида (Г. В. Малинин, В. А. Быков, В. Б. Ядринцев и др.).

Собственный нейтронный фон от спонтанного деления ядер плутония-238 невелик и составляет около 2600 н/с на грамм ^{238}Pu (В. А. Архипов, О. С. Цветков). Однако присутствие в радионуклидном топливе ничтожных количеств примесей легких элементов ($Z < 20$) приводит к резкому возрастанию нейтронного излучения за счет реакции (α, n) . Это налагает жесткие требования на очистку плутония при проведении технологического процесса выделения плутония-238 из облученного нептуния-237. Однако само по себе использование окисной формы плутониевого топлива, содержащего атмосферный кислород, в составе которого находятся ^{17}O (0,04 %) и ^{18}O (0,20 %), повышает нейтронный фон в 6 раз. Изучение различных методов устранения этого недостатка оксида плутония-238 привело к разработке нескольких технологических схем изотопного обмена атмосферного кислорода в топливе на кислород, обедненный по изотопам $^{17,18}\text{O}$ до 0,01 % (В. В. Федоров, А. А. Чайхорский, Б. А. Михайлов, Г. В. Малинин, В. А. Быков с участием сотрудников ПО "Маяк" П. П. Чиненова и В. И. Капитонова).

При создании высокотемпературного РИТ конструктору приходится выполнять жесткие требования разработчика РИТЭГ по максимальному сокращению поверхности (а, следовательно, и объема) источника. Трудность этой задачи была связана с тем, что образующийся и выделяющийся из топлива радиогенный гелий создает в герметичной ампуле непрерывно возрастающее давление, вызывая соответствующие механические напряжения в материале стенок. Поскольку длительная прочность конструкционных материалов резко падает с повышением температуры, для сохранения целостности герметичной ампулы приходится предусматривать в ней свободный объем и увеличивать толщину стенки, что приводит к недопустимому возрастанию объема, поверхности и веса РИТ. Выход из этого положения был найден в разработке конструкции высокотемпературного молекулярного фильтра для сброса радиогенного гелия при контролируемом уровне выхода радиоактивного вещества (В. М. Окаминов, В. В. Федоров при последующем активном участии сотрудников завода "Авангард" Б. В. Дербуновича и др.).

Однако не во всех РИТ возможен вывод радиогенного гелия из внутренней полости капсулы. Это исключено, например, в РИТ для электрокардиостимулятора, где выброс гелия в объем термопреобразователя нарушил бы теплоизоляцию батареи и привел бы к падению ее КПД. В одной из последних разработок такого РИТ впервые в мировой практике был использован диоксид плутония-238 в виде микросфер диаметром около 0,5 мм, полученных по технологии золь-гель процесса (В. М. Макаров, В. И. Ярошенко и др. (ВНИИНМ)). Высокая

плотность и прочность материала микросферы, дополненные вакуумно-плотным покрытием из карбида хрома (А. А. Михайлов, А. И. Костылев и др.), позволили создать новый тип радионуклидного топлива, отличающегося высокой консервирующей способностью радиогенного гелия при рабочих температурах источника тепла в кардиостимуляторе (160 °С) и повышенной безопасностью при сборке РИТ.

Следует отметить большой объем сложных исследовательских работ Радиевого института, проведенных в рамках метрологического сопровождения разработки и производства РИТ-238 (В. Г. Недовесов, В. А. Архипов, Г. Е. Щукин, В. А. Устинов и др.). В частности, были разработаны:

- методика микрокалориметрических измерений тепловыделения радиоактивных образцов (В. А. Архипов, В. А. Устинов);
- методика нейтронных измерений примеси легких элементов в радионуклидном топливе (О. С. Цветков);
- методика определения кислородного показателя в оксиде плутония-238 (Г. В. Малинин, В. А. Быков);
- методика взвешивания реального (нагретого) радионуклидного топлива (В. А. Быков, В. И. Капитонов (ПО "Маяк"));
- методика измерения альфа-загрязнения поверхности РИТ для кардиостимулятора на уровне одного беккереля (М. Б. Евстафьев, С. М. Соловьев);
- методика измерения реального фотонного спектра РИТ и на этой основе установление требований по оптимальным коэффициентам очистки топлива от примесных радионуклидов (Г. Е. Щукин, Н. П. Яковлев).

Результаты всех вышеприведенных исследований и технологических разработок были положены в основу и использовались при разработке непосредственно конструкции РИТ с разными тепловыми потоками, для разных температурных рабочих диапазонов и различных условий эксплуатации (Г. О. Трейман, А. А. Васильев, И. Г. Никитин, А. А. Семенов, Н. Г. Михайлов и др.). На основе плутония-238 были разработаны, испытаны и реализованы "в металле" такие РИТ, как:

1966 г.	РИТ "ЗЕМЛЯ-1"		$W_T = 22 \text{ Вт}$	$T_{\text{раб.}} = 400 \text{ }^{\circ}\text{С}$
1968 г.	РИТ "ЖИЗНЬ"		$W_T = 300 \text{ Вт}$	$T_{\text{раб.}} = 920 \text{ }^{\circ}\text{С}$
1970 г.	РИТ "СЛОЙ"		$W_T = 2 \text{ Вт}$	$T_{\text{раб.}} = 400 \text{ }^{\circ}\text{С}$
1971 г.	РИТ "РИТ"		$W_T = 120 \text{ Вт}$	$T_{\text{раб.}} = 900 \text{ }^{\circ}\text{С}$
1978 г.	РИТ "ВЫСОТА"		$W_T = 1000 \text{ Вт}$	$T_{\text{раб.}} = 950 \text{ }^{\circ}\text{С}$
1984 г.	РИТ "ПОЧВА"		$W_T = 20 \text{ Вт}$	$T_{\text{раб.}} = 200 \text{ }^{\circ}\text{С}$
1986 г.	РИТ "РИТ-238-3, 7, 12"	Ряд:	$W_T = 3, 7, 12 \text{ Вт}$	$T_{\text{раб.}} = 110 \text{ }^{\circ}\text{С}$
1987 г.	РИТ "ГЕММА-ОКР"	Ряд:	$W_T = 0,08-0,30 \text{ Вт}$	$T_{\text{раб.}} = 160 \text{ }^{\circ}\text{С}$
1990 г.	РИТ "РИТ-238-0,22"		$W_T = 0,22 \text{ Вт}$	$T_{\text{раб.}} = 180 \text{ }^{\circ}\text{С}$

В заключение следует отметить, что реализация всех этих разработок не могла быть осуществлена без активного, творческого и самоотверженного участия коллектива Изотопного радиохимического завода ПО "Маяк" (Ю. А. Малых, В. А. Балакин, Г. Я. Чепурнов и многие другие).

РАДИОЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ ИСТОЧНИКИ СВЕТА

Исследования и разработки конструкции радиолюминесцентных источников света (РЛИС) с газообразными нуклидами криптон-85 и тритий были начаты в Радиевом институте в 1985 г. в лаборатории, возглавляемой В. А. Архиповым. Возобновление интереса к данному вопросу, имеющему относительно давнюю историю, как в нашей стране, так и за рубежом, связано с рядом обстоятельств. Во-первых, в середине 80-х годов стали доступны боль-

шие количества названных газообразных радионуклидов с относительно высокой степенью обогащения, которые могли быть использованы в РЛИС. Во-вторых, развитие технологии изготовления люминофоров привело к возможности синтеза радиолюминофоров с более высоким, по сравнению с имевшимся ранее, выходом радиолюминесценции. В-третьих, появилось новое, прежде всего лазерное технологическое оборудование. Вследствие указанных причин возникли предпосылки для создания более мощных, с высоким КПД, более прочных и надежных, чем изготавливались ранее РЛИС с газообразными радионуклидами.

Это направление работ развивалось в институте под руководством В. М. Окамина. На начальном этапе были проведены исследования эффективности свечения под действием бета-частиц, испускаемых криптоном-85 и тритием, как промышленных, так и специально синтезированных люминофоров, определены оптимальные толщины слоев люминофоров, изучены зависимости интенсивности свечения радиолюминесцентных источников света от давления и состава газообразного нуклида. Были разработаны также основы технологии изготовления источников света и оптимизирован ряд параметров их конструкции. В дальнейшем, начиная с 1988 г., на базе полученных на предварительном этапе результатов, были выполнены несколько ОКР, в числе которых можно назвать: разработку аэродромного светосигнального комплекса на базе радионуклидных источников света на основе криптона-85 и трития, разработку тороидальных радиолюминесцентных источников света для устройств ночного чтения карт, разработку серии тритиевых светозащитных элементов различных типоразмеров. В результате этих ОКР были выпущены комплекты документации для серийного выпуска названных изделий с высокими, не достижимыми ранее, показателями качества.

Радиовым институтом для решения различных научно-технических и технологических вопросов к работе привлекались как предприятия Минатома России, так и смежных отраслей. Прежде всего, это ПО "Маяк" (г. Озерск), ГХК (Красноярск-26), Электрохимический комбинат (Красноярск-45), на которых были отработаны вопросы промышленного получения трития и криптона-85 с высокой степенью обогащения для применения в РЛИС, а также освоена технология промышленного выпуска этих изделий. В НПО "Люминофор" (г. Ставрополь), ВНИИ "Электрон", ЛТИ им. Ленсовета, ГОИ им. С. И. Вавилова (Санкт-Петербург), ПО "Рубин", ПО "Прожектор" (Москва) были разработаны и внедрены в производство технологии изготовления комплектующих для РЛИС (радиолюминофоров, выходных окон), а также разработаны конструкция и технология изготовления арматуры для различного светосигнального оборудования.

Кроме решения научно-технических и технологических вопросов, большое внимание уделялось санитарно-нормативным и правовым аспектам изготовления и применения источников света, содержащих радиоактивные материалы. Совместно с Санкт-Петербургским институтом радиационной гигиены были разработаны и выпущены Санитарные правила "Разработка, изготовление и применение радиолюминесцентных источников света на основе трития" СП2.6.1.543-96, которые четко регламентируют порядок безопасного применения этих изделий.

В выполнении работ, связанных с разработками радиолюминесцентных источников света, кроме упомянутых выше сотрудников, активно участвовали А. Г. Кавецкий, С. П. Мелешков, А. А. Васильев, В. А. Устинов, В. К. Казаков, Н. А. Оводова, Н. Г. Михайлов, С. Л. Марков. Кроме того, в различные периоды времени в работах участвовали: А. Г. Михальченко, В. А. Шихарев, А. С. Довгиленко, В. А. Рубинов, М. П. Харачко, А. А. Семенов.

МЕССБАУЭРОВСКИЕ ИСТОЧНИКИ И ИХ ПРАКТИЧЕСКИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ

В 1957 г. немецкий физик Рудольф Мессбауэр открыл явление резонансного поглощения и испускания гамма-квантов без отдачи. Через короткое время эксперименты по резонансному поглощению были повторены во многих лабораториях мира. Стало ясно, что это открытие может быть положено в основу нового физического метода исследования самых

разнообразных объектов природы. Открытое явление получило название "эффект Мессбауэра", и вскоре на его основе был развит новый вид спектроскопии - мессбауэровская спектроскопия, которая с тех пор успешно применяется в сотнях лабораторий мира для исследований в области физики твердого тела, ядерной физики, химии, биологии, геологии и т. д..

Радиевый институт им. В. Г. Хлопина был одним из первых научных учреждений в стране, в котором исследования явления резонансного поглощения гамма-квантов без отдачи проводились с самого начала 60-х годов. Работы в Радиевом институте имели широкий спектр: исследования в области ядерной физики, физики твердого тела, химии, разработка аппаратуры, разработка и изготовление мессбауэровских источников гамма-квантов; в 60-х годах они осуществлялись сотрудниками Г. Н. Белозерским, Г. М. Городинским, Ю. А. Немилковым, Л. М. Крижанским, Е. М. Кругловым, Б. И. Рогозовым, Н. К. Черезовым, С. П. Екимовым и др.

В дальнейшем работы по исследованию и применению эффекта Мессбауэра стали традиционными для Радиевого института. В стране использовались разработанные здесь мессбауэровские источники. Исследования и разработка были сосредоточены в основном в лаборатории радионуклидов (начальник лаборатории Б. И. Рогозов).

Был проведен широкий комплекс научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ в области создания средств гамма-резонансных измерений для мессбауэровской спектроскопии. Цель этих работ - расширить возможности этого уникального ядерно-физического метода и способствовать практическому применению его в различных областях науки и практической деятельности.

Работы велись в направлении создания мессбауэровских источников гамма-квантов для различных гамма-резонансов, улучшения гамма-резонансных и радиационных характеристик, увеличения надежности и срока службы источников, разработки мессбауэровских источников для промышленного применения. В лаборатории были разработаны мессбауэровские источники для резонансов на железе-57, олове-119, теллуре-125, европии-151. В общей сложности было разработано более 20 различных типоразмеров источников. В разработках принимали участие сотрудники лаборатории: А. В. Балув, В. С. Митяхина, Б. И. Рогозов, Д. А. Сарычев, М. Ю. Силин, А. А. Антипов, Н. К. Черезов.

Многочисленными работами лаборатории было показано, что существенного увеличения чувствительности и точности гамма-резонансных измерений можно достичь, применяя метод селективной регистрации безотдачного (мессбауэровского) излучения. Для реализации этой концепции в лаборатории были разработаны высокоэффективные резонансные сцинтилляционные детекторы гамма-квантов для применения в мессбауэровской спектроскопии на железе-57, олове-119 и европии-151. Эти разработки защищены многими авторскими свидетельствами. Уникальные возможности резонансных детекторов значительно увеличиваются при использовании их в составе гамма-резонансных пар - комбинаций мессбауэровского источника и резонансного детектора с определенными гамма-резонансными характеристиками.

Гамма-резонансные пары, которые можно считать новым средством измерений в мессбауэровской спектроскопии, расширяют возможности этого метода не только при применении его в научных исследованиях, но позволяют также по-новому ставить и решать вопросы прикладного применения метода.

В лаборатории созданы гамма-резонансные пары, на основе использования которых были разработаны приборы и устройства для измерения промышленных вибраций (виброметр ядерный гамма-резонансный, виброметр ГРАЦ). Работы проведены объединенным коллективом сотрудников ВНИИ метрологии и Радиевого института (В. С. Шкаликов, В. Л. Федорин, И. Г. Пучков, Б. И. Рогозов, В. И. Гудов и др.). Были разработаны методы измерения параметров предельно малых вибраций с использованием ядерного гамма-резонанса. Последние были использованы при создании методики и аппаратуры для измерения глазо-орбитального пульса в офтальмологии.

Разработка методик применения техники ядерного гамма-резонанса в медицине выполнена сотрудниками Радиевого института совместно с сотрудниками 1-го Ленинградского

медицинского института им. акад. И. П. Павлова (Г. А. Овчинников, проф. Ю. С. Астахов, проф. И. М. Белов, А. А. Тимофеев, Б. И. Ржанов и др.). Методика успешно используется в клинике глазных болезней I ЛМИ им. акад. И. П. Павлова.

Исследование глазо-орбитального пульса методом ядерного гамма-резонанса дало возможность оценивать в динамике как состояние глазного и мозгового кровообращения, так и результаты консервативного и хирургического лечения.

Были разработаны также методы использования гамма-резонансных пар в аналитической химии, в частности для экспрессного определения содержания касситерита в оловянных рудах. С 60-х годов эта методика является штатной аналитической методикой в стране. На ее основе было создано новое поколение мессбауэровских концентратометров типа АСК-01, превосходящих в 50 раз по чувствительности своих предшественников - приборы типа МАК. Разработка концентратомера АСК-01 выполнена Белорусским государственным университетом при участии Радиевого института. Приборами АСК-01 был оснащен ряд горнообогатительных комбинатов страны.

Новые возможности дает применение гамма-резонансных пар при проведении тонких физических экспериментов. Так, сотрудниками Института атомной энергии им. И. В. Курчатова и Радиевого института им. В. Г. Хлопина в 1986-1988 гг. был выполнен цикл экспериментальных работ по исследованию нарушения пространственной четности при мессбауэровских гамма-переходах в некоторых атомных ядрах. В этих работах была обнаружена и измерена асимметрия вылета гамма-квантов из поляризованных ядер олова-119 и железа-57. На основе полученных экспериментальных данных впервые измерена степень нарушения Р-четности в мессбауэровских М1-переходах ядер железа-57 и олова-119.

Прогресс в области разработки источников и улучшения их характеристик (необходимый спектральный состав излучения, высокая удельная активность радионуклида, высокий выход излучения из источника, предельно малая выщелачиваемость радионуклида из матрицы и др.) во многом определяется глубиной проработки вопросов поиска и синтеза веществ-матриц для фиксации целевого нуклида, а также качеством (чистота, концентрация) используемых радионуклидных препаратов.

Лабораторией выполнен большой объем работ по поиску веществ-матриц для фиксации цезия-137 с целью получения активной части источников с этим радионуклидом, обладающей предельно малыми значениями выщелачиваемости радионуклида при высоком значении удельной активности.

При выполнении работ по поиску матриц для фиксации радионуклидов синтезировано более 20 новых, ранее не описанных химических соединений, которые являются перспективными для изготовления активной части радионуклидных источников. Эти работы проводились А. В. Балуховым, В. С. Митяхиной, М. Ю. Силиным, А. Л. Евдокимовым, Л. В. Красниковым.

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЙ ПОЛУЧЕНИЯ ОТДЕЛЬНЫХ РАДИОНУКЛИДОВ

Радиевому институту принадлежит честь разработки промышленных способов получения не только радия, но и таких важных в практическом отношении радионуклидов как полоний-210, актиний-227 и плутоний-238, а позднее - молибден-99.

ПОЛОНИЙ-210

Создание ядерного оружия инициировало рождение, становление и развитие многочисленных новых областей науки и техники. К их числу относится и создание промышленного производства полония-210. Полоний-210 был необходим для изготовления Po-Be ней-

тронных источников, использовавшихся в качестве нейтронного запала (НЗ) в ядерном оружии первого поколения.

До начала работ по ядерным проектам в США и в СССР полоний получали путем выделения его из природных сырьевых источников в индикаторных количествах. Работы, выполненные в довоенный период в Радиевом институте, позволили приступить в 1947 г. к разработке технологии получения полония-210 из облученного в ядерном реакторе висмута. Работы проводились под руководством Д. М. Зива. Расчеты накопления и методы измерения развивались в лаборатории Г. В. Горшкова. Был разработан метод самопроизвольного электрохимического выделения полония на медном порошке из азотнокислых растворов облученного висмута с последующей дистилляционной отгонкой. Разработанный метод был испытан в 1947-1948 гг. на укрупненной установке в НИИ-9. От НИИ-9 научное руководство работами осуществляла З. В. Ершова, от РИАН - Д. М. Зив. Одновременно с отработкой технологии ГСПИ-11 приступил к проектированию цеха промышленного производства полония-210 на заводе "Авангард" в Арзамасе-16. ГИРЕДМЕТ разрабатывал технологию получения висмута высокой чистоты. Первые экспериментальные партии висмута облучались на реакторе Ф-1 в лаб. 2 АН СССР (РНЦ "Курчатовский институт"), а затем на первом промышленном реакторе "А" комбината 817 (ПО "Маяк").

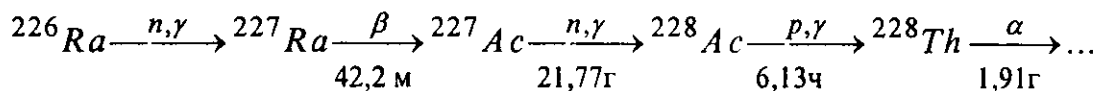
Большой комплекс работ, проведенных в Радиевом институте, ИАЭ, НИИ-9, заводе "Авангард", КБ-11, ГСПИ-11, комбинате 817, НИИХИММАШ, ГИРЕДМЕТ и др. организациях, позволил в кратчайшие сроки построить комплекс производственных зданий и наладить промышленное производство полония-210 и НЗ. Первые НЗ изготавливались в 1949 г. в специальной лаборатории в КБ-11, возглавлявшейся сначала А. Я. Апиным, а затем В. А. Александровичем. Активное участие в изготовлении первых НЗ принимал Д. М. Зив.

В 1956-1963 гг. Радиевый институт при участии завода "Авангард" разработал и испытал новую технологию выделения полония из облученной окиси висмута методом вакуумной дистилляции. Руководство работами от Радиевого института осуществляли Д. М. Зив и С. Л. Фаддеев, а от завода И. М. Горский. Опытная дистилляционная установка ДО-1, разработанная и изготовленная Московским НИИХИММАШ с участием завода "Авангард", была испытана в 1963-1964 гг. на заводе "Авангард" с реальными облученными блоками окиси висмута. При проведении одностадийного процесса были получены коэффициенты обогащения 10 000 и более. На второй стадии процесса конденсат обогащался полонием еще в 100 раз, в результате чего удавалось получать практически чистый полоний. В последующие годы были разработаны и испытаны и другие дистилляционные процессы выделения полония-210 из облученного висмута. В этих работах принимали участие С. Л. Фаддеев, Г. С. Сеницына, В. Н. Терин, О. Г. Феофилов, Ю. А. Корнилов, В. В. Федоров и др.

ПОЛУЧЕНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ АКТИНИЯ-227

Исследования химии актиния в Радиевом институте проводились с целью разработки способов его выделения для использования в изделиях радионуклидной техники в различных областях народного хозяйства. Среди 24 известных в настоящее время изотопов актиния находят применение три: ^{225}Ac , ^{227}Ac и ^{228}Ac ; из них только ^{227}Ac в силу высокого энерговыделения (14,5 Вт/г) и большого периода полураспада (21,7 г.) мог найти применение в радионуклидных источниках различного назначения.

Получение его в необходимых количествах из природного сырья невозможно из-за очень низкого содержания ($2 \cdot 10^{-10}$ г на 1 г урана). В настоящее время актиний-227 получают облучением радия-226 в ядерном реакторе по реакции:



В Радиевом институте В. В. Федоровым и В. А. Архиповым были проведены расчеты оптимального накопления актиния в зависимости от времени и мощности нейтронного потока.

Исследования химии актиния, разработки способов его выделения из облученного радия-226 и изготовление источников различного назначения в Радиевом институте начинались в лаборатории Д. М. Зива, с 1968 г. - в лаборатории В. Р. Клокман под руководством Г. С. Сеницыной.

Выбор способов и схем выделения актиния затруднен очень высоким энерговыделением, свойственным для системы облученного радия (до 1000 Вт/л). Поэтому любая схема должна предусматривать выведение из радиохимического процесса прежде всего изотопов радия, а также использование реагентов и процессов, наименее подверженных радиолитическим воздействиям. Исторически первой (1951-1956 гг.) была разработана осадительная схема выделения актиния с бромидным и спирто-эфирным осаждением радия с последующим гидроокисным и оксалатным осаждением актиния. Впервые в России были получены микрограммовые количества актиния. Позже (1960-1961 гг.) в полупроизводственных условиях была испытана осадительно-экстракционная схема, где этап перекисного осаждения ^{228}Th , как наиболее подверженный радиолитическим воздействиям, был заменен экстракционным отделением ^{228}Th с помощью ТБФ. Совместно с механическим заводом (г. Электросталь) был разработан технологический процесс и создано технологическое оборудование для проведения процесса на граммовых количествах облученного радия. Впервые были выделены весовые количества актиния, необходимые для изготовления источников промышленного и специального применения.

В развитие осадительно-экстракционной схемы выделения были исследованы более радиационно-устойчивые, чем ТБФ, экстрагенты, такие как алкилфосфорные кислоты (Д2ЭГФК), фосфинокиси (ТОФО) и экстрагенты из класса аминов: третичные (ТОА) и четвертичные аммониевые основания (РТЛА). Испытывались различные разбавители и их смеси, а также экстракция смесями экстрагентов (ТТА-ТБФ, ТТА-ТОФО), что позволяло за счет увеличения коэффициентов распределения снизить концентрации экстрагентов.

На основе этих исследований для выделения и очистки актиния были разработаны различные варианты распределительной хроматографии и осадительно-хроматографическая схема выделения актиния. Были исследованы возможности таких радиационно-устойчивых катионитов, как КФП и особенно неорганических сорбентов на основе фосфатов Sb и Sn.

Наименее подвержены радиационным воздействиям гетерогенные газофазные процессы. Поэтому были исследованы возможности выделения актиния и тория дистилляцией хлоридов (процесс протекает длительное время при высоких температурах - $\geq 1000^\circ\text{C}$). Наиболее перспективным оказался метод транспортных реакций с комплексообразованием в газовой фазе, позволяющий обеспечить герметизацию процесса и снижение температуры до 500°C . Был разработан процесс выделения актиния и тория из облученного радия с использованием хлорида алюминия в качестве комплексообразователя и транспортирующего агента.

Для контроля за технологическим процессом использовались возможности сочетания фотонейтронного и калориметрического методов определения ^{227}Ac и ^{228}Th . Были разработаны экспресс-методы определения актиния по собственному альфа-излучению методом распределительной хроматографии с Д2ЭГФК, по ^{223}Fr - методом электрофореза на бумаге и осадительным с фосфоромолибдатом аммония. Показана возможность использования для контроля за выделением актиния изотопа ^{212}Bi как метки без ее предварительного выделения, а также метода дистанционного гамма-контроля на отдельных этапах процесса. Для определения содержания ^{227}Ac и ^{228}Th в облученном радии без их разделения и выделения был предложен метод альфа- и гамма-спектрометрии герметично закрытых мишеней с индикаторными количествами радия, облучаемых в тех же условиях, что и основной образец.

Разработка технологических параметров выделения сопровождалась исследованиями химии этих процессов. Был исследован процесс захвата актиния при бромидном осаждении

радия. Для исследования условий гидроокисного осаждения была разработана уникальная, не имевшая аналогов в России ультрамикротехника исследования химических процессов в ультрамалых объемах (0,001 мл): стеклянный микроэлектрод, электромагнитная микрошалька, микронасос; выполнены и другие методические разработки. Этим методом была определена растворимость гидроокиси актиния, ее зависимость от pH раствора, влияние радиоллиза, состав осадка и pH начала гидролиза, оценена относительная основность (более сильное основание, чем гидроокись лантана); этим же методом были исследованы условия осаждения оксалата актиния и определен состав осадка, его растворимость и зависимость его от концентрации оксалат-ионов.

Методом электромиграции было исследовано комплексообразование актиния в растворах NaF, щавелевой и лимонной кислот, этилендиаминтетраацетат- и 1,2-диаминоциклогексантетраацетат-ионами. Были определены состав и константы образования комплексов, показана возможность разделения La и Ac, определения Ac по Fr, оценен характер связи в комплексах. Образование отрицательно заряженных нитратных комплексов отмечено в водно-спиртовых растворах методом ионообменной хроматографии на АВ-23М.

Исследование условий экстракционных процессов с указанными экстрагентами позволило изучить механизм процессов, состав экстрагируемых комплексов, константы реакции.

Методами газовой хроматографии и транспортных реакций было впервые показано образование в газовой фазе комплексов Ra, Th и Ac с AlCl_3 и определен их состав: $\text{RaCl}_2 \cdot 2\text{AlCl}_3$; $\text{ThCl}_4 \cdot 2\text{AlCl}_3$ и $\text{AcCl}_3 \cdot 3\text{AlCl}_3$.

Исследование указанных процессов позволило разработать ряд препаративных методов получения радионуклидов $^{225}, ^{227}, ^{228}\text{Ac}$, $^{227}, ^{228}, ^{229}, ^{234}\text{Th}$, $^{223}, ^{224}\text{Ra}$, $^{210}, ^{212}\text{Pb}$ из различных стартовых материалов (облученного ^{226}Ra , выдержанных солей тория, радий-мезоториевых препаратов, ^{238}U , ^{233}U) с использованием осадительных и экстракционных приемов, ионообменной и распределительной хроматографии, методов ядер отдачи и эманирования.

Разработка методов получения радионуклидов Ac и Th обеспечила возможность их применения в различных областях науки и техники. Было исследовано деление ^{227}Ac нейтронами, дейтронами и гамма-квантами, исследован спектр ^{225}Ac , распад ^{223}Fr . Препараты ^{227}Ac и ^{228}Th использовались при разработке государственного эталона аэрозолей (ВНИИФТРИ). На основе ^{228}Th изготовлены первые образцовые источники гамма-излучения ОСГИ. Для нейтронного каротажа в промышленной геофизике были изготовлены и испытаны разъемные с регулируемым выходом и стационарные Ac-Be нейтронные источники (ВНИИЯГ). Для определения актиния в урановых рудах были приготовлены первые жидкие эталоны актиния.

Получение первых весовых количеств актиния позволило исследовать калориметрическим методом тепловой эффект его излучения, оценить вклад каждого вида излучения, определить тепловой эффект на распад равновесного актиния, уточнить период полураспада. Определено сечение захвата нейтронов и выход нейтронов Ac-Be источников. Был разработан фотонейтронный метод определения ^{228}Th в облученном ^{226}Ra . Эманлирующие и источники ядер отдачи $^{223}, ^{224}\text{Ra}$ изготавливались для изучения диффузии в материалах и контроля герметичности покрытий (ФТИ, г. Сухуми). Источники излучения на основе ^{227}Ac использовались для снятия статического электричества, при разработке приборов технологического контроля (ВНИИРТ). Был разработан быстрый метод определения эманлирующей способности различных материалов. Получение препаратов $^{227}, ^{228}\text{Ac}$ позволило решить проблему очистки концентрата редкоземельных элементов от актиния и других радиоактивных примесей (ГИРЕДМЕД, Днепродзержинский комбинат).

Разработка генератора для получения ^{227}Th позволила использовать его для контроля в технологических процессах (ГХК). Источники на основе ^{228}Th использовались в биомедицинских исследованиях задержки аэрозольных частиц в органах дыхания (ВНИИПМ), а также для обеспечения учебных программ (ЛГУ). Предпринимаются попытки применения $^{223}, ^{224}\text{Ra}$ в онкологических исследованиях. Рассматриваются возможности использования



Группа радиохимиков-технологов лаборатории Б. П. Никольского.

Слева направо, 1-ый ряд: Н. Б. Высокоостровская, В. И. Парамонова, Б. П. Никольский, А. М. Гуревич, Е. И. Ильенко.

2-ой ряд: В. И. Андреев, Н. В. Куценко, А. М. Трофимов, З. П. Морозова, М. В. Посвольский, Н. Н. Горбовская, Г. С. Марков, Г. А. Синеева



Академик А. А. Гринберг



В. И. Парамонова и С. А. Бартеньев



Б. Я. Зильberman



М. Ф. Пушленков



Л. Н. Лазарев



Р. И. Любцев



В. Н. Романовский



Б. Я. Галкин



Б. Н. Зайцев и В. П. Попик



Ю. М. Толмачев



В. Н. Ушатский



Г. С. Синицына



А. С. Кривохатский



Слева направо, в первом ряду: В. Н. Аксенов, А. С. Кривохатский, В. Г. Савоненков.
Во втором ряду: Е. И. Бирюков, Ю. Г. Петров, Ю. В. Дубасов



Э. М. Пазухин и С. М. Кочергин работают в боксе



Сотрудники Радиевого института на ядерном полигоне



В. Г. Савоненков, С. В. Бутомо, И. Ф. Борисенко



Ю. В. Кузнецов



Л. И. Гедеонов



В. П. Тишков



А. С. Алой



В. К. Легин



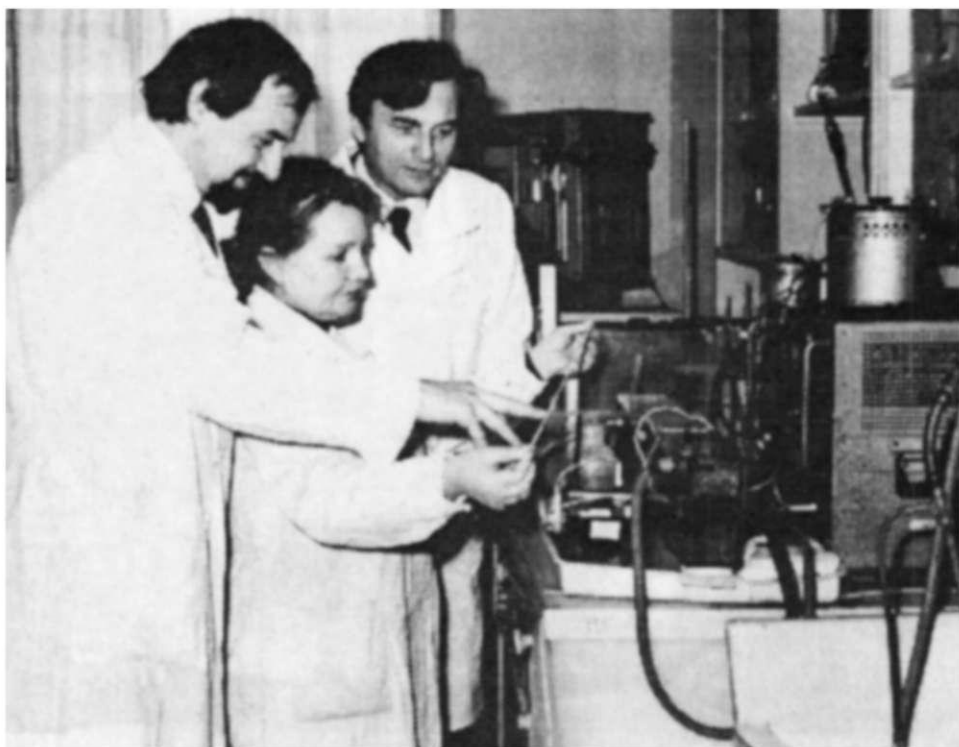
О. С. Цветков (стоит) и А. В. Мадлевский работают на установке нейтрон-нейтронных совпадений, входящих в состав отраслевого эталона единицы потока нейтронов



А. А. Липовский



Е. А. Шашуков



А. М. Фридкин , Т. П. Макарова, А. В. Степанов



Г. А. Акопов в лаборатории



Д. Н. Суглов



В. И. Гребенщикова



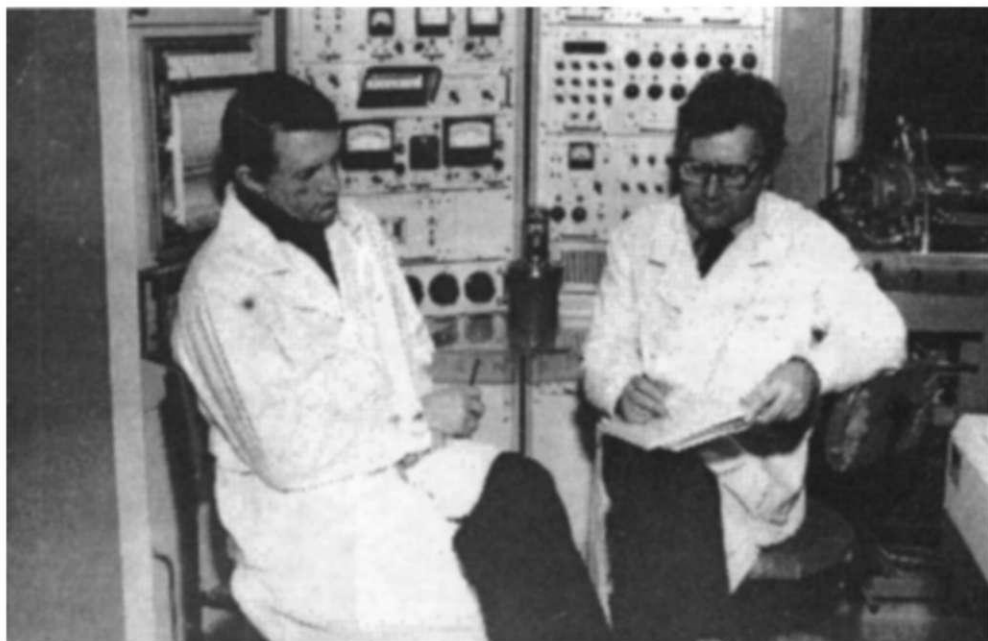
В. Р. Клокман



Л. В. Комлев



Северный Казахстан, озеро Кумдыкуль.
Слева направо: Е. Б. Андерсон, Л. В. Комлев, М. С. Филиппов



Е. Б. Андерсон и В. Г. Заславский



В. Г. Савоненков



Д. М. Зив



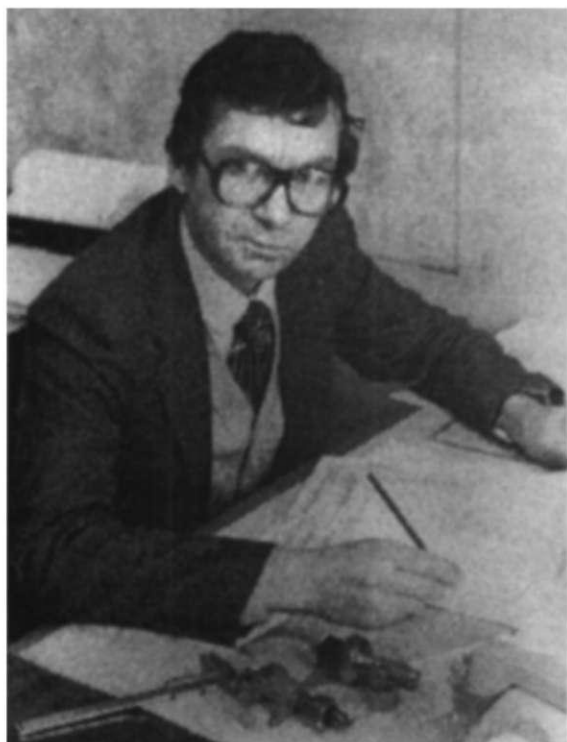
В. Г. Шумков



С. Л. Фаддеев и В. В. Федоров



Н. Б. Высокоостровская



О. Г. Трейман



В. А. Архипов



Лаборатория В. Г. Шумкова.

Слева направо, 1-ый ряд: О. Г. Феофилов, Э. С. Фатеева, Е. А. Волкова, Н. М. Кузьмина, В. В. Белова;

2-ой ряд: В. И. Барышниченко, Е. Г. Найденов, Ю. Г. Покровский, В. Г. Шумков, Н. В. Бавшина, А. А. Михайлов;

3-ий ряд: И. Ю. Павлов, Л. И. Лайчукин, С. И. Кузнецов, О. А. Мигуньков, А. А. Щербанов, М. Б. Евстафьев, А. И. Костылев, В. Г. Рогозовец



Б. С. Дзепепов



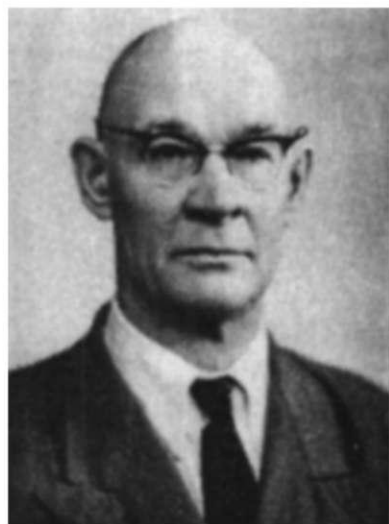
К. А. Петржак



Н. А. Перфилов и М. Г. Мещеряков на заседании Ученого совета в ЛВЭ ОИЯИ



Ю. А. Немилов



Г. В. Горшков



М. И. Якунин и Ю. С. Савченков



Лаборатория Н. А. Перфилова.

Слева направо, 1-ый ряд: В. П. Эйсмонт, О. В. Ложкин, Н. А. Перфилов, Е. Н. Бентелева, З. И. Соловьева. **2-ой ряд:** А. И. Обухов, М. Л. Медведева, Л. И. Царегородцева, С. Т. Семенова, В. Д. Дмитриев, Н. Р. Новикова, В. И. Захаров, Г. В. Меркурьева, Е. В. Баландина, Т. А. Задорская.
3-ий ряд: В. В. Авдейчиков, Е. А. Ганза, О. Е. Шигаев, Е. С. Рожков, Н. П. Кочеров, В. К. Сусленко, А. В. Воронов, В. Леонов, В. Г. Богданов, В. А. Плющев, А. Н. Смирнов, В. И. Богатин, Э. Г. Ткаченко



А. А. Римский- Корсаков



В. В. Смирнов и З. И. Соловьева



В. П. Эйсмонт



О. В. Ложкин



П. И. Федотов (в центре)
с сотрудниками Н. М. Казариновым и А. Т. Коренковым



Подготовка эксперимента на нейтронном генераторе Радиевого института, НГ-150М.
Слева направо: Л. В. Драпчинский и специалисты Технического университета в г. Дрездене
(Германия) Р. Тайхнер и Р. Арльт



Отдел научно-технической информации.

Группа наверху слева: Е. И. Ильенко, Л. Г. Царицына, Н. А. Степанова.

Группа внизу слева, 1-ый ряд: А. А. Панова, Э. С. Кальницкая, Н. П. Белякова,
М. А. Бутото; **2-ой ряд:** Н. С. Колесникова, Е. В. Васильева, Т. Е. Рех, Т. А. Робина.

Группа справа: В. С. Дейнов, Е. В. Волин

^{228}Th в приборах контроля удобрений и источников на трех радионуклидах ($\text{Pa}+\text{Al}+\text{Th}$) при разработке приборов на совпадениях для геологоразведки (Институт минерального сырья).

Основными исполнителями разработок технологии получения препаратов актиния и тория, а также исследований химии актиния были Б. И. Шестаков (во многих случаях - руководитель работ), Л. И. Абрамова, Е. А. Волкова, В. М. Гарбузов, Г. В. Зарубин, Ю. А. Корнилов, Н. А. Плющева, В. А. Цирлин, И. А. Шестакова. В ряде работ принимали участие также А. Ф. Беляцкий, С. В. Бутомо, Т. П. Макарова, А. В. Степанов, Г. М. Суходолов.

В изготовлении источников радиоактивных излучений на основе ^{227}Ac и ^{228}Th принимали участие В. А. Архипов и В. В. Федоров, а в исследовании свойств излучений этих источников - Г. В. Горшков, С. П. Хормушко, Н. С. Шиманская, Ю. А. Селицкий, Б. С. Дзельев, Р. Б. Иванов.

ПЛУТОНИЙ-238

В начале 60-х годов в СССР в связи с развитием отечественной космической техники встал вопрос о необходимости обеспечения ее надежными и долговременно работающими источниками электрического питания. К числу таких источников относятся радиоизотопные термоэлектрические генераторы (РИТЭГ) - устройства, преобразующие в электрическую энергию тепло, выделяющееся при радиоактивном распаде.

Наиболее пригодным радионуклидом для этих целей является плутоний-238, образующийся при облучении нептуния-237 в ядерном реакторе. Первые работы по облучению нептуния-237 и выделению граммовых количеств плутония-238 были проведены совместно специалистами НИИАР, Радиевого института, ФЭИ и ВНИИНМ на базе НИИАР и ФЭИ. Было переработано 75 облученных в реакторе СМ-2 мишеней, содержащих 300 г диоксида нептуния-237, и выделено около 30 г плутония-238.

Первые наработки плутония-238 были проведены по экстракционной технологии сначала с применением в качестве экстрагентов аминов, а затем трибутилфосфата и аминов. Но по разным причинам (недостаточная радиационная стойкость ТБФ, неудовлетворительное аппаратное решение и т. д.) экстракционная технология не была внедрена в производство. Работу по созданию экстракционной схемы вначале возглавлял А. А. Чайхорский, а затем М. Ф. Пушленков. Ответственными исполнителями были Б. Я. Галкин и В. Г. Шумков.

Параллельно с разработкой экстракционной технологии в Радиевом институте начались исследования по созданию сорбционного процесса выделения плутония-238 из облученного нептуния. Работа проводилась под руководством Б. П. Никольского и В. И. Парамоновой (ответственные исполнители - Н. Б. Высокоостровская и В. П. Попик).

В Радиевом институте уже был накоплен большой опыт разработки сорбционных процессов для выделения актинидов из азотнокислых растворов. Такие процессы получили внедрение на радиохимических предприятиях. Кроме того, в 1964 г. появилась американская публикация с описанием сорбционной схемы установки по выделению плутония-238 из облученного нептуния. Все это в большой степени явилось стимулом для разработки сорбционной технологии.

Была разработана целносорбционная схема выделения плутония-238 из облученного нептуния-237 с использованием в качестве сорбента винилпиридинового анионита.

Схема включала процесс растворения облученных блоков "ДН" (блоки на основе диоксида нептуния и металлического алюминия) в азотной кислоте, три сорбционных цикла, осаждение плутония в виде оксалата и получение диоксида плутония. Полученный диоксид плутония направлялся на изотопный обмен (замена ^{16}O на ^{18}O для снижения нейтронного фона диоксида по реакции (α, n)).

Основными разработчиками схемы были С. А. Бартенев - процесс растворения, Н. Б. Высокоостровская - сорбция, Л. И. Крылов - оксалатное осаждение и прокатка, Ю. А. Копалкин - производство ионитов.

Схема имела существенные отличия от американской:

- использование значительно более радиационно-стойкого отечественного винилпиридинового анионита АВ-23М и ВП-1АП вместо стиролдивинилбензольного DOWEX - 1;
- бесфторидное растворение нептуниевых блоков, значительно снижающее коррозионное воздействие среды;

– использование несолеобразующего восстановителя для плутония: аскорбиновой кислоты, а не сульфата железа (II), как в американской схеме.

В процессе сорбции решались три задачи: очистка актинидов от осколочных элементов и алюминия, разделение плутония и нептуния, очистка плутония от примесей легких элементов, имеющих высокое сечение реакции (α, n) и концентрирование плутония.

Основные трудности, с которыми пришлось столкнуться при разработке технологии, были связаны с высокой альфа-активностью и, соответственно, энерговыделением плутония-238. Радиационно-химические эффекты осложняли стабилизацию валентных форм плутония и нептуния, особое внимание пришлось обратить на радиационную устойчивость винилпиридиновых сорбентов, используемых при сорбции плутония и, наконец, потребовалась специальная отработка процесса осаждения высокоактивной соли оксалата плутония-238. Все эти трудности были успешно преодолены, процесс был разработан и опробован в горячих камерах ПО "Маяк" на реальных блоках "ДН".

На основе технического задания (ТЗ), выданного Радиевым институтом, ВНИПИЭТ спроектировал установку 45-03 для получения плутония-238. Установка была смонтирована на изотопном заводе ПО "Маяк" и в 1973 г. введена в эксплуатацию. Получаемый на ней плутоний позволил удовлетворить потребности страны в изотопных источниках тока на его основе.

Пуск установки осуществлялся при непосредственном участии сотрудников Радиевого института. Основными исполнителями работ от Радиевого института были С. А. Бартенев, Н. Б. Высокоостровская, В. С. Дубровин, Л. И. Крылов; от ПО "Маяк" - Н. А. Федоров, В. И. Светлаков, О. И. Трифонов, В. Ф. Кириллов.

Научными руководителями от Радиевого института были Б. П. Никольский и В. И. Парамонова, от ПО "Маяк" - Б. В. Никипелов, В. А. Балакин и Ю. А. Малых.

Почти одновременно с задачей создания источников энергии для космической техники встал вопрос получения плутония-238 особой чистоты ("биомедицинского" плутония) для электрокардиостимуляторов сердца.

В отличие от "космического" плутония на "биомедицинский" плутоний были установлены гораздо более жесткие нормы по выходу нейтронов и гамма-излучению. В связи с этим продукт должен был быть хорошо очищен от примесей легких элементов и от продуктов распада плутония-236, являющихся гамма-излучателями (в первую очередь урана-232 и тория-228). В качестве сырья для получения "биомедицинского" плутония использовался диоксид плутония изотопных источников, отработавших ресурс времени.

Первостепенными задачами при разработке технологии были: обеспечение чистоты реактивов, максимально исключающей примеси легких элементов и обеспечение аналитического контроля, поскольку в конечном продукте их содержание не должно было превышать для различных элементов 10^{-4} - 10^{-5} %.

В результате проведенной работы была принята схема, включающая процесс окислительного растворения диоксида плутония, очистку плутония от тория на фосфатном катионите и очистку от урана, легких элементов и других примесей на винилпиридиновом анионите с использованием особо чистых реактивов.

Основными разработчиками схемы были Н. Б. Высокоостровская, Г. П. Никитина, Ю. Е. Иванов, Л. И. Крылов.

Позднее схема была усовершенствована (исключен цикл катионообменной очистки) и выбран режим, позволяющий всю очистку получить на одном цикле сорбции на анионите. Эта разработка была выполнена под руководством Н. Б. Высокоостровской.

Описанная выше технология была внедрена на установке 45-14 изотопного завода ПО "Маяк". Получаемый на установке плутоний имел нейтронный фон $1,68 \cdot 10^4$ н/с/г и гам-

ма-фон $3,5 \cdot 10^{-3}$ мГэкв/г, что соответствовало необходимым требованиям ($1,7 \cdot 10^4$ н/сг Pu и $5 \cdot 10^{-3}$ мГэкв/г Pu) на этот продукт. После изотопного обмена плутоний направлялся на изготовление источников тепла для электрокардиостимуляторов.

Установка 45-14 была небольшой, и тогда казалось, что очень скоро ее производительности будет недостаточно для удовлетворения потребности страны в "биомедицинском" плутонии-238. Чтобы решить задачу повышения производительности, по ТЗ Радиевого института была спроектирована и построена на изотопном заводе ПО "Маяк" установка "Высота". Установка включала узел электрохимического растворения диоксида плутония (разработчики Г. П. Никитина и Ю. Е. Иванов) и сорбционной очистки плутония от продуктов распада плутония-236 и примесных элементов на винилпиридиновом анионите (разработчики - Н. Б. Высокоостровская, Б. А. Червяков, С. А. Стрелков).

Однако, в связи со свертыванием программы РИТ для электрокардиостимуляторов под влиянием "чернобыльского синдрома" установка не была пущена в эксплуатацию.

Когда в начале 90-х годов потребовалась наработка большой партии высококачественного плутония-238 из диоксида плутония для этих целей, использовали модернизированную установку 45-03, где узел химического растворения блоков ДН был заменен узлом электрохимического растворения диоксида плутония-238 (Г. П. Никитина, Ю. Е. Иванов).

МОЛИБДЕН-99

Одним из основных изотопов, используемых в ядерной медицине, является технеций- 99m . На его долю приходится более 70 % всех диагностических операций. Источником для получения этого изотопа служит молибден-99, образующийся в реакторах при делении урана-235.

К началу 80-х годов молибден в СССР нарабатывался в небольших количествах на реакторе филиала НИФХИ (г. Обнинск). С целью расширения базы для его производства в 1983 г. было принято решение создать установку "М" для выделения молибдена-99 из облученного урана на изотопном заводе ПО "Маяк".

Технология получения молибдена, принятая в НИФХИ, не устраивала ПО "Маяк", поскольку она была основана на использовании хлоридных, а не азотнокислых растворов. Новую технологию было предложено разрабатывать Радиевому институту.

Такая работа началась в 1983 г. В отличие от экстракционно-сорбционной схемы НИФХИ, предложенная Радиевым институтом схема была целносорбционной. В качестве исходного сырья предлагалось использовать блоки промышленных реакторов на основе высокообогащенного диоксида урана и алюминия.

Технологическая схема установки включала три узла:

- узел растворения облученных блоков;
- узел сорбционного выделения и глубокой очистки молибдена-99;
- систему газоочистки для улавливания газообразных и легколетучих продуктов деления.

В зависимости от типа облученного блока его можно было растворять либо полностью в азотной кислоте (в присутствии ртутного катализатора), либо сначала алюминиевая оболочка растворялась в щелочно-нитратном растворе, а в азотной кислоте растворялся только сердечник блока. Полученный азотнокислый раствор направлялся на сорбционный передел.

На первом цикле сорбции предусматривалось использование фосфоновокислых катионитов (СФ-5 или КРФ-20Т), которые позволяют из азотнокислых растворов (концентрация азотной кислоты до 3 моль/л) проводить извлечение молибдена-99 и урана с последующим разделением их на стадии десорбции. На первом этапе работ предполагалось проводить десорбцию молибдена-99 щелочными растворами, а урана - растворами соды.

Исследования поведения продуктов деления на фосфатных катионитах и комплексообразования молибдена в кислых растворах позволили разработать вариант "кислой" десорбции молибдена с использованием органических кислот. Новый вариант первого сорб-

ционного цикла дал увеличение коэффициента очистки молибдена-99 от радиоиода на порядок. Кроме того, отпала необходимость в межцикловой корректировке растворов.

На втором цикле было предложено использовать винилпиридиновый анионит, ВП-1АП, хорошо зарекомендовавший себя в радиохимической практике.

В качестве сорбента для третьего цикла был предложен мелкосферический гранулированный оксид алюминия.

Проведенное изучение сорбционного поведения продуктов деления и основных химических примесей показало, что предложенная схема позволяет получить растворы молибдена-99, удовлетворяющие отечественным и мировым требованиям качества данного вида продукции. Радионуклидная чистота препарата составляла 99,98 %.

На основе данных, полученных при исследовании радиационно-химической устойчивости используемых сорбентов в условиях эксплуатации, было оценено время службы ионитов.

Для обеспечения контроля качества конечного продукта совместно с ПО "Маяк" разработаны аналитические методики гамма-спектрального анализа растворов молибдена-99, определения альфа-активности и содержания бета-излучателей в них.

При производстве молибдена особое внимание было уделено вопросам очистки газов. Наибольшую опасность в этом процессе представляет иод-131, содержание которого в облученной мишени достигает 200-300 Ки, из которых 10-15 % переходит в газовую фазу. Поэтому основная функция системы газоочистки установки "М" заключалась в улавливании иода, присутствующего в сбросных газах в различных химических формах в виде паров и аэрозолей.

Потребовалось создание двух систем очистки газов: технологическая система обеспечивала очистку газов из аппарата-растворителя, а вентиляционная система обеспечивала очистку воздуха, поступающего из горячей камеры, в которой размещалось основное оборудование установки. Технологическая система включала щелочные и кислотные поглотители, аэрозольный фильтр на основе стекловолокна и адсорбционные колонны с алюмогелем, импрегнированным солями серебра.

Вентиляционная линия, предназначенная для очистки от йода, включала аэрозольный фильтр глубокой очистки, фильтр тонкой очистки и адсорбционную колонну с активированным углем, содержащим иодистый калий.

При проведении опытных операций на установке "М" сброс радиоиода в окружающую среду не превышал 0,5 мКи на операцию, что было изначально ниже допустимых норм выброса иода-131.

Организатором и руководителем работ по созданию технологии установки "М" на начальном этапе была В. И. Парамонова, а после ее смерти Н. Б. Высокоостровская. Основными разработчиками технологии были: узла растворения - С. А. Бартенев; узла сорбции - Н. Б. Высокоостровская, М. П. Зыков, А. В. Егоров, С. А. Стрелков, узла газоочистки - В. К. Веселов.

После проведенных в 1991 г. испытаний установка "М" была подготовлена к сдаче в эксплуатацию. Однако после смерти основного руководителя работ Н. Б. Высокоостровской и в связи с начавшимися в стране "перестроечными" процессами работа была остановлена.

МЕЧЕННЫЕ ТРИТИЕМ БИОЛОГИЧЕСКИ АКТИВНЫЕ СОЕДИНЕНИЯ

В 1963 г. в Радиовом институте по инициативе и при непосредственном участии директора института В. М. Вдовенко была создана лаборатория синтеза меченых биологически активных соединений. Основной задачей новой лаборатории было продолжение и развитие работ, начатых в 1962 г. группой сотрудников под руководством В. М. Вдовенко и В. Н. Бобровой (Э. Г. Айрапетянц, Л. С. Гордеева, И. И. Ломоносов, С. В. Патокин, Л. Н. Румянцева, О. А. Рысьев, А. В. Жарков, А. Д. Шестаков), которые занимались синтезом и исследованием радиоактивных противоопухолевых препаратов. Идея исследования

зом и исследованием радиоактивных противоопухолевых препаратов. Идея исследования заключалась в подборе радиоактивных препаратов, которые накапливаются клетками опухоли и создают внутри больной клетки терапевтическую дозу облучения.

В качестве радионуклида был выбран тритий - радиоактивный изотоп водорода, который является мягким β -излучателем, обладает низкой радиотоксичностью и создает дозовое поле облучения только внутри пораженной клетки, щадя соседние здоровые клетки и ткани.

В ходе исследования было синтезировано несколько радиоактивных противоопухолевых препаратов - $[6\text{-}^3\text{H}]$ нафтидон (2-метил-1,4-нафтохинон дифосфат натрия), $[5,6,7\text{-}^3\text{H}]$ нафтидон, $[6\text{-}^3\text{H}]$ викасол (2-метил-1,4-диоксо-2-нафталенсульфонат натрия), $[2,5,6\text{-}^3\text{H}]$ ДОФА (3-[3,4-диоксифенил]-аланин) и $[3,3,4,5,6\text{-}^3\text{H}]$ пирокатехин.

Совместно с радиологическими отделами НИИ онкологии и медицинской радиологии БССР и Института биофизики МЗ СССР, кафедрой биохимии Военно-медицинской академии и отделом общей хирургии Института экспериментальной и клинической онкологии АМН СССР были проведены исследования противоопухолевой активности $[5,6,7\text{-}^3\text{H}]$ нафтидона и $[2,5,6\text{-}^3\text{H}]$ ДОФА, распределения их в животных-опухоленосителях, токсичности и биологического действия препаратов. Была подтверждена их несомненная противоопухолевая активность. Однако выхода в онкологическую практику они не нашли, так как эффективность этих препаратов была соизмерима с уже применявшимися в онкологических клиниках химиотерапевтическими препаратами, имевшими такие очевидные преимущества, как отсутствие радиационной нагрузки на организм пациента и простоту применения.

При решении проблем, связанных с синтезом радиоактивных противоопухолевых препаратов, сотрудниками лаборатории был приобретен ценный опыт работы с мечеными тритием биологически активными препаратами: разработан ряд методов введения тритиевой метки в органические молекулы, сконструирована опытно-производственная установка для работ с газообразным тритием, отработаны условия хранения препаратов с высокой молярной радиоактивностью, методы их очистки и анализа.

Широкое использование метода меченых молекул в биологических и медицинских исследованиях привело к тому, что основным направлением деятельности лаборатории в 70-х годах становится разработка технологии получения биологически активных соединений различных химических классов, меченных тритием, иодом-125 или углеродом-14.

В медицине меченые аналоги лекарственных препаратов применяются на предварительных стадиях изучения новых лекарственных средств с целью выяснения их фармакокинетики и получения разрешения на клиническое применение, а в последующем - при изучении механизма действия лекарства. Меченные тритием компоненты нуклеиновых кислот и их производные используют в медицинской генетике при изучении наследственных заболеваний и иммунитета.

В биохимических исследованиях меченые препараты используют при изучении отдельных цепей метаболизма (углеводного, липидного, нуклеинового обмена и др.) у микробов, растений, животных, при установлении структуры и функций белков и других клеточных веществ, при исследовании в живой клетке биохимических процессов, поддерживающих ее жизнедеятельность и размножение.

Молекулярная биология и геновая инженерия используют метод меченых атомов для установления структуры и изучения функций нуклеиновых кислот, для тестирования активности ферментов нуклеинового обмена (ДНК- и РНК-полимераз, РНК-аз, фосфодиэстераз и др.), для установления молекулярной структуры генов и локализации генетических элементов на хромосомах и т. д.

Целый ряд вопросов, которыми занимается сельскохозяйственная наука, может быть решен при использовании меченых соединений. К таким вопросам относятся следующие: повышение устойчивости зерновых культур к воздействию погодных условий, фармакокинетические исследования новых химиотерапевтических препаратов для борьбы с заболеваниями

ми животных и птиц, применение феромонов для борьбы с насекомыми- вредителями и для повышения продуктивности сельскохозяйственных животных и др.

Разнообразие задач, решаемых с помощью меченых биологически активных препаратов, поставило лабораторию перед необходимостью освоения как методов синтеза разнообразных классов химических соединений, так и разнообразных методов введения в них тритиевой метки.

В короткие сроки номенклатура меченных тритием препаратов, выпускаемых на опытно-производственной установке, была увеличена с 21 наименования (1971 г.) до 111 (1983 г.), и далее - до 188 (1996 г.). Прделанная работа была отмечена государственной премией СССР за 1983 г., которая была присуждена коллективам НПО "ГИПХ", ИМГ АН СССР и Радиевого института им. В. Г. Хлопина за разработку и освоение производства меченных тритием соединений для физико-химической биологии и биотехнологии. Лауреатами Государственной премии стали Ю. Л. Каминский, который возглавляет лабораторию с 1975 г., и Л. Н. Румянцева - руководитель технологической группы.

Основную часть номенклатуры меченых соединений, выпускаемых в Радиевом институте, составляют компоненты нуклеиновых кислот - природные аналоги и их модифицированные производные, углеводы, гетероциклические ароматические соединения, антибиотики, а также аналоги лекарственных препаратов, относящиеся к различным химическим классам и проявляющие различную биологическую активность: противоопухолевые препараты ($[^3\text{H}]$ фторафур, $[^3\text{H}]$ арабинофуранозилцитозин), витамины и их аналоги ($[^3\text{H}]$ викасол, $[^3\text{H}]$ холин хлорид), противовирусные препараты ($[^3\text{H}]$ ацикловир), средства, действующие на центральную нервную систему ($[^3\text{H}]$ диазепам, $[^3\text{H}]$ имипрамин, $[^3\text{H}]$ кофеин) и другие (Г. П. Акулов, А. Д. Шестаков, Л. А. Яковлева).

Для введения тритиевой метки в органические молекулы были использованы различные методы: гетерогенный каталитический обмен с газообразным тритием, каталитическое восстановление галогенпроизводных или функциональных групп в молекуле предшественника, прямой химический синтез, а также ферментативный синтез с различными ферментными системами.

Для очистки и выделения целевых меченых продуктов широко используется колоночная ионообменная, адсорбционная и гельхроматография, а в последнее время - препаративная высокоэффективная жидкостная хроматография (Б. К. Куделин). Для очистки препаратов по окончании сроков хранения от продуктов радиолиза чаще всего применяется препаративная тонкослойная хроматография.

В лаборатории синтеза меченых биологически активных соединений проводилось изучение механизмов и кинетики реакций, используемых для введения тритиевой метки в органические соединения, исследовались особенности энзиматических синтезов меченных тритием соединений высокой молярной активности. Полученные результаты позволяли выбрать оптимальные условия технологического процесса, дающие наибольший выход целевого продукта и позволяющие ввести в молекулу количество трития, близкое к теоретическому, т. е. получить препараты с высокой молярной активностью (более 1000 ТБк/моль). Дальнейшее повышение молярной активности препаратов, что особенно важно для компонентов нуклеиновых кислот, используемых для исследования в области генной инженерии, шло по пути повышения кратности метки, т. е. введения двух, трех и т. д. атомов трития в одну молекулу (2000-3000 ТБк/моль).

Успешным оказалось применение метода твердофазного каталитического изотопного обмена на катализаторах палладиевого ряда в атмосфере трития. Этот метод особенно удобен для введения метки в экзотические или сложные молекулы, для которых трудно синтезировать подходящие предшественники.

Современные требования, предъявляемые к качеству меченных тритием препаратов, очень высоки. Помимо высокой молярной активности потребители заинтересованы в высокой радиохимической чистоте и химической однородности. Эти требования определили развитие в лаборатории исследований особенностей поведения высокоактивных препаратов в различных хроматографических процессах, применяемых для очистки; особенностей измере-

ния препаратов, меченных мягкими β -излучателями. Результатами этих исследований явился ряд публикаций, докладов на конференциях и симпозиумах (И. И. Ломоносов, Б. К. Куделин, О. А. Рысьев), а также создание оригинальных конструкций счетчиков, в основу работы которых положен сцинтилляционный метод. Были разработаны и успешно применяются в лаборатории следующие приборы: токовый сцинтилляционный счетчик для измерения β -излучения трития в жидких пробах, сцинтилляционный сканирующий счетчик для измерения β -излучения трития на хроматограммах, сцинтилляционный счетчик совпадений для измерения β -излучения трития в жидких пробах. Почти во всех оригинальных приборных разработках лаборатории принимал участие Н. А. Суров, который награжден орденом Дружбы народов и занесен в Книгу почета патентной службы Министерства.

Результаты научно-исследовательской работы сотрудников лаборатории опубликованы в виде монографий и 68 статей в 23 научных журналах, таких как "Радиохимия", "Химия природных соединений", "Журнал общей химии", "Journal of Labelled Compounds and Radiopharmaceuticals" и др. Активное участие сотрудники лаборатории принимали в конференциях и совещаниях как внутри страны, так и за рубежом (11 совещаний и симпозиумов, 34 доклада - всесоюзные; 8 конференций и симпозиумов, 22 доклада - международные).

Практическим результатом научной деятельности лаборатории было успешное удовлетворение потребностей заказчиков в меченных тритием препаратах и постоянное расширение номенклатуры.

С 1973 до 1991 г. объем поставок изотопной продукции вырос в 6 раз и достиг уровня 40-50 ГБк/год. Количество потребителей, которыми являлись медицинские, медико-биологические, биохимические институты, а также лаборатории различного профиля в университетах и специализированных научных центрах, расширилось с 16 в 1973 г. до 116 в 1989 г. Опытные партии меченых соединений были направлены в 215 учреждений 64 городов России и ближнего зарубежья.

С 1993 г. в лаборатории начали успешно развиваться работы по синтезу органических соединений, меченных углеродом-14 (Г. П. Акулов) и по регенерации газообразного трития из отработавших свой срок изделий (Б. К. Куделин).

ЯДЕРНАЯ МЕДИЦИНА

Радиевый институт был создан в связи с необходимостью промышленного получения радия. И, наряду с другими проблемами, проблема использования радиоактивных излучений в лечебных целях была в поле зрения института уже с 20-х годов. В начале 30-х годов Е. С. Щепотьевой была предложена методика приготовления искусственных радоновых ванн, основанная на извлечении радона из растворов солей радия. Этот принцип с различными усовершенствованиями используется до настоящего времени.

В 1964 г. большая группа сотрудников института (руководители В. И. Кацапов и Г. И. Гайдук) приняла участие в монтаже и наладке полуавтоматической установки для отпуска радоновых ванн в одной из больниц города. В течение длительного времени надзор за ее работой и ее усовершенствование проводили сотрудники института В. Г. Потапов, В. А. Соколов, В. А. Голубев. Для Центра квалифицированной помощи (Москва) по техническому заданию, подготовленному В. Г. Потаповым и В. А. Соколовым, была спроектирована и создана автоматическая установка для отпуска радоновых процедур с различной объемной активностью радона. В институте для исследовательских и практических целей по производству радонового концентрата была создана полупромышленная установка "Радон".

Для нужд местной радонотерапии, которую многие врачи считают одной из самых эффективных физиотерапевтических процедур при лечении заболеваний опорно-двигательного аппарата, была разработана технология приготовления и изучены свойства радонового масла с удельной активностью до 150 кБк/л (В. Г. Потапов и В. А. Соколов). В течение многих лет оно поставлялось лечебным учреждениям Санкт-Петербурга.

Было уделено большое внимание созданию твердотельных генераторов радона. Разработаны два типа генераторов: на основе расплавов солей (Ю. И. Родионов) и на гидроксиде железа (В. А. Цирлин). Оба типа генераторов нашли применение в различных отраслях народного хозяйства (геология, медицина и т. п.).

Разработана технология изготовления твердых препаратов радона на основе его клатратных соединений для медицинских целей массой ~50 мг и геофизических - 1-10 г с суммарной активностью от 0,4 до 400 МБк (Л. Н. Лазарев, А. А. Палладиев, В. Г. Потапов, В. А. Соколов). Твердые препараты имеют ряд существенных преимуществ перед жидкими: их можно безаварийно поставлять в значительных количествах практически в любую точку земного шара.

Для изготовления твердотельных препаратов радона, "радоновых таблеток", была создана установка для радоновой лаборатории "Ларад" и собственная экспериментальная установка (К. А. Курринен, А. А. Палладиев, И. В. Чубаров). Все методики, препараты и установки имели соответствующие разрешения от органов государственного надзора.

В 30-х годах получило развитие и другое направление использования радиоактивных изотопов в медицине.

Инициатива развития работ по ядерной медицине в Радиевом институте принадлежит Юрию Аркадьевичу Селицкому, который еще в 70-х годах рассматривал возможности создания в Радиевом институте центра с позитронно-эмиссионным томографом (ПЭТ). Поскольку стоимость томографа превышала 2 млн. долларов, предполагалось на первом этапе запустить циклотрон, который позволил бы получать радионуклиды разных типов для ПЭТ диагностики.

В 1983 г. Министерством по атомной энергии СССР были выделены средства на разработку и изготовление в НИИЭФА циклотрона МГЦ-20 для Радиевого института. В 1987 г. основные узлы циклотронного комплекса были смонтированы, и в 1989 г. получен первый пучок.

Поскольку приобретение ПЭТ было под вопросом, Главное управление здравоохранения Ленинграда (ГУЗЛ) в 1988 г. направило запрос в Радиевый институт с просьбой организовать производство иода-123. Использование циклотронного иода-123 вместо реакторного иода-131 для диагностики заболеваний щитовидной железы позволяет снизить лучевую нагрузку в 100 раз за счет меньшей жесткости излучения, отсутствия бета-излучения и короткого периода полураспада - 13 часов вместо 8,1 суток. Исследования с иодом-123 составляют 15-20 % всех исследований, проводимых в ядерной медицине, отсюда понятна практическая значимость его применения. Группой Ю. А. Селицкого работы по получению нуклида иод-123 проводились одновременно с отладкой циклотрона.

Иод-123 образуется при взаимодействии протонов с ядрами теллура-123. В процессе отладки методики проводился целый ряд исследований. Изучались вопросы наилучшего способа приготовления мишени оксида теллура на подложке, обрабатывалось мишенное устройство, определялись оптимальные условия работы циклотрона: энергия протонов, интенсивность пучка, форма пучка на мишени, время облучения. Для выделения иода из облученной мишени методом термовозгонки была создана установка. Мишень помещается внутрь кварцевой трубки и нагревается с помощью кольцевого муфеля. Температура мишени измеряется хромель-алюмелевой термопарой. Выделяющийся из мишени иод-123 потоком воздуха транспортируется к раствору NaOH, который эффективно поглощает иод. Для контроля термовозгонки иода используется сцинтилляционный счетчик на основе кристалла NaI и ФЭУ.

Контроль радионуклидной чистоты препарата проводится гамма-спектроскопическим методом с использованием Ge(Li) детектора и анализирующей аппаратуры. В спектре гамма-излучения, кроме основной линии иода-123 - 159 кэВ, наблюдается линия иода-124 - 602,7 кэВ, представляющая жесткое излучение. На момент изготовления препарата доля излучения иода-124 составляет менее 0,5 % от полной гамма-активности. В спектре иода-123 примерно 3 % приходится на собственное жесткое излучение. Таким образом, препарат имеет высокое качество с точки зрения радионуклидной чистоты.

Радиохимическая чистота определяется содержанием ионов иодида I. В препарате же возможно существование иода в иодатной форме - IO_3^- . Считается, что иодид натрия медицинского назначения должен иметь содержание $\text{I}^- > 95\%$. Высокая радиохимическая чистота - 98-99 % достигается при автоклавировании. Контроль радиохимической чистоты производится методом электрофореза.

После разработки Радиевым институтом метода получения препарата были проведены биологические и клинические испытания радиоактивного фармпрепарата (РФП), получены фармстатья, регистрационное удостоверение, проведены испытания Комиссией по контролю качества, и с 1991 г. начаты регулярные поставки препарата в клиники города. Задача получения РФП - иодида натрия, меченного иодом-123, - была решена в кратчайшие сроки благодаря совместным усилиям высококвалифицированных кадров физиков, радиохимиков, ускорительщиков и механиков. До недавнего времени среди стран СНГ только в Радиевом институте было налажено производство иодида натрия с иодом-123, хотя в течение последнего десятилетия несколько институтов и среди них такие крупнейшие центры, как Объединенный институт ядерных исследований в Дубне, Курчатовский институт в Москве и Институт ядерной физики в Киеве, делали подобные попытки. Надежность и регулярность поставок иодида натрия с иодом-123 больницам города позволили в 1992 г. запретить в Санкт-Петербурге использование для диагностики заболеваний щитовидной железы иодида натрия с иодом-131.

Разработка РФП иодид натрия проводилась под руководством Ю. А. Селицкого группой сотрудников: В. А. Яковлевым, В. Б. Фунштейном, Н. Р. Гребенщиковым, Т. С. Потаповой, Е. А. Громовой.

В 1991 г. была образована лаборатория ядерных реакций и ядерной медицины. Начальником лаборатории был назначен Ю. А. Селицкий (после его смерти лабораторию возглавил Л. М. Солин). Лаборатория объединяет специалистов в области ядерной физики, радиохимиков и персонал для обслуживания двух ускорителей (ЭГ-5 и МГЦ-20).

После завершения разработки РФП иодид натрия с иодом-123 Радиевый институт получил следующее задание от ГУЗЛ - освоить производство ортоиодгиппурата, меченного иодом-123, - препарата, наиболее широко используемого для диагностики заболеваний почек. Разработка метода мечения иодом-123 отличается от методов мечения иодом-131 большей экспрессностью в связи с более коротким временем жизни иода-123. В достаточно короткий срок был разработан оригинальный метод мечения. Проведены биологические и клинические испытания, получена фармстатья, и с 1993 г. Санкт-Петербург регулярно обеспечивается ортоиодгиппуратом. Качество иодида натрия и ортоиодгиппурата, меченных иодом-123, не уступает мировым аналогам, а их стоимость значительно ниже зарубежной.

В 1992 г. предполагалось начать разработку РФП для диагностики опухолевых заболеваний на основе галлия-67 и индия-111, однако в это время начался экономический кризис в стране и Комитет по здравоохранению не смог финансировать эти работы. Тем не менее, в последующие годы в Радиевом институте при финансовой поддержке Министерства по атомной энергии были проведены работы по исследованиям методов получения радионуклидов галлия-67 и индия-111 как сырья для приготовления РФП. Было достигнуто высокое качество продукта, что подтверждают анализы, проведенные не только в Радиевом институте, но и в фармацевтической фирме МАР Финляндии.

В 1993 г. были начаты работы по созданию Центра ядерной медицины на базе циклотрона МГЦ-20. Работы финансировались Минатомом и предполагали сооружение на территории Радиевого института корпуса, оснащенного позитронно-эмиссионным томографом. К сожалению, в связи с прекращением финансирования работы были остановлены на стадии подготовки технорабочего проекта и проведения ряда вспомогательных работ.

В 1996 г. были проведены разработки препарата цитрат галлия-67. В работе принимали участие В. И. Шпаков, Е. А. Громова, Ю. М. Протасенко, М. П. Зыков, С. П. Ерофеев, В. В. Бунцев. Выполненные в Институте биофизики (Москва) биологические испытания по-

казали соответствие получаемого в Радиевом институте препарата фармакопейной статье. По заключению фармакопейного комитета препарат разрешен к клиническому применению.

Другим важным направлением является производство радиофармпрепарата на основе технеция-99m. Благодаря уникальным свойствам этого радионуклида он находит самое широкое применение в радиологических исследованиях в современной медицинской практике. До 70-80 % всех исследований проводится с использованием технеция-99m.

В России практическая медицина обеспечивается раствором ^{99m}Tc , в основном, благодаря сорбционным генераторам ГТ-2, которые производятся в ФЭИ (г. Обнинск) с использованием осколочного молибдена-99.

В связи с неритмичными поставками генератора и с постоянным увеличением спроса на данный препарат ГУЗЛ обратился в НПО "Радиевый институт" организовать региональное производство ^{99m}Tc . Работы в данном направлении в институте были начаты в 1989 г. под руководством В. Н. Романовского и Н. Б. Высокоостровской. В данной разработке принимала участие большая группа специалистов, среди которых следует назвать А. В. Егорова, М. П. Зыкова, С. П. Ерофеева, Е. А. Колобова, В. В. Бунцева, С. А. Стрелкова, А. В. Смирнова, В. А. Демьянова, В. И. Куценко и др. К работе также были привлечены специалисты Института биофизики Минздрава и ИФХАН.

В основе технологии получения ^{99m}Tc лежит экстракционный генератор. Исходным продуктом служит триоксид молибдена с естественным изотопным составом, или обогащенный изотопом молибден-98, в котором после облучения в атомном реакторе накапливается молибден-99. Этот способ получения обеспечивает высокую радионуклидную чистоту ^{99m}Tc , так как исключается возможность загрязнения конечного продукта радиотоксичными примесями, какими являются иод-131, рутений-103, цирконий-95 и др. в случае использования осколочного молибдена.

Облучение производится на Ленинградской атомной станции (ЛИАЭС) в энергетическом реакторе с потоком нейтронов $5 \cdot 10^{13}$ н/см²·с. Мишень облучается в течение 7 дней. В конце облучения удельная активность мишени по ^{99}Mo составляет 80-85 ГБк/г. Начиная с 1996 г. облучение проводится также и в реакторе ВВР-М СПбИАФ РАН (г. Гатчина). Большой поток нейтронов по сравнению с ЛИАЭС - $1 \cdot 10^{14}$ н/см²·с - и большой диаметр канала, который предоставляется для этих целей, - позволяют для накопления ^{99}Mo облучать в реакторе ВВР-М мишени из естественного молибдена.

В основу генератора технеция-99m был положен экстракционный процесс, который достаточно известен. В трех российских центрах, где было налажено региональное производство ^{99m}Tc , в основе способа разделения ^{99}Mo и ^{99m}Tc лежит процесс экстракции ^{99m}Tc из щелочного раствора молибдена метилэтилкетонам (МЭК). Принципиальным отличием производства в Радиевом институте от других аналогичных производств является то, что здесь используется центробежный экстрактор. Это позволяет, с одной стороны, ускорить процесс экстракции и, с другой стороны, сократить время контакта органической и водной фазы и, соответственно, уменьшить влияние процесса радиолитического распада на качество конечного продукта. Центробежный экстрактор (разработан в ИФХ РАН) является важнейшим узлом на установке, так как он обеспечивает получение ^{99m}Tc высокой степени очистки как от ^{99}Mo , так и от химических примесей, в первую очередь компонентов исходного раствора, создающих щелочную среду (гидроксид калия и углекислый калий).

Главным преимуществом РФП, поставляемых НПО "Радиевый институт", является то, что при проведении диагностических операций с их использованием уменьшаются дозовые нагрузки на пациентов и медицинский персонал. При использовании РФП, производимых в НПО "Радиевый институт", в клиниках не образуется каких-либо радиоактивных отходов. В этом случае все проблемы, связанные с обращением и захоронением радиоактивных отходов, решаются в одном месте - Радиевом институте - высококвалифицированными и опытными специалистами.

Число клиник Санкт-Петербурга, которые используют ^{99m}Tc , изготовленный в НПО "Радиевый институт", постоянно растет. Потенциальные ресурсы установки по производству ^{99m}Tc достаточно велики, чтобы обеспечить растущие потребности клиник в данном

радионуклиде в ближайшем будущем. Кроме того, возможно увеличение поставок за счет расширения ассортимента и, в частности, выпуска готовых для инъекций форм радиофармпрепаратов на основе ^{99m}Tc .

С 1992 г. работы на установке по производству ^{99m}Tc ведутся под руководством М. П. Зыкова группой сотрудников, в которую входят: С. П. Ерофеев, Е. А. Колобов, В. В. Бунцев, Н. Т. Усачева, В. И. Куценко, Л. А. Зеленцова, Х. К. Анастасьева, Т. М. Федеева.

На протяжении всего своего существования Радиевый институт постоянно обращался к вопросам использования радиации в медицине. Этим работам посвящена, в частности, статья о синтезе меченых биологически активных соединений, где освещены попытки создания противоопухолевых препаратов. О применении ядерного гамма-резонанса в офтальмологии рассказано в связи с разработками мессбауэровских источников гамма-квантов.

МЕТРОЛОГИЯ РАДИОНУКЛИДОВ И МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПРОИЗВОДСТВА РАДИОНУКЛИДНОЙ ПРОДУКЦИИ

С созданием изотопного отдела вошедшая в его состав лаборатория прикладной ядерной спектроскопии (руководитель лаборатории - Ю. В. Хольнов) была ориентирована на решение задач метрологического обеспечения производства радионуклидной продукции. В решении этих задач важную роль играет качество применяемых образцовых мер - образцовых радионуклидных источников ионизирующего излучения (ОРИИ) и образцовых растворов радионуклидов (ОРР). Применение ОРИИ и ОРР позволяет с максимальной эффективностью и с наименьшей потерей точности производить паспортизацию радионуклидной продукции.

Разработка и аттестация ОРИИ и ОРР стала одним из важнейших направлений деятельности лаборатории прикладной ядерной спектроскопии, которая получила название "лаборатории прикладной ядерной спектроскопии и радиометрии" (с 1982 г. начальник лаборатории - В. Г. Недовесов, с 1992 г. - В. П. Чечев).

Новые задачи потребовали, в первую очередь, существенного обновления измерительной аппаратуры лаборатории, оснащения прецизионными радиометрическими и спектрометрическими установками.

В 60-е - 70-е годы лаборатория имела возможность проводить измерения, используя два типа прецизионных спектрометрических установок - Ge(Li) -гамма-спектрометр и большой магнитный $\sqrt{2}$ альфа-спектрометр лаборатории Б. С. Джелепова. Методики измерений на основе Ge(Li) - детектора были созданы Ю. С. Егоровым и К. И. Яковлевым. Измерения на магнитном спектрометре и анализ альфа- и гамма-спектров производили В. Г. Недовесов, В. П. Чечев, Г. Е. Шукин, Ю. С. Егоров. Кроме того, в 70-е годы в лаборатории была создана группа для проведения абсолютных радиометрических измерений (П. И. Федотов, А. М. Гейдельман, П. С. Солошенко), которая активно занималась разработкой 4 π -счетчиков и установок альфа-гамма- и бета-гамма-совпадений для измерения активности радионуклидов в источниках. В распоряжении сотрудников лаборатории в этот период была также возможность проводить химическое разделение элементов с помощью хроматографического анализа, в постановку которого в эти годы в лаборатории внесли большой вклад Л. Н. Москвин, Ю. Л. Черешкевич и Л. И. Шур.

В рассматриваемый период лаборатория решила две крупные метрологические задачи:

- анализ радиоизотопной чистоты радионуклидных препаратов, применяемых в народном хозяйстве, всего более 50 наименований;
- метрологическое обеспечение разработки образцовых спектрометрических альфа-источников (ОСАИ).

Образцовые спектрометрические альфа-источники в течение 30 лет, прошедших с начала их разработки, широко использовались и продолжают использоваться для калибровки альфа-спектрометрической и альфа-счетной аппаратуры любого типа. Они представляют собой комплекс образцовых мер с достаточно точно установленными значениями радиационно-физических параметров источников альфа-излучения и ядерно-физических характеристик (ЯФХ) альфа-излучающих радионуклидов.

Разработка и выпуск ОСАИ впервые обеспечил нашу промышленность спектрометрическими источниками высокого класса. Аттестация промышленных комплектов ОСАИ стала в последующие годы одной из долговременных задач лаборатории. Промышленный комплект ОСАИ содержит 4 источника альфа-излучения: ^{239}Pu , ^{238}Pu , $^{233}\text{U}+^{239}\text{Pu}+^{238}\text{Pu}$, ^{226}Ra с продуктами распада. Если учесть, что производство ОСАИ за год составляло 75 комплектов, общий массив аттестованных данных по параметрам ОСАИ достигал 1200 измеренных величин в год.

В 70-е годы в лаборатории была решена еще одна важная метрологическая задача. Для градуировки гамма-спектрометров и радиометров в диапазоне энергии гамма-излучения 30-2700 кэВ были разработаны образцовые спектрометрические гамма-источники (ОСГИ) на основе радионуклидов: ^{54}Mn , ^{57}Co , ^{60}Co , ^{88}Y , ^{109}Cd , ^{113}Sn , ^{133}Ba , ^{137}Cs , ^{139}Ce , ^{152}Eu , ^{241}Am . В 1977 г. была разработана технология изготовления и методы аттестации источников гамма-излучения на основе ^{58}Co , ^{51}Cr и $^{110\text{m}}\text{Ag}$. Были созданы также образцовые спектрометрические источники гамма-излучения на основе ^{125}I и ^{170}Tm .

Аттестуемой характеристикой в ОСГИ является активность радионуклида в источнике. Поэтому для определения потока гамма-квантов данной энергии необходимо иметь также достаточно точное значение такой ядерно-физической характеристики радионуклида, как число гамма-квантов, испускаемых на акт распада. Следует отметить в связи с этим, что, начиная с разработки ОСАИ и ОСГИ, лаборатория осуществляла замкнутый метрологический цикл измерений характеристик радионуклидной продукции - от радиационных параметров источников до рекомендуемых значений ЯФХ радионуклидов, входящих в состав продукции. С этой целью в 1974 г. в лаборатории по инициативе и при непосредственном участии Ю. В. Хольнова и В. Г. Недовесова была создана группа сотрудников, занимавшаяся оценкой ЯФХ радионуклидов (В. П. Чечев, Ш. В. Камынов, Н. К. Кузьменко).

Расширение круга задач, решаемых спектрометрическими и радиометрическими методами, увеличение номенклатуры радионуклидов, производимых для нужд науки и техники, привели, с одной стороны, к расширению диапазона регистрируемых спектрометрами энергий (в области гамма-излучения до 2-5 кэВ в сторону уменьшения и до 3-4 МэВ в сторону увеличения) и, с другой стороны, к необходимости иметь при градуировке большее число реперных точек в заданном энергетическом диапазоне.

Для освоения расширенного круга задач в 70-е - 80-е годы в лаборатории создаются новые измерительные установки и совершенствуются уже существующие.

В области альфа-спектрометрии с целью сокращения времени измерений на три порядка разрабатывается метод ограниченного телесного угла для измерения альфа-излучающих препаратов малой активности (Ю. С. Егоров).

В области гамма-спектрометрии расширяется диапазон измерения потока фотонов и создаются исходная образцовая радиометрическая установка отрасли СФТУ-М и поверочная схема для хранения и передачи единицы плотности потока фотонов в энергетическом диапазоне от 4,5 до 136 кэВ с погрешностью измерений 5-10 % (В. Г. Недовесов, А. С. Довгиленко), исходная образцовая радиометрическая установка для хранения и передачи единицы плотности потока гамма-излучения в диапазоне энергий от 100 до 3000 кэВ с погрешностью измерений 3-10 % (Ю. С. Егоров, А. С. Довгиленко), Si(Li) -спектрометр для аттестации в качестве рабочего средства измерений интенсивности рентгеновского и гамма-излучения (Г. Е. Щукин, А. Г. Егоров), образцовая I разряда установка для измерения ЯГР-источников (Н. К. Черезов).

Для аттестации образцовых источников и растворов альфа-излучающих нуклидов на основе прецизионной установки $4\pi\alpha$ -X(γ)-совпадений (с погрешностью измерений 0,1-0,2 %) группой сотрудников под руководством А. М. Гейдельмана создается рабочий эталон единицы активности альфа-излучающих радионуклидов ВЭТ 6-12-76 с погрешностью аттестации 0,4 %, $P=0,99$. В дальнейшем рабочий эталон широко используется для измерения активности изотопов урана и трансурановых элементов с точностью, соответствующей уровню измерений лучших метрологических лабораторий мира.

В 80-е годы в лаборатории продолжались разработки образцовых радионуклидных источников и растворов. Были разработаны ОСГИ-3 с двумя типами номинальных значений активности и дополнением номенклатуры ОСГИ радионуклидом ^{228}Th . Для градуировки бета-радиометрической и бета-спектрометрической аппаратуры были также разработаны образцовые радиометрические источники бета-излучения (ОРИБИ) на основе радионуклидов ^{14}C , ^{60}Co , ^{63}Ni , $^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$, ^{147}Pm и ^{204}Tl с граничной энергией бета-спектров от 66 до 2282 кэВ.

Одним из показателей уровня метрологических работ лаборатории служили международные сличения методов измерения активности радионуклидов, которые проводились в 70-х - 80-х годах в рамках СЭВ. Такие сличения для растворов ^{51}Cr , ^{63}Ni , $^{99}\text{Mo}+^{99}\text{Tc}$, ^{152}Eu , ^{169}Yb показали, что результаты, полученные лабораторией, очень близки к средним значениям удельной активности растворов, определенной организаторами сличений.

Лаборатория активно участвовала также в подготовке разнообразной стандартизированной научно-технической документации в области ядерной метрологии, осуществляла метрологическое обеспечение системы гарантий МАГАТЭ по урану и плутонию, разрабатывала международные, государственные и отраслевые стандарты ионизирующих излучений.

Другим важным показателем уровня метрологического обеспечения, кроме умения правильно и точно измерять радиационно-физические параметры радионуклидных источников, является способность выполнять прецизионные измерения и оценку ЯФХ широко применяемых радионуклидов. Известно, что характеристики используемых на практике радионуклидов обычно измерены с достаточно высокой точностью в различных научно-исследовательских лабораториях мира, но уточнить их значения можно не только за счет наличия приборов высокого класса (что является обязательным условием этих измерений), но и, главным образом, за счет новых методических приемов. Такие разработки были выполнены ведущими сотрудниками лаборатории А. М. Гейдельманом (методика измерения периодов полураспада альфа-излучающих нуклидов ^{233}U , ^{234}U , ^{239}Pu , ^{242}Pu), Ю. С. Егоровым (методика измерений выходов гамма-квантов ^{170}Tm , ^{226}Ra), В. П. Чечевым (методика оценки данных распада радионуклидов), Г. Е. Шукиным (методика учета искажений гамма-спектров, измеренных с помощью полупроводниковых детекторов, и разработка функций отклика $\text{Ge}(\text{Li})$ - и $\text{Si}(\text{Li})$ -спектрометров для прецизионного измерения вероятностей эмиссии рентгеновского и гамма-излучения радионуклидов), Н. К. Черезовым (методика измерения ЯГР-спектров).

В 80-х годах в сотрудничестве с ВНИИМ и Институтом по исследованию, производству и применению изотопов (в настоящее время - Инспекторатом по измерению ионизирующих излучений, Прага) лаборатория выполнила прецизионные измерения абсолютных вероятностей эмиссии рентгеновского и гамма-излучения семи радионуклидов: ^{238}Pu , ^{239}Pu , ^{55}Fe , $^{125\text{m}}\text{Te}$, $^{119\text{m}}\text{Sn}$, ^{75}Se , ^{170}Tm . В дальнейшем эти работы в сочетании с оценкой ЯФХ были продолжены для радионуклидов ^{133}Ba , ^{145}Sm , ^{153}Gd и ^{155}Eu .

В 1993 г. лаборатория была преобразована в отраслевой Центр радионуклидных данных с целью усилить направление работ, связанное с созданием баз ядерных и радиационных данных.

В связи с возникшими экономическими трудностями круг задач лаборатории существенно сократился. В то же время расширились ее связи с зарубежными учеными, и в настоящее время лаборатория активно сотрудничает с ведущими метрологическими лабораториями Франции, Германии, США и Китая. Это сотрудничество осуществляется под эгидой

Международного комитета по радионуклидной метрологии ICRM и направлено на экспериментальное уточнение и оценку ядерных констант, относящихся к распаду радионуклидов, по схеме оценка ---> измерение ---> оценка, т. е. сначала выявление "слабых" мест путем оценки литературных данных, затем собственные измерения и снова оценка, уже с учетом полученных экспериментальных результатов. Недавние работы сотрудников лаборатории в этом направлении опубликованы в международных журналах *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research* (A312 (1992), p. 378-384 и A339 (1994), p. 248-252) и *Applied Radiation and Isotopes* (47 (1996), p. 329-332).

Другое направление деятельности лаборатории в последние годы связано с повышением уровня метрологической аттестации радионуклидных источников. Проведены работы по аккредитации установок для измерения бета- и фотонного излучений, разработаны предложения о введении нового радиационно-физического параметра изделий - внешнего фотонного излучения (ВФИ), проводятся анализ и измерения полных функций отклика Ge(Li)- и Si(Li)-спектрометров.

В заключение следует отметить, что все свои работы лаборатория проводила в тесном сотрудничестве с другими подразделениями института и, в первую очередь с лабораторией технологии источников ионизирующих излучений и лабораторией ядерной спектроскопии Б. С. Желепова. Успешная деятельность лаборатории прикладной ядерной спектрометрии и радиометрии на протяжении трех десятков лет стала возможной только благодаря преемственности кадров научно-технических работников, воспитанных в коллективах института, отдела и самой лаборатории. К сожалению, эта преемственность стала нарушаться с перестройкой государственной политики в отношении науки.

РАБОТЫ ПО СТАНДАРТИЗАЦИИ РАДИОНУКЛИДНОЙ ПРОДУКЦИИ

Для нормативного обеспечения производства и обеспечения безопасности использования и унификации закрытых радионуклидных источников ионизирующего излучения (ЗРИИ) и радионуклидных препаратов в 1975 г. в Радиовом институте было организовано бюро по стандартизации указанной продукции (руководитель - Ю. П. Турбанов).

В 1979 г. с возложением на Радиовый институт им. В. Г. Хлопина функций головной организации по ЗРИИ, радионуклидным источникам тепла и радионуклидным препаратам, а также с возложением функций базовой организации по стандартизации (БОС) указанной продукции, бюро по стандартизации получило статус Научно-исследовательского отдела по стандартизации (НИОС). В работах по стандартизации и унификации радионуклидной продукции за БОС были закреплены 12 ведущих разработчиков и производителей этой продукции, среди которых ПО "Маяк", НИИАР, ФЭИ, ВНИИРТ, ВНИИНМ и др. Руководителем отдела с 1984 г. является Л. И. Крылов.

НИОС в тесном сотрудничестве с отделом радиоизотопов института и другими предприятиями отрасли работал над созданием Программы комплексной стандартизации, в соответствии с которыми были разработаны государственные и отраслевые стандарты, устанавливающие требования к наиболее важным потребительским свойствам и техническим показателям радионуклидной продукции. В числе этих стандартов: общие технические требования, методы измерения радиационных параметров, типы и основные параметры, маркировка, упаковка, транспортирование и хранение, термины и определения, номенклатура показателей качества и другие, всего более 20 государственных стандартов.

Работы по стандартизации позволили упорядочить показатели отечественной радионуклидной продукции, а также внесли существенный вклад в организацию и расширение межгосударственного сотрудничества с зарубежными странами, в частности в нормативное обеспечение поставок радионуклидных источников и препаратов в страны-члены СЭВ, а также в другие страны. Потребительские и технические характеристики и параметры поставляемой за рубеж продукции (препараты криптона-85, углерода-14, трития, других препара-

тов и изделий) регламентировались более чем полутора десятками стандартов СЭВ, разработанных по инициативе и при организующем участии Радиевого института. Опыт, приобретенный в этих работах, был весьма ценным для дальнейшего развития изотопного направления и международного сотрудничества.

Заметное место в работах по стандартизации занимают работы по классификации и кодированию нуклидной продукции. В 1991 г. Министерством возложены на НИОС обязанности по ведению подкласса 701 "Изотопная продукция" классификатора ОКП и по присвоению кодов ОКП изотопной продукции. Проведен анализ размещения указанной продукции по классификационным разрядам, на основании которого в ЦНИИАИ направлены предложения по совершенствованию заполнения групп и подгрупп классификатора с учетом принадлежности размещаемых изделий к соответствующим группам однородной продукции.

В 1994 г. в Радиевом институте, как головной организации по радионуклидной продукции, на основе НИОС организован подкомитет "Радионуклидная продукция" (ПК 17) при техническом комитете ТК 322 "Атомная техника". Подкомитет имеет свое "Положение" и является основным разработчиком нормативной документации по радионуклидным источникам и препаратам. В состав ПК 17 входят представители 14 предприятий и организаций, занимающих ведущее положение в использовании радиоактивных материалов в науке и технике. ПК 17 активно проводит работы по подготовке нормативной базы к сертификации радионуклидной продукции.

Осуществляется постоянный контроль научно-технического уровня действующих стандартов путем их проверки, внесения необходимых изменений и обновления. С целью гармонизации требований отечественных и зарубежных стандартов проводятся работы по внедрению международных стандартов ИСО, регламентирующих методы контроля, а также требования безопасности радионуклидной продукции, контролируемые при обязательной сертификации.

В 1996 г., в связи с недостаточным финансированием и сокращением штатов, НИОС был трансформирован в Научно-исследовательскую лабораторию стандартизации (НИЛС).

Большой творческий вклад в организацию и проведение работ по стандартизации радионуклидной продукции, придавший им научно-технический и методический характер, внес С. Л. Фаддеев.

В решении научно-технических вопросов стандартизации радионуклидных источников и препаратов активное участие принимали В. В. Федоров, В. Н. Боброва, Б. А. Михайлов, В. Г. Недовесов, А. М. Гейдельман, Г. Е. Щукин, В. Г. Шумков, Ю. П. Турбанов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Работы радионуклидного направления сделали Радиевый институт им. В. Г. Хлопина в 70-х - 80-х гг. признанным лидером среди многочисленных научных организаций страны. При институте, как головной организации, были созданы и успешно работали в течение многих лет межведомственные координационные научно-технические советы по радионуклидным источникам, радионуклидным тепловым блокам, меченым радионуклидным препаратам. В состав советов входили ученые и специалисты практически всех ведущих НИИ страны: Радиевого института им. В. Г. Хлопина, ВНИИНМ им. А. А. Бочвара, НИИАР им. В. И. Ленина, ВНИИТФА, ВНИИМ им. Д. И. Менделеева, ФЭИ, ГИПХ, ИФХАН и др. и промышленных предприятий: ПО "Маяк", завода "Авангард". В работе координационных советов принимали участие специалисты более 40 научных организаций страны самого разного профиля. Радиевый институт был организатором проведения ряда всесоюзных и международных конференций и совещаний, в том числе конференции, посвященной 40-летию получения и использования радионуклидов в СССР, симпозиума стран-членов СЭВ.

Сотрудники Радиевого института принимали участие во многих международных конференциях за рубежом. На протяжении ряда лет осуществляется тесное научно-техническое сотрудничество с рядом зарубежных исследовательских центров. К сожалению,

в последние годы объем работ по изотопному направлению из-за общего экономического кризиса в стране значительно сократился. Из института ушли многие ведущие сотрудники, чей вклад в развитие работ по радионуклидному направлению очень значителен.

В заключение нужно отметить большой вклад в развитие и становление работ Радиового института по радионуклидному направлению в 60-х - 80-х гг. руководителей этих работ: заместителя директора по научной работе С. Л. Фаддеева, начальника изотопного отдела В. В. Федорова, руководителей лабораторий В. Г. Шумкова, В. А. Архипова, Г. О. Треймана, Ю. Л. Каминского, В. Г. Недовесова, В. П. Чечева, Б. И. Рогозева. Нельзя не сказать о большой поддержке этих работ руководителями Минатома А. С. Штаня, А. К. Круглова, работников главков Г. Л. Поповой, А. В. Ляхова, А. С. Маслака и И. А. Охотиной.

Работы сотрудников, участвовавших в исследованиях и разработках, связанных с использованием радионуклидов в различных областях науки, техники и медицины, были неоднократно отмечены высокими правительственными наградами. Один из основателей этого направления, доктор химических наук Д. М. Зив был удостоен Ленинской и Государственной премий, а также награжден орденом "Знак Почета". Заведующий лабораторией кандидат химических наук Ю. Л. Каминский и научный сотрудник Л. Н. Румянцева были удостоены Государственной премии. С. Л. Фаддеев, В. В. Федоров, В. И. Парамонова, Н. Б. Высокоостровская, В. А. Архипов, Н. А. Суров и Г. С. Сеницына были награждены орденами; В. Г. Недовесов, Е. А. Волкова, Г. П. Никитина, И. А. Эфрос, В. М. Окаминов и др. - медалями. Многие сотрудники получили медали и дипломы ВДНХ.

ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА

"Физика ядра, которая вытекала из явлений радиоактивности, не может не являться одной из основных задач Радиевого института"

В. М. Вернадский

(Сессия ОМАН АН СССР, март 1936 г.)

Физика, которая была, есть и будет (небольшое предисловие)

Взятые эпиграфом слова основоположника института академика В. И. Вернадского, произнесенные им около 60 лет назад, и сегодня определяют место и "весовую категорию" нашей физики. Можно спросить, с чего начинается ядерная физика - с открытия ли ядра атома (за десять лет до возникновения института) или открытия нейтрона (через десять лет после), но и то и другое, и само ядро и его нейтральный кирпичик - нейтрон, были обнаружены в опытах с α -частицами естественно-радиоактивных элементов. И "усредняя" две точки зрения, можно считать ядерную физику ровесницей института, а явление радиоактивности, для изучения которого институт был создан - их общей матерью. Обязанная этому явлению своим рождением, физика ядра в дальнейшем вобрала его в себя и, объяснив его природу, сделала своей неотъемлемой частью. И часть эта стала нашей работой.

Возможности получения радона как источника α -частиц и на его основе радон-бериллиевых источников нейтронов по реакции ${}^9\text{Be}(\alpha, n){}^{12}\text{C}$ (в которой нейтроны и были открыты) обеспечили физикам института место у истоков нейтронной физики в нашей стране. Открытие и последующее изучение изомерии искусственно-радиоактивных ядер, изучение эффекта Ферми, вместе с более ранними занятиями по измерению радиоактивных излучений, дали опыт и знания, которые позволили через несколько лет без промедления (опять же первыми в стране) включиться в исследование нового явления - деления атомных ядер. Из этого сборника читатель увидит, что деление ядер стало делом жизни многих поколений сотрудников института. Оно и сейчас занимает главное место в наших планах. Потому что физика деления - очень широкая и богатая область ядерной физики, простирающаяся от самых низких ядерных температур - спонтанного деления (открытого совместно Радиевым и Физико-техническим институтами) до высоких - близких к энергии связи нуклона в ядре. Она богата как внутренней сущностью (разнообразием взаимодействия одночастичных и коллективных степеней свободы ядер, определяемых природой ядерных сил и свойствами ядерного вещества), так и внешними приложениями (достаточно вспомнить, что это основной процесс ядерной энергетики). Но главное место - не значит единственное. Всякий экстремизм губителен для науки. Рядом с физикой деления в институте развиваются, обогащая ее и друг друга, физика ядерных реакций (низких и средних энергий) и ядерная спектроскопия. Почти в каждом разделе ядерной физики Радиевый институт в свое время достигал приоритетного положения как в стране, так и в мире; в институте заложены научные школы, продолжающие существовать и сегодня. Кроме фундаментальных проблем, решаемых в исследованиях различного рода ядерных реакций и в ядерной спектроскопии, все четче вырисовывается их практическое значение. В известной мере неожиданно (что часто встречается в науке и, конечно же,

должно служить предостережением против волевого ограничения тематики) наши знания характеристик взаимодействия частиц средних, или как сейчас чаще говорят, промежуточных энергий с ядрами и знания характеристик процесса деления "заработали вместе" в широко обсуждаемой сейчас идее создания безопасной и экологически чистой ядерной энергетики на основе ускорительно-реакторных технологий.

Однако я не хочу создать впечатление о физической части института, как о коллективе, в котором все имеют равные возможности. Наш "машинный парк" составляют ускорители низких энергий (до двух-трех десятков МэВ). Попытка выйти в средние энергии (см. следующую статью) оказалась запоздалой. Мне кажется, что в развитии технической базы физиков еще в конце 40-х - начале 50-х годов - в годы становления новых научных центров - были сделаны упущения, не было проявлено должной инициативы. Достигнув многого в совместной работе с химиками с первых дней существования института (комплексность института - действительно, его выдающаяся особенность, обеспечивавшая успешное решение ряда крупнейших научных и практических задач, в том числе овладение ядерным оружием), физики института не смогли "вырваться" из крепких "химических" объятий (помните: "физика ядра - одна из основных задач Радиевого института"). Поэтому работы по физике промежуточных энергий в прежние годы проводились нами на ускорителях других физических центров нашей страны, например в ОИЯИ, ЛИЯФ, ИТЭФ, а в настоящее время - главным образом на зарубежных ускорителях - в Швеции, Финляндии, Италии, США. Предоставление нам возможности такой работы свидетельствует о высоком авторитете и неутраченном потенциале физиков.

Сказанное выше о "химических" объятиях - не выпад против моих коллег, возможно, это просто попытка оправдаться перед историей. Я думаю, что и сейчас творческое сотрудничество специалистов разных областей знаний - залог нашей способности к выживанию. Недаром сравнительно новые направления, развитые в институте, - неразрушающий контроль ядерного топлива и ядерная медицина - либо навеяны задачами химиков, либо используют их труд. Это как раз те направления, которые сами себя обеспечивают. Фундаментальные же проблемы (конечно же, настолько фундаментальные, насколько фундаментальна сама ядерная физика низких и средних энергий) требуют государственной поддержки. Расказанное ниже о нашей физике, которая была и которая есть, должно убедить читателя, что она заслуживает этого. Она заслуживает быть физикой, которая будет.

Начальник отдела ядерной физики
В. П. Эйсмонт

“МАШИННЫЙ ВЕК” ИНСТИТУТА

В. Д. Дмитриев, В. В. Смирнов, Л. М. Солин, В. П. Эйсмонт

“Скажи, какой ускоритель ты имеешь, и я скажу кто ты...”

Авторы

Введение

В начале 1932 г. Кокрофт и Уолтон, бомбардируя литий протонами, полученными на трубке напряжением 0,5 МВ, впервые расщепили атомное ядро с помощью искусственно ускоренных частиц. В том же году для расщепления ядер был применен резонансный ускоритель - циклотрон, или, как тогда говорили, “установка Лоуренса”. В ядерной физике начался “машинный век”. Обладание ускорителем стало “голубой мечтой” всех физиков-ядерщиков. Из комнатных приборов ускорители превратились в циклопов многокилометровых разме-

ров. Их технические характеристики - энергия, масса ускоряемых частиц, интенсивность и моноэнергетичность пучков - стали определять возможности физиков, их "лицо". Это абсолютно верно для физики высоких энергий, но в значительной степени справедливо и для других областей физики, развиваемых в нашем институте. История создания и роль построенных у нас ускорителей описывается в этой статье.

1. Первый в Европе

Задача ускорения частиц родилась с открытием Резерфордом искусственного расщепления ядер (1919 г.). Сам Резерфорд считал, что искусственно ускоренный пучок частиц будет гораздо более эффективным средством осуществления ядерных реакций, чем α -частицы естественных радиоактивных источников, которые им использовались. Также Н. Бор писал: "Становилось все более и более ясным, что для подлинного решения проблем ядра недостаточно естественных α -частиц и что желательно иметь в своем распоряжении интенсивные пучки частиц высокой энергии, полученные искусственным ускорением ионов". И у Льва Владимировича Мысовского, первого заведующего физическим отделом института, в монографии "Космические лучи", изданной в 1929 г., есть фраза: "Получение высокого потенциала для воздействия на ядра атома является мечтой многих физиков".

Для Л. В. Мысовского это было не столько мечтой, сколько руководством к действию. Уже в 1929 г. в "Докладах Российской академии наук" появилась статья Л. В. Мысовского и В. Н. Рукавишникова "Ускорение положительных и отрицательных ионов полем переменного тока высокой частоты". В институте была собрана установка, действовавшая по принципу трансформатора Тесла. Л. В. Мысовский внимательно следил за всеми попытками получения высоких потенциалов, о чем свидетельствовал его обзор "Лабораторные методы получения быстрых электронов и протонов", опубликованный в журнале "Успехи физических наук" за 1932 г.

Однако первые десять лет со дня открытия расщепления ядер не принесли заметных успехов в этих методах. Сами физики пока еще больше интересовались строением атома, а не атомного ядра. Положение изменилось в 1928-1929 гг. Работы по созданию ускорителей были стимулированы Г. А. Гамовым, который применил принцип волновой механики к α -распаду и объяснил α -распад эффектом проницаемости потенциального барьера ядра. Он же рассчитал вероятность проникновения заряженной частицы в ядро за счет обратного туннельного эффекта. Зимой 1928-1929 гг. Г. А. Гамов был в лаборатории Резерфорда в Кембридже. Сотрудник Резерфорда Кокрофт подставил в формулу Гамова цифры, которые можно было получить в то время для ионного тока, чтобы выяснить вероятность проникновения протонов через энергетический барьер легкого ядра. Вероятность оказалась вполне приемлемой. И через три года в Кембридже был достигнут успех, о котором сказано в начале статьи.

Если ускоритель Кокрофта-Уолтона, как ускоритель прямого действия, стал одним из начал "машинного века", то другим его началом стал ускоритель Лоуренса. Проанализировав эти методы ускорения, Л. В. Мысовский остановился на последнем как не требующем высоких напряжений и вакуума. В 1932 г. Ученый совет института по предложению Л. В. Мысовского и Г. А. Гамова, который в 1931-1933 гг. был сотрудником института, принимает решение о строительстве циклотрона. Специальным правительственным постановлением выделяются ассигнования для этой цели. Время этого решения далеко не случайно. 1932 год называют "годом чудес" в ядерной физике. Помимо упоминавшегося уже наблюдения трансмутации легких ядер, можно назвать по меньшей мере еще три великих открытия этого года: обнаружение позитрона, получение тяжелой воды, открытие нейтрона. Вырисовывались огромное богатство и большие перспективы физики ядра. Эти мощные информационные импульсы были мгновенно приняты институтом, так как почва для них, моральная и техническая база, готовились в институте уже 10 лет - практически со дня его основания.

Циклотрон начал строиться. Магнитные полюсы ускорителя было решено делать диаметром 1000 мм. В 1933 г. на ленинградском заводе “Большевик” специально была выплавлена высококачественная мягкая сталь, приближающаяся по характеристикам к известной марке “Армко”, и произведена поковка станин и полюсных наконечников. На другом ленинградском заводе “Электросила” была произведена высокоточная механическая обработка поковок и изготовлена обмотка возбуждения. В августе 1934 г. циклотрон был установлен в институте. Был создан высокочастотный генератор, изготовлен вакуумный канал и началась наладка. В марте 1937 г. был получен протонный пучок с энергией 2,1 МэВ, а в июне - пучок протонов с энергией 3,2 МэВ и гелиевых ионов с энергией выше 1 МэВ. Как в момент начала строительства, так и в момент запуска это был первый циклотрон не только в нашей стране, но и в Европе. Сооружение установки было осуществлено “бригадой” Л. В. Мысовского, основными специалистами в которой были В. Н. Рукавишников и Д. Г. Алхазов.

Циклотрон создавался в бурный для ядерной физики год. 1932 год был только началом “золотого века” - “великолепной семерки” 1932-1938 гг. Физика “заставляла” циклотронную бригаду очень спешить и непрерывно совершенствовать введенный в строй ускоритель. Кроме физики, спешить заставлял И. В. Курчатов, в августе 1937 г. ставший заведующим циклотронной лабораторией, а с апреля 1939 по октябрь 1940 г. - и заведующим физическим отделом института (по совместительству с работой в ФТИ). Заметим, что циклотрон стал полигоном, большой технической школой не только И. В. Курчатова, но и ряда других выдающихся физиков - А. И. Алиханова, В. П. Дзелепова, М. Г. Мещерякова и уже упомянутого Д. Г. Алхазова, возглавивших впоследствии сооружение новых крупных отечественных ускорителей.

Большую роль в строительстве циклотрона сыграли основатели и первые руководители института В. И. Вернадский и В. Г. Хлопин. В. И. Вернадский горячо отстаивал необходимость сооружения циклотрона в институте. В. Г. Хлопин испытал на себе все трудности первых шагов и многообразие последующих забот по развитию ускорителя. 17 июня 1938 г. из института в Президиум АН СССР уходит записка, в которой говорится: “Государственный Радиевый институт располагает весьма ценным прибором - циклотроном - для ускорения ионов. О проделанной работе по настройке этого прибора и полученных результатах Радиевый институт в марте 1938 г. докладывал Президиуму. За истекший промежуток времени Институт достиг еще ряда успехов в освоении циклотрона и располагает сейчас всеми данными для использования полной проектной мощности установки”. Далее высказывается просьба: “...учитывая, что циклотрон ГРИ является первым действующим циклотроном в Европе и что этот аппарат имеет большое значение для советской науки”, в срочном порядке провести мероприятия по укреплению штатов ускорителя и механических мастерских, повышению окладов сотрудников, оснащению мастерской станками, получению фондов на цветные металлы, размещению заказов, связанных с постройкой новой большой камеры на заводах, строительству новой трансформаторной будки. Документ был подписан и. о. директора профессором В. Г. Хлопиным и заведующим циклотронной лабораторией профессором И. В. Курчатовым.

Совершенствование циклотрона велось непрерывно, наряду с его использованием в экспериментах. Уже в начале 1939 г. при облучении литиевой мишени дейтронами устойчиво получались нейтроны с интенсивностью, эквивалентной нескольким килограммам радий-бериллиевых источников. В первой половине 1941 г. были получены пучки дейтронов с энергией около 5 МэВ при токе на пробнике до 40 мкА.

Наличие столь мощного источника нейтронов позволило нашим физикам и химикам немедленно включиться в изучение деления ядер (см. другие статьи этого сборника). Циклотрон использовался для наработки радиоактивных изотопов и их изучения. Может быть, самым важным в этом направлении было то, что еще перед войной на нем начали проводить длительные облучения больших масс урана с целью получения трансурановых элементов.

Война прервала эти работы. С эвакуацией Радиевого института в Казань циклотрон был законсервирован (обит досками и обложен мешками с песком^{*)}. Во второй половине 1944 г. группа сотрудников института во главе с М. Г. Мещеряковым вернулась в Ленинград для восстановления циклотрона. "Вернувшись в Ленинград в январе 1945 г., Хлопин сразу же окунулся в эксперименты на циклотроне, в ходе которых проводились непрерывные, длившиеся месяцами облучения массивных урановых блоков с целью накопления в них плутония" (из воспоминаний М. Г. Мещерякова). В. Г. Хлопину с сотрудниками удалось получить первые импульсные (около 200 импульсов в минуту) количества плутония и в дальнейшем приступить к разработке крупномасштабной технологии выделения плутония из облученного урана, порученной Радиевому институту Государственным комитетом обороны в 1943 г.

В последующие годы (вплоть до закрытия) ускоритель принадлежал лаборатории Ю. А. Немилова и служил главным образом для изучения прямых ядерных реакций с дейтронами (совместно с сотрудниками ЛГУ В. Ф. Литвиным, Л. В. Красновым, К. А. Гридневым) и деления ядер (Ю. А. Селицкий, И. М. Кукс, В. Б. Фунштейн, В. П. Эйсмонт). Работы на ускорителе прекратились лишь в 1976 г., и он стал музейным экспонатом. Его можно видеть на том же месте, в первом этаже первого здания института на ул. Рентгена, 1, где он был смонтирован более 60 лет назад.

2. Нейтронные генераторы

В самом начале 50-х годов в институте начал строиться специальный нейтронный генератор ("нейтронная трубка") - ускоритель прямого действия для ускорения дейтронов до энергии 200 кэВ и получения с их помощью нейтронов с энергией 14 МэВ по реакции $T(d,n)^4He$. Все основные элементы генератора - высокочастотный источник атомарных ионов, ВЧ-генератор для этого источника, дистанционная система управления подачей газа в источник и режимом его работы, блок высокого напряжения на 200 кВ и разделительный трансформатор для подачи мощности к ВЧ-генератору, магнитный анализатор тока ионов, камера для размещения и охлаждения тритиевой мишени, монитор нейтронного потока и др. - в значительной степени были сконструированы, изготовлены (частично с помощью мастерских института) и собраны молодыми сотрудниками института, только что закончившими ленинградские вузы. Они были объединены в "трубочную" бригаду: один из авторов статьи (В. П. Эйсмонт) - старший, Ю. М. Артемьев, И. А. Баранов, Ю. И. Белянин, М. И. Кузнецов и несколько морских офицеров-практикантов. В работе принимали большое участие также М. В. Блинов, Ю. А. Селицкий, С. М. Соловьев, Б. М. Ширяев и др.. Все они были сотрудниками лаборатории А. Н. Протопопова (до 1950 г. работавшего в КБ-11), специально созданной в институте для получения пучка нейтронов с энергией 14 МэВ и измерений на нем. Установка была построена в 1954 г., она позволяла получать ток дейтронов до 500 мкА и стабильный поток нейтронов, 10^{10} с^{-1} в полном телесном угле. Этими нейтронами облучались мишени из изотопов урана-235 и 238 и плутония-239 с целью определения выходов осколков деления и использования последних для определения коэффициента использования ядерного горючего при термоядерном взрыве. Важность задачи ощущалась по частоте появления и статусу "гостей". В середине 50-х годов на нашем генераторе побывали и президент АН СССР А. Н. Несмеянов (институт входил тогда в Академию наук) и много других важных фигур (в том числе и в генеральской форме). Ряд сотрудников лаборатории был удостоен правительственных наград.

В дальнейшем "трубка" использовалась для работ по физике деления, принесших много интересных результатов (см. другие статьи этого сборника). В начале 60-х годов в связи с переездом на новую площадку нейтронный генератор был демонтирован и вновь установлен на новом месте.

^{*)} Эти предосторожности были необходимы в связи с постоянными бомбардировками и артиллерийскими обстрелами Ленинграда во время блокады. (Прим. ред.)

Интенсивность исследований, проводимых в Радиевом институте, возрастала, и было принято решение о создании новых, более интенсивных источников нейтронов. В середине 60-х годов в лаборатории А. Н. Протопопова начались работы с участием НИИЭФА по разработке проекта нейтронного генератора, ускоряющего дейтроны до энергий 400 кэВ. Монтаж и наладка установки велись довольно долго: ускоритель был введен в эксплуатацию в 1972 г., он обеспечивал потоки нейтронов, образующихся в реакциях (d,d) и (d,t) с энергией 3 и 14 МэВ, соответственно, и с интенсивностью до $5 \cdot 10^{11} \text{ с}^{-1}$. На этом ускорителе можно было осуществлять также и импульсный режим работы, что существенно расширяло возможности проводимых экспериментов. Сразу же после физического пуска ускоритель стал довольно мощным и полезным инструментом в проводимых исследованиях.

Примерно в эти же годы в лаборатории К. А. Петржака также появились нейтронные генераторы. Первый из них (НГ-200), разработанный в Киевском университете и введенный в действие в 1970 г., оказался не слишком удачным, и в 1978 г. он был заменен на разработанный в НИИЭФА НГ-150, который по интенсивности потока нейтронов с энергией 14 МэВ был таким же, как и НГ-400.

В работах по созданию и монтажу новых нейтронных генераторов, помимо упомянутых выше, принимали активное участие В. М. Адамов, С. С. Коваленко, Б. К. Селезнев, Л. В. Драпчинский, В. И. Шпаков, О. И. Косточкин, Б. В. Румянцев, А. М. Соколов, А. В. Фомичев и многие другие.

Для проведения работ на нейтронных генераторах физиками института были разработаны (и постоянно совершенствовались) многочисленные методики и создан ряд уникальных экспериментальных установок, что позволяло выполнять исследования на высоком уровне и получать результаты, которые являлись весьма важными как для развития ядерной физики низких энергий, так и для прецизионных измерений ядерно-физических данных. Так, например, были разработаны времяпролетные спектрометры для изучения спектров мгновенных нейтронов деления (М. В. Блинов, Н. М. Казаринов, О. И. Батенков, Г. С. Бойков, В. А. Витенко, В. Д. Дмитриев, Э. М. Козулин, В. И. Юревич); созданы установки для изучения (n,p') и других реакций, приводящих к образованию γ -излучателей (Б. М. Ширяев, А. А. Филатенков, С. В. Чуваев, В. М. Саидгареев и др.); установка для измерений абсолютных значений сечений деления ядер методом коррелированных во времени сопутствующих частиц, предложенным, кстати, сотрудниками Радиевского института (С. С. Коваленко, И. Д. Алхазов, Л. В. Драпчинский, О. И. Косточкин, В. И. Шпаков, А. В. Фомичев и др.).

3. Ускоритель ЭГ-5

Второй после циклотрона большой ускоритель Радиевского института - ускоритель типа Ван-де-Граафа, или электростатический генератор (ЭГ-5). Его сооружение в Радиевом институте было инициировано Ю. А. Немиловым в конце 50-х годов для проведения ядерно-физических исследований и работ по измерению ядерных данных на пучках заряженных частиц и нейтронов с высоким разрешением по энергии. В это время не выпускалось серийных электростатических ускорителей, поэтому за основу был взят электростатический генератор, разработанный НИИЭФА в качестве форинжектора для протонного синхротрона. Проект был переработан группой сотрудников Радиевского института во главе с А. С. Кучеровым совместно с конструкторами из НИИЭФА для проведения ядерно-физических исследований. В 1963 г. ускоритель был запущен в эксплуатацию. Монтаж, наладка и эксплуатация ускорителей проводились под руководством А. С. Кучерова, Л. С. Лебедева и А. В. Орловского.

Ускоритель ЭГ-5 является наиболее подходящим для исследования ядерных реакций с заряженными частицами при низких энергиях, и первоначально он широко использовался вместе с мультиспектрографом (многоугловым магнитным спектрографом) при изучении подбарьерных реакций срыва. В конце 60-х годов для проведения времяпролетных исследований был разработан, изготовлен и налажен импульсный ионный источник, который позволял на выходе ускорителя получать пучок протонов или дейтронов длительностью

1-2 нсек, амплитудой 0,5 мА. Этот источник использовался, главным образом, при измерении сечений неупругого рассеяния нейтронов.

Большой объем работ на ускорителе был выполнен при изучении деления ядер радия, урана, нептуния нейтронами делительного спектра. В 70-х годах ускоритель использовался совместно с большим магнитным спектрографом для детального исследования схем энергетических уровней ядер и измерения масс ядер. В 80-х годах в Радиевом институте была создана установка для прецизионных измерений сечений деления ядер нейтронами с использованием метода коррелированных во времени частиц при дополнительном разделении сопутствующих частиц в магнитном поле. Нейтроны для исследований получали при взаимодействии пучка дейтронов от ЭГ-5 с дейтериевой мишенью. Работы на установке выполнялись в рамках международного сотрудничества. С использованием ускорителя впервые были выполнены измерения сечений радиационного захвата нейтронов для ряда ядер.

На пучках заряженных частиц ускорителя решался широкий круг задач прикладного характера. Это и проведение элементного анализа методами упругого рассеяния и по ядерным реакциям, и исследования кристаллических структур, и изучение материалов с точки зрения волноводных свойств.

Высокая эффективность использования ускорителя ЭГ-5, свыше 3000 часов в год, обязана огромной инициативной работе коллектива, занятого на его эксплуатации, по повышению надежности и качества оборудования. Впервые именно в Радиевом институте на ускорителе были применены электроразрядные насосы, отработана технология их эксплуатации и ремонта. В 1981-1983 гг. была проведена замена зарядной ленты на цепную (пелетрон), в результате чего была улучшена стабильность энергии в 2-3 раза и повышена надежность работы. В 1985-1988 гг. силами коллектива была спроектирована, изготовлена и налажена современная по оборудованию система управления ускорителем.

К сожалению, ограничение финансирования ядерных исследований и измерения ядерных данных в настоящее время не позволяют использовать уникальные возможности ускорителя ЭГ-5, который законсервирован в рабочем состоянии.

4. Ионный синхротрон

В 60-е годы резко возрос интерес к ускорителям легких и тяжелых частиц промежуточных энергий. В этой области - области энергий в несколько десятков МэВ на нуклон - достигаются такие рубежи физики ядра, как звуковой барьер (15-30 МэВ/нукл.) и энергия Ферми (30-40 МэВ/нукл.). Ожидается, что на первом начинают развиваться гидродинамические эффекты сжатия ядерной материи, на втором - существенные изменения механизма столкновения ядер, происходит переход от взаимодействия между ядрами как целыми, к взаимодействию между составляющими их нуклонами. Хотя речь идет в основном о тяжелых ионах, для интерпретации наблюдаемых эффектов необходимо их сравнение с результатами на легких частицах, в том числе и на протонах.

В институте в конце 60-х годов начиналось проектирование нового лабораторного корпуса на новой площадке. Директор института В. М. Вдовенко выделил физикам около 600 м² в цокольном этаже этого корпуса. Один из авторов сего очерка (В. П. Эйсмонт) предложил построить на этой площади ускоритель для получения легких и тяжелых ионов промежуточных энергий. Заместитель директора по физике Н. А. Перфилов поддержал эту идею (и в дальнейшем приложил массу сил для ее осуществления). Начались поиски изготовителя и денег. Полтора миллиона рублей - деньги большие по тем временам - в Министерстве (мы тогда были уже в Средмаше) нашлись, и нам их охотно отдали, потому что был конец года (1970-го), и деньги все равно бы пропали, если бы не были истрачены до 31 декабря (существовал такой порядок). Время определило и место изготовления - Институт ядерной физики Сибирского отделения АН СССР, возглавлявшийся академиком Г. И. Будкером. Этот институт имел специальное, почти уникальное, разрешение Правительства на возможность перевода денег на новый бюджетный год. Уникальность института состояла и в том, что он имел очень большую производственную базу - около 1000 человек, причем половина

института трудилась в механических мастерских. Почти все элементы своих ускорителей он изготавливал сам. И, конечно, был в состоянии разработать и изготовить ускоритель для нас. Состоялся разговор Г. И. Будкера с министром Е. П. Славским, деньги были выделены и работа ... встала. Встала почти на 10 лет, потому что строительство корпуса на новой площадке основательно затянулось. Вместо 1964 г., как значилось в очень высоком постановлении, корпус, где мог быть размещен ускоритель, был сдан лишь в 1984 г. При этом, как неоднократно подчеркивал начальник Главка Минсредмаша А. К. Круглов, оказывавший большую поддержку созданию ускорителя, уже сам ускоритель служил для ускорения строительства, так как в 1980 г. он был уже изготовлен, принят комиссией Министерства на стенде исполнителя (в Новосибирске) и должен был получить постоянную прописку. Ускоритель был смонтирован одновременно со сдачей корпуса (в "осях" ускорителя). В следующем году был осуществлен его физический пуск в режиме ускорения протонов. Но 1985-й год - не 1975-й, в котором предполагалось его пустить. Слишком запоздавший с рождением, ускоритель оказался к тому же еще очень сложным в эксплуатации. Стремление сделать его универсальным, дешевым и небольшим при высоких выходных параметрах, определенных техзаданием, породило около десятка изобретений на стадии разработки и последующих стадиях строительства. Много авторских свидетельств было получено разработчиком вместе с нами (может быть, вернее даже сказать - нами с разработчиком). Такая высокая степень нестандартности имела и недостаток - сделала ускоритель мало похожим на прибор, начинающий работать с включением в "розетку". Особенно сложным оказался источник многозарядных ионов. Дело в том, что, согласно окончательному варианту техзадания, ускоритель был изготовлен в виде слабофокусирующего синхротрона с диаметром равновесной орбиты около 3 метров и коэффициентом магнитной жесткости $K=200$ (самый маленький синхротрон в мире). Это должно было позволить получить на нем ионы с энергией на нуклон $E=200 Z^2/A^2$. Для получения конечной энергии - 50 МэВ/нукл. - необходимо было иметь на входе отношение заряда иона к массе $Z/A = 0,5$, т. е. впрыскивать в синхротрон голые ядра. Такой ионный источник, как источник голых ядер, имел бы, конечно, и большое самостоятельное значение для атомной и ядерной физики. Основанный на принципе обдирки атомов сильноточным электронным пучком (с плотностью тока выше 1000 А/см²), он и до сих пор нигде в мире не достиг производительности, необходимой для ускорителя с высокой частотой следования импульсов (наш ускоритель по частоте - 50 импульсов в секунду - на порядок превосходил другие существующие синхротроны).

К задержке со строительством, технической сложности машины добавились трудности с комплектацией штатов (штатные единицы были в то время самым большим дефицитом), слишком медленное освоение эксплуатационными службами института внешних технических систем ускорителя, в частности аппаратов воздушного охлаждения воды, АВОВ, (подобно египетским пирамидам "украшающих" внутренний двор института). Все это привело к тому, что физические измерения на ускорителе удалось начать лишь в середине 1988 г. и то только в режиме ускорения протонов до энергии 100 МэВ. В начале 1994 г. синхротрон был законсервирован из-за недостатка средств на его эксплуатацию.

Закончив с "биографией" ускорителя, отметим, что работа над ним начиналась не большой группой сотрудников: В. П. Эйсмонт, В. П. Шиловым, А. В. Поздняковым и др. в составе лаборатории Н. А. Перфилова и была продолжена Лабораторией ионного синхротрона (зав. лаб. В. П. Эйсмонт), образованной в 1977 г. На лабораторию легли все заботы по контролю за договором на разработку и изготовление синхротрона, за проектированием помещений для него, за всеми монтажными и пусконаладочными работами, а также за подбор и обучение команды ускорителя (одно время штат лаборатории составлял 45 человек - научных сотрудников, инженеров, техников, лаборантов). Главными действующими лицами были Г. А. Тутин, руководитель группы ионного источника, В. П. Шилов, С. М. Трофименко - главные инженеры (последовательно), а также А. Г. Доничкин, Н. И. Козлов, В. А. Столяров, Н. А. Тарасов - начальники служб ускорителя.

На лабораторию же была возложена ответственность за подготовку программы исследований на ускорителе и комплексе экспериментальных установок. Такой комплекс соз-

давался в ряде лабораторий физических отделов, в лабораториях Н. А. Перфилова, Б. С. Желепова, Б. Н. Беляева, а также в самой лаборатории ионного синхротрона. И хотя "рабочий век" ускорителя оказался очень коротким - всего лишь около 5 лет - и была осуществлена лишь малая часть задуманного, большинство из выполненных и опубликованных работ (всего около 10) были пионерскими в области энергий протонов 10-100 МэВ. Среди них назовем исследования выходов К- и L-серии характеристического излучения Au, Np, Pu и Am (Г. А. Тутин, А. В. Киреев, И. В. Рыжов), измерение продольного импульса, передаваемого ядрам ^{232}Th , $^{233,235,238}\text{U}$, и определение сечений деления группы ядер от тория до америдия (А. Н. Смирнов, И. Ю. Горшков, А. Т. Дьяченко, А. В. Прокофьев), исследование формы и тонкой структуры изотопных распределений осколков деления Rb и Cs при делении ^{238}U с помощью масс-спектрометра в линию с ускорителем (Б. Н. Беляев, В. Д. Домкин, В. С. Мухин). Ряд результатов этих работ оказался полезным не только для лучшего понимания механизма взаимодействия протонов промежуточных энергий с атомами и ядрами, но и для создания банка ядерных данных для промежуточных энергий, необходимого для разработки физических основ безопасной ядерной энергетики на основе гибридных, ускорительно-реакторных систем. В последнем отношении, в частности, ускоритель мог бы играть заметную роль и сегодня.

5. Малогабаритный циклотрон МГЦ-20

Сразу после прекращения деятельности первого в Европе циклотрона в сентябре 1976 г. ввиду несоответствия требованиям современного эксперимента встал вопрос о сохранении в институте ускорительной экспериментальной базы, но на более высоком уровне. К этому времени сотрудниками НИИЭФА им. В. Д. Ефремова был разработан циклотрон широкого использования МГЦ-20, который позволял ускорять протоны, дейтроны, альфа-частицы и ядра гелия-3 в широкой области энергий (2-18 МэВ) с приемлемой интенсивностью пучков. Первый циклотрон этого типа с 1974 г. успешно эксплуатировался в Финляндии (Турку), как для экспериментальных исследований в области ядерной физики, так и для получения радионуклидов медицинского назначения. В ноябре 1976 г. по инициативе Ю. А. Селицкого и при поддержке Ю. А. Немилова было направлено письмо в Министерство по атомной энергии о необходимости установки циклотрона МГЦ-20 для выполнения работ по измерению нейтронных констант и изучению ядерных реакций. 24 декабря 1976 г. в адрес директора НИИЭФА, директора Радиевого института и начальника 18 Главного управления было направлено ответное письмо из Министерства о включении в план работ 1978 г. изготовления одного комплекта МГЦ. Приказом директора института ответственными по подготовке документации и установке МГЦ были назначены С. С. Коваленко и Ю. А. Селицкий. Однако в связи с перегрузкой опытного производства НИИЭФА работами особой важности начало работ по изготовлению циклотрона было перенесено на 1983 г.

К сожалению, изготовление циклотрона для Радиевого института совпало с выполнением НИИЭФА экспортного заказа Венгрии на изготовление такого же циклотрона. Экспортным заказам в то время уделялось особое внимание, поэтому все оборудование и узлы более высокого качества включались в комплект для Венгрии, что сказалось на монтаже, наладке и эксплуатации циклотрона Радиевого института.

С целью экономии средств циклотрон планировалось разместить в готовом корпусе Радиевого института, где уже работал электростатический ускоритель ЭГ-5. Параллельно с изготовлением ускорителя проводилась реконструкция корпуса. Для сокращения времени между изготовлением и вводом в эксплуатацию циклотрона было принято решение не проводить в НИИЭФА измерения магнитных полей и полную сборку циклотрона. В 1987 г. были смонтированы основные узлы циклотронного комплекса в институте, и в 1989 г. получен первый пучок. Работа по оснащению института новым циклотроном включала бесконечные контакты и согласования в Министерстве, ВНИИПИЭТ, НИИЭФА, ГЛАВАПУ, строительномонтажных управлениях и т. д. Эта огромная работа была проведена Ю. А. Селицким. Трудно представить более целеустремленного организатора работ, способного убеждать и

доводить до конца начатое дело. Работы по монтажу, отладке и запуску циклотрона проводились коллективом лаборатории под руководством Л. М. Солина и Л. С. Лебедева при участии сотрудников НИИЭФА.

В ядерно-физических исследованиях циклотрон МГЦ-20 эксплуатировался ограниченно. В настоящее время он используется, главным образом, для производства изотопов, среди которых первое место занимают изотопы медицинского назначения.

6. Микротрон МТ-25

Решение о строительстве для Лаборатории научных основ дозиметрии Радиевого института (начальник лаборатории В. В. Смирнов) ускорителя электронов - микротрона было принято в начале проектирования нового здания института, и помещение для его установки в этом здании было предусмотрено проектом. Ускоритель электронов этого типа был выбран потому, что он отличается простотой в эксплуатации, малыми габаритами и небольшим энергопотреблением. К тому времени был накоплен большой опыт в изготовлении и эксплуатации таких машин в ЛЯР ОИЯИ (Ю. Ц. Оганесян, А. Г. Белов) и Физической лаборатории ИФП АН СССР (С. П. Капица, В. Н. Мелехин). Именно в этой лаборатории были разработаны методы инжекции электронов в ускоряющий резонатор микротрона, которые позволили резко увеличить ток ускоренных частиц и сделали этот тип ускорителя мощным инструментом для использования в различных областях науки и техники. Ускоритель с максимальной энергией электронов 22 МэВ предназначался для проведения работ, связанных с определением сечений взаимодействия и исследованием пространственно-энергетических характеристик вторичных излучений, возникающих в веществе под действием электронного и фотонного излучений в широком диапазоне энергий, активационного анализа материалов и исследований в области их радиационной стойкости.

В связи с тем, что строительство здания затягивалось, переговоры о начале работ по изготовлению микротрона начались только в декабре 1983 г. После проведения совещания с представителями ОИЯИ было решено разместить заказ на изготовление ускорителя в Ереванском физическом институте (руководитель микротронной лаборатории М. Л. Петросян). В июне 1984 г. было согласовано техническое задание, и в октябре 1984 г. заключен договор об изготовлении микротрона МТ-22, аналогичного работавшему тогда в ЛЯР ОИЯИ. Договор предполагал запуск ускорителя в Ереване во II квартале 1986 г., а в IV квартале того же года - в Ленинграде. В ходе работы (до начала изготовления) было решено изготовить более современную машину, разработка которой велась в то время в ОИЯИ - микротрон бескамерного типа с максимальной энергией 25 МэВ. К работе подключился конструктор отдела В. В. Смирнова Е. Н. Логинов.

В связи с отставанием от графика изготовления "физический пуск" микротрона состоялся в Ереване в октябре 1987 г., и только в октябре 1988 г. на первом этапе пусконаладочных работ в Ленинграде, после устранения недоделок и результатов некачественного изготовления, внутри камеры ускорителя был получен ток, равный 2,5 мкА при энергии ускоренных электронов, равной 23 МэВ. Система вывода пучка к этому времени еще не была изготовлена ЕрФИ. В дальнейшем по ряду причин (землетрясение в Армении, начало политической перестройки в стране и т. д.) работы по изготовлению ряда вспомогательных узлов микротрона замедлились, а затем практически прекратились. Начиная с 1992 г., работы на ускорителе были продолжены: отработаны первый и второй режимы ускорения, доработано выводное устройство, изготовлен и установлен электропровод и система квадрупольных линз для фокусировки пучка, модернизирована вакуумная система. В результате этой работы был получен ток электронов на тормозной мишени ускорителя, равный 10 мкА при 24 МэВ (минимальная энергия электронов, которые можно вывести из вакуумной камеры ускорителя, в настоящее время равна 5 МэВ) и проведены первые эксперименты на пучках электронов и тормозного излучения. На пучке тормозного излучения проводились исследования прикладного характера: обнаружение взрывчатых веществ с использованием гамма-излучения высокой энергии, гамма-активационный анализ ряда мате-

риалов по короткоживущим изотопам, исследовались возможности окрашивания природных драгоценных камней (топазы, аметисты, сапфиры) при облучении электронами высокой энергии. В последнее время начаты работы в области фотоделения тяжелых ядер и исследования характеристик детекторов осколков деления и легких заряженных частиц в поле тормозного излучения (С. В. Хлебников). В целях получения иода-123, применяющегося в медицинской диагностике, разработана конструкция мишенного узла для наработки этого изотопа путем облучения ксенона-124 в твердой фазе тормозным излучением с максимальной энергией 25 МэВ. Для этой же цели разработано техническое предложение на подвижный комплекс микротронной лаборатории на базе автофургона с прицепом. В настоящее время планируется использование ускорителя в рамках программы совместных российско-американских работ по радиационной стерилизации древесины, для чего изготавливается устройство вывода пучка электронов с энергиями 2-4 МэВ.

Сопровождение изготовления микротрона в ЕрФИ, пусконаладочные и конструкторские работы в разное время осуществляли сотрудники отдела ядерно-физических исследований, возглавляемого доктором физико-математических наук, профессором В. В. Смирновым: С. А. Кумзеров, А. В. Кучеров, Г. М. Охотников, Е. В. Логинов, Ю. Д. Крутов. Большую помощь в работе на всех ее этапах оказывал сотрудник ЛЯР ОИЯИ А. Г. Белов. В настоящее время микротрон обслуживают сотрудники лаборатории активационного анализа, входящей в состав НПП "Кирси" НПО "Радиевый институт им. В. Г. Хлопина" (директор НПП М. Л. Савопуло), - В. А. Водоватов, В. Я. Корсунский, Е. В. Селезнев, М. Н. Чубаров.

Заключение

Радиевый институт был пионером развития ускорительной техники в нашей стране (в начале 30-х годов лишь Украинский физико-технический институт также проявлял активность в этом направлении и строил ускорительную трубку по примеру Кембриджа). Кроме "первого в Европе" в институте было построено еще семь ускорителей. Каждый из восьми сыграл свою (большую или меньшую) роль в науке и практике. Некоторые "покинули строй" вполне закономерно - по причине морального и технического износа, другие, например ионный синхротрон и ускоритель ЭГ-5 - преждевременно, не "выслужив срока". Остались в "строю" три ускорителя - НГ-400, МГЦ-20 и микротрон. Все они работают, и "кризиса жанра" не предвидится. Сейчас трудно сказать, каким и когда должен быть новый ускоритель (трудно даже заставить себя думать об этом), но, чтобы была наука, когда-то он должен быть. Другого пути никто пока не придумал. "Машинный век", который 60 лет назад наступил в ядерной физике, - путь длиной в тысячелетия.

ВОСПОМИНАНИЯ О СПЕКТРОМЕТРАХ

Б. С. Желепов

Введение

В начале 30-х годов было установлено, что в некоторых ядерных реакциях возникают очень жесткие гамма-лучи с энергией квантов ~ 3 МэВ; их можно было обнаружить по появлению в камере Вильсона электронных треков большой энергии комптон-электронов, выбитых из стенок камеры.

Когда камеру Вильсона поместили в магнитное поле, было замечено, что часто появляются пары - e^- и e^+ . Фундаментальные явления природы - образование пар и их аннигиля-

ция - давно волновали физиков, но подступа к ним почти не было. Это был период, предшествовавший возникновению современной ядерной физики.

В 1929-1941 гг. я работал в Физико-техническом институте, в лаборатории А. И. Алиханова. Мы занимались ядерной спектроскопией радиоактивных изотопов, возникающих при бомбардировке разных веществ альфа-частицами. Техника у нас в лаборатории была для того времени передовой - счетчики Гейгера-Мюллера, схемы совпадений, магнитный анализ энергий частиц. Активность препаратов была отличной: мы использовали для их получения сильные источники альфа-частиц из продуктов распада эманации радия (до 200 милликюри). Продукция лаборатории была почти классической: хорошо измеренные непрерывные спектры β - и β^+ -частиц. Наши публикации, в том числе и заграничные, шли потоком; все было стабильным. О ядерной физике в более широком плане мы только читали и мечтали, однако кое-где начинались работы с ускорителями.

В Ленинграде, в Радиевом институте, под руководством Льва Владимировича Мысовского проектировался, а затем строился циклотрон - первый в Европе. И проектирование, и изготовление циклотрона осуществлялись очень медленно: ни одного специалиста по ускорителям тогда в СССР не было, а весь коллектив циклотронщиков состоял из четырех человек.

В Харькове, в Физико-техническом институте, К. В. Синельников и А. И. Вальтер строили ускоритель Ван-де-Граафа на 1 МэВ, но строительство двигалось очень медленно и не казалось перспективным.

В 1932 г. были открыты нейтроны. Они были получены в Кембридже на ускорителе с относительно небольшой энергией, равной ~ 400 кэВ. Появилась надежда, что, когда начнет работать циклотрон Радиевского института, нейтроны будут и у нас.

Вскоре выяснилось, что нейтроны, будучи нейтральными частицами, не отталкиваются от атомных ядер, а вступают с ними в сильное взаимодействие. Так открылся новый раздел ядерной физики - нейтронная физика.

Вероятно, многие физики в это время думали о том, как им примкнуть к новой (нейтронной) тематике, к чему следует готовиться теоретикам и какие возможности откроются перед экспериментаторами.

Перечислим главные возможности.

Изучение радиоактивных веществ, создаваемых циклотроном. Циклотрон не имел приспособлений для вывода пучка; не было также устройства для извлечения мишени после облучения. Однако даже в "диффузном" режиме вокруг камеры возникало нейтронное поле, в котором можно было облучать разные жидкости и затем по методу Сцилларда и Чалмерса [1] выделять радиоактивные вещества и изучать их спектры. Мы с А. А. Константиновым делали такие работы [2]. Но число таких задач было ограничено химией.

Изучение полей гамма-лучей и нейтронов вокруг циклотрона. При работе циклотрона вокруг него существуют сильные поля гамма-лучей и нейтронов. Поле гамма-лучей создавалось, в основном, радиоактивными веществами, получавшимися в камере циклотрона, а также веществами, накопившимися в окружающих предметах (магнит и т. п.). Это поле гамма-лучей имело энергию до 3 МэВ. Но вокруг циклотрона возникало и поле нейтронов. Нейтроны взаимодействовали с окружающими веществами, захватывались, вызывали ядерные реакции. При этом получались сильно возбужденные состояния ядер, разрядка которых сопровождалась очень жесткими гамма-лучами, возможно с энергией до 5-6 МэВ. Эта тематика была интересной, но не было аппаратуры для измерения энергий гамма-квантов; имелись только ионизационные камеры с фильтрами, чего было явно недостаточно.

Изучение взаимодействия тепловых нейтронов с ядрами. Когда быстрый нейтрон захватывается ядром, получается сильно возбужденное, быстродвигающееся ядро; гамма-лучи такого ядра получают доплеровское смещение в зависимости от направления вылета кванта. Если захватывается медленный нейтрон, то ядро оказывается сильно возбужденным, но почти неподвижным; доплеровского размытия энергий гамма-лучей почти не должно быть - для спектроскопии это - "клад". Возник проект: 1) добиться получения наиболее интенсив-

ного потока медленных нейтронов и 2) научиться измерять энергию очень жестких гамма-переходов. Приборов для точного определения энергии очень жестких гамма-квантов в то время не было. Но параллельно с испусканием гамма-кванта может происходить конкурирующий процесс образования пары $e^- + e^+$ с суммарной энергией $E_\gamma = 2m_0c^2$. Измерить энергию электронов гораздо проще, чем гамма-квантов.

Мое предложение заключалось в измерениях энергий $e^- + e^+$ с помощью магнитного анализа. Предложение было принято Л. В. Мысовским и В. Г. Хлопиным (РИ), А. И. Алихановым и А. Ф. Иоффе (ЛФТИ). Особенно меня порадовало разрешение В. Г. Хлопина на занятие комнаты, соседней с циклотроном, и на сооружение различных защит на стене, разделявшей комнаты: металлического экрана от электромагнитного поля циклотрона, баритовой стенки от гамма-лучей и "водородной" стенки от нейтронов. Пока налаживался циклотрон, я собирал магнитную цепь для регистрации $(e^- + e^+)$ - совпадений.

Л и т е р а т у р а

1. Szillard L., Chalmers T.A. // Nature, 1934, v. 134, p. 462.
2. Джелепов Б. С., Константинов А. А. // ДАН СССР, 1941, т. 30, N 8, с. 696; т. 31, N 1, с. 553.

Парный спектрометр $e^- + e^+$

Схема парного спектрометра изображена на рис. 1. Спектрометр должен был работать следующим образом: медленные нейтроны должны были поступать из парафинового блока или из сосуда с водой и попадать на мишень; предполагалось выбирать мишень, сильно поглощающую тепловые нейтроны; ядра атомов мишени, захватившие нейтроны, должны были возбуждаться до 6-8 МэВ; при разрядке этих возбужденных состояний должны были возникать, кроме гамма-лучей, пары $e^- + e^+$; в магнитном поле электроны и позитроны должны были фокусироваться на двух счетчиках Гейгера-Мюллера; скорость счета совпадений должна была измеряться в зависимости от магнитного поля; в полученном таким образом спектре совпадений должны получаться пики, по положению и площади которых можно судить об энергии и интенсивности парного перехода.

Для градуировки спектрометра были нужны достаточно жесткие гамма-лучи (> 3 МэВ), образующие соответствующие пары. Среди радиоактивных веществ эти излучатели встречаются редко, и среди доступных нам веществ таких не было. Однако выход нашелся. Из английской работы уже было известно, что гамма-лучи с энергией ~ 3 МэВ возникают при бомбардировке бериллия альфа-частицами. В физической лаборатории Рентгенологического института был склад тонкостенных стеклянных трубочек, которые когда-то наполнялись эманацией и прикладывались к раковым опухолям. Их было много. Эманация и основные продукты ее распада давно распались, но на стенках трубочек остался ^{210}Po - его период полураспада 138,3763 дня [1]. Распадаясь, ^{210}Po испускает альфа-частицы с энергиями 5,3045 и 4,524 МэВ [1]. Таких энергий достаточно, чтобы преодолеть потенциальный барьер бериллия, и получить по реакции $^4_2\text{He} + ^9_4\text{Be}$ возбужденные состояния $^{13}_6\text{C}$, которые испускают гамма-лучи с энергией 3,0684 МэВ [1].

Стеклянные трубочки, содержавшие ^{210}Po , были тщательно растерты в порошок и промыты. ^{210}Po в основном переходил в раствор: повторные растирания и промывания уже не давали заметной альфа-активности. Затем методом электролиза ^{210}Po осаждался на тонкую бериллиевую фольгу, которая оборачивалась другой бериллиевой фольгой; таким образом, куда бы ни вылетали альфа-частицы, они обязательно попадали на бериллий. Полученный таким способом источник пар $e^- + e^+$ помещался в спектрометр и измерялась скорость (e^-, e^+) -совпадений в зависимости от магнитного поля. Получился вполне отчетливый максимум при 3 МэВ. Можно было утверждать, что парный спектрометр работает правильно. Соответствующая заметка была опубликована [2].

На осень 1941 г. планировалось сооружение защиты парного спектрометра от общего гамма-фона и пробная работа спектрометра с нейтронами. Но, увы, началась Великая Отече-

ственная война! По военным делам я съездил в Свердловск, Москву, Казань, но, конечно, меня интересовала судьба установки - все же она была результатом работы предыдущих лет. Я вернулся в Ленинград 29 апреля 1942 г. Ни циклотрон, ни парный спектрометр от войны не пострадали; они сохранились до конца войны. Но Радиевый институт был в Казани, а небольшая часть его, оставшаяся в Ленинграде, средств не имела.

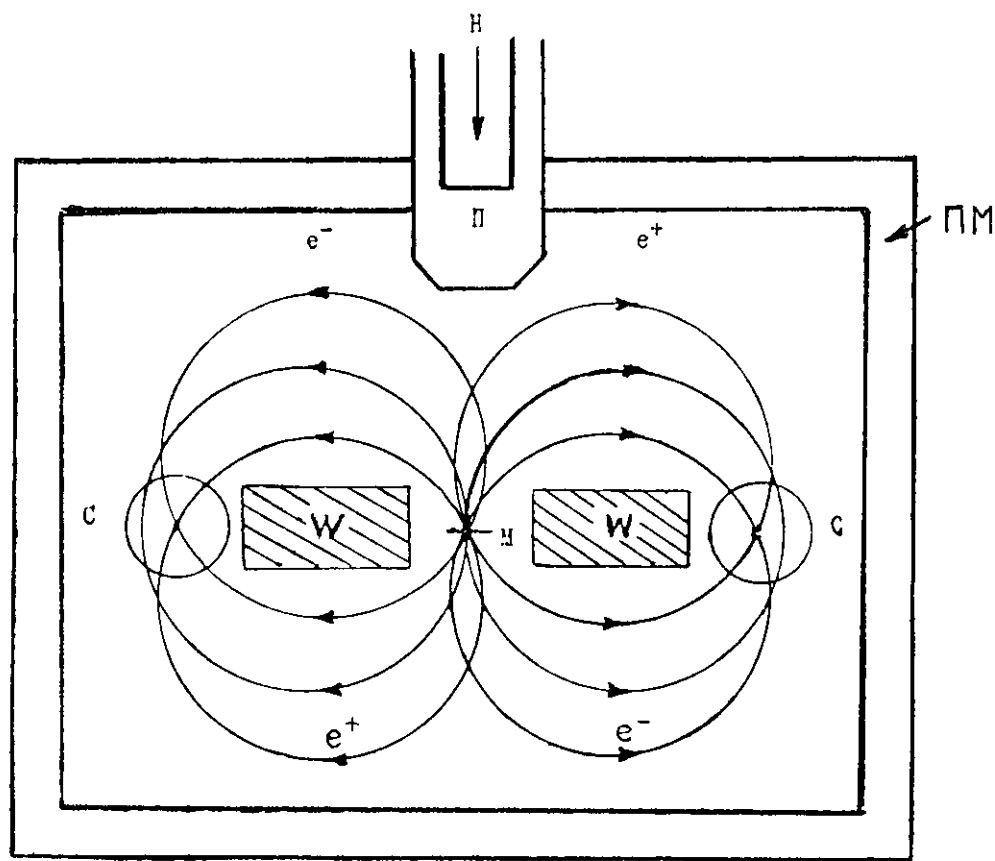


Рис. 1. Спектрометр для $e^- + e^+$ совпадений:

М - мишень, поглощающая тепловые нейтроны; Н - поток нейтронов; ПМ - полюса магнита; П - парафин; W - вольфрамовые блоки, поглощающие гамма-лучи; С - счетчики Гейгера-Мюллера.

Когда институт вернулся из эвакуации, возник вопрос, можно ли быстро восстановить циклотрон и спектрометр. Было ясно, что для этого потребуется несколько лет. Но было ясно и другое. Когда начали работать ядерные реакторы, появилось большое количество разных радиоактивных изотопов. Не было достаточно хороших сведений о гамма-спектрах этих изотопов в области энергий от 100 кэВ до 3 МэВ. Для получения таких сведений нужны были приборы, использующие комптон-эффект. Вот мы и перешли на создание ритрона и элтрона - о них речь пойдет в следующей статье.

В начале 60-х годов пришли сведения о создании полупроводниковых спектрометров.

Парный гамма-спектрометр отошел на второй план: энергии гамма-лучей быстрее и точнее измерялись на полупроводниковых спектрометрах; но, возможно, он еще понадобится при определении относительных интенсивностей жестких гамма-линий.

Л и т е р а т у р а

1. Lederer C. M, Shirley V. S. Table of Isotopes, N.Y., Waley, 1978.
2. Джелепов Б. С. // ДАН СССР, 1939, т. 23, N 1, с. 25.

Гамма-спектрометры - ритрон и элотрон

К 1940 г. в ядерной спектроскопии сложилось следующее положение. После открытия искусственной радиоактивности число радиоактивных элементов стало очень быстро расти - к 1940 г. их было больше сотни. При распаде ядер этих элементов наблюдались: 1) альфа-частицы, 2) бета-частицы, 3) электроны внутренней конверсии и 4) гамма-лучи. Кроме этих видов распада, существует спонтанное деление ядер, но оно наблюдается только в специально созданных условиях.

В самых первых опытах по исследованию радиоактивности альфа-частицы и электроны наблюдались в камере Вильсона. Но при этом гамма-лучи наблюдались только по вторичным явлениям - по фотоэффекту, комптон-эффекту и по эффекту образования пар.

Энергии альфа-частиц и электронов легко определялись в камере Вильсона; энергии жестких гамма-квантов, лежащих в области 0,5-5,0 МэВ, приходилось определять по комптон-эффекту: конверсия и фотоэффект у них малы. Нужен был хороший метод для исследования гамма-лучей с энергией 0,5-5,0 МэВ.

Если радиоактивный источник закрыть достаточно толстым слоем легкого вещества (рис. 2), то альфа-, бета-частицы и конверсионные электроны поглотятся, и из закрывающего легкого вещества будут вылетать комптон-электроны. Анализируя энергии этих электронов по отклонению в магнитном поле, можно получить представление о гамма-спектре радиоактивного вещества.

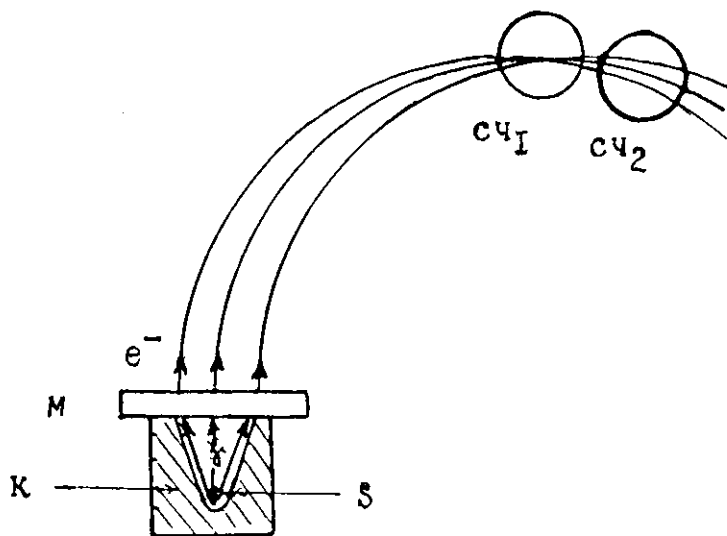


Рис. 2. Схема первого опыта по исследованию гамма-лучей по комптон-электронам:

S - источник радиоактивного излучения; M - мишень из вещества с малым Z; K - контейнер из Pb;
СЧ₁ и СЧ₂ - счетчики Гейгера-Мюллера

Такие опыты проводились еще в 1940 г. Б. С. Дзелеповым и студентом ЛГУ В. Даниловым. Радиоактивные вещества в то время получались на циклотроне Радиевого института. В опыте (рис. 2) наблюдались совпадения комптон-электронов в двух счетчиках Гейгера-Мюллера (схема совпадений была создана совместно с М. С. Козодаевым).

Война прервала эти опыты. Они были возобновлены после войны в 1948 г. в Радиевом институте АН СССР Б. С. Дзелеповым и М. Л. Орбели [1]. Ими был построен "ритрон" - прибор, изображенный на рис. 3. Радиоактивный источник находился вне камеры спектрометра; он был окружен защитой из легкого вещества, чтобы альфа- и бета-частицы не проходили в прибор. Проходил только коллимированный пучок гамма-лучей; на его пути ничего не было, когда измерялся фон двойных совпадений, или находилась пластмассовая пленка толщиной ~ 50 микрон. Камера находилась в магнитном однородном поле, которое при измерениях постепенно увеличивалось. Измерялось число совпадений в зависимости от напряженности магнитного поля.

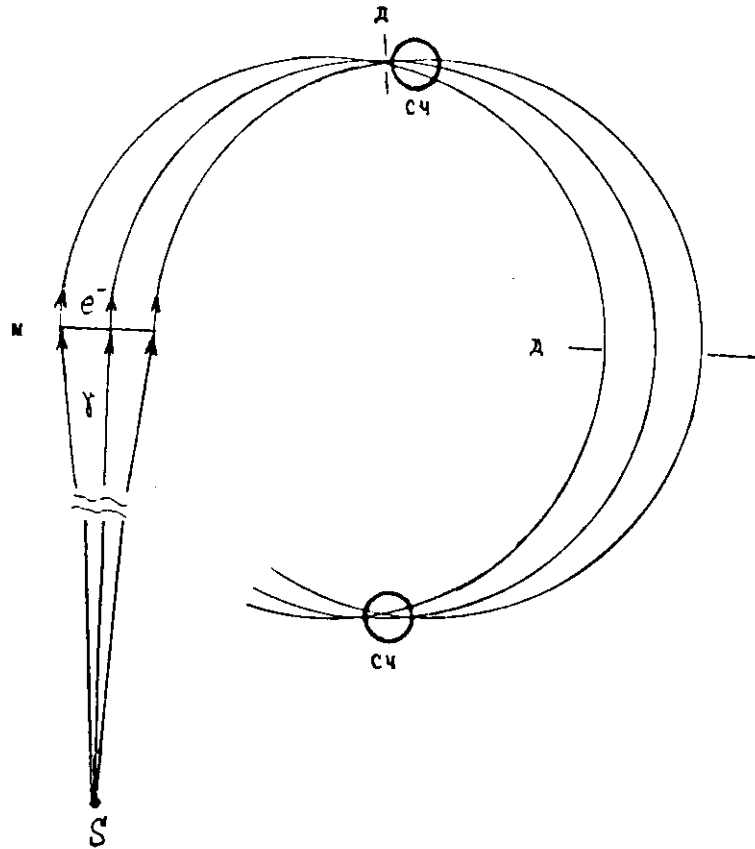


Рис. 3. Схема ритрона:

S - источник радиоактивного вещества; M - мишень из вещества с малым Z; Д - диафрагмы;
СЧ - счетчики Гейгера-Мюллера

На рис. 4 представлен гамма-спектр ^{60}Co - первый гамма-спектр, измеренный на таком приборе, ритроне [2]. При помощи ритрона в 1951-1965 гг. измерены гамма-спектры: ^{59}Fe , ^{64}Cu , ^{65}Zn , ^{76}As , ^{82}Br , ^{110}Ag , ^{122}Sb , ^{124}Sb , ^{131}I , ^{134}Cs , ^{140}La , ^{143}Ce , ^{147}Nd , $^{152,154}\text{Eu}$, $^{175,181}\text{Hf}$, ^{182}Ta , ^{187}W , ^{192}Ir и ^{198}Au [3-23].

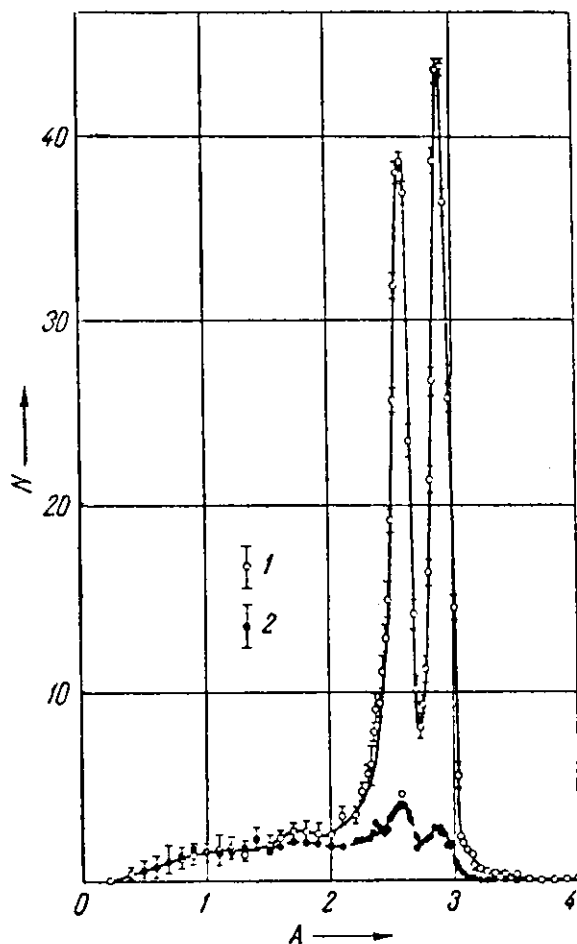


Рис. 4. Гамма-спектр ^{60}Co , полученный при помощи ритрона

Полуширины гамма-линий, полученных на ритроне, были большими: 17 % у $\gamma_{411,8}^{198}\text{Au}$, 6,1 % у $\gamma_{1118,0}^{65}\text{Zn}$, 5,8 % у $\gamma_{2614,3}^{232}\text{Th}$. Все же для того времени (до 1954 г.) это были лучшие результаты; они цитировались в литературе.

Основной недостаток ритрона был очевиден: плохая фокусировка широкого пучка комптон-электронов на первую щель. Необходимо было улучшить фокусировку: пучок электронов должен быть максимально узким в том месте, где он проходил первую щель. Фокусировка такого рода была предложена еще до войны в Харьковском ФТИ М. Корсунским и др. [24]. П. П. Павинский рассчитал улучшенный вариант такой фокусировки [25] ("поле Павинского"). Поле (рис. 5) стали делать спадающим приблизительно на 2° по направлению вниз от линии АВ. Это обеспечило сужение пучка комптон-электронов до 1-2 мм и полуширины гамма-линий до $\leq 1,6\%$ при энергиях $\geq 1,0$ МэВ.

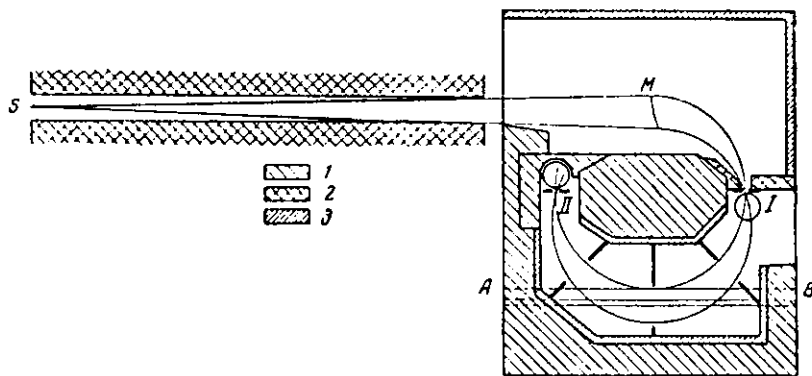


Рис. 5. Поперечный разрез прибора:

S - источник; М - изогнутая мишень; I и II - счетчики. Выше линии АВ поле однородно, ниже этой линии поле спадает по закону Павинского [25]

1 - вольфрам, залитый свинцом; 2 - свинец; 3 - плексиглас.

Был также увеличен размер камеры прибора; он получил название "элотрон" и был изготовлен в двух экземплярах. На первом, изготовленном в Радиовом институте, были исследованы гамма-спектры ^{75}Se , $^{95}\text{Zr}+^{95}\text{Nb}$, ^{110}Ag , ^{124}Sb , ^{140}La , ^{152}Eu , ^{154}Eu , ^{156}Eu , ^{160}Tb и Ra в равновесии с продуктами распада [26-41].

Второй прибор был построен для измерения гамма-спектров короткоживущих изотопов и установлен вблизи реактора ЛФТИ (Гатчина). На нем был измерен гамма-спектр $^{152}\text{Eu}^*$ (9,2 ч.) [42].

Гамма-спектр ^{156}Eu был последним, измеренным на элотроне Радиового института (1966 г.). К этому времени техника работы с полупроводниковыми детекторами была значительно усовершенствована - гамма-спектры получались быстро, точность измерения энергии быстро достигала "элотронной"; однако гамма-линии получались на большом фоне, и поэтому интенсивность на первых порах определялась хуже, чем на элотроне. Но и этот недостаток скоро был устранен.

Л и т е р а т у р а

1. Желепов Б. С., Орбели М. Л. // ДАН СССР, 1948, т. 62, N 3, с. 615.
2. Желепов Б. С., Жуковский Н. Н., Хольнов Ю. В. // ДАН СССР, 1951, т. 77, N 2, с. 233 (^{60}Co).
3. Желепов Б. С., Жуковский Н. Н., Хольнов Ю. В. // ДАН СССР, 1952, т. 86, N 3, с. 511 (^{59}Fe).
4. Желепов Б. С., Жуковский Н. Н., Приходцева В. П., Хольнов Ю. В. // Изв. АН СССР. Сер. физ., 1953, т. 17, N 4, с. 511 (^{64}Cu).
5. Желепов Б. С., Приходцева В. П., Феоктистов А. И., Хольнов Ю. В. // Изв. АН СССР. Сер. физ., 1956, т. 20, N 12, с. 1359 (^{65}Zn).
6. Желепов Б. С., Приходцева В. П., Феоктистов А. И., Хольнов Ю. В. // Изв. АН СССР. Сер. физ., 1956, т. 20, N 12, с. 1361 (^{76}As).
7. Желепов Б. С., Силантьев А. И. // ДАН СССР, 1952, т. 84, N 3, с. 533 (^{82}Br).
8. Желепов Б. С., Елисеев В. А., Приходцева В. П., Хольнов Ю. В. // Изв. АН СССР. Сер. физ., 1959, т. 23, N 2, с. 207 (^{82}Br).
9. Желепов Б. С., Жуковский Н. Н., Хольнов Ю. В. // ДАН СССР, 1951, т. 77, N 4, с. 597 (^{110}Ag).
10. Арутюнян Э. А., Желепов Б. С., Хольнов Ю. В., Щукин Г. Е. // Изв. АН СССР. Сер. физ., 1965, т. 29, N 7, с. 1107 (^{122}Sb).
11. Громов К. Я., Желепов Б. С., Жуковский Н. Н., Силантьев А. И. // ДАН СССР, 1952, т. 86, N 2, с. 255 (^{124}Sb).

12. Джелепов Б. С., Приходцева В. П., Хольнов Ю. В. // Изв. АН СССР. Сер. физ., 1959, т. 23, N 2, с. 206 (^{131}I).
13. Громов К. Я., Джелепов Б. С. // ДАН СССР, 1952, т. 85, N 2, с. 299 (^{134}Cs).
14. Джелепов Б. С., Приходцева В. П., Хольнов Ю. В. // Изв. АН СССР. Сер. физ., 1959, т. 23, N 7, с. 826 (^{134}Cs).
15. Архангельский Л. В., Джелепов Б. С., Жуковский Н. Н., Приходцева В. П., Хольнов Ю. В. // Изв. АН СССР. Сер. физ., 1955, т. 19, N 3, с. 251 (^{140}La).
16. Приходцева В. П., Хольнов Ю. В. // Изв. АН СССР. Сер. физ., 1958, т. 22, N 2, с. 176 (^{140}La).
17. Арутюнян Э. А., Джелепов Б. С., Хольнов Ю. В. // Изв. АН СССР. Сер. физ., 1965, т. 29, N 7, с. 1127 (^{143}Ce).
18. Арутюнян Э. А., Джелепов Б. С., Хольнов Ю. В. В кн.: Программа и тезисы XV Совещания по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра. Л., 1965, с. 56 (^{147}Nd).
19. Джелепов Б. С., Приходцева В. П., Хольнов Ю. В., Уряев И. В кн.: Программа и тезисы IX Совещания по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра, М.-Л., 1959, с. 62, ($^{176,181}\text{Hf}$).
20. Воинова Н. А., Джелепов Б. С., Хольнов Ю. В. // Изв. АН СССР. Сер. физ., 1961, т. 25, с. 239 (^{182}Ta).
21. Джелепов Б. С., Румянцев В. Л., Хольнов Ю. В., Шукин Г. Е. // Изв. АН СССР. Сер. физ., 1960, т. 24, N 3, с. 311 (^{187}W).
22. Глазунов М. П., Джелепов Б. С., Хольнов Ю. В. // Изв. АН СССР. Сер. физ., 1955, т. 19, N 3, с. 294 (^{192}Ir).
23. Джелепов Б. С., Жуковский Н. Н., Приходцева В. П., Хольнов Ю. В. // Изв. АН СССР. Сер. физ., 1955, т. 19, N 3, с. 271 (^{198}Au).
24. Корсунский М., Кельман В., Петров Б. // ЖЭТФ, 1944, т. 14, с. 394.
25. Павинский П. П. // Изв. АН СССР. Сер. физ., 1954, т. 18, N 1, с. 175.
26. Воинова Н. А., Джелепов Б. С., Жуковский Н. Н. // Изв. АН СССР. Сер. физ., 1959, т. 23, N 2, с. 185 (^{73}Se).
27. Воинова Н. А., Джелепов Б. С., Жуковский Н. Н. // Изв. АН СССР. Сер. физ., 1960, т. 24, N 6, с. 850 ($^{95}\text{Zr} + ^{95}\text{Nb}$).
28. Джелепов Б. С., Жуковский Н. Н., Кондаков Ю. Г. // Изв. АН СССР. Сер. физ., 1957, т. 21, N 7, с. 973 (^{110}Ag).
29. Воинова Н. А., Джелепов Б. С., Жуковский Н. Н. // Изв. АН СССР. Сер. физ., 1959, т. 24, N 3, с. 291 (^{110}Ag).
30. Джелепов Б. С., Жуковский Н. Н., Недовесов В. Г., Учеваткин И. Ф., Чумин В. Г. // Изв. АН СССР. Сер. физ., 1956, т. 20, N 8, с. 925 (^{124}Sb).
31. Джелепов Б. С., Жуковский Н. Н., Предовский Ф. А. // Изв. АН СССР. Сер. физ., 1957, т. 21, N 12, с. 1614 (^{124}Sb).
32. Джелепов Б. С., Жуковский Н. Н., Недовесов В. Г. // Изв. АН СССР. Сер. физ., 1955, т. 19, N 3, с. 296 ($^{152,154}\text{Eu}$).
33. Джелепов Б. С., Жуковский Н. Н., Недовесов В. Г., Шукин Г. Е. // Изв. АН СССР. Сер. физ., 1957, т. 21, N 7, с. 966 ($^{152,154}\text{Eu}$).
34. Джелепов Б. С., Жуковский Н. Н., Малоян А. Г., Приходцева В. П. // Изв. АН СССР. Сер. физ., 1966, т. 30, N 3, с. 403 (^{140}La).
35. Джелепов Б. С., Жуковский Н. Н., Малоян А. Г. // Ядерная физика, 1966, т. 1, вып. 6, с. 941 ($^{152}\text{Eu}^*$, 9,4 ч).
36. Джелепов Б. С., Жуковский Н. Н., Малоян А. Г. // Ядерная физика, 1966, т. 3, с. 785 (^{152}Eu).
37. Джелепов Б. С., Дмитриев А. Г., Жуковский Н. Н., Малоян А. Г. // Изв. АН СССР. Сер. физ., 1966, т. 30, N 8, с. 265 (^{154}Eu).
38. Джелепов Б. С., Дмитриев А. Г., Жуковский Н. Н., Малоян А. Г. // Изв. АН СССР. Сер. физ., 1966, т. 30, N 3, с. 394 (^{156}Eu).
39. Воинова Н. А., Джелепов Б. С., Жуковский Н. Н., Хольнов Ю. В. // Изв. АН СССР. Сер. физ., 1960, т. 24, N 7, с. 852 (^{160}Tb).
40. Воинова Н. А., Джелепов Б. С., Жуковский Н. Н. // Изв. АН СССР. Сер. физ., 1959, т. 23, N 7, с. 828 (^{182}Ta).
41. Джелепов Б. С., Жуковский Н. Н., Учеваткин И. Ф., Шестопалова С. А. Радий в равновесии с продуктами распада // Изв. АН СССР. Сер. физ., 1958, т. 22, N 7, с. 841; Nucl. Phys., 1958, vol. 3, N 3, p. 413.
42. Воинова Н. А., Джелепов Б. С., Жуковский Н. Н., Калинин Ю. В., Малоян А. Г., Сергеев А. Г. // Ядерная физика, 1966, т. 3, вып. 1, с. 3.

Магнитный альфа-спектрометр

Где-то в начале 50-х годов ко мне прибежал запыхавшийся начальник спецотдела Радиового института: "Борис Сергеевич, приехал из Москвы некто и хочет срочно видеть Вас. По документам у него высшая степень секретности — я проверил по своим каналам. Вы ему лишних вопросов не задавайте". "Ну, что ж, — сказал я, — дайте его сюда".

Пришел человек средних лет, назвал свое имя и отчество (вероятно, они были условны) и сказал: "Производится некое альфа-активное вещество. В продукте обнаруживается альфа-активная примесь с близкой энергией и относительной интенсивностью порядка процентов. Она очень мешает дальнейшей работе с основным веществом. На сцинтилляционных детекторах она видна очень плохо. Можно ли внести ясность при помощи ваших приборов?" Я ответил: "Думаю, что на аппаратуре РИ это сделать пока очень трудно; если речь идет о процентах, то нужен магнитный спектрометр с уточненной фокусировкой". Он спросил: "Это должен быть очень большой альфа-спектрометр?" - "Да." - "Спасибо." Больше я этого человека никогда не видел.

Через несколько месяцев мне позвонил знакомый инженер из лаборатории Евгения Григорьевича Кумара, работавшего на "Электросиле". Он сказал: "Мы спроектировали ваш магнит, он будет весить 70 тонн. Есть ли у Вас помещение, проводка и машина для стабилизации тока?"

Как это не удивительно, все быстро нашлось... Отрезали половину циклотронного зала, углубили ее, сделали хорошую гидроизоляцию (она работает до сих пор), разобрали часть капитальной стены, и магнит въехал на свое место. Он запустился с первого же включения и пригоден к работе до сих пор.

Как только альфа-спектрометр был готов, из Москвы прибыл альфа-препарат для измерений — до сих пор не знаю, что это было ("Лишнего не спрашивайте!!").

Неприятная примесь, из-за которой все началось, была в спектре отчетливо видна, и ее интенсивность была хорошо измерена. Все - препарат и отчет - уехало в Москву.

Год мы ждали новых заказов, но не дождались и попросили разрешения использовать прибор для получения других альфа-спектров. По телефону получили устное "Да".

Была создана новая группа: Р. Б. Иванов, В. Г. Недовесов и М. А. Михайлова. В течение 8 лет эта группа исследовала альфа-спектры ^{217}At , ^{221}Fr , ^{225}Ac , ^{233}U , $^{239,241}\text{Pu}$, ^{242}Am , $^{243,245,246}\text{Cm}$. Список публикаций приводится ниже [1 - 13].

Не помню, по совету кого-то из начальства, прибор не переделывался - ждали заказа много лет. Однако приборы этого типа, и даже большего размера, были построены (ОИЯИ, Курчатовский центр).

В 1989 г. мною и Н. Н. Жуковским был создан проект использования магнита и камеры альфа-спектрометра в составе спектрометра типа 2pЦ2 для конверсионных электронов небольших энергий (< 100 кэВ); спектрометр 2pЦ2 ВНИИМ не позволял хорошо измерять спектры при энергиях электронов меньше 400 кэВ. Конечно, большой магнит при таких энергиях не нужен, но его размеры делу не мешают. К сожалению, "перестройка" все остановила. Но спектрометр и сопровождающая его аппаратура сохранились и ждут сигнала "к действию".

Л и т е р а т у р а

1. Джелепов Б. С., Иванов Р. Б., Недовесов В. Г., Чумин В. Г. // Изв. АН СССР. Сер. физ., 1959, т. 23, N 7, с. 782.

^{*)} Имеется в виду политическая перестройка в стране (примеч. ред.)

2. Желепов Б. С., Иванов Р. Б., Недовесов В. Г., Шишкин Б. П. // Изв. АН СССР. Сер. физ., 1959, т. 23, N 3, с. 788.
3. Желепов Б. С., Иванов Р. Б., Недовесов В. Г., Пузынович Ю. Т. // Изв. АН СССР. Сер. физ., 1960, т. 24, N 3, с. 258.
4. Желепов Б. С., Иванов Р. Б., Недовесов В. Г. // ЖЭТФ, 1961, т. 41, вып. 6(12), с. 1725.
5. Иванов Р. Б., Кривохатский А. С., Недовесов В. Г. // Изв. АН СССР. Сер. физ., 1962, т. 26, N 8, с. 976.
6. Желепов Б. С., Иванов Р. Б., Кривохатский А. С. // Радиохимия, 1962, т. 4, вып. 5, с. 619.
7. Желепов Б. С., Иванов Р. Б., Москвин Л. Н. // ЖЭТФ, 1962, т. 43, вып. 6(12), с. 2077.
8. Белов Л. М., Желепов Б. С. и др. // Радиохимия, 1963, т. 5, вып. 3, с. 394.
9. Желепов Б. С., Иванов Р. Б., Недовесов В. Г. // ЖЭТФ, 1964, т. 46, вып. 5, с. 1517.
10. Желепов Б. С., Иванов Р. Б., Москвин Л. Н., Родионов В. Ф. // Изв. АН СССР. Сер. физ., 1966, т. 30, N 8, с. 1322.
11. Желепов Б. С., Иванов Р. Б., Москвин Л. Н., Родионов В. Ф. // Изв. АН СССР. Сер. физ., 1967, т. 31, N 1, с. 151.
12. Желепов Б. С., Иванов Р. Б., Михайлова М. А., Назаренко О. М. // Изв. АН СССР. Сер. физ., 1967, т. 31, N 4, с. 568.
13. Александров Б. М., Бак М. А., Бердилов В. А., Иванов Р. Б. // Атомная энергия, 1969, т. 27, вып. 1, с. 41.

О РАБОТАХ ПО ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ЯДЕРНОЙ СПЕКТРОСКОПИИ

Когда возможности экспериментальных исследований в Радиевом институте исчезли, авторы этого раздела перешли к теоретической ядерной спектроскопии. Подчеркнем, что это не теория ядра как некоторого физического объекта, свойства которого не изменяются со временем. Мы придерживаемся модели ядра Бора и Моттельсона и не пытаемся вносить в нее какие-либо уточнения или улучшения.

В модели Бора и Моттельсона ядро может переходить из одного состояния в другое путем гамма-излучения и конверсии: оно также может испускать альфа и бета-частицы - эти процессы связывают уже разные ядра. Интенсивность распада, его энергия, угловые распределения - предмет экспериментальной ядерной спектроскопии. Анализ полученных на опыте фактов, их сопоставление с предсказаниями теории и разными гипотезами - предмет теоретической ядерной спектроскопии.

С 1990 по 1996 гг. Б. С. Желеповым и Н. Н. Жуковским опубликовано 11 [1-11] статей и 15 тезисов докладов по теоретической ядерной спектроскопии (см. сборники тезисов докладов на Международных совещаниях по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра за 1990-1996 гг.).

Нам кажется наиболее интересной и перспективной работа "О смешивании волновых функций в основных и вращательных состояниях деформированных ядер", опубликованная в журнале "Физика элементарных частиц и атомного ядра" (ЭЧАЯ) [11]. Содержание этой работы следующее.

Разные группы авторов в промежутке с 1969 по 1992 гг. в 38 работах по известным к тому времени схемам распада с использованием потенциалов Нильссона или Саксона-Вудса (с небольшими, но разными поправками) рассчитали составы волновых функций многих ядерных состояний. Перечень этих работ приведен в [11]. Сопоставить все работы практически невозможно: нужно повторить вычисления всех работ при разных предположениях. Мы выбрали другой путь.

Авторы каждой работы ставили своей конечной целью выяснение состава волновых функций нижних уровней всех вращательных полос. В конце каждой работы приводились амплитуды компонентов волновых функций основных и вращательных состояний. Мы сосредоточились на конечном результате всех работ - на таблицах амплитуд.

Волновые функции были многокомпонентными: число компонентов иногда доходило до 7. Большинство компонентов были "родственными": имели одинаковые N и n_z+1 , но разные K : $K=J, J-1, J-2...$ Амплитуды компонентов быстро убывали по мере удаления от главно-

го компонента, имеющего $K=J$. Первая примесная амплитуда составляла обычно 10-15 % от главной, вторая - около 5 %. Во втором примесном компоненте противоречия между разными работами были большими. Сопоставляя эти факты, мы пришли к выводу, что до уровня 5 % "наука еще не дошла", и ограничились рассмотрением только главной и первой по величине примесной амплитуд. Отношения первой примесной ($a(K-1)$) и главной ($a(K)$) амплитуд мы обозначили R :

$$R = \frac{a(K-1)}{a(K)}.$$

Величины R для всех ротационных полос - 902 значения - опубликованы в работе [11].

Отношения R основаны на схемах распада, которые за 23 года между первыми [12] и последними [13] расчетами, как правило, сильно изменялись; кроме того, многими авторами вносились разные поправки к модели Бора и Моттельсона. Поэтому можно было ожидать, что у значений R будет большой разброс. Оказалось, что это не так: разброс R в основном имеет гауссовский характер со средним отклонением 15 %. Это означает, что материал статистически доброкачествен, и можно анализировать его свойства. Однако на "хвостах" гауссовского распределения значений R наблюдаются очень большие отклонения R от среднего, даже порядка $R=1$.

Необходимо учитывать, что большие значения R могут получаться и нефизическим путем, поскольку производились сложные расчеты по схемам распада и по модели Бора и Моттельсона; найти такие ошибки практически невозможно. Чтобы избежать ошибок этого рода, мы отобрали случаи, когда одно и то же большое значение R получалось в работах разных авторов.

Приведем пример. Большинство значений R для ^{169}Yb меньше 0,15. Но для уровня $5/2$ [642] ^{169}Yb (N 189 в [11]) в двух работах получены значения $R=0,73$ и $0,76$ при погрешностях $\sim 0,03$. Какова причина появления этих больших R , пока неизвестно. Она может быть связана с особой структурой этого уровня ^{169}Yb и может служить стимулом для выяснения этой структуры.

Большие значения R , найденные в работах двух групп авторов, наблюдались еще в нескольких случаях. В 1997 г. мы надеемся подробнее обсудить этот вопрос.

Л и т е р а т у р а

1. Желепов Б. С., Жуковский Н. Н. В кн.: Сборник докладов к VIII семинару "Вопросы точности ядерной спектроскопии". Вильнюс, 1990, с. 106-114.
2. Желепов Б. С., Жуковский Н. Н., Шестопалова С. А. // Изв. АН СССР. Сер. физ., 1991, т. 55, N 5, с. 834.
3. Желепов Б. С., Жуковский Н. Н., Шестопалова С. А. // Изв. АН СССР. Сер. физ., 1991, т. 55, N 1, с. 4.
4. Желепов Б. С., Жуковский Н. Н., Шестопалова С. А. // Изв. РАН. Сер. физ., 1992, т. 56, N 1, с. 18.
5. Желепов Б. С., Жуковский Н. Н., Шестопалова С. А. // Изв. РАН. Сер. физ., 1992, т. 56, N 11, с. 2-11.
6. Желепов Б. С., Жуковский Н. Н., Шестопалова С. А. В кн.: Сборник докладов к IX семинару "Вопросы точности в ядерной спектроскопии". Вильнюс, 1992, с. 27-32.
7. Желепов Б. С., Жуковский Н. Н., Шестопалова С. А. // Изв. РАН. Сер. физ., 1993, т. 57, N 5, с. 15-18.
8. Желепов Б. С., Жуковский Н. Н., Шестопалова С. А. // Изв. РАН. Сер. физ., 1993, т. 57, N 5, с. 29-38.
9. Желепов Б. С., Жуковский Н. Н., Шестопалова С. А. // Изв. РАН. Сер. физ., 1993, т. 57, N 10, с. 76-90.
10. Желепов Б. С., Жуковский Н. Н., Шестопалова С. А. // Изв. РАН. Сер. физ., 1992, т. 56.
11. Желепов Б. С., Жуковский Н. Н., Шестопалова С. А. // Физика элементарных частиц и атомного ядра. (ЭЧАЯ), 1995, т. 26, вып. 2, с. 384-414.
12. Borggreen J. Lovhoiden G., Waddington J. // Phys.Rev., 1969, vol. A131, p. 241.

13. Аликов Б. А., Бонч-Осмоловская Н. А., Нестеренко В. О. // Изв. РАН. Сер. физ., 1992, т. 56, N 11, с. 43.

ДЕЛЕНИЕ ЯДЕР ПРИ НИЗКИХ И СРЕДНИХ ЭНЕРГИЯХ

В. Д. Дмитриев

Исследования по физике деления ядер начались в Радиевом институте в предвоенные годы и, благодаря наличию в институте уже вполне сформировавшейся к этому времени школы ядерно-физических исследований, были ознаменованы рядом блестящих работ, наиболее яркой из которых явилась выполненная под руководством И. В. Курчатова работа К. А. Петржака и Г. Н. Флерова по изучению спонтанного деления ядер урана. Некоторый перерыв в исследованиях фундаментальных аспектов физики деления был вызван войной. В военные и послевоенные годы внимание физиков было сосредоточено на выполнении работ по Правительственным заданиям, связанных с созданием ядерного оружия и подразумевавших получение конкретных физических величин, т. е. на деятельности, которая позднее была названа измерением ядерно-физических констант. В конце 50-х годов, хотя все эти работы продолжались и имели важное значение, возобновились и систематические исследования в области фундаментальных проблем физики деления.

Успехи, достигнутые сотрудниками института в изучении механизма деления, в значительной степени связаны с уникальной структурой созданного академиками В. И. Вернадским и В. Г. Хлопиным института, объединившего под одной крышей физиков и химиков, что позволило проводить комплексные исследования, начиная с очистки изотопов, изготовления источников и мишеней, разработки и создания измерительных устройств, сложных экспериментальных установок, проведения на них измерений и заканчивая обработкой, осмыслением полученных экспериментальных данных и их теоретической интерпретацией. В лабораториях, руководимых такими известными учеными, как К. А. Петржак, Н. А. Перфилов, А. Н. Протопопов, было воспитано несколько поколений физиков, успешно работающих как в нашем институте, так и в других центрах.

Исследования, проводимые в институте, охватывают практически весь спектр задач в области физики деления ядер: изучение энергетических зависимостей сечений деления ядер и угловой анизотропии осколков, распределений осколков деления по массам и кинетическим энергиям, изучение механизма эмиссии нейтронов и гамма-квантов, измерение периодов спонтанного деления ядер.

Одной из важнейших интегральных характеристик деления являются величины сечений деления, точнее, их энергетические зависимости и угловая анизотропия осколков. Анализ экспериментальных данных дает возможность получить информацию о величине барьера деления, о моменте инерции, т. е. о деформации ядра в седловой точке, структуре переходных состояний. Работы по измерению сечений деления тяжелых ядер нейтронами с энергией 2,5 и 14 МэВ проводились в институте с начала 50-х годов в лаборатории А. Н. Протопопова и несколько позднее в лабораториях К. А. Петржака и Н. А. Перфилова (деление ядер протонами и тяжелыми ионами при средних и промежуточных энергиях).

В характеристиках деления ядер при низких и промежуточных энергиях наблюдается скорее больше различий, чем сходства. Наиболее ярко это проявляется в распределениях осколков деления по массам и кинетическим энергиям, в зависимостях выходов нейтронов деления от массы осколка.

Так, например, для тяжелых ядер зависимость полной кинетической энергии осколков спонтанного и низкоэнергетического деления ядер от массы осколка имеет максимум вблизи массы тяжелого осколка с $A=132$ и минимальна для симметричного деления (исключение составляют тяжелые изотопы Fm и Md). Известно, что кинетическая энергия осколков деле-

ния определяется энергией их кулоновского взаимодействия вблизи точки разрыва (возможный вклад кинетической энергии будущих осколков, приобретаемый при спуске с барьера деления к точке разрыва, мал), т. е. зависит от расстояния между центрами осколков. Сотрудники института М. В. Блинов, А. Н. Протопопов, Ю. А. Селицкий и В. П. Эйсмонт одними из первых предположили, что в момент разрыва дважды магические тяжелые осколки с массой $A=132$ ($Z=50$ и $N=82$) вследствие большой жесткости по отношению к деформации имеют форму, близкую к сферической, что и определяет подобный вид зависимости кинетической энергии осколков деления от их массы.

Вопрос же о формировании распределений осколков деления по массам решался значительно дольше и, несмотря на значительный прогресс, достигнутый в последние годы, изучение механизма формирования массовых, зарядовых распределений осколков деления ядер представляет значительный интерес и в настоящее время. В Радиевом институте исследования по выходам продуктов деления ведутся с 1948 г. Сотрудниками института под руководством Г. В. Горшкова, Б. С. Желепова, Д. М. Зива, К. А. Петржака, А. Н. Протопопова, Ю. М. Толмачева, В. Н. Ушатского был выполнен большой цикл радиохимических исследований при делении ядер урана и плутония под действием реакторных нейтронов и нейтронов с энергией 14 МэВ. Позднее в исследованиях стали применяться методы масс-спектрометрии (Г. Р. Рик, А. Н. Мулин, Л. М. Крижанский, А. В. Ловцюс). В лабораториях К. А. Петржака и А. Н. Протопопова успешно развивались ядерно-физические методики, использующие ионизационные камеры, полупроводниковые детекторы. Выполненные исследования позволили установить основные закономерности в формировании массовых и зарядовых распределений осколков деления, а именно - независимость положения пика тяжелого осколка от массы делящегося ядра и увеличение выхода симметричного деления с ростом энергии возбуждения. Эти факты убедительно свидетельствовали о сильном влиянии оболочечной структуры на выходы осколков при низкоэнергетическом делении ядер, его уменьшении с ростом энергии возбуждения и полном исчезновении при энергиях возбуждения свыше 30-40 МэВ. Полученные данные позволили выдвинуть предположение (А. Н. Протопопов, В. П. Эйсмонт, 1962 г.) о существовании двух типов деления - симметричного и асимметричного. Однако вопрос о том, на какой стадии деления происходит формирование массовых распределений, долгое время оставался открытым. Фонгом было высказано предположение о решающей стадии спуска с барьера деления к точке разрыва и влиянии оболочечной структуры осколков на форму массовых распределений. В то же время расчеты, выполненные Юхансоном, свидетельствовали о том, что уже в районе седловой точки делящееся ядро имеет преимущественно октагональную деформацию, ответственную за асимметрию деления, т. е. барьеры деления для симметричного и асимметричного способов различны.

Для изучения природы асимметрии массовых распределений осколков деления тяжелых ядер значительный интерес представляло исследование деления ядер в области Ra-Ac - уникального явления, когда даже при малых энергиях возбуждения наблюдается ярко выраженное "трихорбное" распределение масс осколков. Цикл исследований по изучению особенностей деления ядер в этой области под действием различных частиц, выполненный группой сотрудников нашего института под руководством Ю. А. Немилова и Ю. А. Селицкого в 1966-1987 гг. (И. М. Кукс, В. Б. Фунштейн, С. В. Хлебников и др.), показал, что энергетические зависимости выходов осколков симметричного и асимметричного деления могут быть объяснены наличием разных седловых точек для разных типов деления.

В 1976-1980 гг. В. Д. Дмитриевым совместно с сотрудниками ЛЯР ОИЯИ (Ю. Э. Пенионжкевичем, Х. Зоданом, Р. Калпакчиевой) были изучены энергетические зависимости выходов симметричного и асимметричного деления для более тяжелых ядер (от ^{232}Th до ^{249}Cf) под действием α -частиц. В этом случае вклад симметричного деления, в отличие от деления ядер в области Ra, не так ярко выражен. Для анализа симметричной и асимметричной компонент впервые была применена процедура описания массовых распределений с помощью пяти гауссианов, где асимметричная мода описывалась двумя гауссианами, соответствующими осколкам с деформированными оболочками. Анализ полученных данных

показал, что они могут быть объяснены в рамках модели двух барьеров деления. При этом полученные из эксперимента значения разницы барьеров для симметричного и асимметричного деления находились в хорошем согласии с теоретическими расчетами Меллера, которые предсказывали вначале уменьшение вклада симметричного деления по мере увеличения массы делящегося ядра от Ra к ^{236}U и дальнейшее его увеличение по мере приближения к ^{260}Fm . Этот подход был позднее использован при изучении механизма формирования массовых распределений осколков деления в широком диапазоне масс ядер группой алматинских физиков под руководством В. Н. Околовича, Г. Н. Смиреникина и М. Г. Иткиса, выдвинувших идею бимодального и мультимодального деления.

Исследования массовых и зарядовых распределений осколков спонтанного деления и деления ядер тепловыми нейтронами показали также, что в этом случае наблюдаются эффекты еще более малого порядка (так называемая "тонкая структура"), обусловленные парными корреляциями нуклонов в осколках деления. Так, например, такие эффекты были обнаружены и изучены при исследовании характеристического рентгеновского излучения осколков деления тяжелых ядер (В. П. Эйсмонт, А. Г. Доницкий, А. Н. Смирнов, С. М. Соловьев).

В середине 50-х годов Б. М. Ширяевым и А. Н. Протопоповым были начаты работы по изучению γ -квантов деления. Были определены основные характеристики гамма-излучения при делении ядер под действием тепловых и быстрых нейтронов: среднее число гамма-квантов и средняя энергия гамма-излучения, что позволило определить средний угловой момент осколков. Одна из последних работ по изучению возможности испускания гамма-квантов высоких энергий (до 20 МэВ) при спонтанном делении ^{252}Cf была недавно выполнена О. И. Батенковым и М. Ю. Майоровым совместно со шведскими коллегами. Было показано, что наблюдавшиеся ранее гамма-кванты больших энергий являются результатом методических неточностей.

Одним из направлений физики деления, успешно развиваемых в институте, является изучение механизма эмиссии мгновенных нейтронов деления (МНД). Анализ данных по МНД дает возможность получить уникальную информацию как об энергетическом состоянии ядра на всех стадиях деления, так и о временной шкале этого процесса, представляя собой, таким образом, своеобразные "нейтронные часы" и "термометр". Спектр и множественность предделительных нейтронов отражают характер эволюции делящегося ядра, начиная с момента взаимодействия и вплоть до точки разрыва. Характеристики же так называемых "пост-делительных" нейтронов отражают особенности распределения энергии возбуждения между осколками. Предполагается также (впервые это было высказано В. П. Эйсмонтом), что нейтроны могут испускаться также и вблизи точки разрыва, т. е. до полного ускорения осколков (так называемые "разделительные" нейтроны).

Первые работы по изучению МНД были выполнены в институте в 50-х годах (А. Н. Протопопов и М. В. Блинов). На основании результатов измерений средней множественности нейтронов при делении урана быстрыми нейтронами было показано, что практически вся вносимая в ядро энергия возбуждения уносится нейтронами. Позднее начали проводиться измерения спектров МНД спонтанного деления и деления тяжелых ядер тепловыми нейтронами с использованием созданного для этой цели времяпролетного спектрометра (М. В. Блинов, Н. М. Казаринов). В дальнейшем под руководством М. В. Блинова развернулись широкомасштабные исследования механизма эмиссии МНД, продолжающиеся и в настоящее время не только в нашем институте, но и совместно с зарубежными коллегами.

В физике нейтронов деления особую роль играет спектр МНД ^{252}Cf . Он является международным стандартом, широко используется для наладки и калибровки экспериментальных установок. Физиками института были выполнены детальные измерения как интегрального спектра, так и дифференциальные измерения (М. В. Блинов, О. И. Батенков, Г. С. Бойков, В. А. Витенко, В. И. Юревич и др.), была также выполнена работа по оценке спектра (Г. С. Бойков и В. И. Юревич), которая находится в хорошем согласии с известной оценкой Манхардта.

В конце 70-х годов под руководством М. В. Блинова начались работы по созданию экспериментальной установки для изучения спектров нейтронов деления в реакциях под действием тяжелых ионов. Первый в нашей стране времяпролетный спектрометр для изучения эмиссии нейтронов в реакциях с тяжелыми ионами был разработан и создан в нашем институте (Э. М. Козулин, А. С. Вещиков, Б. П. Гаврилов, В. М. Саидгареев, Г. П. Тюрин). В начале 80-х годов в Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ на ускорителях У-200, У-300 и У-400 совместно с сотрудниками ЛЯР (под руководством Ю. Э. Пенионжkevича) были выполнены первые в нашей стране эксперименты по изучению эмиссии нейтронов в реакциях с тяжелыми ионами. Другой времяпролетный спектрометр, позволяющий измерять помимо спектров нейтронов и массовые распределения осколков с высокой точностью (также времяпролетным методом), был создан О. И. Батенковым, А. С. Вещиковым, А. Н. Блиновым и С. Н. Смирновым. Эта установка использовалась для исследования дифференциальных характеристик при спонтанном делении ^{252}Cf и изотопов $^{246,248}\text{Cm}$. В настоящее время аналогичный спектрометр используется в экспериментах по изучению влияния углового момента, вносимого ионом в ядро, на характеристики деления на ускорителе университета в г. Уппсала, Швеция (О. И. Батенков, М. Ю. Майоров). Другая многопараметровая установка на базе позиционно-чувствительных нейтронных детекторов, созданная в институте (И. Д. Алхазов, Д. Н. Вахтин, А. В. Кузнецов, В. Г. Ляпин, С. В. Хлебников, Г. П. Тюрин), работает на ускорителе тяжелых ионов в г. Ювяскюля, Финляндия.

В 1987-1988 гг. Г. С. Бойковым и В. Д. Дмитриевым были проведены измерения спектров МНД при делении ядер ^{232}Th , $^{235,238}\text{U}$ и ^{237}Np нейтронами с энергией $E_n=3$ и 14,7 МэВ. Измерения проводились относительно спектра нейтронов спонтанного деления ^{252}Cf , и было экспериментально обнаружено, что при делении под действием нейтронов с энергией 14 МэВ форма спектров существенно отличается от обычно наблюдаемой, которая может быть сравнительно хорошо описана распределениями типа Максвелла или Уатта. При энергиях вторичных нейтронов в области $E_n\text{--}V_0$ отчетливо наблюдался вклад предравновесных нейтронов, испускаемых до деления. Анализ экспериментальных данных, выполненный совместно с физиками ФЭИ под руководством Г. Н. Смиреникина с учетом экситонной модели, позволил получить новые данные о механизмах эмиссии МНД и относительных вкладах "шансов" деления. В настоящее время изучение этих эффектов продолжается на ускорителе ФЭИ.

Для изучения распределений множественности нейтронов в начале 70-х годов в лаборатории К. А. Петржака была создана установка на основе жидкого сцинтиллятора (О. И. Косточкин, Л. З. Малкин), позволяющая с высокой эффективностью определять число нейтронов, испускаемых в акте спонтанного деления. В дальнейшем эта установка была модернизирована (В. И. Шпаков, И. Д. Алхазов, В. Д. Дмитриев, А. В. Кузнецов, Л. З. Малкин, Б. Ф. Петров), а также создана еще одна, большего объема. Под руководством В. И. Шпакова были проведены детальные исследования характеристик спонтанного деления ^{252}Cf , которые позволили получить новые данные о механизме деления и, в частности, обнаружить явление так называемого "холодного компактного и деформированного" деления.

Помимо фундаментальных задач физиками института успешно решаются и задачи прикладного характера, в частности в области измерения ядерных констант. Под руководством К. А. Петржака в институте была разработана методика измерения абсолютных значений сечений деления важнейших делящихся ядер с использованием мониторинга потока нейтронов методом регистрации коррелированных во времени сопутствующих частиц. В течение ряда лет проводились прецизионные измерения сечений деления на ускорителях Радиевого института и Технического университета г. Дрездена (И. Д. Алхазов, Л. В. Драпчинский, О. И. Косточкин, С. С. Коваленко, А. В. Фомичев, В. И. Шпаков и др.). В течение ряда лет проводилось изучение фотоделения тяжелых ядер и фотоядерных реакций (С. В. Хлебников, О. И. Осетров, Г. П. Тюрин). Были впервые измерены сечения деления и угловые распределения осколков деления изотопов Cm , получены неизвестные ранее величины барьеров деления и плотности переходных состояний для $^{243,244,247,248}\text{Cm}$. В настоящее время в лаборатории В. Д. Дмитриева при поддержке Международного научно-

технического центра (МНТЦ) проводятся измерения спектров МНД спонтанного деления минорных актиноидов (Л. В. Драпчинский, Г. С. Бойков, О. И. Косточкин, А. С. Вещиков, Б. В. Румянцев, Б. М. Ширяев). Совместно с сотрудниками СПбИАФ им. Б. П. Константинова проводятся измерения сечений деления тяжелых ядер на источнике нейтронов с "белым" спектром (А. В. Фомичев). Также при поддержке МНТЦ сотрудниками лаборатории В. П. Эйсмонта проводятся измерения характеристик деления ядер (сечений деления и угловых распределений осколков, массовых и энергетических распределений осколков) под действием нейтронов промежуточных энергий (А. В. Прокофьев, А. Н. Смирнов, Г. А. Тутин, И. В. Рыжов).

Как видим, физиками института выполнены обширные исследования, внесшие значительный вклад в физику деления ядер и, естественно, здесь дан лишь весьма краткий обзор этих работ. В настоящее время ими проводятся исследования не только в рамках нашего института, но и в сотрудничестве с физиками других исследовательских центров нашей страны, а также Финляндии, Швеции, Германии, Китая, Италии.

В заключение отметим, что в физике деления остается еще много задач, требующих своего решения, и мы надеемся, что физики Радиевого института примут в этом активное участие.

ДЕЛЕНИЕ И МОДЕЛИ ЯДЕР

В. П. Эйсмонт

На примере собственных более чем сорокалетних исследований в области физики деления автор стремился показать, что работы института в этой области традиционно отличаются фундаментальностью - изучением коренных вопросов с проникновением в глубинную физическую сущность проблем и выходом на общие проблемы физики ядра, что придает им непреходящее, всегда актуальное значение. При этом автор хотел бы сразу подчеркнуть, что не было бы таких примеров, если бы ему не посчастливилось работать с целым рядом прекрасных физиков, внесших неоценимый вклад в упоминаемые исследования и выполнивших кроме них много других работ, принесших интереснейшие результаты. И главное - все сделанное обязано большой научной школе ядерной физики, и особенно физики деления, заложенной в нашей стране такими выдающимися учеными института, как К. А. Петржак, Н. А. Перфилов, А. П. Жданов и А. Н. Протопопов, выходцем из которой автору лестно себя считать. Поэтому сначала немного истории.

Немного истории

Основатель и первый директор Радиевого института академик В. И. Вернадский в одном из своих выступлений сказал: "Физика ядра, которая вытекала из явлений радиоактивности, не может не являться одной из основных задач Радиевого института". Поэтому абсолютно закономерно, что Радиевый институт, созданный для исследования радиоактивности, стоял у истоков рождения ядерной физики в нашей стране (см., например, статью Н. А. Перфилова, К. А. Петржака и В. П. Эйсмонта "От радиоактивности к физическим основам атомной энергетики" в сборнике "Очерки по развитию ядерной физики в СССР", Киев, 1983 г.). В частности, в институте было положено начало отечественным работам по нейтронной физике и физике деления. Под руководством академика В. Г. Хлопина, ближайшего соратника В. И. Вернадского, сменившего его на посту директора института, в начале 20-х годов был получен первый российский радий. Для работ по добыче, выделению и изучению радия физики института во главе с первым заведующим физическим отделом Л. В. Мысовским разрабатывали и изготавливали необходимые измерительные приборы -

электрометры, электроскопы, различные счетчики. В середине 20-х годов в институте осваиваются и развиваются основные в то время методы экспериментального изучения заряженных частиц - метод сцинтилляций и метод камеры Вильсона. Л. В. Мысовский предлагает использовать (а затем и использует) для регистрации α -частиц фотографические пластинки с толстым слоем светочувствительной эмульсии. Таким образом, уже к началу 30-х годов Радиевый институт располагал широким арсеналом методических средств изучения и измерения радиоактивных излучений. Л. В. Мысовским была создана оригинальная эманационная установка для добычи радона ("эманации радия") из раствора радия. Эти препараты радона находили широкое применение в медицинской практике, а с открытием нейтрона (Чэдвик, 1932 г.) ампулы с эманацией радия и порошком бериллия как источники нейтронов по реакции ${}^9\text{Be}(\alpha, n){}^{12}\text{C}$ (в которой нейтроны и были открыты) приобрели неоценимое значение. На этих радон-бериллиевых источниках и были выполнены первые отечественные работы по изучению взаимодействия нейтронов с ядрами. Опыты с нейтронами начались практически сразу же после появления сообщения об обнаружении Э. Ферми наведенной нейтронами радиоактивности. Эти опыты проводились в 1935 г. совместно с группой сотрудников Физико-технического института, возглавлявшейся И. В. Курчатовым, по совместительству бывшим также "постоянным консультантом", а затем и заведующим циклотронной лабораторией и физическим отделом Радиевого института. В результате было открыто новое явление - существование ядерной изомерии у искусственно создаваемых радиоактивных ядер. Возможно, отсюда надо вести нить, приведшую через 30 лет к открытию физиками Дубны - Г. Н. Флеровым, С. М. Поликановым и др. - спонтанноделящихся изомеров. Для изучения изомерии и других исследований нужны были мощные источники нейтронов, которые мог дать только циклотрон. К тому времени циклотрон Радиевого института (с диаметром магнитных полюсов 1 метр), первый в Европе, был уже смонтирован, а вскоре и запущен, что позволило уже в начале 1939 г. при облучении литиевой мишени дейтронами устойчиво получать нейтроны с интенсивностью, эквивалентной нескольким килограммам радия, смешанного с бериллием.

Наличие столь мощного источника нейтронов, разнообразных методик, опыта и знаний, накопленных в предыдущих исследованиях естественной и искусственной радиоактивности, позволило физикам и химикам Радиевого института так же быстро включиться в изучение деления ядер, как до этого в изучение нейтронов. Об открытии деления ядер в институте стало известно в начале 1939 г. А уже седьмого марта в печать была направлена первая отечественная работа по делению ядер, принадлежавшая перу Л. В. Мысовского и А. П. Жданова и называвшаяся "Наблюдение ядер отдачи при бомбардировке нейтронами". На Совещании по физике атомного ядра, состоявшемся в ноябре 1939 г. в Харькове, кроме обзорного доклада А. И. Лейпунского (УФТИ), были представлены четыре экспериментальные работы по делению ядер: одна из Физико-технического института - "Опыты по делению ядер урана" Л. И. Русинова и Г. Н. Флерова - и три от Радиевого института: "Наблюдение следов ядер отдачи, получающихся при делении урана под действием нейтронов в камере Вильсона с пониженным давлением" Н. А. Перфилова, "Пробеги и энергии осколков при делении урана быстрыми нейтронами" К. А. Петржака и "Химическая природа продуктов деления тяжелых ядер" В. Г. Хлопина. Названия докладов говорят сами за себя.

Исследования по делению ядер развивались в мире вообще исключительно быстро. За первые несколько месяцев после открытия самого явления стали известны (качественно) почти все основные характеристики этого типа ядерного расщепления: сечения деления и их зависимость от энергии нейтронов, неравенство масс и зарядов осколков, полная кинетическая энергия осколков, эмиссия нескольких нейтронов в одном акте деления, испускание запаздывающих нейтронов. Кроме уже упоминавшихся работ, выполненных в Радиевом институте, можно указать на первое экспериментальное определение эффективного заряда осколков, выполненное Н. А. Перфиловым методом отклонения в магнитном поле циклотрона, первое наблюдение деления ядер урана, помещенного внутри эмульсии и подвергнутого бомбардировке нейтронами, проведенное А. П. Ждановым и Л. В. Мысовским, а также об-

наружение В. Г. Хлопиным с сотрудниками ряда неизвестных до этого продуктов деления урана и тория. В июне 1940 г. в "Журнал экспериментальной и теоретической физики" была направлена статья К. А. Петржака и Г. Н. Флерова "Спонтанное деление урана", в которой сообщалось об открытии нового явления - спонтанного деления тяжелых ядер. Работа была выполнена в Радиевом и Физико-техническом институтах.

Открытие спонтанного деления стало крупной вехой в истории ядерной физики, положив начало многочисленным исследованиям этого процесса, результаты которых имеют глубокое теоретическое и гносеологическое значение, позволяя понять принципиальную ограниченность мира природных химических элементов. Обнаружение спонтанного деления подтвердило предсказание Н. Бора и Дж. Уиллера, давших одновременно с Я. И. Френкелем первое теоретическое объяснение процессу деления. Сам Н. Бор ссылаясь на результаты Н. А. Перфилова по определению эффективного заряда осколков.

Таким образом, работы института по делению были не просто пионерскими, они затрагивали сами основы явления. Возможно, дух фундаментальности проводимых исследований поселился в Радиевом институте вместе с Г. А. Гамовым, одним из крупнейших физиков-теоретиков XX века, начавшим свою "карьеру" с квантовой теории α -распада в конце 20-х - начале 30-х годов и бывшим одно время сотрудником института. А возможно и раньше, так как еще в 20-е годы Л. В. Мысовским были написаны теоретические работы, касавшиеся фундаментальных вопросов - энергии α -частиц и связи ее с постоянной радиоактивного распада. Проникновению в глубины механизма распада и строения ядер безусловно способствовало то, что работы по ядерной физике велись в институте широким фронтом: и в области космических лучей, и в области ядерной спектроскопии, и в области ядерных взаимодействий при низких и высоких энергиях. С физикой деления и только что перечисленными направлениями, кроме уже упомянутых имен, связаны имена выдающихся отечественных физиков: Д. Г. Алхазова, Н. А. Власова, И. И. Гуревича, Б. С. Желепова, П. И. Лукирского, М. Г. Мещерякова, Ю. А. Немилова и др.

Ряд военных и послевоенных лет многие из них наряду с другими сотрудниками института были заняты обеспечением "ядерного щита страны", но в начале 50-х годов фундаментальные работы в институте возобновились. С этим временем связано и начало работ автора по физике деления, которые, как ему хочется думать, наряду со многими другими, продолжают традиции института по постижению природы изучаемого процесса, ее связи с характером ядерных сил и структурой ядра.

Угловая анизотропия деления и обобщенная модель ядра

Деление - один из типов ядерных превращений. Экспериментальные и теоретические методы его изучения по существу не отличаются от методов, используемых в других областях ядерной физики. Поэтому развитие физики деления идет параллельно с общим развитием науки о ядре, и уровень наших представлений об этом процессе отражает общий уровень наших знаний о структуре ядра. Не существует последовательной теории ядра, не существует и последовательной теории деления. Для интерпретации явления деления мы используем модельные представления из других областей ядерной физики. Сами ядерные модели получают при этом существенное развитие.

Одна из ярких особенностей процесса деления - связь направлений вылета осколков с направлением вызывающих деление частиц. В рамках простой капельной модели не ожидалось никакой корреляции между направлениями падения частиц и разлета осколков. При делении ядер тепловыми нейтронами корреляции действительно не было обнаружено, однако при вынужденном делении быстрыми нейтронами (с энергией около 14 МэВ) наблюдалось (1953 г.), что наибольшее число делений происходит в направлении, параллельном пучку нейтронов. Отчетливая тесная связь направлений была установлена и в случае фотоделения. Сейчас ясно, что указанная связь, или анизотропия, является свойством процесса деле-

ния, общим для всех делящихся ядер, проявляющимся в тех случаях, когда момент составного ядра получает некоторое преимущественное направление ориентации.

Открытие угловой анизотропии привлекло к себе большое внимание. Оно потребовало пересмотра старых и создания новых представлений о механизме процесса деления. Основа для новых представлений была найдена в обобщенной модели ядра (О. Бор, Д. Хилл, Дж. Уиллер, В. М. Струтинский). Анизотропия была объяснена свойствами углового момента переходного ядра.

Исследования угловой анизотропии были начаты автором в 1955 г., т. е. почти в самом начале экспериментальных и теоретических работ в этой области. Впервые была определена степень угловой анизотропии деления ^{239}Pu и ^{241}Am нейтронами с энергией 14 МэВ и дана термодинамическая интерпретация экспериментально установленной связи ее с параметром Z^2/A делящегося ядра. Наблюдаемое уменьшение анизотропии с ростом параметра Z^2/A было объяснено тем свойством ядерных структур, что с увеличением этого параметра растет температура переходного ядра и, следовательно, уменьшается роль создания падающей частицей энергетической выгоды деления в параллельном пучку направлении. Это объяснение, играющее важную роль в понимании не только этого, но и иных эффектов угловых распределений осколков, было дано одновременно и независимо от почти аналогичного объяснения, данного Халперном и Струтинским на II Международной конференции по мирному использованию атомной энергии (Женева, сентябрь 1958 г.).

Экспериментально изучалась также связь между угловым и массовым распределением осколков при делении ^{238}U нейтронами с энергией 3 и 14 МэВ. Природа этой связи и роль в ней температуры ядра в седловой точке остается предметом оживленного обсуждения еще и сегодня.

Из описываемых исследований был сделан вывод: "Если справедливо утверждение, что "физика деления перестала быть изживенкой у ядерных моделей, но сама начинает давать им кое-что и весьма существенное" (Гриффин, 1958 г.), то оно в значительной мере относится к области угловой анизотропии. Прямая связь между направлением разлета осколков и ориентацией деформированного делящегося ядра приводит к замечательной возможности исследования свойств возбужденных состояний атомных ядер. Представляется, что дальнейшее экспериментальное и теоретическое изучение угловой анизотропии даст много полезных сведений о структуре тяжелых ядер."

Эффекты ядерной структуры осколков деления

Деление - коллективный ядерный процесс, в котором на первый план выступает множественность частиц, участвующих в реакции, общность их поведения. Из нуклонов делящегося ядра формируются совершенно новые ядра. Ясно, что такое глубокое превращение - прежде всего результат единообразного совместного движения нуклонов, и его проще всего описать, используя статистическую модель и ее простейшую форму - капельную. Конечно, такое описание будет приблизительным, но есть основание ожидать, что оно отразит основные черты процесса, главные тенденции в его характеристиках. Капельная модель не обманула надежд, успешно объяснив первые установленные факты и правильно предсказав еще не известные явления (например, спонтанное деление). Многочисленные экспериментальные данные, данные по делению возбужденных тяжелых ядер и ядер легче радия свидетельствуют, что модель может служить основой теории деления и сегодня. В непреходящем значении модели нет ничего удивительного. Такова природа рассматриваемого явления.

Однако те же экспериментальные данные для актинидов при небольших энергиях возбуждения (до нескольких десятков МэВ) показывают, что свойства деления сильно зависят от конкретных особенностей ядра. В этом отражается влияние индивидуальных состояний нуклонов на характер их коллективного движения. Один из наиболее ярких примеров проявления внутренней структуры ядер дало открытие спонтанноделящихся изомеров. Этот и другие факты были объяснены вытекающей из метода оболочечной поправки, развитого

В. М. Струтинским, моделью двугорбого барьера. В ней естественным образом сбалансированы роль модели жидкой капли (общие гладкие изменения) и модели независимых частиц (остающиеся осцилляции), а сами оболочки рассматриваются как большие неоднородности в спектре одночастичных состояний.

В методе оболочечной поправки, по-видимому, заложены потенциальные возможности для цельного описания процесса деления, но в настоящее время его главный успех (в отношении процесса деления) связан с объяснением квантовых эффектов в седловой точке, к которым относится только что описанный эффект угловой анизотропии. Сделаны лишь первые шаги к качественному рассмотрению стадии развала ядра на осколки (А. В. Игнатьюк). Вместе с тем, с точки зрения автора, эффекты квантовой структуры осколков, т. е. эффекты нуклонных оболочек и спаривания, отчетливо проявляются во многих характеристиках этой последней стадии: в распределениях осколков по массам, зарядам, кинетическим энергиям, энергиям возбуждения и т. д. Понимание этих эффектов существенно как для интерпретации самого процесса деления, так и для установления свойств ядер в столь необычных условиях, которые реализуются в процессе деления - большие деформации, большой избыток нейтронов.

В направлении изучения различных эффектов ядерной структуры осколков деления и развивались дальнейшие исследования автора. На рубеже 50-х - 60-х годов, когда они были начаты, идеи оболочек уже "работали" в физике деления, но не шли дальше предположения о том, что с энергетической выгодностью замкнутых оболочек может быть связана асимметрия масс осколков. В 1959 г. автором и его коллегами (А. Н. Протопоповым, И. А. Барановым и Ю. А. Селицким) было надежно установлено уменьшение средней кинетической энергии осколков в области симметричного деления, а именно при делении ^{238}U нейтронами с энергией 14 МэВ, когда выход симметричного деления сравним с полным выходом. Эта, а также ряд других особенностей распределений кинетических энергий и энергий возбуждения осколков, впервые были связаны с влиянием степени заполненности оболочек на форму осколков в момент разделения. В дальнейшем влияние деформируемости осколков на их кинетические энергии и энергии возбуждения детально изучалось многими другими исследователями (как в институте, так и за его пределами) и в настоящее время представляется общепризнанным. Существование разных способов деления может быть обязано этому влиянию.

Обнаружение в ИАЭ (В. В. Скляревский) рентгеновских характеристических лучей деления дало в руки физиков прямой способ определения первичного заряда осколков, и этот способ был использован автором (вместе с А. Г. Доничкиным, А. Н. Смирновым, С. М. Соловьевым, В. А. Юргенсоном и др.) для исследования эффектов оболочек в ядерном заряде, а также в свойствах самого рентгеновского излучения. С развитием техники спектрометрии рентгеновских лучей оказалось реальным разделение вкладов соседних зарядов, а это, в свою очередь, позволило приступить к экспериментальному изучению ядерной структуры меньшего интервала - парных корреляций протонов в осколках. С наблюдением эффектов спаривания нуклонов в осколках возникла принципиальная возможность сравнения парных сил в деформированных ядрах с большим избытком нуклонов с парными силами в обычных ядерных системах.

Здесь автору пора признаться, что название и содержание предыдущей и этой глав - суть название и содержание его кандидатской (1959 г.) и докторской (1973 г.) диссертаций, соответственно. Введение и заключение последних воспроизведены почти дословно. В какой-то степени автор сам удивлен их актуальности. По принципу сохранения исторической документальности изложения будет написана и следующая глава.

Нейтроны деления возбужденных ядер и свойства ядерной материи

В 1965 г. была опубликована статья автора "Нейтроны деления возбужденных ядер". В аннотации говорилось: "Время, необходимое для набора осколком заданной скорости, рассчитывается и сравнивается с вычисленным временем жизни возбужденного ядра по отношению к испусканию нейтронов. На основе этого делается предположение, что при деле-

нии ядер, возбужденных до энергий ≈ 20 МэВ и выше, некоторая доля нейтронов (увеличивающаяся с возбуждением) может эмитироваться до момента полного ускорения осколков. Учет этого обстоятельства позволяет устранить некоторые противоречия, существующие в трактовке экспериментальных данных. Оказывается, что "это обстоятельство" особенно важно учитывать сегодня, когда на поле физики деления идет охота на природу и величину сил трения в ядерном веществе. Динамика коллективного движения ядер стала одной из центральных проблем современной ядерной физики. Эта проблема связана с изучением поведения уникальной сверхплотной квантовой Ферми-жидкости в условиях конечного числа частиц и связи коллективных и одночастичных степеней свободы. Особый интерес в этом отношении имеет процесс деления. Здесь мы имеем дело не только с самыми большими амплитудами коллективного движения, но и с разными формами перекачки энергии от одних степеней свободы к другим: от хаотического теплового движения к упорядоченному коллективному на стадии до седловой точки и от коллективного - обратно к тепловому (от порядка к хаосу) на стадии спуска. Эти противоположные по знаку переходы, происходящие, к тому же, при различных деформациях, могут управляться различными механизмами внутреннего трения (вязкости) и иметь разную величину силы трения. Определяя на опыте различные характеристики процесса деления, связанные с той или иной стадией, и приближаясь таким образом к квазиполному опыту, мы можем надеяться получить, с одной стороны, новые сведения о величине и характере ядерной диссипации - ядерной диссипации на обеих стадиях, и, с другой стороны, сделать результаты теоретического анализа внутренне согласованными.

Одним из основных способов изучения динамики деления являются так называемые "нейтронные часы", когда по соотношению числа изотропно и неизотропно испущенных нейтронов деления определяется скорость процесса деления. При этом изотропно испущенные нейтроны приписываются эмиссии из делящегося ядра (до или после седловой точки). Но читаем: "Проблемы эмиссии нейтронов деления возбужденных ядер, в частности определения источника и момента времени испускания нейтронов, - одна из старейших в физике деления. Несмотря на проведенные опыты и теоретические оценки, с точки зрения авторов, она остается нерешенной...". Это уже из аннотации написанного совместно с Г. А. Тутиным доклада (с тем же самым названием, что и статья 30-летней давности), опубликованного в трудах XIII Совещания по физике деления ядер (Обнинск, 1995 г.). В докладе подчеркнуто, что пренебрежение испусканием нейтронов на ранней стадии ускорения осколков, имеющих также почти изотропные распределения, что и нейтроны из делящегося ядра, может существенно изменить "показания нейтронных часов", и, следовательно, вывод о силе связи коллективных и одночастичных степеней свободы (величине вязкости вещества). Поскольку всякая хорошая история должна иметь продолжение, в докладе намечены эксперименты, которые должны помочь продвижению по пути решения проблемы нейтронной эмиссии и получения другой новой информации о "расписании" процесса деления и, тем самым, о свойствах ядерной материи.

Вместо заключения

Заключения по существу этого очерка делать не хочется. Да его и невозможно дать. Физика деления, как любая настоящая наука, будет развиваться и будет продолжать обогащать наши знания о природе вещей. Но еще раз хочется подчеркнуть, что скорость прогресса в сильной степени зависит как от отношения государства к науке (ее финансирования - ох, уж эти деньги!), так и от атмосферы непосредственно ученого окружающей. Поэтому несколько последних слов снова о ней, школе Радиевого института, но уже более конкретно - применительно к персоне автора. Условия никогда не были тепличными. Приходилось "бороться за свои права": ссориться с начальством, "выбивать" приборы, материалы, штатные единицы. Но было главное - атмосфера большого интересного труда, и не столько под глазом старших, сколько вместе с ними, в общении с самыми высокими авторитетами науч-

ного мира. Автору очень повезло с таким общением. Еще в Ленинградском политехническом институте, после успешной сдачи ему экзамена по электродинамике, Я. И. Френкель предложил поработать с ним. Хотя было не совсем понятно, что это значит, и этому не суждено было случиться (Я. И. Френкель скоро скончался), это приятное предложение надолго осталось в сознании и пробудило интерес к физической сущности изучаемых явлений. Дипломная практика проходила в лаборатории К. А. Петржака, поддерживающей славу своего руководителя, открывшего спонтанное деление, и несшей отпечаток его большого физического и общего художественного вкуса. Дальнейшая работа протекала под началом А. Н. Протопопова, переведенного в институт для выполнения правительственного задания по определению эффективности термоядерного заряда с "Приволжской конторы", как тогда называли ВНИИЭФ, и "захватившего", возможно, оттуда довольно жесткие методы управления коллективом, и, вместе с тем, авторитет лауреата Государственной премии за участие в разработке первой атомной бомбы. Для молодого коллектива, который достался А. Н. Протопопову, эти его энергия (не только организационная, но и творческая) и авторитет были весьма кстати. Была напряженная, захватывающая работа (и техническая, и физическая), давшая хороший импульс высоким будущим достижениям таких замечательных физиков как М. В. Блинов и Ю. А. Селицкий, а также И. А. Баранов, С. М. Соловьев, Г. А. Тутин, Н. М. Казаринов, М. И. Кузнецов, Б. М. Ширяев, В. А. Юргенсон и др. Своим учителем автор считает также Н. А. Перфилова, в лаборатории которого он работал с середины 60-х до середины 70-х годов и имел возможность наблюдать (и на себе чувствовать) ровное, ненавязчивое и вместе с тем заинтересованное, побуждающее к делу отношение ко всем своим сотрудникам. И еще - Ю. А. Немилова, с членами лаборатории которого много работал и с которым имел очень полезные для понимания результатов дискуссии о механизме взаимодействия частиц с ядрами. И Н. А. Перфилов, и Ю. А. Немилов были профессионально яркими и удивительно интеллигентными учеными. Автору часто вспоминаются лабораторные семинары, организованные А. Н. Протопоповым, семинары отдела под руководством Н. А. Перфилова (секретарем которого автор одно время был), а также семинары, которые вел в Институте атомной энергии И. В. Курчатов (на одном из которых в конце 50-х годов автор выступал с докладом). Думается, что научные семинары, участие в них и особенно выступления - лучшая школа воспитания молодых (и немолодых) ученых. Большое впечатление произвели на автора оппоненты по кандидатской диссертации: крупный ученый, работавший в нашем институте, Г. В. Горшков, который и во время обсуждения диссертации и после часто повторял: "Ein Versuch - kein Versuch" (один опыт - не опыт), а также Л. И. Русинов, работавший в Физико-техническом институте, - один из первых физиков-ядерщиков и ближайший соратник И. В. Курчатова, охотно делившийся с автором своими знаниями эксперимента и физики. Столь же видными физиками были и оппоненты по докторской диссертации: Б. М. Гохберг - сотрудник ИАЭ, также один из соратников И. В. Курчатова, сменивший его впоследствии на посту руководителя Всесоюзных семинаров по физике деления, К. А. Петржак, о котором уже говорилось, и С. М. Поликанов, открывший вместе с Г. Н. Флеровым спонтанноделящиеся изомеры. Со всеми из них автору посчастливилось иметь многочисленные встречи в формальной и "неформальной" (имеющей, между прочим, не меньшее значение для образования, в том числе и физического) обстановке.

Довелось также встретиться и в течение вечера беседовать с зарубежными "классиками" - Дж. Уиллером, соавтором Н. Бора по первой теоретической работе, давшей объяснение процесса деления, и Г. Сиборгом - великим химиком, открывшим ряд трансурановых элементов, сыгравших большую роль для изучения деления. Это было на заключительном приеме конференции, посвященной 50-летию открытия деления, проходившей в Западном Берлине в 1989 г. На ряде других конференций, наших и международных, кстати являющихся также неоценимой школой роста, удалось познакомиться со многими другими известными физиками - "делительщиками". Большое значение для связи автора с физическим обществом имело первое открытое Всесоюзное совещание по физике деления в Ленинграде в 1961 г., одним из главных организаторов которого он был.

Однако наибольшей своей удачей (в плане общения) автор считает многолетнюю личную дружбу с В. М. Струтинским (ИАЭ, Москва) - выдающимся отечественным физиком-теоретиком, внесшим в развитие физики деления наших дней крупнейший вклад, сравнимый разве что лишь с классическими работами Я. И. Френкеля, Н. Бора и Дж. Уиллера. Основанные на этой дружбе тесные контакты позволили находиться в курсе самых новых идей, "примеряя" к ним планируемые эксперименты. Возможно, когда-нибудь удастся рассказать (и даже показать имеющийся у автора "домашний" фильм) о В. М. Струтинском и его роли в исследованиях по физике деления в Радиевом институте более подробно, но сейчас придется ограничиться открытием связанной с ним последней "тайны названий" сей статьи. Название самой статьи повторяет название ненаписанной нами книги, хотя на ее издание был заключен договор с Атомиздатом. Это было в середине 60-х годов. Вскоре, однако, В. М. Струтинский уехал из Москвы в Киев, и частота наших встреч стала ниже. Кроме того, и у него, и у автора было много интересной "оригинальной" работы и отвлекаться на "писанину" (с неизбежным изложением того, что сделали другие) не очень-то хотелось - дулось, это никуда не уйдет. Сейчас-то ясно, что мы ошибались.

Конечно же, здесь оказались неназванными имена еще много большего (чем названы) числа достойнейших физиков, экспериментаторов и теоретиков, которые формировали творческий макро- (в институте) и микро- (вокруг автора) климат. Климат этот был не просто здоровым, но вдохновляющим, побуждающим к новым исследованиям самых больших старых и новых загадок физики деления. Наш долг - сохранить его в институте.

ДЕЛЕНИЕ ЯДЕР ПРИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЯХ ВОЗБУЖДЕНИЯ

Б. Н. Беляев, В. Д. Домкин, А. И. Обухов, О. Е. Шигаев

Исследования по физике деления атомных ядер при высоких энергиях возбуждения начались в Радиевом институте практически сразу после ввода в строй ускорителя протонов с энергией 660 МэВ в Лаборатории ядерных проблем в Дубне (1949 г.). В 1950 г. под руководством Н. А. Перфилова проводилось изучение взаимодействия пионов и протонов с тяжелыми ядрами методом толстослойных ядерных фотозмульсий. Сами эмульсии, а также оригинальные способы введения в них тяжелых ядер, разрабатывались непосредственно в лаборатории Н. А. Перфилова.

В последующие годы запуск новых ускорителей (синхрофазотрон ОИЯИ, протонный синхротрон ИТЭФ, фазотрон ЛИЯФ, ионный синхротрон РИ и др.) позволил существенно расширить круг исследований по физике деления ядер, как по энергиям частиц (от десятков МэВ до 10 ГэВ), так и по набору изучаемых ядер-мишеней. В начале 60-х годов стали проводиться систематические работы по изучению деления ядер под действием тяжелых многозарядных ионов на ускорителях У-200 и У-300 в Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ (Дубна). Успеху в исследованиях, проводимых сотрудниками Н. А. Перфилова, способствовало то, что в Радиевом институте постоянно велась работа по усовершенствованию методик проводимых экспериментов, в первую очередь в области детектирующих систем: ядерных фотозмульсий (Н. Р. Новикова, В. И. Захаров), полупроводниковых детекторов (В. В. Авдейчиков, Е. А. Ганза, С. М. Соловьев и др.), тонкопленочных пробойных счетчиков (А. Н. Смирнов), пластиковых трековых детекторов типа CR-39, монокристаллических AgCl, AgBr (Н. П. Кочеров, В. Д. Дмитриев, О. Е. Шигаев).

1. Деление ядер протонами промежуточных энергий

Отличительной особенностью деления ядер протонами промежуточных энергий является то, что в этом случае не образуется составное ядро и процесс деления происходит в две стадии. При энергиях протонов свыше 100 МэВ последние взаимодействуют не с ядром в целом, а с отдельными нуклонами ядра, вследствие чего развивается каскад столкновений высокоэнергетических частиц, главным образом нейтронов и протонов. Возбужденное ядро-остаток либо переходит в основное состояние путем испарения легких частиц и испускания γ -квантов, либо (при энергиях возбуждения остаточного ядра выше его порога деления) в процессе разрядки может разделиться. Вероятность деления при этом определяется соотношением между частичной (Γ_1) и делительной (Γ_f) ширинами Γ_1/Γ_f , каждая из которых в отдельности является функцией энергии возбуждения. Исследование энергетических зависимостей этих функций (т. е. измерение $\sigma_d(E^*)$) является одной из главных задач физики деления.

Большинство экспериментов по изучению деления ядер при высоких энергиях возбуждения было выполнено с использованием методик твердотельных трековых детекторов (ТТД) и тонкопленочных пробойных счетчиков (ТПС). Использование этих методик позволило не только измерять значения сечений деления, но и определять анизотропию угловых распределений осколков, что дает дополнительную информацию о состоянии делящегося ядра в седловой точке. Благодаря высокому порогу регистрации этих детекторов удалось существенно расширить диапазон исследуемых делящихся ядер вплоть до серебра и более легких элементов.

1.1. Анизотропия угловых распределений осколков

Анизотропия в угловом распределении осколков деления ядер является важной характеристикой, позволяющей получить детальную информацию о механизме процесса деления: об угловом моменте делящегося ядра, переданном импульсе, форме ядра на вершине барьера деления и т. д.

Как было показано А. И. Обуховым и Н. А. Перфиловым (1967 г.), при облучении ядер протонами с энергией до 50 МэВ их деление происходит анизотропно: осколки деления в системе центра масс делящегося ядра вылетают преимущественно под углами 0 и 180° по отношению к пучку протонов. До этого имелись экспериментальные данные, свидетельствовавшие о том, что при облучении урана и тория протонами с энергиями 45, 80 и 155 МэВ анизотропия уменьшается с ростом энергии протонов.

С 1973 по 1982 гг. были выполнены систематические исследования сечений деления и угловой анизотропии осколков при делении ядер в широком диапазоне (от урана до серебра) при облучении протонами с энергиями 70, 100, 155, 200 и 1000 МэВ (О. Е. Шигаев, В. С. Быченков, В. Д. Дмитриев, А. И. Обухов, Р. М. Яковлев, А. И. Сальман). Эти измерения позволили выявить ряд общих закономерностей в энергетических зависимостях угловой анизотропии и ее зависимости от параметра делимости Z^2/A делящегося ядра. Анализ экспериментальных данных по анизотропии деления в зависимости от Z^2/A при облучении ядер протонами с энергией 200 МэВ позволил сделать ряд важных выводов о различии в механизмах деления тяжелых и легких ядер. Было установлено, что для ядер вблизи Та и более легких экспериментально определенное значение параллельной составляющей переносной скорости для осколков деления в пределах погрешностей совпадает с расчетными значениями для деления через образование составного ядра. Наблюдаемое экспериментально увеличение переносной скорости с уменьшением Z^2/A можно объяснить тем, что при делении легких ядер из послекаскадных возбужденных ядер-остатков в делительном канале реализуются лишь случаи со все большими значениями энергии возбуждения. Для ядер легче Та это означает, что практически все акты деления идут через образование компаунд-системы. Расчетные же значения анизотропии для случаев деления во всей области исследованных ядер су-

щественно превышали экспериментальные (причем это превышение было особенно значительным в области Ag-Sn), что можно объяснить предположением об образовании составной системы лишь в тех случаях, когда прицельный параметр меньше некоторого значения, определенного для каждого конкретного делящегося ядра. Таким образом, из полученных экспериментальных данных следовало, что реализующийся в акте деления угловой момент меньше, чем рассчитанный в предположении о том, что прицельный параметр равен радиусу ядра R , т. е. только центральные соударения приводят к образованию составной системы и делению легких ядер. Обнаруженный нами эффект центральных столкновений (некий аналог критического углового момента в реакциях с тяжелыми ионами, см. раздел 3) необходимо учитывать при оценках сечений деления легких ядер.

Для согласования расчетных и экспериментальных значений сечений деления обычно предполагается энергетическая зависимость барьеров деления от энергии возбуждения остаточных ядер. В соответствии с этой зависимостью уменьшение барьера деления в области Ag достигает величины 10-15 МэВ при энергиях возбуждения свыше 70 МэВ по сравнению со значением жидкокапельного барьера 50 МэВ. Учитывая эффект центральных соударений, сечения деления легких ядер должны рассчитываться по формуле: $\sigma_f \approx G_f / G_n \cdot \sigma_{in}$, где полное неупругое сечение реакции пропорционально не квадрату радиуса ядра-мишени, а величине g_{pr}^2 , которая определяется экспериментально из измерений угловой анизотропии осколков. Так, например, было показано, что для протонов с энергией 200 МэВ результаты расчетов по этой формуле хорошо согласуются с экспериментальными данными в области Ag-Ta, если использовать жидкокапельные значения барьеров деления, а отношения параметров плотности уровней, как и в большинстве расчетных работ, выбрать вблизи асимптотических - 1,05 - 1,10.

В энергетических зависимостях анизотропии деления для различных ядер-мишеней, так же как и в зависимостях от Z^2/A , обнаруживаются интересные различия в механизмах для тяжелых (U, Th) и легких (Bi, Pb, Au и т. д.) ядер. Экспериментальные значения анизотропии деления ядер в случае урана и тория возрастают с ростом энергии протонов, проходят через максимум в районе 50-70 МэВ и затем уменьшаются. В случаях Bi, Pb, Au изменение экспериментальных значений анизотропии с ростом энергии протонов свыше 70 МэВ подобно урану и торю. В обоих случаях экспериментальные значения анизотропии остаются меньше расчетных значений, полученных в предположении об образовании составного ядра. При энергии протонов ниже 50 МэВ расчетные и экспериментальные зависимости анизотропии от энергии протонов существенно различаются для U, Th и Bi, Pb, Au. В случае Bi и более легких ядер-мишеней расчетная анизотропия уменьшается, проходит через минимум и затем резко возрастает вблизи порога деления, тогда как для U, Th продолжает уменьшаться. Такое поведение анизотропии объяснялось существованием аномально большой энергии спаривания нуклонов. Однако для сравнительно легких ядер существует некоторая пороговая энергия бомбардирующей частицы, при которой энергия возбуждения составного ядра близка по величине к барьеру деления, но которая выше кулоновского барьера взаимодействия, т. е. $E_{пор.} = E_f - d > E_{кул.}$, где d - энергия связи бомбардирующей частицы в составном ядре. С уменьшением энергии протонов энергия возбуждения ядра в седловой точке может быть получена как угодно малой при малом, но конечном значении вносимого углового момента, что приводит, как нами было показано, согласно теории Халперна-Струтинского, к резкому возрастанию угловой анизотропии осколков деления таких ядер. При облучении U и Th протонами и более тяжелыми частицами такое условие не может быть достигнуто, так как пороговая энергия частиц будет значительно ниже кулоновского барьера. В экспериментах Натовича (Технический университет, США) при делении золота протонами только одно значение анизотропии совпадает с предсказанным нами подъемом при энергии протонов 17 МэВ. Подъем угловой анизотропии вблизи порога деления наблюдался также при облучении ядер рения протонами и свинца и более легких ядер ионами ^4He . Все эти данные косвенно подтвердили наши предположения о существовании $E_{пор.}$

1.2. Сечения деления ядер при облучении протонами промежуточных энергий

Энергетические зависимости сечений деления тяжелых ядер (U, Th) и более легких, начиная с Bi, имеют заметные различия. На основании экспериментальных данных о величинах сечений деления тяжелых ядер, полученных сотрудниками Радиевого института при облучении протонами в широком интервале энергий, установлено, что с ростом энергии протонов от порога кулоновского взаимодействия сечения деления указанных ядер возрастают, проходят через максимум при энергии протонов 50-70 МэВ и затем заметно уменьшаются. Уменьшение сечений деления ядер урана с ростом энергии протонов свыше 70 МэВ связано с проявлением каскадного характера взаимодействия быстрых протонов с ядрами, с увеличением числа вылетевших каскадных нуклонов из ядра урана и, соответственно, с уменьшением делимости остаточных послекаскадных ядер. Это указывает на то, что в области высоких, так же как и в области малых энергий, G/G_n тяжелых ядер слабо зависит от энергии возбуждения, но зависит от Z и A делящегося ядра.

Для более легких ядер, начиная с Bi, ход энергетической зависимости сечений деления отличается от аналогичной зависимости для урана отсутствием явно выраженного максимума. Быстрое возрастание сечений деления с увеличением энергии бомбардирующих протонов свидетельствует о сильной зависимости делимости этих ядер от энергии возбуждения, сохраняющейся и в области высоких энергий так же, как это наблюдается в области малых энергий возбуждения.

Все, что было сказано о висмуте, в полной мере может быть отнесено и к ядрам значительно более легким, вплоть до группы редкоземельных элементов. В 1961 г. Н. А. Перфиловым при анализе известных к тому времени сечений деления различных ядер протонами с энергией до 660 МэВ был сделан вывод, что сечения деления достигают насыщения при этой энергии протонов. Опираясь на этот вывод, Н. А. Перфилов высказал предположение, что существует некая универсальная для всех ядер зависимость делимости от параметра Z^2/A , в эмпирической форме описываемая выражением $\sigma/\sigma_{in} = \exp\{a(Z^2/A - b)\}$, где $a = 0,682$, $b = 36,25$. Из этого выражения следует, что для ядер с $Z^2/A \geq 36,25$ сечение неупругого взаимодействия должно полностью, или почти полностью, учитывая приближенный характер выражения, определяться делением.

Экспериментальные данные, которыми мы располагаем к настоящему времени, показывают, что насыщения в зависимости сечений деления (делимостей) для различных ядер-мишеней от энергии бомбардирующих частиц скорее всего не существует. Для урана это проявляется совершенно отчетливо. Для более легких ядер наблюдается расширение максимума в энергетической зависимости сечений деления и постепенный сдвиг его в сторону больших энергий с уменьшением массы делящегося ядра. Тем не менее, оказалось, что подобные прямолинейные в полулогарифмическом масштабе зависимости делимостей ядер от Z^2/A имеют место, но только при определенной энергии (или в узком интервале энергий) бомбардирующих частиц и с другими значениями параметров "а" и "b". Полезность построения таких зависимостей состоит в том, что они могут быть использованы при оценке сечений деления (делимостей) для ядер, экспериментальные данные по которым отсутствуют.

В области еще более легких ядер-мишеней также обнаружена новая интересная особенность: для протонов с энергией 200 МэВ (при других энергиях экспериментальные данные отсутствуют) для ядер с $Z^2/A \leq 25$ наблюдается отклонение от прямолинейной зависимости в сторону увеличения делимостей. Это факт может свидетельствовать о том, что для очень легких ядер механизм процесса деления опять изменяется (см. раздел 1.1).

Не затрагивая детально вопрос о новом механизме деления, объяснение этому явлению может быть дано, исходя из жидкокапельных представлений о барьере деления. Никс и Сасси (Калифорнийский университет, США) проделали количественные расчеты зависимости делимости ядер от Z^2/A с учетом испарения частиц, которые показали, что делимость ядер падает с уменьшением Z^2/A , достигает минимума в области серебра и затем, для более легких ядер-мишеней, снова начинает расти. Таким образом, найденное нами экспериментально

отклонение делимости ядер от прямолинейной зависимости в случае деления ядер Sn и Ag протонами с энергией 200 МэВ качественно согласуется с этими расчетами. Дополнительное подтверждение такому объяснению зависимости делимости ядер от Z^2/A было получено нами позднее. В ядерной фотоэмульсии были обнаружены распады релятивистских ядер $Mg \Rightarrow B+N$ и $Si \Rightarrow C+O$, произошедшие в результате неупругих периферических взаимодействий с ядрами эмульсии. Оцененные из кинематического анализа энергии возбуждения в этих взаимодействиях составляли величину порядка 70 МэВ, а сечения распада ("квазиделения") - порядка 1 мбн. тогда как минимум в делимости соответствует величине сечения деления около 10^{-2} мбн.

2. Деление ядер нейтронами промежуточных энергий

Пучки нейтронов промежуточных энергий получают, как правило, на ускорителях в (p,n)-реакциях на различных мишенях-конверторах. В дальнейшем формирование пучка, очистка его от заряженной компоненты, выделение нейтронов заданной энергии и, наконец, мониторингирование представляют сложную методическую задачу. Именно поэтому объем экспериментальной информации по сечениям деления ядер нейтронами промежуточных энергий весьма ограничен, тогда как потребность в них очень велика. Данные по нейтронным сечениям деления представляют большой интерес не только для фундаментальной ядерной физики (изучение конкуренции между различными модами распада возбужденных ядер, проверка теоретических моделей), но также и для прикладных исследований (электроядерный бридинг, трансмутация долгоживущих отходов ядерного производства, ядерная медицина, космическая дозиметрия и пр.). До недавнего времени лишь очень небольшому числу исследовательских групп удалось получить достоверные данные по сечениям деления ядер нейтронами с энергиями свыше 20 МэВ.

В настоящее время в Радиовом институте подобные исследования ведутся группой сотрудников под руководством В. П. Эйсмонта в коллаборации со шведскими учеными на ускорителе лаборатории им. Сведберга в Уппсале и А. В. Фомичевым совместно с сотрудниками СПБИЯФ (Гатчина). Эксперименты в Гатчине ведутся на источнике нейтронов с "белым" спектром в интервале энергий до 100 МэВ, а измерения в Швеции проводятся на квазимоноэнергетическом пучке нейтронов в диапазоне энергий 70-160 МэВ. Были измерены сечения деления ядер ^{208}Pb , ^{209}Bi и ^{238}U с использованием тонкопленочных пробойных счетчиков в качестве детекторов осколков деления.

Анализ вновь полученных, а также имевшихся ранее данных по сечениям деления ядер нейтронами и протонами в зависимости от энергии позволил сделать весьма важное заключение. В области энергий 100-150 МэВ основным фактором, определяющим разницу в величинах протонных и нейтронных сечений деления становится нуклонный состав остаточных возбужденных ядер. И, кроме того, отношение протонных и нейтронных сечений для каждого отдельного ядра становится постоянным при энергиях бомбардирующих частиц порядка 200 МэВ, что может быть описано эмпирическим соотношением вида: $\sigma_{pt}/\sigma_{nf} = \exp 0,162(37-Z^2/A)$. Это соотношение дает возможность оценки нейтронных сечений для тех ядер-мишеней и тех энергий, где экспериментальные данные отсутствуют.

3. Деление ядер тяжелыми многозарядными ионами

Исследования деления ядер тяжелыми ионами проводятся в Радиовом институте с начала 60-х годов. Первые результаты были получены на ускорителях У-200 и У-300 в ЛЯР ОИЯИ (Дубна). Были проведены измерения угловых распределений осколков и сечений деления ядер в области от урана до серебра ионами углерода, кислорода, неона и аргона с

энергиями порядка 10 МэВ/нуклон. Развитие ускорительной техники позволило расширить круг исследований в область релятивистских ионов. Один из последних экспериментов был выполнен нами на ускорителе релятивистских ионов в Беркли. Многослойная камера, состоящая из 70 слоев детектора CR-39, изготовленного в нашем институте, толщиной 1,2 мм, перемежающихся с 70 слоями кадмия, толщиной 1,0 мм каждый, облучалась релятивистскими ионами гольмия-165 с энергией 982 МэВ/нуклон.

Основной отличительной особенностью деления ядер с участием тяжелых ионов является высокий угловой момент делящегося ядра, во много раз превышающий момент, реализующийся в реакциях с более легкими (n , p , α) частицами. Наиболее ярко все эффекты, связанные с высоким угловым моментом, проявляются на легких ядрах-мишенях. К началу наших исследований наиболее легкие ядра были изучены Сиккеландом (Калифорнийский университет, США), измерившим сечения деления ядер от урана до цезия при облучении их ионами ^{16}O с энергиями 10,4 МэВ/нуклон и ниже. В серии работ, выполненных в Радиовом институте в последующие годы, изучалось деление ядер серебра и редкоземельных элементов ионами от кислорода до аргона с энергиями порядка 10 МэВ/нуклон. Наиболее полные результаты были получены с ионами кислорода и неона. Если сравнить зависимости величин угловой анизотропии от Z^2/A для протонов и ионов кислорода и неона, то видно, что в соответствии с классической теорией Халперна-Струтинского анизотропия в угловом распределении осколков деления растет с увеличением массы бомбардирующей частицы: для ионов она в несколько раз выше, чем для протонов при одном и том же значении Z^2/A . С ростом Z^2/A делящегося ядра во всех случаях величина анизотропии уменьшается, но в реакциях с тяжелыми ионами это уменьшение происходит гораздо резче, чем в реакциях с протонами.

Величина анизотропии определяется величиной углового момента вращающегося делящегося ядра. Угловой момент ориентирован преимущественно в плоскости, перпендикулярной к пучку бомбардирующих частиц. Проекция углового момента на ось симметрии делящегося ядра в седловой точке имеет гауссовское распределение. Расчеты, проведенные нами в рамках модели жидкой капли, показали, что для легких ядер ширина этого распределения значительно меньше, чем для тяжелых. Поэтому более легкие ядра делятся преимущественно при больших значениях углового момента. Этим и объясняется не только уменьшение анизотропии с ростом Z^2/A , но и более резкий характер ее падения при облучении ядер ионами по сравнению с протонами.

Измерения сечений деления ядер показали, что для одних и тех же составных ядер со сравнимыми энергиями возбуждения делимости в области легких ядер при облучении тяжелыми ионами на два - три порядка превышают делимости ядер при облучении протонами. Расчеты в рамках модели жидкой капли (Г. А. Пик-Пичак) показали, что увеличение делимости ядер с большим угловым моментом связано с уменьшением барьера деления из-за центробежных сил вращающегося ядра. К повышению делимости, особенно заметному в области легких ядер, приводит также обсуждавшийся выше эффект сужения распределения проекции полного углового момента на ось деления с уменьшением Z^2/A делящегося ядра.

Существует, однако, эффект, связанный с угловым моментом делящегося ядра, оказывающий прямо противоположное влияние на величины измеряемых в эксперименте сечений деления и угловой анизотропии. С расширением исследований реакций с участием тяжелых ионов возникла проблема, связанная с так называемым "критическим" угловым моментом. Имеющиеся в настоящее время экспериментальные данные свидетельствуют о том, что в реакциях с тяжелыми ионами при значениях углового момента выше некоторой величины $I_{кр}$ составное ядро не образуется и основной вклад в полное сечение реакции, в том числе и в делительный канал, начинают давать взаимодействия с неполной передачей нуклонов. Наши эксперименты показали, что "критический" угловой момент в очень сильной степени зависит как от энергии ионов, так и от соотношения масс взаимодействующей пары: ядро-мишень - бомбардирующий ион.

Взаимодействие релятивистских ионов с ядрами носит неизмеримо более сложный характер по сравнению с реакциями при энергиях ионов в несколько десятков МэВ/нуклон.

Делительный (бинарный) канал занимает очень малую долю в полном сечении реакции. Основную роль играют процессы глубоконеупругих взаимодействий, фрагментации, мультифрагментации, полного развала взаимодействующих ядер на легкие фрагменты при центральных столкновениях.

Для изучения реакций с большой множественностью вторичных продуктов необходимо создание сложной многоканальной регистрирующей аппаратуры типа "crystal-ball", обеспечивающей регистрацию и идентификацию продуктов реакции в 4π -геометрии. Для обработки трековой информации, содержащейся в многослойной камере CR-39 детекторов, облученной ^{165}Ho с энергией 982 МэВ/нуклон, в институте была создана автоматизированная телевизионно-оптическая сканирующая система. Управление работой системы и получение экспериментальных результатов осуществляется с помощью персонального компьютера.

4. Исследование механизма деления и расщепления ядер протонами

С целью изучения особенностей механизма образования ядер-продуктов с различным нуклонным составом в реакциях расщепления и деления атомных ядер протонами средних и высоких энергий в Радиовом институте были созданы две экспериментальные установки, одна из которых была установлена на синхротроне института, а другая - на синхроциклотроне СПБИЯФ. Основными компонентами этих установок являлись высокочувствительные изотопные масс-спектрометры, ионные источники которых были совмещены с мишенями, облучавшимися выведенным из ускорителя протонным пучком. Методика определения изотопных распределений ядер-продуктов с помощью таких установок получила название "масс-спектрометрии в линию с ускорителем". В разработке методики, создании установок и проведении исследований на них активное участие принимали Б. Н. Беляев (научный руководитель), В. Д. Домкин, Ю. Г. Коробулин, В. С. Мухин, Ю. М. Булеев, Г. А. Фирсанов.

Большая часть работ, выполненных с 1974 по 1994 гг. на масс-спектрометрах в линию с ускорителем, была посвящена исследованию формы и тонкой структуры изотопных распределений осколков деления тяжелых ядер (иридия и урана) при разных энергиях бомбардирующих протонов - от 70 МэВ до 1 ГэВ. За счет экспрессности регистрации и точной идентификации ядер-продуктов в этих работах с высокой точностью были определены относительные выходы различных изотопов Rb и Cs в большом интервале их времени жизни (от стабильных изотопов до достаточно короткоживущих - с $T_{1/2} > 0,1$ с). Обобщая полученные экспериментальные данные, следует отметить, что в разных областях энергий бомбардирующих частиц значение различных факторов, влияющих на нуклонный состав осколков деления тяжелых ядер, существенно изменяется.

В области средних энергий основными факторами являются энергетические зависимости делимости ядер и соотношения вероятностей симметричного и асимметричного каналов деления, а также проявление оболочечных эффектов при формировании первичных осколков. При энергии протонов менее 100 МэВ форма кривых изотопных распределений осколков хорошо аппроксимируется суммой двух гауссовых кривых, смещенных друг относительно друга на 3-5 а.е.м. Основная компонента такого разложения изотопных распределений обусловлена реакциями, идущими через образование составного ядра; другая, более нейтроноизбыточная компонента, составляющая в этой области энергии около 25 % от всех событий деления, вызвана реакциями, сопровождающимися вылетом быстрых нуклонов на начальной стадии взаимодействия. Относительные вклады этих компонент изотопных распределений и их взаимное расположение достаточно чувствительны к величине энергии бомбардирующих частиц, при изменении которой индивидуальные выходы осколков претерпевают заметные флуктуации.

С ростом энергии бомбардирующих частиц от 100 МэВ до 1 ГэВ изменение формы кривых изотопных распределений осколков связано, главным образом, с расширением набора делящихся ядер и их энергетических спектров в результате увеличения числа каналов

внутриядерного каскада на быстрой стадии реакции. Двугорбый вид изотопных распределений осколков в этой области энергии объясняется большим вкладом поверхностных реакций в неупругих протон-ядерных взаимодействиях, приводящих к делению урана, и влиянием оболочечных эффектов. Проведенный анализ изотопных распределений Rb и Cs как одних из наиболее вероятных осколков при делении урана позволил сделать вывод о том, что и при энергии протонов 1 ГэВ процесс деления остаточных ядер после прохождения внутриядерного каскада практически не отличается от деления этих ядер, вызванного низкоэнергетическими частицами, особенно в случае образования нейтроноизбыточных осколков. При энергии протонов 1 ГэВ расчеты по каскадно-испарительной модели удовлетворительно воспроизводят выходы осколков. Дальнейшее увеличение энергии бомбардирующих частиц приводит к появлению большой группы нейтронодефицитных продуктов реакций глубокого расщепления.

Исследована форма кривых изотопных распределений K, Rb, Sr и Cs в реакциях расщепления и деления ядер Ig протонами с энергией 1 ГэВ. Асимметрия этих распределений была объяснена наличием двух механизмов протон-ядерного взаимодействия: каскадно-испарительного механизма, формирующего основную группу остаточных ядер, и предравновесного, формирующего сравнительно небольшую группу нейтроноизбыточных ядер-продуктов. В последнем случае эмиссия большей части нуклонов происходит до установления термодинамического равновесия, а остаточные ядра имеют небольшую энергию возбуждения, и отношение числа нейтронов к числу протонов у них близко к этому отношению для ядер мишени.

Путем совместного анализа результатов двух экспериментов, выполненных на масс-спектрометре в линию с синхроциклотроном СБИЯФ и на двухплечевом времяпролетном спектрометре, удалось определить среднюю величину потерь нуклонов и заряда на один акт деления урана в зависимости от величины N/Z осколков. В этой работе, выполненной в сотрудничестве с группой Г. Е. Солякина из СБИЯФ, было показано, что при делении ^{238}U протонами с энергией 1 ГэВ нейтроноизбыточные изотопы Rb и Cs являются наиболее вероятными дополнительными осколками друг для друга, тогда как нейтронодефицитные изотопы этих элементов образуются в событиях с очень большими потерями нуклонов на один акт деления. При этой энергии бомбардирующих частиц средние значения нуклонных потерь при образовании таких типичных осколков, какими являются Rb ($Z = 37$) и Cs ($Z = 55$), составляют 20 нейтронов и 2-3 протона.

Влияние ядерной структуры на образование осколков приводит к систематическому превышению независимых выходов изотопов с четным числом нейтронов, особенно в непосредственной близости к заполненным оболочкам и подоболочкам. Среднее значение этого превышения в изотопных распределениях Rb и Cs при делении урана протонами с энергией в диапазоне 0,07-1 ГэВ составляет 2-4 %. В области нейтронных оболочек $N = 50$ и $N = 82$, а также подоболочки $N = 56$ оно составляет 6-9 %. В то же время в реакциях расщепления при сопоставимых и даже более высоких энергиях возбуждения ядер величина четно-нечетного эффекта заметно выше этих значений. При расщеплении легких ядер протонами с энергией 1 ГэВ (например, в реакции $\text{C}(p, X)\text{Li}$) она достигает 50 %, а в случае средних ядер (в реакции $\text{Zr}(p, X)\text{Rb}$) - около 15 %.

Основным фактором, влияющим на величину четно-нечетных флуктуаций в изотопных распределениях продуктов ядерных реакций, является соотношение величины энергии связи нейтрона и средней энергии возбуждения этих ядер перед испарением последнего нейтрона. Различие величины этих флуктуаций в реакциях расщепления и деления ядер свидетельствует об отличительных особенностях спектра состояний остаточных ядер в этих реакциях. Из анализа данных по величине четно-нечетного эффекта сделан вывод о том, что при одинаковых начальных условиях по энергии возбуждения и нуклонному составу остаточных ядер перед испарением последнего нейтрона энергия возбуждения имеет при делении ядер более высокое значение, чем в реакциях расщепления.

Л и т е р а т у р а

1. Бочагов Б. А. и др. // Ядерная физика, 1978, т. 28, вып. 2, с. 572.
2. Шигаев О. Е. и др. // Препринт РИ, 1973, РИ-17, (Л-д).
3. Smirnov A. N. et al. Proc. of the 21 Intern. Symp. on Nuclear Physics, 1991, Gaussig, Germany, p. 214.
4. Eismont V. P. et al. // Phys. Rev.C, 1996, v. 53, N 6, p. 2911.
5. Перфилов Н. А. // ЖЭТФ, 1961, т. 41, с. 871.
6. Обухов А. И., Перфилов Н. А. // УФН, 1967, т. 92, вып. 4, с. 621.
7. Шигаев О. Е. и др. // Ядерная физика, 1982, т. 35, вып. 3, с. 567.
8. Обухов А. И. и др. // Ядерная физика, 1970, т. 11, с. 977.
9. Перфилов Н. А. // Ядерная физика, 1974, т. 20, вып. 2, с. 270.
10. Belyaev B. N., Domkin V. D., Korobulin Yu. G., Andronenko L. N., Solyakin G. E. // Nuclear Physics, 1980, v. A348, N 4-5, p. 479.
11. Беляев Б. Н., Домкин В. Д., Мухин В. С. // Физика элементарных частиц и атомных ядер, 1992, т. 23, вып. 4, с. 993.
12. Беляев Б. Н., Домкин В. Д., Мухин В. С. // Ядерная физика, 1994, т. 57, вып. 7, с. 1231.

ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ЯДЕРНЫЕ ПРОЦЕССЫ

О. В. Ложкин

Ученые Радиевого института всегда живо откликались на все новое, что появлялось в науке о радиоактивности, физике атомного ядра, в исследованиях проникающих излучений. Появление в институте и развитие нового направления исследований по физике атомного ядра, о котором рассказывается ниже, связано непосредственно с физикой космических лучей - одним из основных направлений работ с момента организации Радиевого института, которое возглавил заведующий Физическим отделом Л. В. Мысовский. Достижения института в этой области рассматриваются в другой статье, а здесь мы отметим лишь работы, имеющие непосредственное отношение к проблеме ядерных реакций.

Интересно отметить, что проблему элементарных частиц В. Г. Хлопин включает в план работ Радиевого института в те годы, когда невозможно было и представить всей сложности этого раздела физики. Как мы знаем, для проникновения в мир элементарных частиц - этот передний край физики во все времена - потребовались необычайные усилия уже нескольких поколений физиков.

В Радиевом институте лишь отдельные работы в разные годы непосредственно касались проблем физики элементарных частиц, а основной целью исследований в физике высоких энергий всегда были проблемы ядерных реакций и структуры атомных ядер при высокоэнергетических взаимодействиях, многочисленные вопросы о природе различных явлений в области высоких энергий и о свойствах высоковозбужденного ядерного вещества и его критических состояниях. По современной классификации все эти проблемы являются предметом исследований ядерной физики высоких энергий, или релятивистской ядерной физики, представляющей собой промежуточную область исследований между собственно физикой ядра и физикой элементарных частиц, в которой тесно переплетаются фундаментальные проблемы физики элементарных частиц, свойств барионной материи и структуры атомных ядер. Ядерная физика высоких энергий предоставляет уникальные возможности для изучения пространственно-временной картины адрон-адронных и адрон-ядерных взаимодействий и для исследований ненуклонных степеней свободы в ядерных системах, их экстремальных состояний и фазовых переходов в барионном веществе, включая фазовый переход в кварк-

глюонную плазму. Последнее исключительно важно не только для развития теории сильных взаимодействий, но и для понимания эволюции Вселенной в раннюю эпоху.

Собственно говоря, история исследований ядерных взаимодействий при высоких энергиях частиц в Радиевом институте охватывает период лишь немного меньший, чем история самого института. Использование фотографического метода в изучении расщеплений ядер под действием частиц космического излучения быстро привело к ряду интересных результатов. Уже первые наблюдения показали необычные характеристики ядерных расщеплений ("звезд" по терминологии тех лет) под действием космических лучей - большую множественность вторичных частиц и наличие среди них частиц с зарядом большим, чем у гелия (И. И. Гуревич, А. П. Жданов, А. Н. Филиппов, 1938 г.). Публикуется работа о наблюдении необычных ливней большого числа заряженных частиц в фотоэмульсии, экспонированной на высоте гор (А. П. Жданов, 1940 г.), которые так и не получили объяснения до настоящего времени; сообщается о наблюдении полного расщепления ядер серебра (А. П. Жданов, Н. А. Перфилов, М. Ю. Дейзенрот, 1944 г.) - необычного ядерного явления, которое детально начали изучать лишь в 70-е годы. В 40-х годах был организован поиск ядерных расщеплений при захвате отрицательных мезонов ("мезотронов" по старой терминологии), входящих в состав космических лучей, ядрами в фотоэмульсии с целью оценки массы мезонов по балансу энергии в наблюдаемых "безимпульсных" расщеплениях. Была получена оценка массы мезонов в диапазоне 140-200 масс электрона (П. И. Лукирский, Н. А. Перфилов, 1945 г.) еще до открытия пионов в 1947 г. Сообщалось о наблюдении образования пар мезотронов (П. И. Лукирский, А. П. Жданов, 1949 г.) в ядерном расщеплении. Работы по ядерным взаимодействиям космических лучей, проведенные в последующие годы, уже после исследований на ускорителе протонов высоких энергий в Дубне, были связаны также с только что открытыми тяжелыми мезонами. Было сообщено о впервые наблюдавшемся ядерном расщеплении в эмульсии при поглощении тяжелого мезона и об оценке его массы около 1220 масс электрона (Ю. Г. Дегтярев, А. П. Жданов, П. И. Лукирский, 1954 г.). Были начаты исследования открытых Данышем и Пневским в 1953 г. гиперфрагментов (короткоживущих квазиядерных систем, имеющих в своем составе, кроме протонов и нейтронов, еще нейтральный лямбда-гиперон). Были опубликованы данные о модах распада легких гиперядер (А. П. Жданов, З. С. Хохлова, Ф. Г. Лепехин, И. Б. Беркович, 1959 г.). Эти работы были среди первых исследований частиц со странностью (новым квантовым числом, введенным в физику в 1955 г.); образование этих частиц могло происходить только при очень высоких энергиях, еще недоступных при имеющихся ускорителях. В исследованиях ядерных взаимодействий космических лучей в Радиевом институте были также получены интересные результаты о множественном рождении частиц, об образовании изотопов гелия в космических лучах, об угловых распределениях ливневых частиц в альфа-ядерных ливнях (А. П. Жданов, И. М. Кукс, Н. В. Скирда, В. Н. Кузьмин, Р. М. Яковлев, 1961 г.).

В Радиевом институте сформировалось оригинальное направление исследований в области физики космических лучей, связанное с проблемами ядерных взаимодействий при высоких энергиях, когда неожиданно по решению администрации работы по исследованию космического излучения в лаборатории А. П. Жданова были прекращены (1964 г.).

Эксперименты с космическими лучами послужили основой ядерной физики высоких энергий и явились важным стимулом для создания первых ускорителей протонов высоких энергий: синхроциклотронов в Беркли (1946 г.) и Дубне (1949 г.), протонных синхротронов в Брукхэвене (1952 г.) и Бирмингеме (1953 г.), беватрона в Беркли (1954 г.) и затем других. Уже первые исследования ядерных расщеплений под действием космических лучей показали, что мы имеем дело с чрезвычайно сложными ядерными явлениями, для изучения которых потребовалось разработать много новых и разнообразных экспериментальных методов и теоретических подходов. Задачей физики высоких энергий с самого начала являлось изучение наиболее глубоких деталей строения вещества, и сама необходимость высоких энергий в эксперименте вытекала из квантовомеханического принципа неопределенности, требующего увеличения энергии частиц для исследования областей малых размеров. В Радиевом институте ядерные исследования на ускорителе частиц высоких энергий были начаты непосред-

ственно после ввода в эксплуатацию синхроциклотрона на 660 МэВ (сначала 480 МэВ) в Дубне - самого крупного ускорителя в мире в свое время.

Президиумом Академии наук в 1950 г. в Радиевом институте была учреждена новая лаборатория для исследований ядерных взаимодействий частиц высоких энергий (зав. лаб. Н. А. Перфилов). Нужно отметить еще, что в 50-х и 60-х годах решением Отделения ядерной физики АН СССР В. И. Векслер (сотрудник ФИАН и руководитель строительства ЛВЭ в Дубне) и Н. А. Перфилов были назначены ответственными за развитие работ по ядерным реакциям в области высоких энергий в СССР. За полувековой период исследований на ускорителях высоких энергий в Радиевом институте постоянно расширялись задачи исследований и совершенствовалась методика. В те или иные периоды в этих исследованиях принимали участие сотрудники лабораторий П. И. Лукирского, Б. А. Никитина, А. П. Жданова, А. Н. Мурина, Г. В. Горшкова, Л. М. Крижанского, Б. Н. Беляева, В. В. Смирнова, А. А. Римского-Корсакова, В. А. Рубчени. Однако, в основном, исследования высокоэнергетических ядерных процессов в Радиевом институте оставались сосредоточенными в лаборатории, созданной Н. А. Перфиловым.

Начало исследованиям ядерных реакций под действием протонов с энергией 480 и 660 МэВ положили эксперименты с помощью двух методов: ядерных фотоэмульсий и радиохимии - хорошо развитых в Радиевом институте к началу 50-х годов. Совершенствованием методики ядерных фотоэмульсий в институте занимались две группы: под руководством А. П. Жданова (Л. И. Шур, К. И. Ермакова, И. В. Рыжова, А. П. Картужанский, Г. Г. Мартыш, И. К. Куks) и Н. А. Перфилова (Н. И. Герлинг, Е. И. Прокофьева, Н. Р. Новикова, О. В. Ложкин, В. И. Захаров, Ю. И. Вихров, Е. В. Фаина, В. С. Быченков, Н. П. Кочеров). Крупным успехом в технологии изготовления фотоэмульсий явилось изобретение особомелкозернистых ядерных эмульсий (Н. А. Перфилов, 1948 г.) и разработка способов изготовления эмульсий с различными свойствами (P90, P94, Pr), что существенно расширило возможности фотометода в ядерных исследованиях. Одновременно были разработаны методы введения в фотослой исследуемых элементов в виде химических растворов и мелкодисперсных порошков (от Be до U). Мы не останавливаемся здесь на истории развития фотометода, так как она была хорошо освещена в юбилейном сборнике к 50-летию института.

Были широко использованы также возможности радиохимического метода в изучении реакций глубокого расщепления и деления ядер в мишенях, облучаемых протонами высоких энергий, для установления закономерностей в распределениях различных вторичных нуклидов, а также для обнаружения новых радиоактивных изотопов (Б. А. Никитин, А. Н. Мурин, М. А. Якимов, Б. К. Преображенский, И. А. Ютландов, Б. Н. Беляев, В. Д. Нефедов, В. И. Барановский, Н. Е. Титов, А. В. Калямин, Г. В. Горшков, Л. М. Крижанский, Г. М. Городинский, В. Н. Покровский).

Первые работы в Радиевом институте были связаны с получением информации об основных характеристиках ядерных расщеплений под действием протонов высоких энергий и мезонов. Эти исследования считались сугубо секретными, и первые публикации по ним были разрешены лишь в 1955 г. на Сессии АН СССР по мирному использованию атомной энергии.

В этой статье мы не будем рассматривать вопросы физики деления ядер, которым посвящена отдельная глава. Однако целесообразно упомянуть здесь первые работы по делению ядер, когда основной целью экспериментов являлось определение относительной роли различных каналов глубокого расщепления ядер и вероятности деления при высокой энергии возбуждения. Использование фотометода позволило провести эксперименты на малоинтенсивных пучках пионов на дубнинском ускорителе по изучению захвата медленных отрицательных пионов тяжелыми ядрами (Н. А. Перфилов, Н. С. Иванова, О. В. Ложкин, В. П. Шапов). В этих работах было впервые открыто деление ядер урана при захвате пионов (Н. А. Перфилов, Н. С. Иванова, 1950 г.), определены вероятности деления ядер от урана до вольфрама, распределения осколков деления по пробегаем, множественность частиц, сопровождающих деление. В первых работах с использованием мезонных пучков на дубнинском синхроциклотроне было выполнено также измерение массы отрицательных мезонов

(Н. А. Перфилов, В. И. Остроумов) и наблюдение реакций захвата пионов легкими ядрами эмульсии с образованием нуклидов ${}^8\text{Li}$ (О. В. Ложкин), были высказаны соображения о механизме расщепления тяжелых ядер медленными отрицательными мезонами как процессе взаимодействия мезона с парой нуклонов в ядре. Начиная с этих работ, проблеме поглощения пионов ядрами всегда придавалось большое значение. Это связано с тем, что канал поглощения составляет значительную часть полного пион-ядерного сечения и является фундаментально важным для понимания природы таких взаимодействий и образования высоко-возбужденных ядерных систем.

В первых работах по изучению реакций под действием протонов высоких энергий, проведенных одновременно с помощью методов ядерных эмульсий и радиохимии, были определены вероятности деления и расщепления тяжелых ядер (от Ta до U) при энергии 480 и 660 МэВ и исследованы основные характеристики реакций деления и глубокого расщепления при высокой энергии возбуждения ядер. В фотоэмульсионных работах впервые была дана оценка энергий возбуждения ядер в неупругих протон-ядерных взаимодействиях при высоких энергиях по пробегу ядер-отдачи и по углу между осколками деления (В. И. Остроумов, 1953 г.).

В радиохимических исследованиях реакций под действием протонов высоких энергий было измерено большое число продуктов реакций глубокого расщепления ядер Cu, La, Ta, Pb, Bi, U. Впервые были проведены измерения с мишенями из разделенных изотопов ${}^{63}\text{Cu}$ и ${}^{65}\text{Cu}$ в подобных исследованиях (А. Н. Мурин, И. А. Ютландов, 1955 г.).

Радиохимические исследования позволили сделать важные выводы о распределениях потерь заряда и массы в реакциях глубокого расщепления (А. Н. Мурин, И. А. Ютландов, Б. К. Преображенский, В. И. Барановский, А. В. Калямин, М. А. Якимов, 1955-1963 гг.). Радиохимические исследования при высоких энергиях потребовали разработок уникальных химических методов быстрого выделения малых количеств образовавшихся в облученной мишени короткоживущих радиоактивных изотопов (обычно с помощью соответствующих носителей с соблюдением требований изотопного обмена) при обеспечении радиохимической чистоты радиоэлементов (Б. А. Никитин, Б. К. Преображенский, И. А. Ютландов, М. А. Якимов, Л. Н. Москвин, А. В. Калямин, Л. Г. Царицына, О. М. Лилова).

После первых экспериментов, выполненных на ускорителях высоких энергий, сразу же стало общепринятым, что неупругое взаимодействие частиц высоких энергий со сложными ядрами, когда длина волны частиц меньше среднего расстояния между нуклонами в ядре, может быть представлено через процесс последовательного квазисвободного рассеяния падающих частиц на отдельных нуклонах ядра и возникновение внутриядерного каскада. Эффект нуклонов ядра-мишени, не принимающих участия в этих рассеяниях, заключается в создании некоторого среднего комплексного потенциала, действующего как на падающую, так и на все вылетающие частицы. Эти представления привели к созданию своеобразной двух-ступенчатой модели ядерных реакций - каскадно-испарительной модели. Обсуждение данных представлений в Радиевом институте было инициировано П. И. Лукирским еще в 1950 г. Как известно, для расчета первой стадии реакций в этой модели - внутриядерного каскада - в начале 50-х годов был разработан феноменологический подход, основанный на решении уравнения Больцмана в квазиклассическом приближении с использованием метода случайных испытаний - метода Монте-Карло.

Модель внутриядерного каскадного процесса сыграла большую роль при анализе различных экспериментальных данных о неупругом взаимодействии частиц высоких энергий с ядрами. Конечно, данное приближение, в котором все сводится к соударениям реальных частиц, не отражает полностью все детали процесса взаимодействия при высокой энергии. Ряд наблюдаемых особенностей потребовал использования представлений о коллективных взаимодействиях, включаемых в модель когерентной трубки, в гидродинамическую модель и варианты кластерной модели. При переходе в ультрарелятивистскую область энергий основополагающим становится кварк-партонный аспект структуры адронов. Что же касается работ Радиевского института, то следует отметить, что впервые эти весьма трудоемкие расчеты внутриядерного каскадного процесса были проведены вручную, еще без применения

ЭВМ в 1956-1959 гг. при анализе результатов трех различных экспериментов: по делению ядер урана при захвате отрицательных пионов (И. И. Пьянов), по взаимодействию быстрых дейтронов с ядрами углерода (Ф. Г. Лепехин) и по расщеплениям ядер углерода протонами с энергией 660 МэВ (П. И. Федотов). В последующие годы уже с использованием доступных ЭВМ расчеты по каскадно-испарительной модели с учетом процесса испарения частиц и деления были проведены для взаимодействий протонов с энергией 135 МэВ с ядрами ^{209}Bi с целью описания экспериментальных данных по реакциям типа (p, xp) , связанным с периферическими взаимодействиями протонов (Б. Н. Беляев, А. Н. Мурин, 1962 г.; Б. Н. Беляев, И. В. Царицына, 1968 г.), и для взаимодействий альфа-частиц высокой энергии с ядрами (И. И. Пьянов, В. Е. Дудкин, 1969 г.). Были рассчитаны также кинематические характеристики остаточных ядер и их энергии возбуждения в каскадном процессе при энергии протонов 660 МэВ (В. И. Кочкин, В. М. Мальцев, О. В. Ложкин, Ю. П. Яковлев, 1968 г.) с целью получения исходных данных для анализа испарения фрагментов из возбужденных ядер. В последнем случае была использована одна из первых версий дубнинской каскадной модели. В ряде последующих работ, связанных с изучением pA - и AA - взаимодействий при релятивистских энергиях, использовалась, как правило, дубнинская каскадно-испарительная модель.

В 80-х годах в Радиевом институте была проведена важная работа по развитию метода внутриядерного каскада на основе единого теоретического подхода - метода кинетических уравнений (Г. В. Матвеев, В. Е. Бунаков, С. Г. Явшиц, В. А. Рубчеля, 1985 г.). В этой работе был разработан способ учета пи-мезонного канала на основе нового варианта изобарной модели и использовано описание ядра с учетом квантовых поправок в модели Тома-са-Ферми.

Начиная с середины 50-х годов, большой цикл работ Радиевского института по ядерной физике высоких энергий составляют исследования фрагментации и мультифрагментации атомных ядер. Впервые были определены характеристики нового ядерного явления при неупругом взаимодействии частиц высокой энергии с ядрами - явления образования легких ядер ($A > 6$) в высокоэнергетических ядерных реакциях (О. В. Ложкин, Н. А. Перфилов, 1954 г.), которое в дальнейшем получило название фрагментации ядер. Уже первые экспериментальные наблюдения при энергии протонов 660 МэВ показали необычные свойства фрагментации ядер: широкие зарядовые и массовые распределения фрагментов, существование множественного образования фрагментов с $Z > 3$ в расщеплении, характерные квазимаксвелловские энергетические спектры фрагментов с большим вкладом подбарьерных частиц и с высокоимпульсной компонентой, специфичные функции возбуждения и A -зависимости сечений фрагментации. Эти результаты вызвали большой интерес, они были доложены авторами на I Всесоюзной конференции по физике частиц высоких энергий (Москва, 1956 г.) и на Международной конференции по ядерным реакциям (Amsterdam Nuclear Reactions Conference, July 1956).

Изучение этого явления при взаимодействии с ядрами фотоэмульсии пионов с энергией 70 и 280 МэВ показало универсальные свойства фрагментации ядер в реакциях с протонами и пионами (Н. С. Иванова, В. И. Остроумов, А. С. Ассовская, Ю. В. Павлов, 1959 г.). Особенности фрагментации ядер в дальнейшем постоянно привлекали к себе большое внимание теоретиков и экспериментаторов, так как они не находили объяснения в рамках стандартной каскадно-испарительной модели и обнаруживали все более глубокие связи с фундаментальными свойствами барионной материи. Результаты исследований фрагментации и деления при взаимодействии частиц высоких энергий с ядрами, полученные к концу 50-х годов, были рассмотрены в первом обзоре по этой проблеме в УФН (Н. А. Перфилов, О. В. Ложкин, В. П. Шамов, 1960 г.) и в первой в мировой литературе монографии, посвященной проблемам ядерной физики высоких энергий (Н. А. Перфилов, О. В. Ложкин, В. И. Остроумов, 1962 г.). Результаты работ по фрагментации ядер были доложены на I Международной конференции по ядерной физике высоких энергий в Женеве и на Международной конференции по гиперфрагментам в Сан-Серге (Н. А. Перфилов, О. В. Ложкин, 1963 г.).

Введение в действие в 1957 г. синхрофазотрона на 10 ГэВ в Дубне (крупнейшего в течение ряда лет ускорителя протонов в мире) позволило продолжить исследования фрагментации ядер при большей энергии протонов и мезонов. Однако еще раньше был проведен эксперимент по фрагментации ядер при энергии протонов 930 МэВ, когда эмульсии, изготовленные в Радиевом институте, были облучены проф. Дж. Фремлинным на протонном синхротроне в Бирмингэме. Это явилось первым в Радиевом институте совместным исследованием с зарубежным научным центром, которое позволило решить важные вопросы об энергетической зависимости сечений фрагментации и зарядового распределения фрагментов (О. В. Ложкин, Н. А. Перфилов, Дж. Фремлин, А. А. Римский-Корсаков, 1960 г.).

Так случилось, что именно в этих специально изготовленных для данного эксперимента особомелкозернистых фотоэмульсиях типа П9ч (с чувствительностью к протонам средних энергий и с хорошей дискриминирующей способностью) при анализе событий фрагментации ядер Ag и Вг был открыт самый тяжелый изотоп гелия - ^8He . Среди треков фрагментов, приписываемых обычно изотопу ^8Li (характерные Т-образные треки в ядерной фотоэмульсии, благодаря бета-распаду ^8Li после его остановки и распаду образовавшегося ^8Be на две альфа-частицы), оказалось два трека с ионизацией меньшей, чем у следов альфа-частиц, которые по этой причине и привлекли к себе внимание. Проведенный анализ привел к выводу, что эти треки обусловлены образованием в ядерном расщеплении и распадом нуклонно-стабильного изотопа ^8He , испытывающего два последовательных бета-распада с образованием ^8Be (О. В. Ложкин, А. А. Римский-Корсаков, 1961 г.). Позднее факт испускания двух электронов при остановке в эмульсии ядра ^8He был подтвержден в работе группы экспериментаторов в Дубне (Ю. А. Батусов, С. А. Бунятов, В. М. Сидоров, В. А. Ярба, 1965 г.). Открытие ^8He - нуклида с отношением $N/Z = 3$ явилось, как стало ясно позднее, открытием самого нейтроноизбыточного нуклида в природе, который теоретически предсказывался еще в 1959-1960 гг. (Я. Б. Зельдович, В. И. Гольданский). В 1972 г. это открытие было внесено в Государственный реестр открытий СССР под N 119 с указанием всех упомянутых авторов. Здесь следует вспомнить, что изотоп ^6He был также открыт впервые в Радиевом институте еще в 1937 году при проведении химических исследований короткоживущих искусственных радиоэлементов при облучении вещества нейтронами (А. Е. Полесицкий, 1937 г.).

Таким образом, из четырех изотопов гелия два были открыты в Радиевом институте!

Расширение энергетического диапазона исследований явления фрагментации в Радиевом институте в начале 60-х годов происходило как в область энергий протонов 2-9 ГэВ, так и в околопороговую область энергий около 100 МэВ (У. В. Арифханов, Н. С. Иванова, О. В. Ложкин, М. М. Макаров, Н. А. Перфилов, В. И. Остроумов, З. И. Соловьева, В. П. Шамоу, 1960 г.). Совершенствовалась методика идентификации заряда фрагментов в мелкозернистой ядерной эмульсии по характерному конусообразному профилю их треков при $Z > 4$ и по ширине треков в эмульсии. Для определения заряда фрагментов разрабатывается фотометрический метод анализа микроскопных изображений треков частиц (П. А. Горичев, О. В. Ложкин, 1962 г.). Проводилось изучение фрагментации при энергии пионов 7,5 ГэВ (Ю. Ф. Гагарин, Н. С. Иванова, 1963 г.). Эти эксперименты показали, что для понимания такого сложного явления как фрагментация ядер необходимы как исследования в широких диапазонах энергий различных падающих частиц, масс ядер-мишеней и их нуклонного состава, так и развитие методов измерений. Это определило программу многолетних исследований фрагментации ядер в Радиевом институте, которая включила эксперименты на самом крупном ускорителе в СССР - протонном синхротроне на 70 ГэВ в Протвино, введенном в строй в 1967 г., эксперименты на пучках ионов от Li до Si с энергией 3.6 ГэВ/нуклон, ускоренных на синхрофазотроне ЛВЭ ОИЯИ, а также эксперименты на ряде зарубежных ускорителей при больших энергиях.

Для изучения характеристик фрагментации ядер с различными A и Z использовался метод вакуумной камеры реакций с ядерными эмульсиями в качестве детекторов, что имело большое значение для понимания механизма явления. Детальные исследования кинематических характеристик ^8Li при взаимодействии протонов с энергией 660 МэВ с ядрами Be, C, Al, V, Au, Th позволили впервые получить представление об основных механизмах передачи

большой энергии многонуклонным ассоциациям в ядрах, определить основные параметры источников фрагментов (температуру, скорость, кулоновский барьер) в рамках испарительного приближения и дать оценку роли нестатистических процессов образования фрагментов из тяжелых ядер (В. В. Авдейчиков, В. И. Богатин, О. В. Ложкин, Н. А. Перфилов, Ю. П. Яковлев, 1964 г.).

В эти же годы проводится одна из первых теоретических работ, посвященных вопросу о природе механизма испускания сложных частиц из ядер при высокой энергии падающих частиц. Был исследован механизм косвенного испарения для описания образования трития в ядерных реакциях за счет испарения нуклонов и их объединения вблизи границы ядра. Проведенные расчеты показали неплохое согласие с экспериментом при энергиях падающих протонов до 500 МэВ (И. И. Пьянов, С. В. Измайлов, 1963 г.). Механизм косвенного испарения был предложен и для объяснения образования более тяжелых фрагментов. В более поздних работах образование легких ядер в релятивистских рА-взаимодействиях было с успехом проанализировано в рамках феноменологической модели коалесценции (Н. Л. Горшкова, К. Г. Денисенко, О. В. Ложкин, Ю. А. Мурин, 1985 г.).

В работах Радиевого института во всем указанном диапазоне энергий падающих частиц были определены основные характеристики фрагментации ядер: полные сечения и относительные вероятности различных каналов, зарядовые распределения фрагментов и их кинематические характеристики, множественности вторичных частиц и их корреляции с фрагментами. Впервые изучаются особенности множественного образования фрагментов протонами с энергией 9 ГэВ, которые в дальнейшем привлекли особый интерес в связи с проблемой мультифрагментации ядер (П. А. Горичев, О. В. Ложкин, Н. А. Перфилов, Ю. П. Яковлев, 1961 г.). Само явление ядерной мультифрагментации (множественного образования фрагментов с $Z > 3$) было обнаружено в Радиевом институте в реакциях при более низких энергиях $p(0,66 \text{ ГэВ}) + \text{Ag, W}$ еще в начале 50-х годов. Однако малая вероятность событий множественного образования фрагментов при энергии протонов 660 МэВ позволила лишь сделать выводы о независимости испускания нескольких фрагментов в ядерном расщеплении и о существовании широкоуголовых корреляций. Исследования при энергии протонов 9 ГэВ дали представление о функциях возбуждения множественного образования фрагментов и корреляциях характеристик при мультифрагментации ядер.

Значительный прогресс в исследованиях фрагментации ядер был достигнут в 70-х - 80-х годах в экспериментах с использованием новой экспериментальной техники. В этот период были созданы и освоены электронные методы изучения процессов образования фрагментов промежуточных масс из ядер-мишеней непосредственно на пучках протонов высоких энергий: на выведенном пучке протонов синхротрона с энергией 660 МэВ и на внутренних пучках протонов, дейтронов и альфа-частиц с энергиями от 2 до 15 ГэВ синхрофазотрона в Дубне. Для идентификации Z и A фрагментов и измерения их энергий был использован метод ΔE - и E - детекторов. Успешное применение этого метода было обеспечено разработкой в Радиевом институте новой технологии изготовления очень тонких поверхностно-барьерных полупроводниковых кремниевых детекторов с высокой степенью однородности по толщине (В. В. Авдейчиков, О. В. Ложкин, 1970 г.). Для изучения энергетического разрешения данных детекторов по величине dE/dx для заряженных частиц была проведена серия экспериментальных измерений на пучках многозарядных ионов от He до Ag на циклотроне ЛЯР (В. В. Авдейчиков, Е. А. Ганза, О. В. Ложкин, 1974 г.), а также на пучке альфа-частиц циклотрона ИЯФ (Краков) совместно с группой доктора Л. Поморского в Кракове. Была измерена также дисперсия потерь энергии осколков спонтанного деления ^{252}Cf в тонких детекторах (Е. А. Ганза, М. Грушецкий, В. Картч, О. В. Ложкин, Л. Поморский, 1978 г.). Измерения показали, что разработанная технология изготовления кремниевых детекторов обеспечивает предельно возможное энергетическое разрешение.

Здесь необходимо остановиться на работах, которые были посвящены проблеме нейтроноизбыточных легких нуклидов. Изготовленные в Радиевом институте тонкие кремниевые детекторы были с успехом использованы не только для изучения фрагментации ядер, но

и в решении важной научной проблемы, связанной с границей ядерной устойчивости нейтроноизбыточных нуклидов. После открытия ^8He возник вопрос о ядерной устойчивости нуклида ^{10}He , поискам которого было посвящено много работ в различных лабораториях. Теоретически вопрос о существовании легких ядер с большим избытком нейтронов связан непосредственно с ролью взаимодействия нуклонов в состояниях, триплетных по изоспину и спине ($[3,3]$ -потенциал). Эти силы недостаточно изучены, так как они дают весьма малый вклад в нуклон-нуклонных рассеяниях при низких энергиях, но они могут иметь решающее значение для стабильности многонуклонных систем. Поэтому экспериментальное изучение стабильности легких ядер с аномальным нейтронным избытком приобрело большое значение. Среди работ, доказавших нестабильность ^{10}He , выделяются исследования, выполненные сотрудниками Радиевого института в рамках нескольких экспериментов. Тонкие кремниевые детекторы Радиевого института были применены для идентификации нейтроноизбыточных изотопов в реакциях многонуклонных передач при взаимодействии тяжелых ионов с ядрами в совместных работах с группой В. В. Волкова в ЛЯР ОИЯИ на базе циклотрона У-300 (1970 г.).

В сотрудничестве с группой В. А. Никитина в ЛВЭ ОИЯИ был проведен поиск ^{10}He среди продуктов фрагментации ядер ^{232}Th под действием протонов с энергией 9 ГэВ (1979 г.).

Был проведен анализ систематики сечений образования нейтроноизбыточных нуклидов в процессе фрагментации и получены расчетные оценки сечения образования ^{10}He в рамках развитой феноменологической модели фрагментации (1983 г.). Все эти работы показали ядерную неустойчивость нуклида ^{10}He .

Изготовление в институте необходимого набора детекторов с толщинами от 6 микрон до 3 мм позволило создавать различные многодетекторные телескопы для разных экспериментов. Нужно отметить, что использование спектрометрических полупроводниковых детекторов в исследованиях ядерных реакций на ускорителях высоких энергий в Дубне было осуществлено впервые сотрудниками Радиевого института. Для обработки спектрометрической информации от многодетекторных телескопов было создано два варианта специализированного электронно-вычислительного устройства "Альфа" (СКБ при ЛПИ), которое позволяло по определенному алгоритму производить идентификацию заряда и массы фрагментов и измерение их энергий в режиме "on line" при работе на ускорителе (В. В. Авдейчиков, В. И. Капустин, О. В. Ложкин, Н. А. Перфилов, 1970 г.).

Первое же применение новой экспериментальной методики для исследования фрагментации ядер привело к обнаружению изотопических эффектов в сечениях фрагментации. Изучение изотопных распределений вторичных частиц при взаимодействии протонов 660 МэВ с разделенными изотопами ядер-мишеней $^{58,64}\text{Ni}$ и $^{112,124}\text{Sn}$ показало наличие специфических изоспиновых корреляций сечений фрагментации - эффекта, который оказался неожиданным для общепринятых представлений о природе реакций при высоких энергиях частиц (В. И. Богатин, В. К. Бондарев, В. Ф. Литвин, О. В. Ложкин, Н. А. Перфилов, Ю. П. Яковлев, 1973 г.). Дальнейшее изучение изотопических эффектов в реакциях с изотопными мишенями $^{10,11}\text{B}$ и $^{150,154}\text{Sm}$, измерения энергетических зависимостей и корреляций сечений фрагментации с изоспинами фрагментов и ядер-мишеней, проведение экспериментов на пучках релятивистских протонов, дейтронов и альфа-частиц позволили выявить наиболее существенные параметры, определяющие сечения фрагментации. Была создана первая феноменологическая модель процесса фрагментации, которая позволила описывать не только полные сечения образования фрагментов и изотопические эффекты, но и зависимость формы спектров фрагментов от свойств ядра-мишени и фрагмента (В. И. Богатин, Е. Л. Григорьев, О. В. Ложкин, Ю. П. Яковлев, 1974 г.).

Обнаружение изотопических эффектов в сечениях фрагментации позволило предложить новый метод термометрии высоковозбужденного ядерного вещества по зависимости изотопных отношений от разности энергий отделения фрагментов из двух изотопов ядер-мишеней, который успешно используется в настоящее время (В. И. Богатин, В. К. Бондарев, В. Ф. Литвин, О. В. Ложкин, Н. А. Перфилов, Ю. П. Яковлев, В. П. Бочин, В. В. Авдейчиков, 1974 г.).

Непосредственным следствием экспериментов по изотопическим эффектам в сечениях фрагментации явились поиски изотопических эффектов в процессах образования заряженных пионов. Эксперименты, проведенные на мишенях $^{58,64}\text{Ni}$ и $^{112,124}\text{Sn}$ при энергии протонов 660 МэВ, привели к обнаружению сильного изотопического эффекта в сечениях образования отрицательных пионов и в отношениях выходов положительных и отрицательных пионов. (Д. В. Балин, Ю. А. Батусов, В. И. Богатин, В. К. Бондарев, В. Ф. Литвин, О. В. Ложкин, К. О. Оганесян, С. Ю. Пороховой, Ю. П. Яковлев, 1974 г.).

Начиная с середины 70-х годов, в Радиевом институте для изучения фрагментации ядер используются еще два метода: метод прецизионной масс-спектрометрии в линию с ускорителем ЛИЯФ (на пучке протонов 1 ГэВ) и метод гамма-спектрометрии для идентификации радиоактивных фрагментов. Эти методы рассмотрены в отдельных статьях.

В Радиевом институте в экспериментах по исследованию явлений фрагментации и мультифрагментации было использовано два кинематически противоположных подхода: 1 - измерения фрагментации ядер-мишеней под действием высокоэнергетических адронов и ядер и 2 - измерения фрагментации налетающих релятивистских ядер при их взаимодействии с ядрами фотоэмульсии. Второй метод стал практически возможным, когда появились ускорители тяжелых ионов на релятивистские энергии (Беркли, Брукхэвен, Дубна, ЦЕРН, 80-е годы). Использование этих двух методов позволило получить как хорошо статистически обеспеченную инклюзивную информацию о двойных дифференциальных сечениях образования фрагментов, так и эксклюзивную информацию о топологических характеристиках событий фрагментации ядер. Выше были описаны исследования фрагментации ядер-мишеней с помощью различных методов. Теперь необходимо представить результаты исследований фрагментации налетающих ядер-снарядов при релятивистских энергиях. В Радиевом институте этому методу исследований придавалось большое значение, благодаря ряду уникальных возможностей в исследовании фрагментации. В эти годы была усовершенствована приборная база фотоэмульсионных исследований за счет полуавтоматических прецизионных микроскопов, была автоматизирована обработка измерений треков в эмульсии. Большое значение сыграло объединение отдельных групп из разных институтов в Фотоэмульсионное сотрудничество при ОИЯИ и Международную коллаборацию EMU-01 и согласование методов измерений. Поэтому с самого начала исследования фрагментации релятивистских ядер-снарядов в Радиевом институте проводились как совместные, в рамках данных коллабораций. Коллаборация EMU-01 представляет собой мощное объединение физиков из двух десятков институтов четырех континентов и существует с 1985 г. От Радиевского института в работах обеих коллабораций принимала постоянное участие фотоэмульсионная группа (Н. А. Перфилов, З. И. Соловьева, В. А. Плющев, В. Г. Богданов, Л. И. Царегородцева). Обе коллаборации широко использовали возможности облучения эмульсионных камер и стопок на различных ускорителях тяжелых ионов в Беркли, Дубне, Брукхэвене и ЦЕРНе, что позволило получить экспериментальный материал по ядро-ядерным взаимодействиям в необычайно широких диапазонах масс и энергий взаимодействующих ядер: 1,05 А·ГэВ/с - Au, U (Беркли); 4,5 А·ГэВ/с - He, Li, C, O, Ne, Si, S (Дубна); 11,6 А·ГэВ/с - Au (Брукхэвен); 14,6 А·ГэВ/с - O, Si (Брукхэвен); 60 А·ГэВ/с - O (ЦЕРН); 160 А·ГэВ/с - Pb (ЦЕРН); 200 А·ГэВ/с - O, S (ЦЕРН).

Использование метода фотоэмульсионных камер с их 4 π -геометрией и уникальной разрешающей способностью в угловых и пробеговых измерениях обеспечили выполнение широкой программы исследований релятивистских ядро-ядерных взаимодействий в те годы, когда еще не были созданы соответствующие 4 π -устройства с электронным съемом информации. Одной из крупных задач фотоэмульсионного эксперимента было детальное изучение общих характеристик неупругих взаимодействий различных релятивистских частиц (p, d, He, Li, C, O, Ne, Si, S, Au, Pb, U) с ядрами фотоэмульсии и проведение сравнительного анализа полных сечений, топологических функций, распределений множественностей вторичных частиц и их кинематических характеристик. Этот цикл работ привел к выявлению многих существенных деталей неупругих ядерных взаимодействий при релятивистских энергиях и

обеспечил развитие теоретических моделей. Важной задачей исследований в эти же годы явилось получение подробной экспериментальной информации о предельных расщеплениях ядер Ag, Br в эмульсии под действием протонов и ионов ^2H , ^4He , ^{12}C с импульсом 4,5 ГэВ/с на нуклон. В этой работе впервые в рамках единого методического подхода изучен большой ряд характеристик вторичных частиц в предельных расщеплениях ядер Ag, Br (Н. А. Перфилов, В. А. Плюшев, З. И. Соловьева, 1980 г.) и сделаны важные выводы о природе предельных ядерных расщеплений.

В эти же годы проводится изучение одной любопытной проблемы в релятивистской ядерной физике - проблемы образования фрагментов с аномально большим сечением взаимодействия, которые получили название аномалонов. Результаты, полученные в Радиевом институте, позволили доказать ошибочность ряда работ по аномалонам и установить их отсутствие при фрагментации релятивистских ядер.

В 80-е годы особый интерес приобретают и становятся важным объектом исследования глубоконеупругие протон-ядерные и ядро-ядерные взаимодействия, приводящие к испусканию высокоэнергетических частиц и легких ядер в так называемой кумулятивной области кинематических переменных. По существующим представлениям эти вторичные частицы несут информацию о природе высокоимпульсной компоненты волновой функции ядра-мишени, о локальных свойствах ядерного вещества и могут быть связаны с кварковыми степенями свободы.

Во многих лабораториях были проведены детальные исследования энергетических спектров различных элементарных частиц в кумулятивной области при взаимодействии лептонов, адронов и легких ядер с атомными ядрами. В Радиевом институте исследования были сосредоточены на измерениях сложных частиц в кинематически запрещенной для свободного рассеяния области переменных. В реакциях под действием протонов 6,6 ГэВ были измерены двойные дифференциальные сечения образования изотопов $^{1,2,3}\text{H}$, $^{3,4,6}\text{He}$ и $^{6,7}\text{Li}$ в области высоких поперечных импульсов для ядер-мишеней C, Cu, $^{112,124}\text{Sn}$ и Au. Экспериментальные данные показали высокие значения эффективных температур в спектрах и сильную зависимость сечений от массового числа мишени, возрастающую с увеличением барионного числа фрагмента. Для описания характеристик многонуклонных фрагментов в кумулятивной области было использовано приближение парных корреляций нуклонов в ядрах, которое дало на качественном уровне совпадение с экспериментом (М. А. Браун, В. В. Вечернин, О. В. Ложкин, Ю. А. Мурин, 1982 г.). Измерение спектров фрагментов под действием релятивистских альфа-частиц и протонов показали существование масштабной инвариантности и факторизации сечений при образовании фрагментов, как и для элементарных частиц.

Остановимся еще на одном крупном направлении работ в Радиевом институте в области ядерной физики высоких энергий. Начиная с 50-х годов, большое значение в исследованиях ядерных взаимодействий частиц высоких энергий придается так называемому импульсному приближению, когда взаимодействие падающих частиц с ядерными нуклонами или малонуклонными ассоциациями считается квазисвободным. Сама проблема нуклонных ассоциаций в ядрах, в решении которой импульсное приближение квазиупругого выбивания кластеров сыграло большую роль, является одной из наиболее актуальных проблем в теории ядра до настоящего времени. В Радиевом институте в конце 50-х и начале 60-х годов проводилась серия экспериментальных работ по изучению взаимодействий высокоэнергетических протонов и дейтронов с ядрами ^{12}C (алмазный порошок в фотоэмульсии) и с легкими ядрами эмульсии C, N, O. Результаты этих работ показали большую роль кластерной структуры легких ядер в реакциях при высоких энергиях. (А. П. Жданов, П. И. Федотов, Ф. Г. Лепехин, 1959 г.; Н. А. Перфилов, Ю. И. Серебренников, 1961 г.). В эти же годы исследуется вопрос о механизме образования быстрых альфа-частиц при расщеплении ядер Ag и Br протонами высоких энергий и возможность их квазиупругого выбивания быстрыми нуклонами (В. И. Остроумов, Н. А. Перфилов, Р. А. Филон, 1960 г.). При изучении прямых ядерных процессов используется методика вакуумной камеры реакций с фотоэмульсиями в качестве детекторов для определения возможности больших передач импульса остаточным ядрам при взаимодействии быстрых протонов с легкими ядрами-мишенями ^7Li , ^9Be и ^{12}C . Этот цикл

работ привел к обнаружению высокоимпульсной компоненты в спектрах остаточных ядер в реакциях типа $(n, 2n)$ на легких ядрах (В. И. Богатин, О. В. Ложкин, Ю. П. Яковлев, 1963 г.). В связи с этими результатами были проведены детальное изучение реакций ${}^9\text{Be} (p, 2p) {}^8\text{Li}$ при энергиях 180, 660 и 9000 МэВ и теоретическое рассмотрение характеристик ядер-отдачи в рамках полюсного механизма (Е. Л. Григорьев, З. Марич, В. К. Сусленко, В. И. Кочкин, 1969 г.). В дальнейшем было выполнено специальное исследование реакций типа " $2 \rightarrow 3$ ", которые являются важным источником сведений о взаимодействиях элементарных частиц и свойствах ядер, и проведено детальное рассмотрение вопросов релятивистской кинематики, вычисления фазовых объемов конечных состояний и процедуры выделения динамической информации из экспериментальных данных (В. К. Сусленко, 1970 г.). Общий анализ вопросов релятивистской кинематики реакций столкновения с тремя частицами в конечном состоянии был изложен в обзоре в ЭЧАЯ (В. К. Сусленко, 1975 г.).

Помимо вопроса о волновой функции легких ядер, описывающей высокоимпульсную компоненту нуклонов, данное исследование привело к формулировке гипотезы о своеобразных внутриядерных реакциях на кластерах - возможности неупругого взаимодействия быстрых частиц с нуклонными ассоциациями в ядрах с образованием высокоимпульсных фрагментов. В рамках этой гипотезы были выполнены расчеты процесса образования фрагментов ${}^8\text{Li}$ при взаимодействии протонов 660 и 2200 МэВ с ядрами ${}^{12}\text{C}$, причем использовалось полюсное приближение для описания взаимодействия падающего протона с кластером ${}^9\text{Be}$ в ядре ${}^{12}\text{C}$. Модель реакций на внутриядерных кластерах позволила описать кинематические характеристики ${}^8\text{Li}$ и объяснить соотношения выходов различных вторичных нуклидов (Р. В. Афанасьева, О. В. Ложкин, В. М. Мальцев, Ю. П. Яковлев, 1964 г.). Аналогичное рассмотрение образования ${}^8\text{Li}$ из Al при энергии протонов 660 МэВ также дало хорошее описание высокоимпульсной компоненты спектров фрагментов (С. Азимов, Р. Арипов, Е. В. Бетер, О. В. Ложкин, 1970 г.). Эти исследования показали необходимость учета кластерной структуры ядер и прямых процессов в явлении фрагментации. Проблеме прямых реакций на легчайших кластерах посвящается ряд экспериментальных работ по изучению дифференциальных энергетических спектров изотопов ${}^3\text{He}$ и ${}^4\text{He}$ при взаимодействии протонов 340 и 660 МэВ с ядрами Li, Be, C, N, O. При этом отдельно измеряются сечения упругого рассеяния протонов на ядрах ${}^2\text{H}$, ${}^3\text{He}$ и ${}^4\text{He}$ по методу регистрации ядер-отдачи. В этих исследованиях дополнительным подтверждением квазиупругого выбивания ${}^4\text{He}$ из ядер послужило обнаружение азимутальной лево-правой асимметрии в распределении ${}^4\text{He}$ при взаимодействии поляризованных протонов 630 МэВ с ядрами ${}^9\text{Be}$. Анализ реакций (p, pn) на ${}^4\text{He}$ показал, что они могут быть непротиворечиво описаны в импульсном приближении без существенного влияния взаимодействий в начальном и конечном состояниях. Были получены оценки эффективных чисел кластеров ${}^3\text{He}$ и ${}^4\text{He}$ в легких ядрах как отношений сечений квазиупругого выбивания и упругого рассеяния на свободных ядрах (В. Н. Кузьмин, Р. М. Яковлев, 1965 г.). Данная проблема была вновь рассмотрена через много лет в связи с выяснением роли кварковых степеней свободы в ядрах. Были получены инклюзивные спектры ${}^{1,2}\text{H}$ и ${}^3\text{He}$ при взаимодействии протонов с энергиями 46 - 400 ГэВ с ядрами ${}^4\text{He}$ под углом 90° в лабораторной системе. Спектр ${}^3\text{He}$ был успешно описан в рамках модели, учитывающей помимо спекторного механизма и механизм квазиупругого выбивания кластера ${}^3\text{He}$ из ядра ${}^4\text{He}$ с вершинной константой, совпадающей с полученной при низких энергиях (Н. Л. Денисенко, В. А. Никитин и др., 1988 г.).

В конце 80-х годов в Радиовом институте было предпринято исследование одного из предсказываемых эффектов при фазовом переходе газ-жидкость, а именно изменение формы зарядовых распределений фрагментов промежуточных масс в области фазового перехода: от крутых экспоненциальных распределений при энергиях ниже и выше этого перехода к относительно слабой степенной зависимости зарядового распределения фрагментов в области перехода. Для проведения эксперимента была использована вакуумная камера на ионопроводе синхрофазотрона ЛВЭ, в которой были расположены телескопы детекторов. В эксперименте для измерений спектров тяжелых фрагментов (от бора до серы) были использованы

телескопы ΔE - E детекторов с толщинами 6 и 24 микрона. Были измерены сечения образования фрагментов с $Z=5-14$ в реакциях $p+Au$ при энергиях от 2,5 до 7,5 ГэВ и в реакциях ^4He+Au при энергиях от 1,3 до 13,5 ГэВ. Этот эксперимент впервые указал на существование минимума в зависимости параметра зарядового распределения фрагментов от энергии налетающих альфа-частиц в области около 6 ГэВ, что могло интерпретироваться как сигнал фазового перехода. Кроме того, были получены данные о характеристиках источников фрагментов промежуточных масс (В. В. Авдейчиков, А. И. Богданов, В. А. Будилов, Е. А. Ганза, К. Г. Денисенко, Н. К. Жидков, О. В. Ложкин, Ю. А. Мурин, В. А. Никитин, П. В. Номоконов, 1987 г.).

В 90-х годах в России изменилось все: экономические реформы привели к резкому сокращению или полной остановке научных исследований, особенно в областях науки, которые без серьезного финансирования существовать не могут. Относится это и к ядерной физике и особенно к фундаментальным исследованиям, которые переживают тяжелейшее бедствие.

Если все же в 1997 г., в год 75-летия Радиевого института, мы можем еще говорить об успехах научной деятельности в 90-х годах в области исследований высокоэнергетических ядерных процессов, то это можно признать своеобразным феноменом, имеющим истоки в истории и традициях института и связанным с обретением в этот период свободы научных контактов с Западом. Исследования в рамках Международных коллабораций и прямые научные связи обеспечили не только продолжение интенсивной работы по тематике прежних лет, но и изучение новых проблем ядерной физики высоких энергий.

В эти годы в ряде ядерных центров мира предпринимаются особенно интенсивные исследования явления ядерной мультифрагментации, что вызвано тем новым уровнем понимания этого сложного явления и его связей с фундаментальными свойствами барионной материи, с механизмами процессов кластеризации нуклонов и природой фазовых переходов при высоких температурах, а также и с общими проблемами физики многочастичных систем, которое появилось в результате многолетних исследований. Эти годы характеризуются совершенствованием техники ускорения тяжелых ионов в широких областях энергий, созданием уникальных многодетекторных 4- π устройств и развитием статистических и динамических приближений для описания ядерной мультифрагментации. Одной из главных целей становится задача определения уравнения состояния ядерного вещества, знание которого необходимо как для решения проблем физики ядра, так и в астрофизике - для понимания процессов в ранней Вселенной, в нейтронных звездах и сверхновых.

Исследования ядро-ядерных взаимодействий с помощью фотоэмulsionной методики в Радиевом институте в 90-х годах были сосредоточены на проблемах, связанных с механизмами фрагментации релятивистских ядер и множественного рождения частиц. Цикл работ по фрагментации релятивистских ядер-снарядов, выполненный в рамках коллаборации EMU-01 (от Радиевого института участниками были В. Г. Богданов, В. А. Плющев, З. И. Соловьева), включил большой набор релятивистских ядер в широком диапазоне энергий от 3,7 до 160 ГэВ/нуклон. Были проанализированы длины свободных пробегов релятивистских ядер, множественности вторичных частиц, изотопный состав фрагментов, угловые распределения, топологические формулы фрагментации ядер-снарядов. Анализ множественностей ливневых частиц во взаимодействиях релятивистских ядер ^{197}Au с ядрами показал, что распределение множественности частиц непосредственно отражает ядерную геометрию при столкновении ядер и что приведенная множественность $n/\langle n \rangle$ обеспечивает существенно независимую от энергии в интервале 10-200 А·ГэВ меру центральности, так же как и при соударении более легких релятивистских ядер. Отдельную проблему представляло образование фрагментов He при фрагментации релятивистского ядра. Впервые был выполнен поиск реакций когерентной диссоциации релятивистских ядер кислорода на четыре альфа-частицы при импульсе 4,5 А·ГэВ/с. В сотрудничестве с ФИАН и СПбИАФ проведено исследование фрагментации релятивистских ядер 6Li , показавшее существенное влияние кластерной структуры $^2H+^4He$. В работах по программе коллаборации EMU-01 произведен поиск нестатисти-

ческих флуктуаций в распределениях квазибыстрот ливневых частиц. Нестатистические флуктуации были обнаружены для центральных взаимодействий тяжелых ядер, что указывает на возможный вклад нового механизма в процесс множественного мезонообразования, изучение которого служит целям поиска деконфайнмента кварков и его отношения к динамике взаимодействия. Этой же цели служит новый экспериментальный материал, получаемый при анализе неупругих взаимодействий ядер свинца в эмульсии при энергии 160 А·ГэВ. В эти же годы в сотрудничестве с СПбГТУ и НИЦ РБ КО выполнено исследование взаимодействий ядер ^{197}Au в эмульсии в диапазоне энергий 0,1-1,15 А·ГэВ, а также изучение фрагментации ядер эмульсии под действием ядер ^{20}Ne , ^{40}Ar и ^{56}Fe с энергиями 0,1-0,5 А·ГэВ. В начале 90-х годов с помощью созданного нейтронного спектрометра на базе синхрофазотрона ЛВЭ ОИЯИ было проведено изучение спектров быстрых нейтронов из тонких и толстых мишеней под действием протонов и дейтронов с энергиями 1-3,7 ГэВ. Показано, что трехкомпонентное аналитическое представление хорошо воспроизводит экспериментальные данные (А. В. Даниель, В. Г. Ляпин, И. О. Цветков, В. И. Юревич, Р. М. Яковлев, 1992 г.).

В 1990 г. группа сотрудников Радиевого института, возглавляемая О. В. Ложкиным, была приглашена принять участие в работах Международной коллаборации СНИС - объединения ученых европейских стран для исследований по физике ядро-ядерных взаимодействий при промежуточных энергиях на ускорителе-накопителе CELSIUS (Уппсала, Швеция). Эта коллаборация включает 45 физиков из 12 лабораторий семи стран. Основу программы фундаментальных исследований коллаборации СНИС составляют проблемы мультифрагментации атомных ядер, околопорогового рождения мезонов и интерферометрии фермионов в ядро-ядерных взаимодействиях, а также необходимые методические разработки. За прошедшие годы Радиевый институт принял участие в работах по всей программе коллаборации (О. В. Ложкин, В. В. Авдейчиков, А. И. Богданов, Ю. А. Мурин, А. Б. Фокин, М. Д. Зубков и позднее А. Т. Дьяченко, А. В. Кузнецов, И. Д. Алхазов, В. Г. Ляпин).

В исследованиях фрагментации ядер $^{112,124}\text{Sn}$ и ^{197}Au под действием ионов ^{14}N с энергией 14 и 32 МэВ/нуклон на циклотроне им. Густава Вернера (Уппсала) впервые была получена детальная информация об изотопных эффектах при образовании нуклидов He - C в реакциях на тяжелых ионах для определения температуры источников, проанализирована зависимость изобарических отношений от энергии фрагментов для оценки кулоновских эффектов, получены распределения инвариантных сечений образования фрагментов в плоскости продольной и поперечной компонент их импульсов для определения переносных скоростей источников и т. д. Для оценки характеристик источников фрагментов был проведен анализ изотопических эффектов в рамках квантовой статистической модели (О. В. Ложкин, В. Траутманн, 1992 г.). Распределения изотопных выходов фрагментов и изотопные эффекты были проанализированы в рамках двух статистических приближений для описания мультифрагментации: множественного образования фрагментов в мгновенном распаде возбужденной системы (модель Гросса) и при последовательном испарении фрагментов (модель Бланна). Исследовался также вопрос о временной шкале процесса мультифрагментационного распада ядер (Ю. А. Мурин, 1995 г.). Для определения характеристик источников фрагментов было разработано статистическое приближение, которое позволяет описывать аналитически системы конечного числа частиц и позволяет получать температуру, плотность, энергию возбуждения и энтропию распадающейся системы (М. Д. Зубков). Была выяснена роль возбужденных состояний фрагментов и их распадов в формировании конечных состояний фрагментационного распада. При анализе динамики ядро-ядерных взаимодействий и процессов образования пионов и фрагментов промежуточных масс было использовано два теоретических приближения: гидродинамическое описание столкновений тяжелых ионов с учетом изменения во времени и с энергией уравнения состояния ядерного вещества (А. Т. Дьяченко, 1994-1996 гг.) и новая версия модели квантовой молекулярной динамики (А. Б. Фокин, 1996 г.). Проблема рождения частиц в высокоэнергетических ядерных взаимодействиях была проанализирована в рамках статистической модели и было дано описание процесса образования пионов, каонов, эта-мезонов и антипротонов в области энергий от абсолютного порога до энергий 2 ГэВ/нуклон. Было проведено также исследование образования и распада локализованных

состояний дельта-изобар в рА- и АА-соударениях (М. Д. Зубков, 1993 г.). В 1996 г. коллаборацией СНИС при участии группы Радиевого института был проведен эксперимент на ускорителе-накопителе CELSIUS с целью изучения структуры функции возбуждения пинообразования в рА- и АА-взаимодействиях. Одной из задач эксперимента является поиск узких резонансов, которые могли бы, в частности, указывать на необычные свойства дельта-изобар в ядре.

Интересные результаты в коллаборации СНИС были получены в 1993 г. в интерферометрических измерениях пар нуклонов в реакциях $Ag + {}^{197}Au$, ${}^{12}C$ при энергии 30 АМэВ (от Радиевого института принимали участие О. В. Ложкин, Ю. А. Мурин, А. И. Богданов). Для изучения вопросов пространственно-временной эволюции ядерной материи в реакциях с тяжелыми ионами принципиально важным является то, что измерения проводились одновременно для трех пар фермионов pp, pn и nn. Продолжение исследований малоугловых корреляций фермионов планируется в схеме совпадения с регистрацией тяжелого ядра отдачи с помощью разработанного в Радиевом институте детектора на микроканальных пластинах (А. В. Кузнецов, И. Д. Алхазов, В. Г. Ляпин).

Благодаря активной работе в коллаборации СНИС группа Радиевого института участвовала в трех Международных конференциях по ядерной физике на накопительных кольцах (Лунд-1992, Санкт-Петербург-1994 и Бернкастель-Кюс-1996). Вторая конференция была посвящена проблемам ядерной мультифрагментации и была организована Радиевым институтом (председатель Оргкомитета О. В. Ложкин, ученые секретари Ю. А. Мурин и М. Д. Зубков).

Результаты работ по физике высокоэнергетических ядерных процессов в 90-е годы позволяют надеяться, что с преодолением продолжающегося кризиса в российской науке программы будут осуществлены и в будущем, в преддверии 2000 года, будут получены новые важные результаты.

ЯДЕРНАЯ АСТРОФИЗИКА В РАДИЕВОМ ИНСТИТУТЕ

Я. М. Крамаровский, В. П. Чечев

Ядерная астрофизика представляет собой науку, основанную на применении результатов теоретической и экспериментальной ядерной физики к астрономическим объектам с целью объяснения их природы, источников энергии, химического состава и возраста. В свою очередь, знание динамики эволюции звезд позволяет изучать уникальные физические процессы, моделирование которых в земных условиях либо затруднено, либо просто неосуществимо. Исследование звездных процессов предоставило возможность обнаружить многие ядерные эффекты, которые впоследствии были открыты в земных условиях.

Ранний период. Создание теории альфа-распада

Ядерная астрофизика как наука возникла благодаря работам английского астрофизика сэра Артура Эддингтона, который объяснил в 1926 г., что с помощью реакций слияния ядер водорода происходит энерговыделение в недрах Солнца. К этому времени было известно, что суммарная масса четырех ядер водорода больше массы ядра гелия примерно на один процент.

Однако было совершенно непонятно, что позволяет протонам сблизиться настолько, чтобы произошло ядерное взаимодействие. Буквально два года спустя, летом 1928 г., Г. А. Гамов, который был командирован из советской России в Германию, оказался в самом центре теоретической физики того времени. Здесь, после знакомства с работами Резерфорда по рассеянию альфа-частиц на ядрах урана, Г. А. Гамов развивает квантовомеханическую

идею проникновения альфа-частицы сквозь потенциальный барьер ядра и делает соответствующие расчеты. По-видимому, именно 1929 год следует считать точкой отсчета ядерной астрофизики в Радиевом институте, поскольку Г. А. Гамов после окончания Ленинградского университета становится сотрудником Радиевого института.

Исследования по физике космических лучей и ядерной геохронологии (30-е - 40-е годы)

Особое место среди работ физического отдела Радиевого института занимает изучение космических лучей, которое началось в 1924 г., когда даже само их существование подвергалось сомнению. Работы проф. Л. В. Мысовского и Л. Р. Тувима не только подтвердили факт существования космических лучей, но и установили широтное распределение их интенсивности. Кроме этого ими был определен коэффициент поглощения космических лучей в воде, оказавшийся на порядок меньше коэффициента поглощения гамма-квантов от источников RaC и ThC. В 1927 г. Л. В. Мысовским были продолжены работы по определению коэффициентов поглощения космических лучей в свинце и воде. В 1929 г. в монографии "Космические лучи", которая явилась первой книгой на эту тему на русском языке, Л. В. Мысовский дал сводку новейших на тот период времени знаний о природе космического излучения [1].

В начале 30-х годов аспирантом С. Н. Верновым разработан метод изучения космических лучей на шарах-зондах. С помощью шаров-зондов проводились исследования космических лучей в тропиках в середине 30-х годов. Была разработана также аппаратура и методика исследований свойств космических лучей при стратосферных полетах, а профессор А. Б. Вериге совершил полет на стратостате СССР-1. Кроме того, А. Б. Вериге проводит исследования по влиянию географической широты места наблюдения на величину интенсивности космических лучей. Измерения проводились на ледокольном корабле "Малыгин" во время рейда в архипелаге Земли Франца Иосифа (1932 г.). Контрольные эксперименты и градуировка проводились А. Б. Вериге на подводной лодке при погружении на глубину 40 м.

Полученные им результаты позволили утверждать, что интенсивность космических лучей в течение продолжительного промежутка времени и вне зависимости от широты места измерения в пределах экспериментальных ошибок постоянна [2].

Как известно, 30-е годы ознаменовались фундаментальными достижениями в ядерной физике. Были открыты нейтрон и позитрон, искусственная радиоактивность и деление ядер, открыто спонтанное деление и разработана теория цепных ядерных реакций. Все эти работы так или иначе заложили фундамент не только собственно ядерной физики, но и придали мощный импульс развитию ее космической ветви - ядерной астрофизики.

В экспериментальном отношении ядерная астрофизика в Радиевом институте занимала лидирующее положение среди научных институтов. Здесь следует упомянуть фундаментальные работы по ядерной геохронологии, которые проводили И. Е. Старик, Э. К. Герлинг, В. В. Чердынцев [3]. Ими были разработаны новые методы определения возраста геологических формаций, а также возраста Земли и метеоритов с помощью свинцового, аргонового и ксенонового методов. Еще в 1932 г. под руководством В. И. Вернадского в СССР был образован Головной центр в области геохронологии для определения абсолютного возраста геологических формаций. Обширные геохронологические исследования, предпринятые в Радиевом институте в 1947-1948 гг. после появления отечественных масс-спектрометров, привели к открытию радиогенного изотопа аргона в калийсодержащих минералах. Это явилось важным успехом В. Г. Хлопина и Э. К. Герлинга.

Геохронология - один из важных разделов более общей задачи ядерной астрофизики, связанный с вопросами эволюции вещества Вселенной и проблемой происхождения химических элементов. В историческом плане быстрое развитие исследований этих направлений ядерной астрофизики началось с 1946 г. благодаря работам Г. А. Гамова [4], ставшего к этому времени гражданином США, в сотрудничестве с выходцами из России Р. Альфером и Р. Германом. Ими была создана теория Большого Взрыва, согласно которой все известные в

природе химические элементы образуются в первые три минуты с момента Большого Взрыва. И хотя тщательный анализ последующих исследователей, В. Фаулера, Дж. и М. Бербиджей, Д. Клейтона, Ф. Хойла и многих других, показал, что в Большом Взрыве синтезируются лишь самые легкие элементы, тем не менее именно работы Гамова положили начало исследованиям этой наиболее яркой и информативной проблемы ядерной астрофизики.

Вопросы эволюции Вселенной и поиск связи микро- и макромира

60-е годы ознаменовались триумфом теории горячей Вселенной, и в это же время начинается поиск связи между фундаментальными взаимодействиями через связь фундаментальных физических постоянных микро- и макромира. Поисками связи между микро- и макромиром с целью создания единой теории поля в течение многих десятилетий занимался А. Эйнштейн. Однако лишь открытие нестационарности Вселенной поставило проблему связи констант на совершенно новую основу, а именно, был поставлен вопрос, не влияет ли расширяющийся мир, как целое, на фундаментальные физические константы, медленно изменяя по крайней мере некоторые из них? Интерес к этому вопросу, стимулированный знаменитой гипотезой Дирака о Больших Числах и последующими исследованиями Е. Теллера, Г. А. Гамова, Ф. Дайсона и др., проявили и авторы настоящей статьи, опубликовав в 1978 г. монографию по этой проблеме [5] и ряд статей. На принципиальную важность работ в этом направлении указывает и тот факт, что спустя почти двадцать лет к этой проблеме обратились наши коллеги из Физико-технического института им. А. Ф. Иоффе. Большой цикл работ по ограничению изменения постоянной тонкой структуры был выполнен Д. А. Варшавичем, С. А. Левшаковым и А. Ю. Потехиным в 1993-1995 гг.

Как известно, "горячая" модель Вселенной получила экспериментальную поддержку в результате открытия трехградусного реликтового излучения. Кроме того, с помощью этой модели хорошо объясняется наблюдаемое обилие ${}^4\text{He}$. Однако имеющиеся расхождения в измерениях наблюдаемых обилий ${}^4\text{He}$ позволили в работах авторов этой статьи поставить вопрос о пределах постоянства константы слабого взаимодействия.

Исследования ядерных реакций с заряженными частицами (60-е - 80-е годы)

Помимо глобальных вопросов эволюции Вселенной ядерная астрофизика при исследовании проблемы происхождения элементов имеет дело с конкретными механизмами ядерных реакций в звездах и межзвездном веществе, которые доступны проверке и экспериментальному исследованию в лаборатории. Один из таких механизмов синтеза легких и средних ядер осуществляется, когда галактические космические лучи бомбардируют ядра, выброшенные при взрыве звезд в межгалактическую среду. Основными ядерными реакциями, которые реализуются при таких взаимодействиях, являются реакции скалывания, подхвата, а также реакции деления (при взаимодействии высокоэнергетичных заряженных частиц с тяжелыми ядрами). С начала 60-х годов экспериментальными исследованиями ядерных реакций срыва (скалывания) в Радиевом институте им. В. Г. Хлопина занимался проф. Ю. А. Немиллов с сотрудниками. Позднее были проведены также многочисленные исследования взаимодействия высокоэнергетичных протонов с тяжелыми ядрами. В то время эти работы не имели строгой астрофизической направленности, однако сегодня можно говорить о большом значении этих работ для формирования экспериментального фундамента ядерной астрофизики, которое продолжалось почти четверть века, вплоть до середины 80-х годов.

Открытие ${}^6\text{He}$ и ${}^8\text{He}$

На первых этапах исследований взаимодействия нейтронов с легкими нуклидами важнейшие результаты о природе короткоживущих радиоактивных нуклидов были сделаны в 1938 г. в Радиевом институте А. Е. Полесицким. Им впервые было показано, что в результате взаимодействия нейтронов с ядрами ${}^9\text{Be}$ образуется "продукт с периодом полураспада

0,84 с", который является ${}^6\text{He}$. Важность этого открытия для ядерной астрофизики ценна тем, что обилия ${}^6\text{Li}$, синтезированные в звездах, могут пополняться также и за счет β -распада ${}^6\text{He}$ [6].

Еще один пример взаимодействия ядерной физики с астрофизикой связан с открытием в Радиевом институте ${}^8\text{He}$. В начале 60-х годов Я. Б. Зельдовичем и В. И. Гольданским были выдвинуты соображения о возможном образовании гелионов при взаимодействии тяжелых ядер, перегруженных нейтронами, с высокоэнергетичными протонами. Вскоре сотрудниками Радиевского института О. В. Ложкиным и А. А. Римским-Корсаковым были обнаружены в фотоэмульсии треки, идентифицированные как ${}^8\text{He}$. Это открытие позволило установить границу нейтронной стабильности для самых легких ядер (которая оказалась абсолютной). С другой стороны, это же открытие позволило астрофизикам исследовать дополнительный механизм синтеза легких ядер в галактическом пространстве и, в известной степени, уменьшить нишу незнания в области синтеза ядер, которые не могут образоваться ни в термоядерных процессах, ни в реакциях с нейтронами на стадии взрыва Сверхновых.

Реакции с нейтронами. Расчет сечений нейтронного захвата

Другая обширная область ядерно-физических исследований, важных для астрофизики, связана с реакциями нейтронного захвата. Большинство ядер в Природе обязано своему синтезу в звездах на стадии их эволюции и при взрывах звезд. Создание количественной теории процессов нейтронного захвата в звездах непосредственно связано с точным знанием сечений нейтронного захвата при энергиях нейтронов, характерных для стационарных и взрывающихся звезд.

Процессы захвата нейтронов в звездах обычно подразделяют на медленный s (slow) и быстрый r (rapid) процессы. Медленный процесс происходит в звездах средней массы, для которых характерна средняя плотность потока нейтронов $10^{15}-10^{16}$ н.см $^{-2}$ с $^{-1}$, температура $>10^8$ К и длительность процессов облучения $\sim 10^3$ лет. В этом случае β -распад образовавшихся неустойчивых ядер ($T_{1/2}$ меньше 10^3 лет) успевает произойти раньше, чем будет захвачен следующий нейтрон.

Процесс быстрого нейтронного захвата происходит при взрыве Сверхновых при плотности потока нейтронов $\sim 10^{30}$ н.см $^{-2}$ с $^{-1}$ и температуре $\sim 5 \cdot 10^{10}$ К. В этом случае захват большого количества нейтронов смещает равновесное обилие ядер от долины стабильности в сторону нейтроноизбыточных. Избыток нейтронов в ядре растет до тех пор, пока энергия отделения нейтрона не станет равной нулю. В этот момент ядра "ждут", пока β -распад не превратит ядерные нейтроны в протоны и после ряда последовательных β -распадов ($\tau \sim 10^{-1}$ с) ядра снова могут захватить нейтроны.

Если s-процесс можно моделировать в лабораторных условиях (при работе реактора), то r-процесс в земных условиях реализуется лишь при термоядерных взрывах. В таких процессах были синтезированы многие трансактиновые изотопы. Основная ядерно-физическая неопределенность расчетов астрофизических реакций захвата нейтронов связана с недостаточно точным знанием сечений нейтронного захвата в области энергий 10-100 кэВ. Достоверные значения сечений нейтронного захвата особенно необходимы при расчетах неравновесного r-процесса, так как при продвижении по дорожке синтеза от $Z=26$ до $Z>100$ в рассмотрение включается около 5000 ядер.

Отсюда очевидна важность проведения работ по измерениям, расчетам и оценке сечений (n, γ)-процессов. Такие расчеты проводятся нами для ряда ядер, удаленных от долины стабильности в звездной области температур.

Большой научный интерес к ядерно-астрофизической тематике работ нашего института в 70-е - 80-е годы неоднократно поддерживался крупнейшими учеными-физиками (см. рисунок).

UNITED STATES
ATOMIC ENERGY COMMISSION
WASHINGTON, D.C. 20545

February 15, 1970

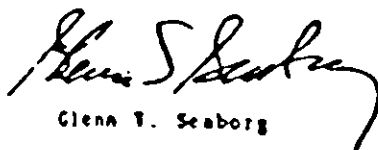
Professor Konstantin Petrzhak
Joint Institute for Nuclear
Research
Dubna, Moscow, USSR

Dear Professor Petrzhak:

During my visit to Dubna on September 28, 1969, I recall your interesting evaluation of the U-235/238 ratio in some forty meteorite samples analyzed in the Soviet Union. I have enclosed a copy of an article that appeared in the January 30, 1970, edition of the U.S. magazine "Science" that provides a similar analysis for the U-235/238 ratio obtained from lunar rock samples returned by the Apollo-11 astronauts.

I would be very interested in hearing whether this missing link, about which you inquired during my visit to Dubna, now confirms your hypothesis that "God did create the world in one day."

Sincerely,


Glenn T. Seaborg

MAILING
25 FEB 1970
0000 00000000
MAILING UNIT, LOUISIANA STATE UNIVERSITY
BATON ROUGE, LOUISIANA 70803


ВНИМАНИЮ
РАЙОННОГО МЕНТРИА
г. В.П. КИРОВА
ПРОФЕССОР А.Н. ПЕТРЖАК

Уважаемый Леонид Николаевич!

Я обращаюсь к Вам с тем, чтобы рассмотреть теоретические работы по нуклеосинтезу в астрофизике, проводимые в Вашем Институте.

Эти работы представляют значительный научный интерес. Нуклеосинтез определяет химический состав звезд и планет. Теория нуклеосинтеза основывается на данных ядерной физики, в особенности на данных о взаимодействиях ядер в нейтронах. В Раппопорт-Портенском институте нуклеосинтеза на протяжении более 10 лет выполняются работы. Члены В.П. и Кривоносов А.Н. Эти работы представляют большой научный интерес и являются одним из основных направлений в тематике Института.

Большое значение имеет продолжение и расширение этих работ, в том числе работ, проводимых в контакте с учреждениями Академии Наук.

24/83. 

Изучение бета-запаздывающих процессов

При образовании нуклидов в астрофизических процессах следует учитывать также роль β -распадов, происходящих после захвата ядром нейтронов. Для описания β -распада чаще всего используется понятие силовой функции β -распада ($S\beta$), которая представляет собой распределение квадратов матричных элементов бета-распадного типа по энергии возбуждения ядра. Существенную роль запаздывающего деления при образовании тяжелых элементов отмечают все исследователи буквально с момента обнаружения бета-запаздывающего деления. Исследование роли бета-запаздывающих процессов в астрофизических условиях для синтеза ядер в области $A=250-266$ выполнил (1980-1986 гг.) сотрудник Радиевого института И. Н. Изосимов. Им, в частности, предсказан резонансный характер силовой функции β -распада, отличный от ранее принятого статистического подхода.

Детальные расчеты астрофизических процессов требуют как широкой экстраполяции в область ядер, удаленных от полосы стабильности, так и знания характеристик и сечений нейтронного захвата ядер, экспериментально не обнаруженных.

Проблема обойденных ядер

Еще одна проблема ядерной астрофизики связана с происхождением так называемых "обойденных ядер". Обойденными принято называть ядра наблюдаемых в природе нуклидов с аномально низкими распространенностями, находящиеся по числу нейтронов слева от долины стабильности. Поскольку их образование в процессах медленного и быстрого нейтронного захвата проблематично, считается, что в большинстве своем эти ядра могут быть образованы в реакциях скалывания при взаимодействии протонной составляющей космических лучей, а также в астрофизических реакциях. Это (p,n) -, (p,γ) - и (γ,n) -реакции, т. е. так называемые p -процессы. Кроме того, возможен механизм получения таких ядер в реакциях слабого взаимодействия в звездах при температурах более 10^9 К в зоне горения кислорода. Однако перечисленные реакции не обеспечивают необходимого производства всех известных стабильных нуклидов, обойденных нейтронами. Расчеты синтеза этих элементов с участием нейтрино также в определенной степени воспроизводят ход кривой распространенности ряда обойденных ядер, в то же время характер сделанных оценок по энергии нейтрино, излучаемых при взрыве звезд, не позволяет подтвердить большой вклад нейтрино в такой синтез обойденных ядер.

Нами был предложен еще один возможный механизм образования обойденных ядер: деление с вылетом легких заряженных частиц. В самом деле, известно, что вероятность тройного деления с вылетом легких гелионов типа ${}^8\text{He}$ при переходе от ${}^{236}\text{U}$ к ${}^{252}\text{Cf}$ (параметр Z^2/A увеличивается на 6 %) возрастает в шесть раз. Однако расчеты показывают, что и этот механизм недостаточен для объяснения происхождения обойденных ядер. Поэтому дальнейшие исследования будут направлены на изучение ядерных реакций под действием космических лучей.

Работы по ядерной космохронологии

Как уже было отмечено выше, работы, выполненные в Радиевом институте В. И. Вернадским, И. Е. Стариком, Э. К. Герлингом, В. В. Чердынцевым, Л. В. Комлевым и другими, явились фундаментом исследований по геохронологии. В Радиевом институте выросла школа исследователей, которые развили и усовершенствовали методы геохронологического датирования. Усилиями таких ученых, как Ю. В. Кузнецов, Э. В. Соботович, В. М. Александрюк, С. М. Гращенко, Е. П. Петряев, К. Ф. Лазарев и ряда других были выполнены принципиальные работы в области ядерной геохронологии. В монографии И. Е. Старика "Ядерная геохронология" [7] были проанализированы также и калий-аргоновые методы датирования длительных процессов, соответствующих возрастам геологических формаций и возрастам

метеоритов. Работы К. А. Петржака, М. А. Бака, И. Н. Семенюшкина по исследованию изотопного содержания ^{235}U и ^{238}U в метеоритах разного типа позволили сделать заключение о возрасте Земли и метеоритов, сопоставимом с результатами, полученными по уран-свинцовой датировке.

Самое замечательное, на наш взгляд, состоит в том, что, во-первых, момент окончания нуклеосинтеза, оказывается, не может быть слишком отдален от момента образования Солнечной системы, и, во-вторых, в том, что все тела Солнечной системы (по крайней мере метеориты, Земля и Луна) образовались по космологическим масштабам времени одновременно - за время меньшее или порядка сотни миллионов лет ($\leq 10^8$ лет).

“Бог создал мир в один день!” (см. рисунок).

Детальное изучение космохронологии продолжается и поныне. Так, в 80-е годы было показано, что использование короткоживущих хронометров s- и г-процессов, таких как ^{129}I , ^{107}Pd , ^{146}Sm , ^{244}Pu , ^{247}Cm , ^{205}Pb , позволило установить, что интервалы времени между окончанием нуклеосинтеза и образованием твердых тел Солнечной системы, определенные по s- и г-хронометрам, совпадают и не превышают 10^8 лет. В 90-е годы А. Ю. Шуклюковым и др. исследовалась временная эволюция и содержание в ранней Солнечной системе изотопа ^{60}Fe с периодом полураспада 1,5 млн. лет. Его наличие подтверждается обнаружением в метеоритах ^{60}Ni - продукта распада ^{60}Fe . Кроме этого исчезнувшего короткоживущего (по отношению к возрасту Солнечной системы) радионуклида, были обнаружены следы другого исчезнувшего радионуклида, ^{53}Mn ($T_{1/2}=3,7$ млн. лет), которые изучались по относительному содержанию ^{53}Cr в различных метеоритах. Сами метеориты представляли собой куски затвердевшей магмы, и по изотопному отношению $^{53}\text{Mn}/^{55}\text{Mn}$ можно было определить время затвердевания. В настоящее время из анализа наиболее точного “свинец-свинцового” возраста Солнечной системы, $4,5578 \pm 0,0005$ млрд. лет, с помощью короткоживущих хронометров была сделана более точная количественная оценка шкалы образования метеоритов [8].

Ранние представления о галактическом нуклеосинтезе основывались на том, что вещество Солнечной системы за миллиарды лет полностью перемешалось, изотопно гомогенизовалось. А. Ю. Шуклюковым было сделано заключение об удивительном явлении при образовании планет и метеоритов - неполном перемешивании в Солнечной системе продуктов от разных типов нуклеосинтеза. Это означает внутреннюю изотопную гетерогенность в пределах одного элемента. Примером может служить аномальное содержание Хе в углистых хондритах, которые обогащены самыми тяжелыми и самыми легкими изотопами (смесь компонентов от г- и р-процессов нуклеосинтеза).

Резюмируя все вышесказанное, можно утверждать, что ядерная астрофизика, зародившаяся в Радиевом институте благодаря идеям и работам В. И. Вернадского, В. Г. Хлопина, Л. В. Мысовского, Г. А. Гамова, И. Е. Старика, Э. К. Герлинга и многих других ученых, способствовала становлению перспективного научного направления. Именно комплексность научных исследований Радиевского института - работы в области физики ядра и космических лучей, в области геофизики, геохимии, космохимии и радиохимии, использование новейших методических и теоретических разработок в других областях науки - способствовали весомому вкладу института в развитие наших представлений об окружающем мире.

Сегодня, на наш взгляд, заложенные в прошлом методы комплексного подхода к решению разнообразных научных задач вполне применимы к объединению научных интересов по комплексной проблеме “Ядерная астрофизика.”

Л и т е р а т у р а

1. Мысовский Л. В. Космические лучи. М.: Госиздат, 1929.
2. Вериго А. Б. Изучение физических свойств и природы космических лучей. // Серена, 1934, N 5, с.16.
3. Труды Государственного Радиевского института под ред. проф. В. Г. Хлопина. Л.-М.: Госиздат, 1938, т. 4, с. 138.
4. Alpher R. A., Bethe H., Gamov G. // Phys. Rev. 1946, v.70, p.572, ibid. 1948, v. 73, p. 803.
5. Чечев В. П. Крамаровский Я. М. // Радиоактивность и эволюция Вселенной. М.: Наука, 1978.

6. Полесицкий А. Е. Изучение химической природы короткоживущих радиоэлементов. /Труды Государственного Радиового института под ред. проф. В. Г. Хлопина. Л.-М.: Госиздат. 1938, 4, с 245.
7. Старик И. Е. // Ядерная геохронология. М.-Л.: Изд. АН СССР, 1961.
8. Shukolyukov A. et. al. // Science, 1993, v. 259, p. 1138.

ЯДЕРНЫЕ РЕАКЦИИ ПРИ НИЗКИХ ЭНЕРГИЯХ

Л. М. Солин

В конце 40-х - начале 50-х годов на циклотроне Радиового института под руководством заведующего лабораторией Ю. А. Немилова были начаты систематические исследования ядерных реакций. С помощью специального устройства - клиновидного фильтра - изучалось распределение по энергиям протонов, образующихся при облучении мишеней дейтронами. Ю. А. Немиловым впервые было показано, что реакция d,p протекает преимущественно без образования составного ядра; позднее это было подтверждено другими исследователями.

С другой стороны, исследования реакций (d,α) на ряде ядер при энергиях дейтронов 5,5-6,8 МэВ, проведенные сотрудниками лаборатории А. Е. Денисовым, Р. П. Колалисом, В. С. Садковским и Е. Д. Тетериным, показали преобладание механизма образования составного ядра.

Большой интерес представляют поляризационные эксперименты, проведенные для выяснения процессов, происходящих при взаимодействии протонов и дейтронов с ядрами. Исследована поляризация протонов при упругом рассеянии и нейтронов из реакций $^{12}\text{C}(d,n)$ и $^{14}\text{N}(d,n)$. Обнаружены корреляции искажающих эффектов в (d,p) - и (d,n) -реакциях. Эта серия работ выполнялась при участии Н. П. Бабенко, Б. А. Бибичева, И. О. Константинова, А. П. Москалева, Л. А. Победоносцева.

Для описания (d,p) -реакций в начале 50-х годов была разработана модель срыва Батлера. Согласно этой модели, по форме угловых распределений вылетающей частицы оказалось возможным определять орбитальный момент захватываемого нуклона и, следовательно, четность и спин возбужденного состояния остаточного ядра. После появления работы Батлера начались интенсивные исследования (d,p) -реакций с целью извлечения спектроскопической информации о ядрах и их возбужденных состояниях. В Радиовом институте был разработан и изготовлен многоугловой магнитный анализатор (мультиспектрограф), который позволял одновременно измерять энергетические спектры продуктов реакций под разными углами. С помощью мультиспектрографа была получена обширная информация для ядер от углерода до железа. Экспериментальные данные сравнивались с теорией Батлера, определялись спины и четности.

На основании изучения закономерностей энергетических спектров и угловых распределений было показано, что в (d,p) -реакциях возбуждаются преимущественно одночастичные нейтронные состояния, а коллективные состояния проявляются с гораздо меньшей вероятностью, чем одночастичные. Эти анализы выполнялись на основе изучения спектроскопических факторов. В моделях ядерных реакций дифференциальное сечение (d,p) -реакции пропорционально спектроскопическому фактору, зависящему от ядерных волновых функций, и кинематическому фактору. Спектроскопический фактор показывает, в какой степени образовавшееся состояние остаточного ядра можно представить как ядро-мишень в основном состоянии плюс нейтрон.

Теория реакций срыва Батлера, развитая в приближении плоских волн, не учитывала искажения волн до и после реакции, что не позволяло получать правильные значения спектроскопических факторов. Поэтому в дальнейшем большинство экспериментальных данных обрабатывалось с помощью метода искаженных волн. Если энергия налетающих частиц (дейтронов) ниже высоты кулоновского барьера ядра, то искажения будут обусловлены,

главным образом, кулоновским взаимодействием, и расчеты могут быть выполнены достаточно точно. Это можно отнести к исследованиям реакций срыва при подбарьерных энергиях.

Наиболее подходящим ускорителем для исследований ядерных реакций при малых энергиях является электростатический ускоритель типа Ван-де-Граафа, который обеспечивает пучки заряженных частиц с высоким разрешением по энергии. В 1963 г. в лаборатории Ю. А. Немилова был сдан в эксплуатацию электростатический ускоритель с максимальной энергией 4 МэВ, спроектированный и изготовленный в НИИЭФА для физических исследований. Монтаж и наладка ускорителя выполнялись группой сотрудников Радиевого института под руководством А. С. Кучерова.

В исследованиях подбарьерных (d,p)-реакций участвовали В. Ф. Литвин, Л. В. Краснов, К. А. Гриднев, К. И. Жеребцова, Ю. А. Лакомкин, Т. В. Орлова. При анализе энергетических спектров было обнаружено более 150 новых уровней ядер. Детальное изучение реакций срыва на большом числе изотопов одного и того же элемента дало возможность обнаружить ряд интересных закономерностей. Оказалось, например, что сечения испускания протонов малых энергий для легчайших изотопов данного элемента много больше, чем сечения образования протонов малой энергии для самого тяжелого изотопа.

Для детальных исследований энергетических спектров (d,p)-реакций в конце 60-х годов в лаборатории Ю. А. Немилова был установлен большой магнитный спектрограф, который обеспечивал энергетическое разрешение на уровне 0.01 %. В наладке спектрографа принимали участие В. Н. Кузьмин, Л. М. Солин, А. В. Панкин, П. Н. Вениг. При анализе первых же энергетических спектров протонов из (d,p)-реакции на ^{27}Al было обнаружено 11 новых уровней возбуждения ядра ^{28}Al . Впоследствии вместо фотопластинок для регистрации заряженных частиц в фокальной плоскости спектрографа была разработана и изготовлена координатная искровая звуковая камера. Использование координатного детектора позволило не только автоматизировать процесс получения энергетических спектров, но и повысить точность определения энергий заряженных частиц, а соответственно, и энергий возбуждения.

Измерение энергий протонов и альфа-частиц из ядерных реакций (d,p) и (d, α), которые приводят к образованию основных состояний ядер, делает возможным измерение масс конечных ядер, если известны массы трех других участников реакции. Измерения энергетических спектров при нескольких углах реакции позволили уточнить массы ядер ^{37}S , ^{34}P . Проведенные работы инициировали поиски эмпирических закономерностей в энергиях связи атомных ядер, в результате чего была предложена новая полуэмпирическая формула масс ядер. Анализ спектров позволил также уточнить схемы уровней ядер ^{32}P и ^{37}S .

В 70-х годах большое внимание уделялось исследованиям возможностей приложений ядерных реакций; в частности, проводились исследования элементного состава по упругому рассеянию, по реакциям срыва, по трехчастичным реакциям, например, определение примеси бора в кремнии по реакции $^{11}\text{B}(p,3\alpha)$.

Ввод в эксплуатацию циклотрона МГЦ-20 в Радиевом институте (1989 г.) расширил экспериментальные возможности. Работы по отладке циклотрона проводились под руководством Л. М. Солина и Л. С. Лебедева при участии А. И. Баранова, А. Ф. Мосенкова, А. И. Таразевича, В. В. Петрунина, И. П. Поплаухина, Г. В. Борисова, А. М. Кузьменкова, Р. А. Соломенцева, С. П. Петрова, Ю. В. Давыдова и сотрудников НИИЭФА им. В. Д. Ефремова, главным образом А. В. Галчука. В 1990-1992 гг. были проведены исследования деления легких ядер при бомбардировке их протонами. Измерялись функции возбуждения реакций $^{23}\text{Na}(p,^{12}\text{C})^{12}\text{C}$ и $^{27}\text{Al}(p,^{12}\text{C})^{16}\text{O}$. В первом случае, при развале промежуточных состояний ядра ^{24}Mg , был обнаружен канал реакции с вылетом ядер ^{16}O и ^8Be (2α), а для второй реакции оценено сечение.

В 80-х годах в лаборатории Ю. А. Немилова проводились исследования ядерных реакций с заряженными частицами на тяжелых ядрах группой Ю. А. Селицкого с участием В. А. Яковлева, В. Б. Фунштейна и Е. А. Громовой. Основной целью этих работ было опре-

деление оптимальных способов накопления легких трансактинидов, таких как изомеры нептуний-236 и плутоний-236. При проведении этих исследований использовались ускорители различных сторонних организаций, а именно: циклотроны У-120 ЛГУ, У-150 ИЯФ АН КазССР (г. Алма-Ата) и У-240 ИЯИ АН УССР (г. Киев). В результате было установлено, что максимальный выход нептуния-236 и плутония-236 с приемлемой радионуклидной чистотой достигается при облучении естественного урана протонами с энергией 30 МэВ. Кроме измерения сечений ядерных реакций производилось накопление долгоживущего изомера нептуния-236 ($T_{1/2}=155000$ лет) и плутония-236 ($T_{1/2}=2,85$ г.), которые в дальнейшем использовались для определения их делительных характеристик в реакторе ВВР-М (ЛИЯФ, г. Гатчина), реакторе Ф-1 и установке ЛУЭ "Факел" ИАЭ им. И. В. Курчатова.

С 1988 г. работы по исследованию ядерных реакций актинидов с легкими заряженными частицами проводились в рамках международного сотрудничества с университетами городов Хельсинки, Турку и Ювяскюля (Финляндия). Первая работа в этом направлении была посвящена изучению энергетической зависимости изомерного отношения нептуния-236 в реакции урана-238 с протонами. Облучения урановых мишеней проводились на циклотроне МГЦ-20 Обо Академии (г. Турку, Финляндия). Для определения пикограммовых количеств долгоживущего изомера нептуния-236 был применен оригинальный метод регистрации осколков его деления тепловыми нейтронами. В результате теоретического анализа измеренного изомерного отношения было впервые установлено, что основным состоянием нептуния-236 является его долгоживущий изомер.

В дальнейшем совместные исследования были, в основном, посвящены поиску и определению сечений реакций, приводящих к образованию нуклидов, используемых в качестве радиоактивных меток. Актуальность этих исследований была связана с тем, что при эксплуатации ядерных энергетических установок происходит накопление трансурановых элементов и, в частности нептуния-237 и плутония-239. Удобными реперами при контроле попадания этих нуклидов во внешнюю среду являются для нептуния - гамма-активный ^{235}Np с периодом полураспада $T_{1/2}=396$ сут, а для плутония - альфа-активный ^{236}Pu с $T_{1/2} = 2,85$ г и гамма-активный ^{237}Pu с $T_{1/2} = 45,13$ сут. Кроме того, изотопы ^{235}Np и ^{237}Pu являются единственными относительно безопасными метками нептуния и плутония при метаболических исследованиях в живых организмах, что стало особенно актуальным после аварии в Чернобыле в 1986 г.

С 1990 по 1994 гг. в результате исследований, выполненных на циклотроне МГЦ-20 Обо Академии, был определен ряд оптимальных ядерных реакций, приводящих к образованию радиоактивных меток. Так, при использовании относительно низкоэнергетических ускорителей наиболее производительными реакциями являются $^{236}\text{U}(p,2n)^{235}\text{Np}$, $^{237}\text{Np}(p,2n+pn\beta^-)^{236}\text{Pu}$ и $^{237}\text{Np}(p,n)^{237}\text{Pu}$ при энергии протонов до 20 МэВ. Кроме того, были определены характеристики ядерной реакции $^{237}\text{Np}(^3\text{He},2np)^{237}\text{Pu}$, приводящей к образованию высокочистого ^{237}Pu с относительно большим выходом при энергии ионов гелия-3 до 30 МэВ.

Дальнейшие исследования, проводимые с 1994 г. на циклотроне К-130 университета г. Ювяскюля, показали, что вышеперечисленные ядерные реакции дают максимальный выход и при более высоких энергиях налетающих частиц по сравнению со всеми ранее известными реакциями. Так, например, выход ^{236}Pu в реакции $^{237}\text{Np}(p,2n+pn\beta^-)^{236}\text{Pu}$ в семь раз выше, чем у ранее считавшейся наиболее производительной реакции $^{238}\text{U}(p,3n\beta^-)^{236}\text{Pu}$ при энергии протонов до 40 МэВ.

В настоящее время совместные исследования ядерных реакций с легкими заряженными частицами на тяжелых ядрах продолжаются в направлении изучения образования легких изотопов трансурановых ядер.

РАСПЫЛЕНИЕ-ДЕСОРБЦИЯ УЛЬТРАДИСПЕРСНЫХ МИШЕНЕЙ ИОНАМИ ЗА СЧЕТ НЕУПРУГИХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ

И. А. Баранов

В середине 60-х годов в Радиевом институте (РИ) появился ^{252}Cf , и было обнаружено, что в вакуумных установках этот спонтанно-делящийся изотоп оставляет следы: один осколок деления (ОД) может выбивать из слоев калифорния до 10^3 - 10^4 атомов калифорния. К этому времени уже появилась теория Зигмунда, которая позволяла надежно оценивать коэффициенты распыления (S) вещества с поверхности ионами за счет каскадов упругих столкновений. Полученные в Радиевом институте значения S на 3-4 порядка были больше расчетных. Такой же эффект в 1956 г. наблюдался в ИТЭФ Б. Эршлером и Ф. Лаптевой при делении ^{235}U и ^{239}Pu в слоях, облученных тепловыми нейтронами в реакторе. Измерения энергетических зависимостей S тонких слоев окислов ^{241}Am и ^{238}Pu многозарядными ионами (МЗИ) - ОД ^{252}Cf показали, что распыление атомов Am и Pu происходит не за счет упругих столкновений, а за счет потери энергии МЗИ на ионизацию атомов мишеней у поверхности (1971-1974 гг.). В этих работах ИТЭФ и РИ впервые было обнаружено и доказано существование неупругого (за счет электронных процессов) распыления веществ ионами, а сами работы дали начало целому направлению исследований.

Оно интенсивно развивается во многих странах и сейчас, но, в основном, с диэлектриками, так как считалось, что металлы и полупроводники за счет электронных процессов ионами не распыляются и не десорбируются. Однако в Радиевом институте в 1976-1983 гг. было установлено, что, если металлы или полупроводники состоят из блоков-зерен с размерами < 20 нм, то такие ультрадисперсные слои распыляются МЗИ за счет неупругих взаимодействий. При этом коэффициент распыления достигает значений 10^3 - 10^4 ат./ион.

В дальнейшем в Радиевом институте изучались основные интегральные и дифференциальные характеристики распыления металлов (золото) и полупроводников (окислы урана и др. актинидов) МЗИ-ОД ^{252}Cf . Было показано, что распыление золота или UO_2 происходит путем десорбции блоков-островков в целом виде, т. е. с массами до $5 \cdot 10^7$ а.е.м. и размерами до 15-20 нм. Для регистрации таких тяжелых ионов нельзя было использовать вторичную электронную эмиссию. Поэтому на специально разработанном масс-спектрографе с использованием коллекторной и нейтронно-активационной методик были измерены спектры масс частиц золота, выбиваемых ОД из островковых мишеней золота. Было показано, что большая часть ионов золота имела значения m/q 10^5 - 10^7 а.е.м./е и размеры 7-10 нм, т. е. примерно такие же, как островки золота на мишени. Такие ионы были названы супертяжелыми кластерными ионами (СТКИ), так как по массе они на 1-2 порядка больше, чем массы кластеров, получаемых с помощью различных методов конденсации в газовой фазе. Этот кластерный макроэффект от одиночного МЗИ был подтвержден в 1996 г. в Институте ядерной физики при Техническом университете (Дармштадт, Германия) К. Вином на двойном масс-спектрометре по времени пролета с использованием конвертора и вторичной ионной эмиссии легких ионов.

В настоящее время исследования проводятся совместно с группой К. Вина (Дармштадт) и К. Реймана (Уппсала) в нескольких новых направлениях:

- изучаются характеристики самих СТКИ - первичная энергия, заряд и т. д.;
- под воздействием СТКИ изучаются подпороговая электронная эмиссия, вторичная ионная эмиссия и повреждения поверхности.

В Радиевом институте разрабатывается источник СТКИ с системой ускорения, фокусировки и фильтрации легких ионов и кластеров, снабженный безопасным источником ОД - ^{252}Cf собственной разработки.

В исследованиях представленного направления на разных этапах принимали участие: И. А. Баранов (руководитель работ), А. С. Кривохатский, В. В. Обнорский, Б. М. Александров, Н. В. Бабаджанянц, С. О. Цепелевич, А. К. Новиков и др.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДЕЛЕНИЯ АТОМНЫХ ЯДЕР

В. А. Рубченя, С. Г. Явшиц

Теоретические исследования процессов перестройки атомных ядер, как спонтанных, так и индуцированных пучками налетающих частиц, начались в Радиовом институте еще в 20-х - 30-х годах и продолжают до настоящего времени. Основные направления исследований связаны с изучением: 1) собственно механизма деления ядер (спонтанного и вынужденного), и 2) других ядерных реакций - спонтанной и вынужденной фрагментации ядер, тройного деления, реакций с тяжелыми ионами и т. п.

Изучение деления атомных ядер дает нам уникальную возможность исследовать эффекты кластеризации в тяжелых ядрах. Такие работы в теоретической лаборатории ведутся с начала 80-х годов. Особую роль при формировании кластеров в делении играет конечная стадия процесса вблизи точки разрыва. Если на ранних стадиях механизм формирования осколков управляется гидродинамическими и оболочечными свойствами ядра, то вблизи точки разрыва в наблюдаемое распределение масс осколков вносят вклад процессы обмена нуклонами между осколками. Такое динамическое рассмотрение формирования массовых распределений продуктов деления основано на особой стабильности дважды магического ядра-осколка, приводящей к градиенту химических потенциалов в объеме осколочной системы и появлению потоков массы от осколка к осколку.

Широкий спектр масс легких продуктов деления наблюдается при делении, сопровождаемом вылетом легких заряженных частиц или тройном делении. Тройное деление связано с формированием вблизи точки разрыва тройной ядерной системы (ТЯС), представляющей собой систему двух осколков деления и легкого ядра между ними. В рамках динамического квазиклассического подхода формирование ТЯС может быть связано с появлением вблизи точки разрыва двух независимых разрывов шейки. Развитие такого подхода и учет динамических эффектов обмена нуклонами в ТЯС позволили описать как вероятность тройного деления, так и массовые и зарядовые распределения легких ядер (формула Рубчени - Явшица).

Среди актуальных задач физики деления ядер важное место занимает изучение условий движения делящегося ядра вблизи точки разрыва. Более частный случай, а именно динамика конечной стадии тройного деления, был подвергнут серьезному анализу в лаборатории теоретической ядерной физики Радиового института. В этих работах информация о конфигурации ядерной системы и ее динамические характеристики определялись из траекторных расчетов тройного деления, основанных на современных представлениях о механизме взаимодействия ядер. В процессе работы был разработан новый подход к траекторным расчетам тройного деления и создан пакет программ решения задачи разлета трех тел. Развитая модель включает в себя учет конечных размеров ядер, диффузности и деформации их поверхности, учет ядерной и кулоновской части потенциала взаимодействия для данных ядер, учет диссипативных сил в виде сил трения относительного движения ядер. Результаты исследования конфигурации ТЯС, ее динамических характеристик вблизи точки разрыва, кинематически полный анализ разлета ТЯС показали, что начальная конфигурация ТЯС является достаточно компактной, образование ее происходит при среднем расстоянии между центрами осколков 20-21 Ферми. Начальная кинетическая энергия осколков имеет порядок 5-7 МэВ, что указывает на значительную вязкость процесса спуска делящегося ядра с седловой

точки. Ядерные и диссипативные силы вносят существенный вклад в движение легкой заряженной частицы (ЛЗЧ) на начальных участках траектории, задерживая частицу в межосколочной области на времена порядка 10^{-21} секунды. Показано, что конфигурация ТЯС, определяемая в традиционных кулоновских траекторных расчетах, является более поздней стадией разлета тройной ядерной системы. В рамках предлагаемого подхода получено удачное описание кинетических энергии испускаемых ЛЗЧ, и тем самым получены надежные предсказания кинетических энергий труднорегируемых ЛЗЧ. Развита модель и полученные результаты позволили объяснить явление полярной эмиссии ЛЗЧ в тройном делении как результат процесса ядерного орбитирования (баланса ядерных и кулоновских сил при движении ЛЗЧ на начальных участках траекторий) частиц из межосколочной области. Важную роль в механизме полярной эмиссии играют диссипативные силы трения, способствующие сохранению баланса между притягивающими ядерными и отталкивающими кулоновскими силами, и тем самым способствующие выходу частиц в полярную область. Анализ вклада диссипативного процесса в энергию возбуждения осколков показал, что величина энергии диссипации при движении ядер может достигать 10 МэВ, что несколько изменяет представления о распределении энергии возбуждения в ТЯС непосредственно после разрыва делящегося ядра.

Ценную информацию о процессе перестройки ядерной материи можно получить, изучая эмиссию ЛЗЧ из области перекрытия ядер в реакциях столкновения тяжелых ионов. Явление тройного деления напоминает данный процесс и может рассматриваться как низкоэнергетический предел общего механизма трехтельной фрагментации составного ядра, или двойной ядерной системы (ДЯС). В работах сотрудников лаборатории был предложен новый механизм фрагментации области перекрытия ядер, составляющих ДЯС. Были произведены расчеты относительных выходов "шеечных" альфа-частиц для широкого набора реакций. Расчеты вероятности трехтельной фрагментации ДЯС в сочетании с экспериментальными данными об эмиссии "шеечных" ЛЗЧ позволили получить информацию о времени жизни двойной ядерной системы в глубоко неупругих реакциях с тяжелыми ионами.

Открытие явления спонтанного испускания ядер углерода вначале из изотопов радия, а затем и других ядер, поставило вопрос о механизме нового явления. Начиная с середины 80-х годов, в лаборатории разрабатывалась модель спонтанного двухтельного распада (f -распада), основанная на представлении о промежуточном между спонтанным делением и α -распадом механизме процесса. Если процесс спонтанного деления целиком определяется свойствами коллективного ядерного движения большой амплитуды, то механизм f -распада связывался нами с флуктуациями формы ядра сравнительно малой амплитуды. Рассмотрение такого промежуточного механизма привело к построению модели f -распада, которая затем была обобщена и для описания двухтельного распада с испусканием фрагментов из возбужденных ядерных состояний.

Теоретическая ядерная физика в значительной мере представляет собой набор феноменологических моделей (таких, например, как оболочечная модель ядра, или оптическая модель ядерных реакций), которые "хорошо работают" в тех областях, где имеется достаточное количество экспериментальных данных, позволяющих определить все (как правило, весьма многочисленные) феноменологические параметры, неизбежно входящие в эти модели. Однако для прогнозирования ядерных данных в тех областях, где проведение эксперимента затруднено или практически невозможно (например, в реакторных задачах, связанных с экзотическими продуктами деления, или в некоторых задачах астрофизики), необходима разработка моделей, базирующихся на принципах более фундаментальной теории. Именно с такой целью с конца 70-х годов проводились исследования А. В. Позднякова. Началом этих работ было построение изовекторной части оптического потенциала для взаимодействия нуклонов с ядрами. Исходя из нуклон-нуклонных потенциалов модели однобозонного обмена (ОВЕР), А. В. Поздняков получил величину и энергетическую зависимость изовекторной компоненты оптического потенциала, что позволило точно рассчитать сечения упругого рассеяния и полного поглощения нуклонов для ядер, далеко отстоящих от дорожки стабиль-

ности (в частности, для многих продуктов деления). Развивая и уточняя метод, основанный на применении потенциалов ОВЕР, А. В. Поздняков затем рассчитал изоскалярную часть оптического нуклонного потенциала, что позволило проводить полные вычисления нейтронных сечений, и далее сумел построить мезонную теорию эффективных сил, дающую корректные значения для величин энергии связи и равновесной плотности ядерной материи.

Начиная с 1979 г. в лаборатории прикладной теоретической ядерной физики проводились исследования механизма разрядки возбужденных атомных ядер; в частности, значительное внимание было уделено теоретическому изучению механизма эмиссии мгновенных нейтронов при спонтанном и низкоэнергетическом делении актинидных ядер ввиду как научного, так и существенного прикладного значения этого процесса. В силу широко обсуждавшегося в то время вопроса о стандарте нейтронного спектра, центр тяжести этих исследований лаборатории пришлось на теоретическое изучение характеристик мгновенных нейтронов спонтанного деления ^{252}Cf . Исследования характеристик мгновенных нейтронов деления (МНД), т. е. энергетических спектров, распределений множественности, угловых распределений МНД, в лаборатории велись на основе использования статистической модели Хаузера-Фешбаха, представляющей собой наиболее полный подход к описанию процесса эмиссии частиц из возбужденных ядер. В ходе этих работ в лаборатории был разработан статистический метод расчета характеристик МНД и создан комплекс необходимых компьютерных программ. С их помощью были рассчитаны интегральные спектры и распределения множественности спонтанного деления ^{252}Cf и других нуклидов, в том числе деления ^{235}U тепловыми нейтронами в широкой области кинетической энергии нейтронов. Результаты этих расчетов хорошо описывали прецизионно измеренный к этому времени интегральный спектр нейтронов спонтанного деления ^{252}Cf и позволили оценить вклад в этот спектр так называемых "разделительных" нейтронов, чем был решен вопрос о преимущественно равновесно-статистическом характере эмиссии нейтронов спонтанного деления ^{252}Cf . Детальные расчеты энергетических спектров и выполненные впервые в лаборатории подробные статистические расчеты распределений множественности МНД из индивидуальных осколков деления ^{252}Cf позволили снять обсуждавшийся тогда в ряде публикаций вопрос о "стандартности" формы дифференциальных спектров МНД из осколков. С целью уточнения разработанного в лаборатории метода расчета характеристик МНД было проведено теоретическое исследование угловой анизотропии эмиссии мгновенных нейтронов из осколочного ядра в системе центра инерции осколка. Было показано, что часто использовавшаяся при проведении оценок спектра МНД ^{252}Cf эмпирическая аппроксимация коэффициента анизотропии являлась завышенной и не учитывала зависимости анизотропии от кинетической энергии испущенных нейтронов и от характеристик возбужденных осколков. Было показано также, что последовательный учет анизотропии эмиссии нейтронов из осколков в расчете интегрального спектра МНД спонтанного деления ^{252}Cf приводит к улучшению согласия его с экспериментальным спектром в низкоэнергетической области. Результаты расчетов интегрального спектра мгновенных нейтронов спонтанного деления ^{252}Cf были переданы в МАГАТЭ для использования при выработке стандарта нейтронного спектра.

В 1976 г. в США С. Е. Кунин с сотрудниками начали первые компьютерные эксперименты по столкновениям ядерных слоев с использованием метода Хартри - Фока с временной зависимостью (TDHF) с учетом эффективных сил Скирма. Такие исследования послужили хорошей основой для исследования динамики больших амплитуд, проявляющейся в делении и особенно ярко - в столкновениях тяжелых ионов. Одновременно с этим в Радиовом институте были начаты поиски теоретического подхода для исследования динамики больших амплитуд, который смог бы оказаться менее трудоемким и менее дорогим, но мог быть связан непосредственно с уравнением состояния ядерного вещества. В результате был найден эффективный метод описания взаимодействия тяжелых ионов в рамках газодинамического подхода. В отличие от традиционных методов, использующих уравнения ядерной гидродинамики для описания столкновений тяжелых ионов с локально-равновесным уравнением состояния, было предложено использовать неравновесное уравнение состояния, соответ-

ствующее деформированной ферми-поверхности. При низких энергиях длина свободного пробега нуклонов сравнима с размерами системы, и было обнаружено близкое сходство с результатами расчетов по методу TDHF. В рамках этого подхода удалось объяснить "высокоэнергетические хвосты" испускаемых нуклонов, проявляющиеся в реакциях тяжелых ионов под малыми углами наблюдения, которые были обнаружены в экспериментах. Естественным развитием такого гидродинамического подхода было проведенное в работе объединение "бесстолкновительной" гидродинамики и традиционной локально-равновесной гидродинамики. Гидродинамическое рассмотрение позволяет упростить расчеты и повысить их точность по сравнению с трудоемкими расчетными моделями (молекулярная динамика, динамическое уравнение Власова), а также выделить характерные особенности тяжелоионных столкновений. Полученное уравнение состояния оказывается зависящим от энергии столкновения и учитывает переход с возрастанием энергии от первоначально неравновесного состояния к локально-равновесному. В процессе расчета мы рассматриваем стадии сжатия, разрежения и разлета по достижении расширяющейся системой критической плотности. По найденным из решения уравнений полям коллективных скоростей и температур находятся двойные дифференциальные сечения образующихся частиц. Таким образом, без введения подгоночных параметров было дано описание экспериментальных двойных дифференциальных сечений, испускаемых под разными углами нуклонов при столкновениях тяжелых ионов в диапазоне энергий 20-100 МэВ/нуклон. Гидродинамическая модель с неравновесным уравнением состояния использовалась для описания двойных дифференциальных сечений образования α -частиц и других фрагментов. Гидродинамическая модель с учетом термализации и образования области локального нагрева позволяет описать экспериментальные двойные дифференциальные сечения рождения подпороговых π -мезонов - одного из ярких проявлений коллективной динамики ядро-ядерных столкновений. В ходе исследований (А. Т. Дьяченко) была сформулирована трехжидкостная гидродинамическая модель, где вопрос о термализации и выборе уравнения состояния решается иначе. Взаимопроникающие жидкости ядра-снаряда и ядра-мишени приводят к образованию третьей жидкости, находящейся в состоянии локального равновесия. Гидродинамические приближения оказались полезными и при формулировке коллективного механизма усиления подбарьерного слияния тяжелых ионов, что может оказаться существенным для проблемы синтеза сверхтяжелых элементов.

До недавнего времени при анализе процесса деления возбужденных ядер использовалась стандартная статистическая модель, в которой делительная ширина рассчитывалась согласно выражению Бора-Уиллера. Первая попытка принять во внимание динамику коллективного движения с большой амплитудой была сделана вскоре после основополагающей работы Бора-Уиллера в работе Крамерса. Однако поправка Крамерса долгое время не учитывалась в статистических моделях, поскольку имеющиеся экспериментальные данные можно было описать варьированием параметров стандартной модели. Важная роль динамических эффектов в делении нагретых вращающихся ядер была продемонстрирована в реакции слияния-деления между тяжелыми ионами. Для описания динамики деления нагретых вращающихся ядер в последнее время нами развивалась версия статистической модели с включением зависящих от времени парциальных ширин распада составных ядер и учетом основных динамических эффектов:

- задержка во времени формирования стационарного потока вероятности через барьер деления;
- влияние диссипативных эффектов на поток вероятности;
- эмиссия частиц и γ -квантов на стадии спуска с седловой точки;
- релаксация осколков деления после разрыва.

На основе разработанной модели процесса слияния-деления при ядро-ядерных столкновениях создана программа расчета характеристик реакции. Сравнение рассчитанных энергетических спектров и множественности частиц (нейтронов, протонов, α -частиц), а также γ -квантов с экспериментальными величинами позволяет оценить динамические параметры ядер и характерные времена процесса деления. Сделан вывод о зависимости приведенного

коэффициента трения от энергии возбуждения в процессе каскадного испарения частиц вида $\gamma \propto T^2$.

Перечисленные работы представляют далеко не полный перечень направлений теоретических исследований лаборатории. Здесь можно упомянуть и работы по изучению внутри- и межъядерного переноса нуклонов при взаимодействии высокоэнергетических пучков с ядрами, исследование свойств парных корреляций в ядрах и атомных кластерах, изучение динамических и статических эффектов, проявляющихся в зарядовых радиусах ядер, изучение деления гиперядер и многие другие темы, работа по которым еще далека от завершения.

Л и т е р а т у р а

1. Rubchenya V. A., Yavshits S. G. // *Z. Phys. A*, 1988, v. A239, p. 217.
2. Рошин А. С., Рубченя В. А., Явшиц С. Г. // *ЯФ*, 1994, т. 57, вып. 6, с. 974.
3. Rubchenya V. A., Yavshits S. G. Mechanism of the Spontaneous and Induced Two-Body Fragmentation of Heavy Nuclei. In: *Clustering Phenomena in Atoms and Nuclei*, Springer Series in Nuclear and Particle Physics, eds. M. Brenner, T. Lonnroth, F. B. Malik, Springer-Verlag, 1992, p. 250.
4. Герасименко Б. Ф., Рубченя В. А. // *Бюллетень Центра данных ЛИЯФ*. Л.: 1986, вып. 12, с. 3-29.
5. D'yachenko A. T. // *J. Moscow Phys. Soc.*, 1993, v. 3, p. 327.
6. Kuznetsov A. V., Rubchenya V. A., Vakhtin D. N. et al. // *Z. Phys. A*, 1996, v. A354, p. 287.

НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ ДОЗИМЕТРИИ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ

В. В. Смирнов

С 1952 г. в Радиовом институте ведутся исследования в области фундаментальных научных проблем дозиметрии ионизирующих излучений. Эти работы были начаты и велись под руководством К. К. Аглинцева - крупного ученого в области дозиметрии и метрологии ионизирующих излучений, основателя отечественной научной и прикладной дозиметрии.

На основе современных ядерно-физических методов исследовались вопросы, связанные с теорией ионизации в полости и с количественными характеристиками механизма регистрации гамма-излучения с помощью ионизационных камер, счетных трубок и фотопленок. Исследования пространственных и энергетических распределений вторичных электронов, выбиваемых из различных материалов гамма-излучением ^{60}Co и ^{137}Cs , позволили количественно охарактеризовать эффективность разных детекторов гамма-излучения, проследить процесс формирования электронного равновесия в стенках детекторов и сделать выводы относительно применимости принципа Брегга-Грея к измерениям поглощенной дозы излучения наперстковыми ионизационными камерами.

В 1955 г. впервые были получены энергетические и угловые распределения вторичных электронов, выбитых из воздухоэквивалентной мишени гамма-излучением кобальта-60 под разными углами (рис. 1). Эти спектры получили международное признание и вошли в научную и учебную литературу.

Теоретические и экспериментальные исследования фотографического действия рентгеновского и гамма-излучений, включающие определение чувствительности фотоматериалов к моноэнергетическим электронам разной энергии, позволили получить результаты, важные для фотодозиметрии и радиографии. Экспериментально полученная зависимость чувствительности системы "фотопленка-кассета" от энергии гамма-излучения при использовании разных материалов кассет приведена на рис. 2.

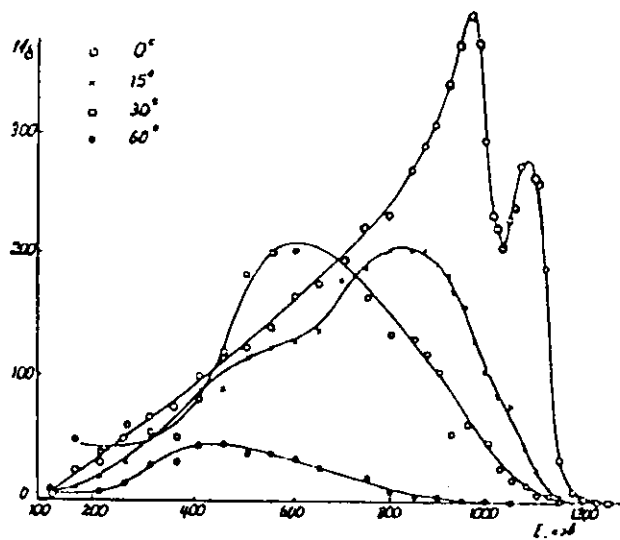


Рис. 1. Спектр вторичных электронов, выбитых из воздухоразвивалентной мишени гамма-лучами кобальта-60 под углами 0, 15, 30, 60°

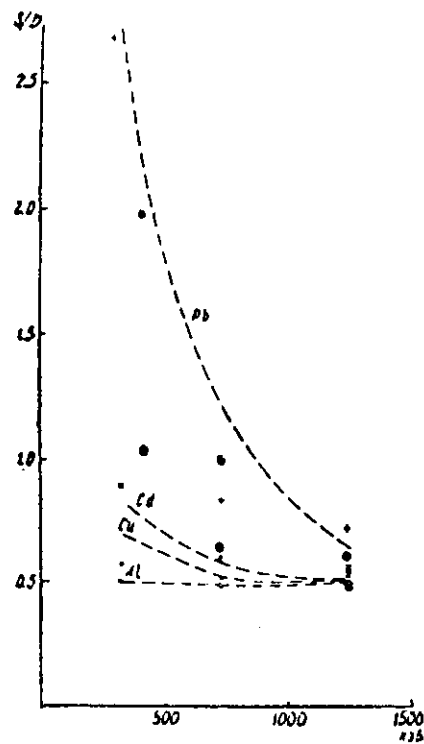


Рис. 2. Зависимость чувствительности системы "фотопленка - кассета" (почернение/доза) от энергии гамма-излучения для разных материалов кассет

С целью уточнения характеристик процесса взаимодействия гамма-излучения с веществом с помощью разработанной спектрометрической методики детально изучались угловые распределения фотоэлектронов, испускаемых в элементарном акте взаимодействия в зависимости от атомного номера материалов. Были получены значения сечений фотоэффекта и установлено, что, вопреки теории Заутера, число электронов, испущенных вперед, не равно нулю. Экспериментальные кривые углового распределения фотоэлектронов, выбитых гамма-излучением кобальта-60 и золота-198 из висмутовой мишени, представлены на рис. 3.

В области дозиметрии бета-излучения были изучены формы действующих электронных спектров в полях различных бета-излучателей и установлен простой и важный эмпирический закон постоянства значения поглощенной дозы на одну бета-частицу для бета-спектра данной граничной энергии. Эти исследования позволили разработать важную для медицинской радиологии систему облучения электронами и градуировки бета-дозиметров. Зависимость значения поглощенной дозы на одну бета-частицу от максимальной энергии бета-частицы представлена на рис. 4.

Дальнейшие исследования в области научных основ дозиметрии квантового ионизирующего излучения проводились под руководством В. В. Смирнова. Начатые в 1952 г. исследования вторичных электронов получили дальнейшее развитие. Было осуществлено комплексное изучение всех макроскопических характеристик полей электронного излучения (пространственно-энергетические распределения, абсолютные выходы), возникающих в различных материалах под действием моноэнергетических фотонов с энергиями от 30 кэВ до 3 МэВ.

В развитие теории ионизации в полости проводились исследования с целью учета вклада, вносимого в ионизацию вторичными электронами, обратно-рассеянными стенками полости, изучались характеристики процесса обратного рассеяния электронов различной энергии от материалов с разными атомными номерами. С помощью спектрометрических методов определялись спектры и угловые распределения обратно-рассеянных электронов в области энергий от 4 кэВ до 1,8 МэВ и находились значения коэффициентов обратного рассеяния электронов от разных материалов для различных энергий и направлений вылета.

С целью определения основных закономерностей формирования полей вторичного электронного излучения были разработаны метод и аппаратура для электростатического абсолютного измерения потоков вторичных электронов с использованием техники регистрации малых (10^{-16} - 10^{-12} А) постоянных токов. Применение этого электростатического метода сняло ограничение по минимальной энергии исследуемых вторичных электронов, присущее измерениям на магнитных спектрометрах. Для реализации этого метода была создана специальная высоковакуумная экспериментальная установка, которая позволяла определять выходы быстрых и истинно-вторичных электронов из различных материалов, облучаемых коллимированным пучком фотонов с энергиями от 0,03 до 3 МэВ. Внешний вид установки представлен на рис. 5. Полученные экспериментальные данные о медленных истинно-вторичных электронах, выбиваемых гамма-излучением из металлических мишеней, позволили, помимо чисто количественных характеристик, установить закономерности связи между выходами медленных и быстрых вторичных электронов. Было показано, что их отношение является линейной функцией средних потерь энергии быстрых электронов и определяется эмиссионной способностью материала мишени.

Полученные экспериментальные данные и проведенный анализ механизмов формирования полей быстрых и медленных вторичных электронов позволили перейти к количественному решению ряда сложных задач радиометрии и дозиметрии гамма- и рентгеновского излучений, к созданию новых и оптимизации существующих детекторов фотонного излучения. Был разработан и создан принципиально новый детектор гамма-излучения прямой зарядки, обладающий малым ходом с жесткостью в широком диапазоне энергий и потоков фотонов. Были заложены основы для создания высокоэффективных конвертеров гамма-излучения.

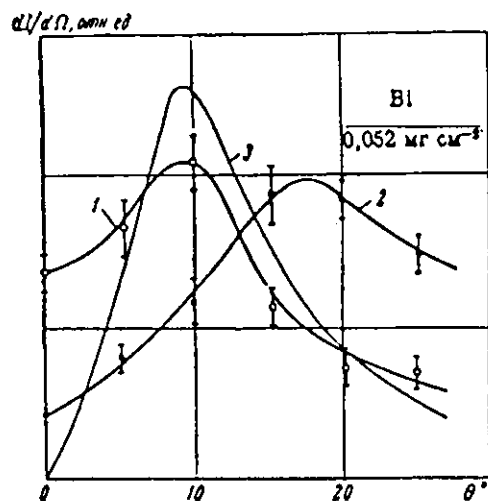


Рис. 3. Угловые распределения фотоэлектронов, выбитых гамма-излучением кобальта-60 и золота-198 из висмутовой мишени толщиной 0,05 мкм:

1 - гамма-излучение ^{60}Co ; 2 - гамма- излучение ^{198}Au ; 3 - распределение по Заутеру

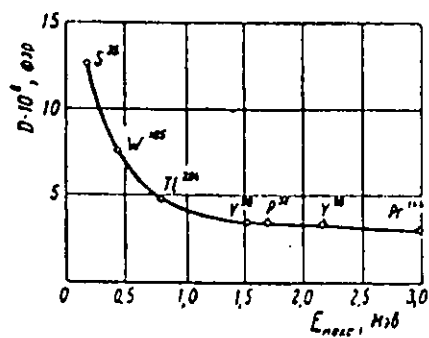


Рис. 4. Зависимость поглощенной дозы на одну бета-частицу от максимальной энергии бета-спектра

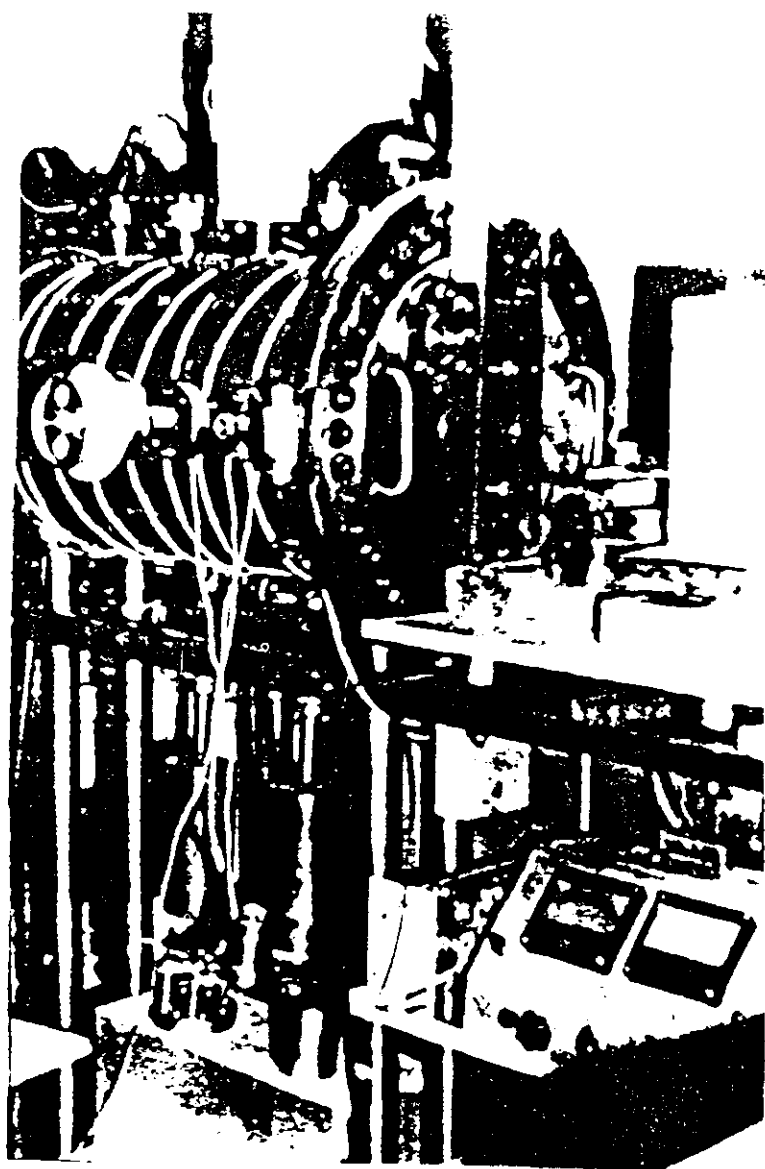


Рис. 5. Общий вид электромеханической высоковакуумной установки

Успешно развивалось направление, связанное с использованием микроканальных пластин (МКП) как в качестве эффективных конвертеров фотонного излучения, так и в качестве базового элемента устройства регистрации заряженных частиц и фотонов. Были созданы специальные установки, на которых исследовалась эффективность регистрации шевронных сборок МКП для различных видов ионизирующих излучений, оптимизировались их рабочие параметры и отрабатывались конструкции узлов регистрации. Одновременно проводилось исследование влияния магнитных полей на характеристики вторичных электронных умножителей на основе МКП и разрабатывались устройства регистрации гамма-излучения с использованием эффективных конвертеров. Впервые была показана возможность достижения высокой эффективности регистрации жесткого фотонного излучения с помощью конвертера на сцинтилляционном кристалле BaF_2 в шевронной сборке МКП. В результате был предложен новый способ регистрации заряженных частиц, который позволяет по амплитуде выходного сигнала разделять частицы с различной ионизирующей способностью.

Для широкого рассмотрения вопросов, связанных со вторичным электронным излучением и разработкой эффективных детекторов гамма-излучения и частиц, в Радиовом институте было проведено два всесоюзных совещания, 29-31 октября 1975 г. и 6-8 декабря 1983 г. Программы совещаний охватывали широкий круг вопросов, связанных с прохождением ионизирующих излучений через вещество, характеристиками полей вторичных электронов, радиационными эффектами на границе раздела сред, вторичными эмиссионными детекторами ядерных излучений и другими задачами. Труды двух совещаний были изданы под редакцией В. В. Смирнова и М. Я. Грудского, причем труды первого совещания по вторичным электронам были переведены на английский язык и изданы в США в 1979 г. В 1986 г. вышла в свет монография "Вторичное электронное излучение из твердых тел под действием гамма-квантов" (авторы А. Ф. Аккерман, М. Я. Грудский, В. В. Смирнов, М.: Энергоатомиздат). Для развития, поддержки и согласования работ в области фундаментальных проблем дозиметрии и исследований прохождения ионизирующих излучений через вещество был создан Межведомственный координационный совет, в состав которого вошли крупные ученые — специалисты в указанной области.

В 1991-1992 гг. проводились исследования переноса ионизирующих излучений через вещество применительно к фундаментальным проблемам дозиметрии. Методом Монте-Карло проведены расчеты глубинных распределений переданной энергии в плоских полубесконечных слоях алюминия, железа и свинца для случая падения по нормали на их поверхность широкого мононаправленного потока фотонов с энергиями 15, 10, 5, 1,25 и 0,662 МэВ. Результаты сопоставлены с измерениями выходов истинно-вторичных электронов под действием гамма-излучения источников на основе цезия-137 и золота-198. Подтверждена справедливость концепции о переходном равновесии для заряженных частиц, что позволяет определять поглощенную дозу фотонного излучения по значению кермы, расходуемой заряженными частицами в неупругих столкновениях. Методом Монте-Карло разработаны оригинальные программы расчета распределений энерговыделения и заряда в многослойных плоских слоях вещества, облучаемого мононаправленным или изотропным потоками фотонов и/или электронов с произвольным энергетическим спектром. С помощью линейного координатного детектора проводились измерения профилей диссипации энергии в газе под действием рентгеновского излучения с энергией 4-20 кэВ и определялся раздельный вклад фото- и оже-электронов в форму профиля диссипации энергии. Было показано, что зависимость ширины профиля от энергии излучения имеет минимум, связанный с разлетом вторичных электронов (фото- и оже-) в противоположных направлениях. Этот минимум расположен в области 7-8 кэВ для газовой смеси детектора на основе ксенона и в области 5-6 кэВ для смеси на основе аргона.

Проведенный в 1993-1994 гг. комплекс исследований переноса бета-излучения в веществе и его спектрометрия в целях измерения дозовых характеристик позволили научно обосновать и разработать совместные методы и средства дозиметрии бета-излучения.

Дальнейшие исследования в области вторичного электронного излучения были продолжены в направлении изучения конверсионных электронов, обусловленных резонансным поглощением в веществе мягкого фотонного излучения. При выходе конверсионных электронов из облучаемого вещества они претерпевают рассеяние и наложение фото- и комптоновских электронов. Все эти искажающие факторы должны быть учтены как расчетным путем, так и сопоставлением с экспериментом. Знание выходов, пространственного и энергетического распределений конверсионных электронов, сопровождающих резонансное поглощение фотонного излучения, имеет важное практическое значение для избирательной по глубине мессбауэровской спектроскопии, применяемой для исследования химических свойств материалов.

Применение этого метода для определения химического и структурного состояния золота в геологической породе с использованием резонансной линии 77,3 кэВ радионуклида ртуть-197 или платина-197 позволяет оценить рентабельность выделения золота из породы и разработки данного месторождения.

Помимо работ в области фундаментальных проблем дозиметрии, в отделе ядерно-физических исследований Радиевого института (начальник отдела - В. В. Смирнов) в период с 1964 г. по настоящее время проводится широкий комплекс прикладных исследований, имеющих важное практическое и оборонное значение. Особо следует отметить следующие направления:

- разработка, изготовление и внедрение в серийное производство изотопных источников мягкого гамма-излучения на основе гадолиния-153 и самария-145, обладающих высокой радиохимической чистотой и высокой удельной активностью препарата (предназначены для задач ядерной геофизики и медицины), а также металлических источников бета-излучения на основе технеция-99 и никеля-63 для контактной радиографии и градуировки бета-дозиметров;

- разработка и применение автордиографического метода усиления фотоизображения и бета-радиографического метода для задач криминалистики и экспертизы документов;

- проведение комплекса экспериментальных и натурных исследований по обоснованию применения технеция-99 в качестве радиоактивной защиты от обрастания плавсредств, гидросооружений и аппаратуры;

- проведение исследований, разработка методов и аппаратуры контроля радиоактивности объектов окружающей среды (почвы, воды, воздуха), включая определения радиохимического и изотопного состава плутония, урана и других радиоактивных веществ;

- разработка высокочувствительных методов рентгенофлуоресцентного анализа материалов и объектов окружающей среды на содержание в них тяжелых металлов;

- проведение исследований и разработка методов и аппаратуры для поиска и обнаружения взрывчатых веществ ядерно-физическими методами;

- разработка приборов для регистрации радона и долгоживущих продуктов его распада, а также методов метрологического обеспечения этих измерений на базе "радоновой комнаты" в подземной низкофоновой лаборатории.

Основными исполнителями работ в области научных основ дозиметрии являлись В. П. Касаткин, В. В. Митрофанов, В. П. Виноградов, Е. Н. Тарасов, А. А. Римский-Корсаков, М. Н. Чубаров, А. В. Малышенков, В. А. Муштатный, В. В. Андреев, М. Я. Грудский, Н. Н. Ролдугин, Ю. В. Мортиков, К. Н. Шалотенко, Ю. В. Хольнов, В. А. Гуссар, С. А. Кумзеров, В. Б. Маслова, А. Г. Лебедев, А. С. Серебряков.

Целый ряд указанных научных и прикладных исследований и разработок проводился в тесном сотрудничестве с крупными научно-исследовательскими и промышленными предприятиями, что способствовало их развитию и внедрению результатов в практику.

ЯДЕРНЫЕ ДАННЫЕ ПРИ НИЗКИХ ЭНЕРГИЯХ

Л. В. Драпчинский

Систематические исследования, связанные с измерениями ядерных данных, были начаты в Радиевом институте в 1972 г., когда Министерство выразило готовность финансировать эти работы. К тому времени за рубежом, прежде всего в США, Франции и Англии, такого рода исследования получили значительное развитие. Был выполнен большой объем работ по измерениям ядерных данных, проводилась систематизация полученных результатов и их оценка. Конечной целью всех работ было создание базы ядерных данных, полученных с максимально возможной точностью, для повышения точности проектирования ядерно-физических установок. Это осуществляли специально созданные Центры ядерных данных. Работы поддерживались Международным агентством по атомной энергии (МАГАТЭ), где активно работал Международный комитет по ядерным данным (МКЯД). Прецизионные измерения ядерных данных весьма трудоемки и дорогостоящи. Западные страны не хотели просто передавать СССР ядерные данные из своих библиотек. Они соглашались только на обмен, пусть неравноценный по объему, но именно обмен ядерными данными.

Для организации и координации работ в СССР при Научно-техническом управлении Министерства была создана Комиссия по ядерным данным, в которой Радиевый институт представляли К. А. Петржак и С. С. Коваленко. Головной организацией был определен Физико-энергетический институт (г. Обнинск), при котором начали создавать Центр ядерных данных.

На одном из первых заседаний Комиссии, в котором участвовали К. А. Петржак, Ю. А. Немилов и С. С. Коваленко, были определены направления работ и распределены между участвующими институтами и организациями. На Радиевый институт Приказом министра было возложено проведение абсолютных измерений ядерных данных - одного из наиболее сложных видов измерений.

При постановке работ в институте исходили из накопленного многолетнего опыта фундаментальных исследований в области физики деления и нейтронной физики. В институте были освоены и развиты многочисленные методы регистрации и измерений угловых и энергетических характеристик излучений различного вида, созданы экспериментальные установки с детекторами различных типов для проведения многопараметровых измерений. Был накоплен определенный опыт радиохимической очистки исходных препаратов, а также изготовления источников и мишеней делящихся веществ. Это позволило достаточно быстро разработать необходимые методики и приступить к проведению измерений ядерных данных.

Основные работы были развернуты в следующих направлениях:

1. Абсолютные измерения сечений деления важнейших изотопов нейтронами различной энергии.
2. Абсолютные измерения сечений деления важнейших нуклидов, усредненных по спектру нейтронов деления ^{252}Cf .
3. Измерения среднего числа $\langle \nu_p \rangle$ мгновенных нейтронов, испускаемых на акт спонтанного деления ^{252}Cf .
4. Измерения спектров мгновенных нейтронов, испускаемых при делении тяжелых нуклидов (с 1973 г.).
5. Измерения выходов тритонов при тройном делении тяжелых ядер.

Рассмотрим вкратце содержание и результаты, достигнутые в каждом из перечисленных направлений исследований.

1. К началу работ по измерениям сечений деления тяжелых нуклидов нейтронами различной энергии имелся перечень МАГАТЭ с запросами на измерение ядерных данных. Многочисленные запросы касались данных по сечениям деления всех важнейших нуклидов в широком диапазоне энергий нейтронов (до 20 МэВ). Анализ опубликованных работ показал, что результаты малочисленны, получены, в основном, при энергиях нейтронов около 2,6 и 14,6 МэВ, разброс результатов выходит за пределы указанных авторами ошибок измерений.

Учитывая имеющиеся аппаратные возможности, было решено начать работу с абсолютных измерений сечений деления важнейших изотопов урана и плутония нейтронами с энергиями 14,7 и 2,7 МэВ. При этом наиболее сложную задачу в измерениях такого рода - определение числа нейтронов, попадающих на мишень делящегося нуклида, - решить, используя метод коррелированных по времени сопутствующих частиц (МКВСЧ) как наиболее прецизионный. В дальнейшем планировалось продолжить измерения на нейтронах других энергий, используя для получения нейтронов тандем-генератор.

Нейтроны с энергиями 14,7 и 2,7 МэВ получали по реакциям $T(d,n)^4\text{He}$ и $D(d,n)^3\text{He}$ на нейтронном генераторе НГ-150М.

Особой задачей при постановке измерений было изготовление качественных мишеней делящихся нуклидов и прецизионное измерение их характеристик. Мишени должны были изготавливаться из максимально чистых препаратов, желательно мононуклидных, неоднородность толщины слоя по площади мишени не должна была превышать 1-2 %. Поскольку имевшиеся в распоряжении количества веществ, прошедших сепараторную очистку, были минимальны, необходим был метод нанесения, обеспечивающий максимально возможный выход вещества на подложку. С этой целью был выбран и впервые применен метод высокочастотного распыления. Потребовалось разработать и создать специальную распылительную установку. Были изготовлены рабочие мишени ^{235}U , ^{238}U , ^{239}Pu и методами α -счета и α -спектрометрии определены количества ядер на 1 см² мишеней, а также неоднородности толщины слоя по площади мишеней. К 1975 г. были получены первые результаты абсолютных измерений сечений деления для ^{235}U , ^{238}U и ^{239}Pu .

Осенью 1975 г. специалисты Радиевого института обратились к специалистам Технического университета (ТУ) г. Дрездена, ГДР, с предложением начать совместные абсолютные измерения сечений деления важнейших нуклидов нейтронами с энергией в диапазоне 4-20 МэВ с использованием в качестве источника нейтронов тандем-генератора ЭПП-10 в Институте ядерных исследований (Россендорф, ГДР). Предложение было принято с энтузиазмом. Было согласовано, что в качестве начальной стадии измерений специалисты ТУ при консультациях и непосредственном участии специалистов Радиевого института осваивают МКВСЧ и проведут несколько абсолютных измерений сечений деления на нейтронном генераторе. Тем временем будет проводиться подготовка экспериментов на тандем-генераторе. Предполагалось органично использовать опыт специалистов ТУ по работе на тандем-генераторе, программированию, наносекундной электронике, работе с аппаратурой КАМАК и опыт специалистов Радиевого института по измерениям МКВСЧ, изготовлению высококачественных мишеней делящихся веществ (мишенная группа в лаборатории П. И. Федотова, руководимая С. М. Соловьевым), изготовлению кремниевых поверхностно-барьерных полностью обедненных детекторов (типа ΔE) заданной толщины, вплоть до единиц микронов (Е. А. Ганза), по проведению расчетов конечной геометрии эксперимента (В. А. Рубчюна с сотрудниками). Работы со стороны ТУ возглавили Г. Музиоль и Р. Арльт. Общее руководство работами со стороны Радиевого института осуществляли С. С. Коваленко и К. А. Петржак. Непосредственно работами руководили и участвовали в подготовке и проведении сеансов измерений В. И. Шпаков и Л. В. Драпчинский.

Сотрудничество оказалось эффективным и плодотворным, что неоднократно отмечалось Управлением международных связей ГКАЭ. Были созданы детекторы сопутствующих

частиц типа $\Delta E - E$, многослойные ионизационные импульсные токовые камеры делений и измерительные установки для измерений на нейтронном генераторе на нейтронах с энергиями 2,6 и 14,7 МэВ и на тандем-генераторе на нейтронах с энергиями в области 4,8, 8,5 и 18,8 МэВ. Особое внимание было уделено детальному исследованию и анализу погрешностей, выявлению их возможных источников, а также определению фоновых условий измерений и вводимых поправок. Это дало возможность выполнить абсолютные измерения сечений деления ^{235}U , ^{238}U , ^{237}Np , ^{239}Pu нейтронами перечисленных выше энергий с полной погрешностью измерений в пределах 1,1-3,2 % [1, 2].

В рамках совместных работ была разработана методика, создана измерительная установка и проведены абсолютные измерения сечения деления ^{235}U нейтронами с энергией 1,9 МэВ на электростатическом ускорителе ЭГ-5 Радиевого института. В этих измерениях для регистрации сопутствующих частиц был впервые в мировой практике использован магнитный анализатор с позиционно-чувствительным детектором. Необходимо также подчеркнуть, что выбор значений энергий нейтронов в этих измерениях, так же, как и в измерениях на тандем-генераторе, производился в областях энергий, где данные либо отсутствовали, либо расхождение имевшихся данных было максимальным.

К взаимному сожалению, совместные работы были прекращены в 1990 г., на пятнадцатом году сотрудничества, так как после воссоединения Германии в Бонне было принято решение переориентировать Отдел прикладных исследований ТУ на исследования в области атомной физики.

В описанных исследованиях, помимо упомянутых в ходе изложения, принимали участие сотрудники Радиевого института И. Д. Алхазов, О. И. Косточкин, Б. В. Румянцев, В. Н. Кузьмин, В. А. Калинин, В. Н. Душин, П. С. Солошенко.

2. Для абсолютных измерений сечений деления, усредненных по спектру нейтронов спонтанного деления ^{252}Cf , был избран и впервые в мире использован метод, который может рассматриваться как разновидность МКВСЧ. В качестве сопутствующих частиц регистрируются осколки деления ^{252}Cf . Деления измеряемого нуклида регистрируются по совпадениям "осколок деления исследуемого нуклида - осколок деления калифорния". Отличиями от МКВСЧ в его "классическом" варианте являются отсутствие сильной угловой корреляции между осколками деления калифорния и испускаемым нейтроном, а также эмиссия не одного, а $\langle \nu_p \rangle$ мгновенных нейтронов на акт деления калифорния. Поэтому осколки деления регистрируются в геометрии, близкой к 2π , а в формулу для определения сечения деления вводится так называемый геометрический фактор, учитывающий конечную геометрию (геометрические размеры и взаимное расположение источника калифорния и мишени делящегося вещества, рассеяние нейтронов конструкционными материалами подложек и детекторов осколков деления). Расчет геометрического фактора первоначально проводился методами численного интегрирования, а в последующем - методом Монте-Карло. Основными достоинствами избранного метода измерений являются: исключение фона нейтронов, рассеянных стенами и перекрытиями помещения, подавление вклада спонтанного деления при измерениях спонтанноделящихся нуклидов, минимальное количество вводимых поправок.

Геометрия измерений была достаточно простой: слой исследуемого нуклида на тонкой подложке из нержавеющей стали диаметром 24 мм располагался на расстоянии $(3,82+H)$ мм от близкого к точечному источнику калифорния в специальной прецизионно выполненной сборке, содержащей минимальное количество конструкционного материала (H - толщина подложки мишени делящегося вещества). Сборка фиксировалась в двойной ионизационной токовой импульсной камере. Скорости счета делений были малыми, поэтому особое внимание было уделено обеспечению помехозащищенности установки.

С 1972 по 1994 гг. были выполнены абсолютные измерения сечений деления, усредненных по спектру мгновенных нейтронов спонтанного деления ^{252}Cf , для следующих нуклидов: ^{233}U , ^{234}U , ^{235}U , ^{236}U , ^{238}U , ^{237}Np , ^{239}Pu , ^{240}Pu , ^{241}Pu , ^{242}Pu , ^{241}Am , ^{242m}Am , ^{243}Am . Погрешность измерений была в пределах 1,1-2,8 % [3, 4].

Эти исследования проведены под руководством Л. В. Драпчинского сотрудниками: В. М. Адамовым, И. И. Тютюгиным, Л. А. Плескачевским, В. В. Кольцовым, В. А. Тренкиным, О. И. Косточкиным, Г. Ю. Кудрявцевым, А. М. Соколовым, Б. М. Александровым, С. М. Соловьевым, П. С. Солошенковым. Расчеты эффектов конечной геометрии выполнил В. Н. Душин.

3. Для измерения $\langle v \rangle$ ^{252}Cf необходимо определить число делений в источнике ^{252}Cf и нейтронный поток, испускаемый этим источником. В противоположность ситуации во всех других измерениях ядерных данных в Радиевом институте, к прецизионным измерениям среднего числа нейтронов на акт деления ^{252}Cf приступила группа сотрудников, руководимая Э. А. Шляминым, у которой не было опыта ни прецизионного определения скорости счета делений, ни - тем более - потока нейтронов. Начинать пришлось в буквальном смысле с нуля, в то время как уже были известны, по крайней мере, восемь измерений $\langle v \rangle$ ^{252}Cf , выполненных разными авторами с погрешностями менее 1 %. Вместе с тем разброс и расхождение результатов, полученных разными методами, достигали 3 %. В то же время экономически обосновывалась необходимость достижения погрешности измерений менее 0,25 %.

Из известных ко времени начала работ методик была выбрана следующая: измерение числа делений в плоском источнике ^{252}Cf небольшого радиуса (8 мм) производится в камере с кремниевым поверхностно-барьерным детектором в геометрии малого телесного угла; нейтронный поток измеряется методом проточной марганцевой ванны. Такая методика была перспективной для достижения минимальной погрешности результатов.

К 1976 г. в Радиевом институте была создана сферическая марганцевая ванна диаметром 1 м, рабочим раствором в которой служил водный раствор марганца с концентрацией ~28 %. Регистрация наведенной активности ^{56}Mn производилась методом γ - γ совпадений с помощью сцинтилляционных счетчиков с кристаллами NaI(Tl) , расположенными в защите в петлях прокачки. Калибровка проточных счетчиков осуществлялась с помощью абсолютных измерений аликвот введенного в ванну раствора ^{56}Mn на установке $4\pi\beta$ - γ -совпадений. Несмотря на кажущуюся простоту метода марганцевой ванны, при прецизионных абсолютных измерениях потоков нейтронов приходилось определять экспериментально или рассчитывать и вводить целый ряд поправок, позволяющих корректно учесть резонансный захват нейтронов марганцем, поглощение быстрых нейтронов в процессе замедления, утечку нейтронов из объема ванны, поглощение тепловых нейтронов в самом источнике и конструкционных материалах, а также поглощение нейтронов примесями раствора.

Собственно работам по определению $\langle v \rangle$ ^{252}Cf предшествовали длительный период исследования режимов работы ванны и многочисленные калибровки γ - γ детекторов, сличения установки $4\pi\beta$ - γ -совпадений Радиевого института и эталонной установки Института метрологии им. Д. И. Менделеева и, наконец, абсолютные измерения нескольких нейтронных источников в Радиевом институте, Институте метрологии и в Национальной физической лаборатории (Теддингтон, Англия).

В результате измерений было получено значение $\langle v \rangle$ ^{252}Cf , равное $3,757 \pm 0,15$ [5].

В работе принимали участие Я. М. Крамаровский, Е. В. Королев, Г. Е. Ложкомоев, Р. И. Маслова, В. Г. Матюханов, К. А. Петржак, А. Г. Прусаков, А. В. Сорокина.

4. Группу специалистов, приступившую к прецизионному измерению энергетических спектров мгновенных нейтронов (СМН) деления, возглавил М. В. Блинов. К началу 70-х годов разными авторами и различными методами было выполнено большое количество измерений СМН деления, основная часть которых относилась к вынужденному делению ^{235}U , ^{239}Pu и спонтанному делению ^{252}Cf . Однако результаты измерений имели существенный разброс. При этом теоретические расчеты СМН, выполненные в предположении испарения нейтронов полностью ускоренными осколками деления, заметно расходились с результатами измерений в областях высоких и низких энергий нейтронов. В то же время СМН спонтанного деления ^{252}Cf был принят МКЯД в качестве стандартного спектра для использования в

относительных измерениях. Поэтому одной из основных задач стало повышение точности СМН ^{252}Cf . Требовались измерения СМН, проведенные на максимально возможном современном экспериментальном уровне, с анализом возможных источников ошибок, а также искажений спектра за счет эффектов рассеяния нейтронов.

Анализ ранее выполненных измерений показал, что с точки зрения возможной точности наиболее перспективным является метод времени пролета. Поэтому в Радиевом институте для измерений СМН при спонтанном делении был создан многопараметровый время-пролетный нейтронный спектрометр, совершенствование и развитие которого шло параллельно с измерениями СМН. Конечный вариант спектрометра характеризует ряд особенностей, которые позволили получить хорошие спектрометрические характеристики. Применение метода программной время-амплитудной компенсации и использование микроканальных пластин для получения временного сигнала об акте деления путем регистрации электронов, выбиваемых осколком деления из тонкой пленки окиси алюминия, дало возможность достигнуть временного разрешения порядка 1 нс в широком диапазоне энергий нейтронов. Это, в свою очередь, позволило проводить измерения на самых малых пролетных базах (до 12,5 см) и увеличить скорость набора статистики.

Измерения СМН ^{252}Cf проводились в течение нескольких лет. Для исключения возможных систематических ошибок измерения проводились на разных время-пролетных базах (от 6,5 до 100 см) с использованием детекторов нейтронов различных типов. Хотя в качестве основного детектора нейтронов для исследования СМН в интервале энергий 1-5 МэВ использовался сцинтилляционный детектор на основе кристалла стильбена (50x40 мм²) и фотумножителя ФЭУ-30, использовались также камера деления с ^{235}U для измерений в широком интервале энергий нейтронов и детекторы с кристаллом $^6\text{LiJ}(\text{Eu})$ для измерений области малых энергий спектра. Особое внимание было обращено на исследование фоновых условий измерений. Тщательные измерения и теоретические расчеты позволили корректно учесть влияние фона на результаты измерений и избежать ошибок, допущенных авторами некоторых работ по измерению СМН ^{252}Cf . В результате детальных исследований формы СМН ^{252}Cf в области энергий нейтронов 0,1 кэВ-10 МэВ было убедительно показано, что интенсивная "тонкая структура" спектра, сообщенная в ряде работ, объясняется методическими ошибками.

В измерениях СМН ^{252}Cf участвовали О. И. Батенков, А. Б. Блинов, Г. С. Бойков, В. А. Витенко, Н. М. Казаринов, И. Т. Криск, В. Т. Туз, В. И. Юревич. Расчеты спектра по статистической модели в ее наиболее последовательной трактовке, какой является статистическая модель Хаузера-Фешбаха, провели Б. Ф. Герасименко и В. А. Рубченя.

Помимо измерений СМН ^{252}Cf в разное время были выполнены измерения СМН спонтанного деления ^{242}Pu , ^{244}Cm , ^{248}Cm , деления тепловыми нейтронами ^{233}U , ^{235}U , ^{239}Pu , деления нейтронами с энергиями 2,9 и 14,7 МэВ ^{235}U , ^{238}U , ^{232}Th и ^{237}Np . Измерения ^{248}Cm и измерения на быстрых нейтронах (в измерениях ^{237}Np участвовал В. Д. Дмитриев) были проведены относительно опорного спектра, в качестве которого служил стандартный спектр СМН ^{252}Cf , полученный в итоге оценки, выполненной Маннхартот. Оценка была проведена на основе семи наиболее надежных и точных измерений СМН ^{252}Cf (в том числе и измерений Радиевского института), что обусловило малую погрешность стандартного спектра. Если измерения СМН исследуемого нуклида и опорного СМН проводятся одновременно с использованием одних и тех же измерительных каналов, то влияние ряда искажающих результаты измерений факторов будет исключено или существенно ослаблено. В итоге заметно снижается погрешность конечного результата. Именно этим методом были выполнены в 1995-1996 гг. измерения СМН спонтанного деления ^{244}Cm и ^{246}Cm . Они проводились в рамках Проекта МНТЦ (руководитель проекта Л. В. Драпчинский) и стали первыми в серии планируемых прецизионных измерений СМН деления вторичных актиноидов для целей трансмутации. Погрешности определения средних энергий нейтронов, полученные как первые моменты распределений СМН, составили 1,3 и 1,1 % для ^{244}Cm и ^{246}Cm , соответственно.

5. Обращение с тритием, образующимся при работе атомного реактора, является серьезной проблемой. До 40 % трития образуется за счет тройного деления. В 60-х годах в литературе появилось сообщение об экспериментальной работе, результаты которой указывали на увеличение выхода трития с ростом энергии нейтронов, вызывающих тройное деление. Это вызвало понятную обеспокоенность конструкторов создававшихся реакторов на быстрых нейтронах, где жесткость спектра нейтронов была выше, чем для реакторов на тепловых нейтронах. Имевшиеся данные о выходах тритонов при тройном делении были крайне ограничены и неточны. Возникла необходимость проведения новых измерений выходов тритонов при тройном делении важнейших нуклидов быстрыми нейтронами.

Методически работы по определению выходов тритонов при тройном делении ядер весьма сложны. Основные трудности связаны с малой вероятностью испускания тритонов в процессе деления (около $1,5 \cdot 10^{-4}$ на деление) и с задачей идентификации тритонов на фоне других заряженных частиц (α -частиц тройного деления, интенсивность которых более чем на порядок выше, чем тритонов, а также других заряженных частиц из реакций на быстрых нейтронах на конструкционных материалах детектора). Тем не менее, постановка работ по измерениям выходов тритонов при тройном делении представлялась возможной, так как фундаментальные исследования тройного деления (деления ядер с эмиссией легких заряженных частиц - ЛЗЧ) были традиционным научным направлением в Радиовом институте с середины 40-х годов, когда Н. А. Перфилов обнаружил это физическое явление независимо от Альвареса в США. Группой ученых, возглавлявшейся С. С. Коваленко, а позднее Л. В. Драпчинским, были разработаны и освоены различные методы регистрации ЛЗЧ, созданы установки и выполнен цикл фундаментальных исследований различных характеристик тройного деления. Было решено отработать методику регистрации тритонов, создать измерительную установку и приступить к измерениям выходов тритонов для максимально возможного числа нуклидов при двух значениях энергии возбуждения: при делении нейтронами с энергией 14,5 и 2,5 МэВ. Несмотря на накопленный ранее опыт, отработка методики регистрации тритонов потребовала больших усилий и времени. ЛЗЧ регистрировались сцинтилляционным детектором на основе кристалла CsJ(Tl) диаметром 40 мм, толщиной 1,4 мм и ФЭУ-13. Идентификация тритонов тройного деления производилась по форме импульса световой вспышки в сцинтилляторе.

В итоге измерений, выполненных с 1982 по 1990 гг., были определены выходы тритонов при делении ^{232}Th , ^{233}U , ^{234}U , ^{235}U , ^{236}U , ^{238}U , ^{237}Np , ^{239}Pu , ^{240}Pu , ^{241}Pu , ^{242}Pu нейтронами с энергией 14,5 МэВ и ^{233}U , ^{234}U , ^{235}U , ^{236}U , ^{238}U , ^{237}Np , ^{239}Pu , ^{240}Pu , ^{242}Pu нейтронами с энергией 2,5 МэВ. Погрешности определения выходов были в пределах 2-24 % [6].

В группе сотрудников, руководимой Л. В. Драпчинским, в работах по измерению выходов тритонов участвовали В. М. Адамов, В. В. Кольцов, О. И. Косточкин, Н. Н. Розина, Б. В. Румянцев, А. М. Соколов, В. А. Тренкин. Мишени нуклидов для измерений были изготовлены П. С. Солошенковым и С. М. Соловьевым.

Помимо вышеперечисленных основных видов измерений ядерных данных в институте осуществлялись также некоторые другие, менее масштабные работы по измерению ядерных данных. В частности, к 1973 г. были закончены работы по определению абсолютных и относительных выходов осколков деления ^{239}Pu , ^{241}Pu , ^{241}Am медленными нейтронами и спонтанного деления ^{252}Cf . Продукты деления радиохимически выделялись из исходного образца. Для измерения выходов продуктов деления (более 40 нуклидов) использовались абсолютный β -счет и γ -спектрометрия. Эти работы выполнили Н. В. Сковородкин, А. В. Сорокина, С. С. Бугорков, Г. Е. Ложкомоев, Б. М. Александров, К. А. Петржак, А. С. Кривохатский, В. А. Яковлев, Е. И. Высторобская.

В 1981-1991 гг. Ю. Н. Трофимовым проводились работы по измерению сечений радиационного захвата нейтронов в малоисследованном диапазоне энергий нейтронов - 0,5-2,2 МэВ. Методом активации были измерены сечения радиационного захвата для 54 изотопов элементов, применяемых в реакторостроении (^{58}Fe , ^{96}Zr , $^{98,100}\text{Mo}$, $^{106,110,114}\text{Cd}$, ^{236}U , ^{237}Np

и др.). Моноэнергетические нейтроны получали из реакции ${}^3\text{H}(p,n){}^3\text{He}$ на электростатическом ускорителе ЭГ-5.

На основе проведенных измерений было показано, что для ядер изотонов логарифм сечения реакции (n,γ) линейно зависит от параметра нейтронного избытка ядра. Было установлено также, что изотоническая зависимость от параметра нейтронного избытка ядра пригодна для описания разнородных ядерных характеристик (вероятность α -распада четно-четных тяжелых ядер, вероятность распада при спонтанном делении четно-четных тяжелых ядер и др.). На основе изотонической и изотопической систематик была проведена оценка сечений реакций (n,γ) при $E_n=30$ кэВ и (n,p) при $E_n=14,5$ МэВ для широкого круга ядер, труднодоступных для измерения (радиоактивные ядра, ядра редкоземельных элементов, элементы в газообразном состоянии и т. д.).

Необходимо отметить, что в выполнение практически всех работ по измерениям ядерных данных в Радиевом институте весомый вклад внесла "мишенная группа", созданная в 1973 г. при лаборатории, руководимой П. И. Федотовым. Эта группа, возглавляемая С. М. Соловьевым, в короткое время освоила основные методы изготовления мишеней и источников и постепенно приняла на себя подавляющую часть работ по обеспечению экспериментаторов качественными и, в основном, паспортизированными мишенями. В последующем в группе были освоены новые методы нанесения слоев, новые методы измерения важнейших характеристик мишеней.

Особо следует отметить вклад Б. М. Александрова с сотрудниками (лаборатория Ю. В. Дубасова), которые изготовили мишени из нуклидов с высокой удельной активностью и практически все требовавшиеся источники ${}^{252}\text{Cf}$ различной геометрии. Эти источники, являвшиеся основой для измерений $\langle v \rangle {}^{252}\text{Cf}$, СМН спонтанного деления ${}^{252}\text{Cf}$, определения выходов осколков ${}^{252}\text{Cf}$, были необходимы для измерений сечений деления, усредненных по спектру нейтронов ${}^{252}\text{Cf}$.

Все результаты измерений ядерных данных, выполненных в Радиевом институте, предоставлялись для широкого использования специалистами. Результаты передавались в Центр ядерных данных (г. Обнинск) и представлялись от нашей страны на ежегодных заседаниях МКЯД (Вена), где в обмен на них наши представители получали материалы по измерениям и оценкам ядерных данных, выполненных за рубежом. Кроме того, они проходили апробацию на всесоюзных и международных конференциях, совещаниях специалистов, проводимых МАГАТЭ, публиковались в "Вопросах атомной науки и техники", "Атомной энергии" а также в зарубежных научных журналах, в виде препринтов Радиевского института, Технического университета (Дрезден) и других институтов. Данные по сечениям деления были использованы при проведении оценок, создании и совершенствовании библиотек ядерных данных. Как уже отмечено выше, результаты измерений СМН спонтанного деления ${}^{252}\text{Cf}$ были использованы при проведении оценки и выработке международного стандарта спектра нейтронов.

Л и т е р а т у р а

1. Nuclear Data for Science and Technology. Proc. of Int. Conf., Julich, Fed. Rep. of Germany, 13-17 May, 1991, pp. 510-513.
2. NIM, A316, 1992, pp. 147-157.
3. Адамов В. М., Драпчинский Л. В., Кудрявцев Ю. Г. и др. // Препринт РИ-52, Л., 1976.
4. Nucl. Physics and Nucl. Data for Measurements with Accelerators and Research Reactors. IAEA-TECDOC-345, Vienna, 1985.
5. IAEA-NDC-190, Vienna, Sep. 1982.
6. Neutron Physics and Nuclear Data Measurements with Accelerators and Reactor Research Reactors. IAEA-TECDOC-469, Vienna, 1988.

ЯДЕРНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ ПРОМЕЖУТОЧНЫХ ЭНЕРГИЙ

М. А. Михайлова, А. А. Носов, В. П. Приходцева, А. А. Римский-Корсаков,
А. Н. Смирнов, Г. А. Тутин, В. П. Эйсмонт

Введение

В последнее время резко возрос интерес к ядерным данным при промежуточных энергиях. Одна из главных причин - широко обсуждаемая сейчас идея создания ядерной энергетики "без опасностей", т. е. без реактивных аварий и радиоактивных отходов - на основе управляемых ускорителем ядерных систем. Последние могут быть использованы также для конверсии оружейного плутония. Оценка возможностей таких систем требует знаний ядерных констант в новой, ранее почти не использовавшейся на практике области промежуточных энергий. Работы института в этом направлении, в основном выполненные в последние годы, и описываются в данной статье.

В мире уже накопилось большое количество радиоактивных материалов: десятки и сотни тонн оружейного и реакторного плутония, трансплутониевых элементов и долгоживущих продуктов деления (в основном продуктов топливного цикла атомной энергетики). Ожидается, что в ближайшие 50 лет их запасы возрастут еще в 5-10 раз. Некоторые из актинидов и продуктов деления имеют периоды полураспада более тысячи или даже миллиона лет. Обеспечить надежное и экономически приемлемое хранение продуктов топливного цикла столь длительное время является крайне трудной задачей. Однако если удалить из отработанного топлива уран, плутоний и другие актиниды, а также ряд долгоживущих продуктов деления, то время контроля за топливом (время достижения токсичности урановой руды) можно снизить до нескольких сотен лет. Отходы, содержащие младшие актиниды (^{237}Np , ^{241}Am) и долгоживущие осколки деления (^{99}Tc , ^{129}I , ^{90}Sr и ^{137}Cs), должны быть трансмутированы, т. е. переведены в другое состояние: либо короткоживущих, либо стабильных продуктов с помощью реакции деления для актинидов и реакции захвата нейтронов (с последующим бета-распадом) для осколков деления.

Для трансмутации предлагается использовать так называемые гибридные системы: подкритический реактор и управляющий им (приводящий его в действие) ускоритель. Пучок высокоэнергетических частиц бомбардирует мишень из тяжелых элементов. Возникающие мощные потоки нейтронов используются для питания расположенного вокруг мишени blankets, представляющего собой реактор деления в подкритическом режиме, неспособный функционировать без внешнего источника нейтронов. В качестве высокоэнергетических частиц чаще всего предполагается использование протонов с энергией около 1 ГэВ (от 0,8 до 1,6 ГэВ), что обеспечивает достаточно высокий коэффициент преобразования кинетической энергии падающих частиц в энергию нейтронов. В качестве мишеней - тяжелые элементы Ta, W, Pb, Bi, U, дающие большой выход нейтронов на падающий протон. При токе пучка протонов 100 мА в мишени полного поглощения (длиной около 60 см для протонов с энергией 1 ГэВ) можно получить поток около 10^{19} нейтронов в секунду. Спектр нейтронов очень широкий - от энергии протонов падающего пучка до тепловой - и должен быть смягчен с помощью замедлителя, если реактор работает на тепловых нейтронах. Далее нейтронный поток из мишени увеличивается за счет деления актинидов в blankets. Тепло, выделяемое в реакторе-blankete, как обычно, превращается в электроэнергию, часть которой идет во внешнюю сеть, а часть возвращается для питания ускорителя. Радионуклиды, образовавшиеся в реакторе, поступают на химическую переработку: слабоактивные и короткоживущие отходы отделяются для последующего хранения (или захоронения), а актиниды и долгоживущие осколки деления возвращаются в реактор для трансмутации.

Весьма привлекательной является возможность получения ^{233}U из ^{232}Th и использование его как топлива. В уран-ториевом топливном цикле не образуются подлежащие трансму-

тации актиниды. Остаются только продукты деления. Долгоживущие продукты выжигаются в процессе самой работы гибридной ускорительно-реакторной системы. На осуществление уран-ториевого цикла направлена гибридная схема Карло Рубиа, разработанная в 1994 г.

Таким образом, возникает перспектива создания ядерной энергетики без опасности (так как реактор работает в подкритическом режиме и "выключается" с выключением ускорителя) и без радиоактивных отходов (долгоживущие продукты топливного цикла выжигаются в самой системе).

Исследования реакций в области промежуточных энергий были начаты институтом уже в конце 40-х годов, сразу же после пуска в Дубне ускорителя протонов на 660 МэВ, затем продолжены на протонных ускорителях ИТЭФ (Москва) и ЛИЯФ (г. Гатчина) и в последнее время велись на малом (до 100 МэВ) протонном синхротроне Радиевого института и большом (до 10 ГэВ) синхротроне ЛВЭ ОИЯИ (г. Дубна). Все перечисленные исследования проводились на заряженных частицах. В 1992 г. в сотрудничестве с группой проф. Г. Конде из Уппсальского университета на нейтронном пучке ускорителя Лаборатории им. Т. Сведберга (Швеция) начались эксперименты и на нейтронах с энергиями 45-160 МэВ. Многие описываемые далее количественные результаты получены как побочный продукт изучения механизма реакций и свойств распада возбужденных ядерных систем. Однако целый ряд экспериментов, в частности на массивных мишенях, был проведен специально для удовлетворения практических потребностей в ядерных данных для промежуточных энергий.

1. Сечения образования радионуклидов в тонких мишенях из конструкционных, защитных и нейтронопроизводящих материалов для протонов с энергиями 100-1600 МэВ

Методами γ -спектроскопии были измерены сечения образования радионуклидов в тонких мишенях из природной смеси изотопов Al, Ti, V, Fe, Co, Ni, Cu, Zr, Mo, Ag и Sn при бомбардировке протонами с энергией 660 МэВ и Al, Ti, Fe, Co, Cu и Au при бомбардировке протонами с энергией 1000 МэВ. При этом абсолютные сечения были определены для более 400 реакций образования радионуклидов с $T_{1/2}$ от 10 мин до 5 лет. В настоящее время проведена ревизия всех измеренных сечений с учетом современных данных по сечениям мониторинговых реакций. Эти результаты совместно с другими известными данными позволили получить функции возбуждения для сечений образования радионуклидов в энергетическом диапазоне от 100 до 1600 МэВ для тонких мишеней из C, N, O, Na, Mg, Al, Si, Ar, K, Ca, Ti, V, Mn, Fe, Co, Ni, Cu и Zr. Более 160 функций возбуждения включены в атлас сечений (p,x)-реакций.

Среди нейтронопроизводящих мишеней наибольшее внимание привлекает свинец. Вместе с тем сколько-нибудь полные и надежные данные по сечениям образования радионуклидов в свинце отсутствуют. Для заполнения пробела было проведено облучение тонкой мишени свинца протонами с энергией 660 МэВ и определены сечения для 89 продуктов реакций. Общие тенденции зависимости сечений образования от нуклонного состава продуктов (их заряда Z и массового числа A) представлены на рис. 1 для Fe и рис. 2 для Pb. Из сравнения рисунков видно, что при подобии зависимостей выхода продуктов реакций отщепления (при относительной разности масс мишени и продуктов $\sim 20\%$) в спектре масс продуктов для Pb появляются отсутствующие в случае Fe продукты реакции деления (с Z и $A \sim 50\%$ числа соответствующих нуклонов мишени).

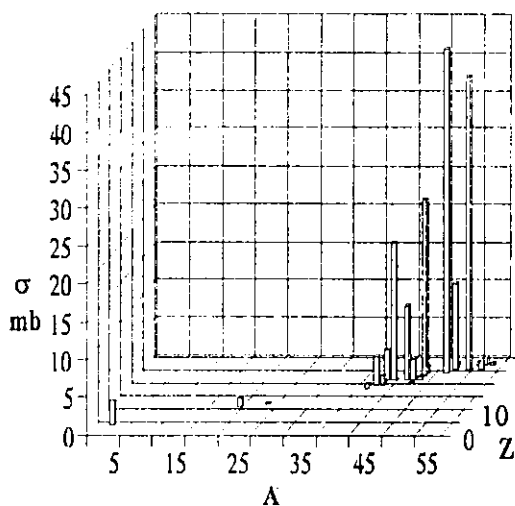


Рис. 1. Сечения реакций отщепления для ${}^{\text{nat}}\text{Fe}$. $E_p = 660$ МэВ

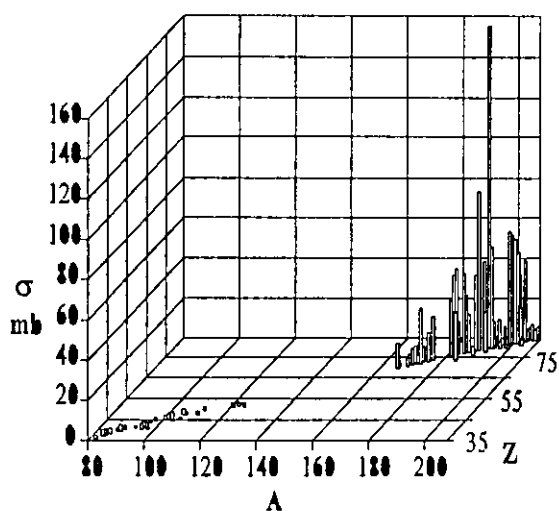


Рис. 2. Сечения реакций отщепления и деления для ${}^{\text{nat}}\text{Pb}$. $E_p = 660$ МэВ

2. Сечения деления тяжелых ядер протонами и нейтронами промежуточных энергий

С применением различных методик регистрации осколков деления - тонкопленочных пробойных счетчиков, ионизационных камер, твердотельных детекторов в дальней геометрии - выполнен большой цикл работ по измерению сечений деления тяжелых ядер. Эти измерения проведены для широкого круга ядер, включающего почти все потенциальные кандидаты в мишени-генераторы нейтронов, и в широком диапазоне энергий - от единиц до тысячи МэВ (конкретный диапазон энергии зависит от нуклида). Среди измеренных - сечения деления ${}^{181}\text{Ta}$, ${}^{197}\text{Au}$, ${}^{206}\text{Pb}$, ${}^{207}\text{Pb}$, ${}^{208}\text{Pb}$, ${}^{209}\text{Bi}$, ${}^{232}\text{Th}$, ${}^{233}\text{U}$, ${}^{235}\text{U}$, ${}^{238}\text{U}$, ${}^{237}\text{Np}$, ${}^{239}\text{Pu}$, ${}^{241}\text{Am}$ и ${}^{243}\text{Am}$. В ряде случаев, например, сечений деления протонами трансурановых элементов, сечений деления свинца и висмута нейтронами, полученные данные составляют основу для оценки функций возбуждения - энергетической зависимости сечений. Такие оценки были проведены путем компиляции и селекции всех опубликованных результатов. Оценки сечений деления протонами, выполненные для ${}^{238}\text{U}$, ${}^{232}\text{Th}$, ${}^{209}\text{Bi}$, ${}^{208}\text{Pb}$, ${}^{\text{nat}}\text{W}$ и Ta , представлены на рис. 3. Можно видеть, что для наиболее тяжелых нуклидов, ${}^{238}\text{U}$ и ${}^{232}\text{Th}$, сечения деления составляют значительную долю неупругого взаимодействия (~ 2 барн), тогда как для наиболее легких, Ta и W , эта доля всего лишь порядка 1 %. Однако ввиду предполагаемой высокой интенсивности потока протонов и длительного срока службы мишеней-генераторов, а также высокой токсичности продуктов деления, их выходом пренебречь нельзя. Обращает на себя внимание различие в энергетической зависимости сечений: спад сечений при энергии свыше 50 МэВ для ${}^{238}\text{U}$ и ${}^{232}\text{Th}$, выход сечений на насыщение при энергии свыше 500 МэВ для ${}^{209}\text{Bi}$ и ${}^{208}\text{Pb}$ и продолжающийся в этой области рост сечений для Ta и W . Не обсуждая физических причин такого различия, заметим, что это делает малым вклад вторичных нуклонов в образование осколков в случае сравнительно легких мишеней.

На рис. 4 приведены данные по сечениям деления ${}^{209}\text{Bi}$ и ${}^{208}\text{Pb}$ на квазимоноэнергетических нейтронах, которые являются по существу, единственными в мире. Эти данные имеют высокий приоритет в силу уже отмеченной перспективности свинца и висмута как материалов мишени и в силу использования их (наряду с ${}^{238}\text{U}$ и ${}^{232}\text{Th}$) как стандартов для измерения нейтронных потоков. Они указывают на необходимость уточнения существующей оценки файла ENDF-B / 6 / High Energy.

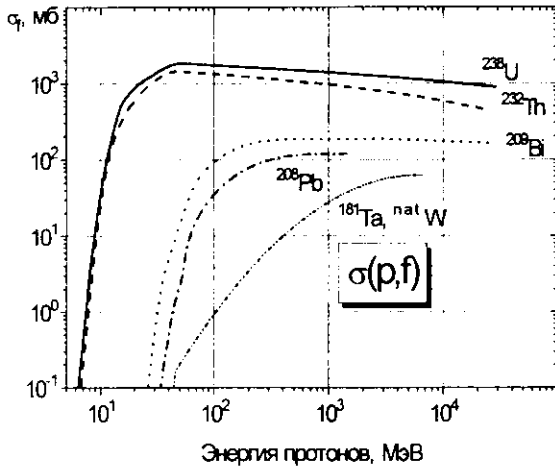


Рис. 3. Сечения деления тяжелых ядер протонами (аппроксимации)

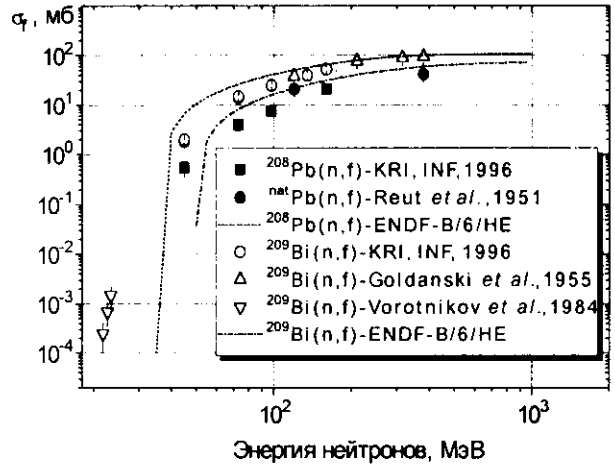


Рис. 4. Сечения деления ^{209}Bi и ^{208}Pb нейтронами

3. Выходы радиоактивных продуктов в массивных мишенях, облученных протонами с энергией 1 ГэВ

Наряду с “микроскопическими” измерениями (на тонких мишенях), позволяющими определить элементарные константы акта взаимодействия адронов с ядром, были проведены опыты на массивных мишенях, дающие интегральные характеристики, усредненные по всему каскаду столкновений, разыгрывающихся в реальной мишени. В этих опытах протонами с энергией 1 ГэВ облучались мишени из Al, Fe и Pb, имеющие форму цилиндра диаметром 20 см и длиной 60 см (эта длина превышает длину поглощения протона в Fe и Pb). Ось цилиндра располагалась по оси падающего пучка. С помощью тонких мишеней-вкладышей из того же материала, что и массивная мишень (а также других материалов - Co и Au - в случае Al и Fe), расположенных в различных местах мишени, были измерены пространственные распределения выходов 22 продуктов реакций: $^{203,204,206}\text{Bi}$, $^{201,202\text{m}}\text{Pb}$, $^{198,199}\text{Tl}$, $^{194,196}\text{Au}$, $^{193,193\text{m},195\text{m}}\text{Hg}$, $^{189,191}\text{Pt}$, ^{186}Ir , $^{183,185}\text{Os}$, $^{173,175}\text{Hf}$, ^{171}Lu , ^{89}Zr и ^{87}Y в свинцовых вкладышах в Pb, ^{198}Au в золотых вкладышах, ^{56}Co в железных вкладышах в Al и Fe. На рис. 5 приведены распределения выходов ^{201}Pb , ^{194}Au и ^{192}Hg вдоль радиуса (на переднем торце и на расстоянии 540 мм от него) и по глубине свинцовой мишени. Распределения позволили судить о спектрах нейтронов в различных областях мишеней и активности мишеней после облучения. Сведения о подобных опытах в литературе крайне малочисленны.

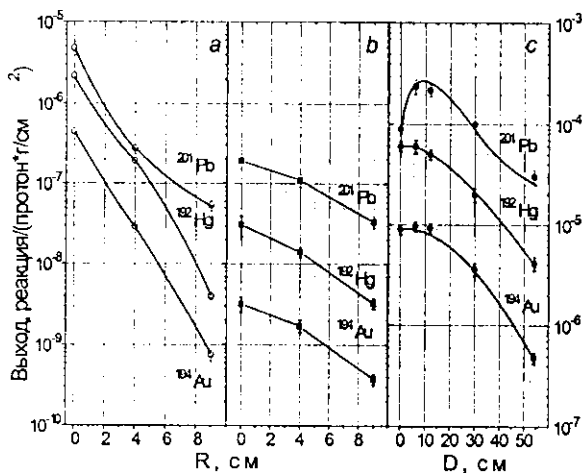


Рис. 5. Распределения выходов нуклидов по радиусу мишени: на переднем торце (а), на расстоянии 54 см (б) и по глубине (с)

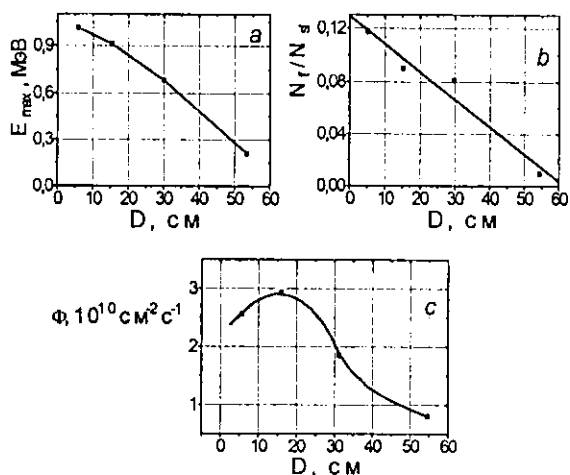


Рис. 6. Зависимости положения максимума спектра нейтронов (а), отношения числа быстрых (>0.1 МэВ) и медленных (<0.1 МэВ) нейтронов (б) и потока нейтронов на поверхности мишени от расстояния (с)

4. Выходы и спектры нейтронов на поверхности массивных мишеней

Для свинцовой мишени тех же размеров и конфигурации, что и в опыте по определению выходов радионуклидов, с помощью активационных детекторов из ^{197}Au , ^{93}Nb , ^{59}Co и ^{27}Al , расположенных по поверхности мишени на различных расстояниях от ее торца, были определены энергетические спектры нейтронов, выходящих из мишени, при облучении протонами с энергией 1 ГэВ. Были установлены изменения величины потока и жесткости спектра нейтронов вдоль оси цилиндра, показанные на рис. 6. Позднее были продолжены исследования образования нейтронов в свинцовых мишенях под действием протонов и дейтронов с энергией 1-4 ГэВ. Методом пороговых детекторов было найдено, что для свинцовой мишени диаметром 20 см и длиной 60 см выход нейтронов (число нейтронов на одну падающую частицу) возрастает с энергией частиц и составляет $25,1 \pm 3,0$, $44,2 \pm 3,1$ и $80,7 \pm 6,9$ для протонов с энергиями 1,2 и 3,7 ГэВ, соответственно, и $24,9 \pm 5,0$, $58,5 \pm 8,2$ и $98,9 \pm 14,0$ для дейтронов тех же энергий. Средняя энергия нейтронов возрастает от 8,8 до 13,7 МэВ, когда энергия пучка протонов изменяется от 1 до 3,7 ГэВ. В случае облучения дейтронами в том же энергетическом диапазоне средняя энергия нейтронов изменяется от 5,5 до 9,4 МэВ. Методом времени пролета были измерены спектры нейтронов из мишеней меньших размеров: $\varnothing 20 \times 20$ см, $8 \times 8 \times 8$ см и тонкой мишени (с эффективной толщиной по пучку 0,7 см). Было найдено, что для протонов с энергией около 1 ГэВ жесткость нейтронного спектра выше для мишеней меньших размеров - доля нейтронов с энергиями до 1 МэВ уменьшается от 38 % для мишени $\varnothing 20 \times 60$ см до 17 % в случае тонкой мишени.

Заключение

По мнению авторов, интенсивность работ по ядерным данным при промежуточных энергиях будет нарастать по мере развития практического интереса к новым гибридным энергетическим системам и, тем более, при подходе к технологическим расчетам демонстрационных установок.

Она будет нарастать также в силу того, что эти данные необходимы не только для ускорительной трансмутации, но также и для осуществления космических полетов

(определение воздействия космических лучей на космонавтов и электронную аппаратуру управления и исследовательских установок), для лучевой терапии и хирургии живых тканей, для астрофизики и, наконец, для развития самой ядерной физики, которая в свою очередь может привести к еще более впечатляющим перспективам.

РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ИЗГОТОВЛЕНИЯ И КАЛИБРОВКИ МИШЕНЕЙ ИЗ ДЕЛЯЩИХСЯ НУКЛИДОВ

С. М. Соловьев

В Радиевом институте изготовление мишеней из радиоактивных веществ было начато в 1936 г., когда для исследования альфа-распада тория и самария К. А. Петржаком были изготовлены первые слои путем нанесения на подложку суспензии окиси этих элементов с добавкой шеллака. Несколько позже приготовленные аналогичным способом мишени из урана были использованы в экспериментах, которые привели к открытию явления спонтанного деления тяжелых элементов.

В 50-х - 60-х годах в лабораториях Л. М. Крижанского, Ю. А. Немилова, Н. А. Перфилова, К. А. Петржака и А. Н. Протопопова проводились многочисленные работы по исследованию деления ядер, при этом в каждой лаборатории сотрудники сами занимались изготовлением мишеней, используя в основном два метода - многократное намазывание с промежуточным отжигом и распыление в вакууме тетрафторидов урана и тория. Позднее для получения мишеней из урана, нептуния и плутония в лаборатории К. А. Петржака был разработан метод плазменного распыления в атмосфере аргона.

В дальнейшем, в связи с развитием в стране атомной энергетики, потребовалось получение новых, уточненных данных о сечениях деления тяжелых ядер, о числе вторичных нейтронов и других характеристиках процесса деления. Эти исследования требовали изготовления мишеней высокого качества. Развитие научных исследований в области физики деления также требовало использования разнообразных мишеней с новыми, более совершенными параметрами. Для централизованного решения этих вопросов в 1973 г. в Радиевом институте была создана группа под руководством С. М. Соловьева. В группе плодотворно работали П. С. Солошенко, С. И. Лашаев, А. С. Воронин, Т. Е. Кузьмина, Г. М. Степченкова, И. О. Артемьева, З. Ф. Шереметьева. Характер исследовательских работ группы определялся конкретными требованиями заказчиков к параметрам мишеней, причем заказчиками были физики как Радиевского института, так и других предприятий. Первой задачей группы стала разработка способа изготовления мишеней с неоднородностью активного слоя, не превышающей 1 %.

Был предложен способ испарения в вакууме на вращающуюся подложку с испарителя, расположенного в стороне от оси вращения. Проведены расчеты распределения плотности по радиусу мишени для различной геометрии испарения как для легкоплавких (тетрафториды), так и для тугоплавких (окислы, нитраты) веществ. Метод удобен тем, что первоначальное распределение допускает корректировку при повторном испарении. При этом, вследствие близкого расположения испарителя от мишени, потери вещества существенно снижаются (для мишеней с заданной неоднородностью). Этим методом были изготовлены мишени из урана, нептуния и плутония, причем на мишени из плутония-239 толщиной 200 мкг/см² и диаметром 20 мм была получена неоднородность 0,3 %. Неоднородность менее 1 % была и на мишенях из висмута и урана-238 с диаметром слоя 80 мм. Позднее набор мишеней из урана-235 и урана-238 с активным слоем диаметром 15 мм и неоднородностью 1 % был изготовлен с использованием устройства, включавшего вращающуюся обойму с подложками и корректирующий экран. Для изготовления мишеней с большой площадью активного слоя был освоен и усовершенствован метод многократного намазывания с про-

жуточным отжигом. Так были сделаны мишени из тория, изотопов урана и нептуния диаметром 180 мм со слоем толщиной 0,3-0,6 мг/см² и неоднородностью около 5 %. В случае использования сборки мишеней неоднородность может быть уменьшена: партия из 15 мишеней из урана-233 с активным слоем 0,5 мг/см² диаметром 130 мм имела радиальную неоднородность (усредненную по всем мишеням) не более 2 %.

Количество радионуклидов на мишенях определялось весовым способом и путем измерения альфа-активности. При калибровке мишеней из урана-238 на алюминиевой подложке толщиной 6 мкм оказалось возможным измерение числа ядер одновременно на обеих сторонах подложки, поскольку при измерении в счетчике с определенным телесным углом альфа-частицы не поглощались в подложке, и в спектре наблюдались два хорошо разделенных пика.

Разработан метод изготовления калиброванных мишеней с малым количеством делящегося вещества. В этом случае альфа-активность мишени столь мала, что не позволяет проводить прямых измерений, поэтому использовался метод реперного источника. При изготовлении мишеней из урана-238 массой 0,05 мкг (активность 0,6 мБк, диаметр слоя 3 мм, подложки - 6 мм) напылялись одновременно 10 мишеней. Подложки помещались во вращающуюся обойму с калиброванными отверстиями, и напыление проводилось через неподвижную диафрагму со щелью, вырезающей угол 12°. В таких условиях активность слоя на диафрагме в 1000 раз больше, чем на мишени, и может быть определена прямыми измерениями. Расчеты соотношения активности мишеней и диафрагмы были проверены при изготовлении аналогичных мишеней из нептуния-237.

В дальнейшем для выполнения заказа на изготовление аналогичных мишеней с массой, в 100 раз меньшей, была создана новая установка с дополнительной отсечкой пучка испаряемых молекул тетрафторида урана с помощью вращающейся секторной диафрагмы. Таким образом была изготовлена партия мишеней из урана-235 с массой $(0,84 \pm 0,04)$ нг.

Разработан метод получения покрытий из урана, нептуния и плутония путем разложения металлоорганических соединений (МОС). В этом методе соединение наносимого радионуклида испаряется в вакуумированном объеме реактора при сравнительно невысокой температуре (до 200 °С) и разлагается на подложке, нагретой до более высокой температуры (300-500 °С). Были получены достаточно прочные покрытия, состоящие, в основном, из окиси актинида. Для получения слоев с неоднородностью ~1 % необходимо было обеспечивать равномерный нагрев подложки. Слои урана, приготовленные методом разложения МОС, имеют более совершенную структуру, чем слои, приготовленные другими способами. Это было установлено в Физическом институте АН СССР при исследовании деления урана-235 на ультрахолодных нейтронах, где использовалась такая мишень с активным слоем диаметром 36 мм, толщиной 3,5 мг/см². С этой мишенью удалось избавиться от искажений, связанных с наличием дефектов в структуре активного слоя, в ходе исследований зависимости сечения деления от энергии.

Метод позволяет получить прочные слои на тонких подложках. Так были изготовлены мишени из урана-238 диаметром 30 мм, толщиной 1,8 мг/см² на алюминиевых подложках толщиной 0,5 мг/см². Интерес представляет нанесение покрытий путем разложения МОС на тонких подложках из окиси алюминия. Трудность состоит в том, что пленка окиси, выращенная на алюминиевом кольце, разрушалась при нагревании из-за разницы в температурных коэффициентах расширения пленки и подложки. Это препятствие было преодолено путем переклеивания пленок на керамические кольца. На пленках толщиной 100 мкг/см² были получены слои естественного урана толщиной 300 мкг/см² и диаметром 12 мм. Было показано, что метод может быть использован для получения более толстых слоев (по сравнению с методом испарения в вакууме) на прозрачных для осколков деления подложках.

Большая часть мишеней на подложках из окиси алюминия изготавливалась путем испарения в вакууме. Так были изготовлены мишени на пленках толщиной 50-60 мкг/см² со слоями урана, нептуния и плутония диаметром 20 мм, плотностью до 100 мкг/см². На подложках из титана толщиной 120 мкг/см² удалось нанести слой урана-238 размером 10x10 см²,

при этом пленка была укреплена сеткой с ячейками $10 \times 10 \text{ мм}^2$. Самый тонкий изготовленный источник - слой калифорния на угольной пленке толщиной $4,5 \text{ мкг/см}^2$.

С помощью испарения в вакууме был выполнен и следующий непростой заказ: нанесение и калибровка однородных слоев урана-238 на внутренней поверхности цилиндров диаметром 8 мм, длиной 50 мм. Активный слой следовало нанести в центре цилиндра на длине 10 мм. Испарение тетрафторида проводилось из лодочки, введенной внутрь цилиндра: специальное устройство обеспечивало вращательное и возвратно-поступательное движение цилиндра относительно испарителя. Калибровка мишеней по массе урана с погрешностью 3 % была проведена по счету альфа-частиц, вылетающих из торца цилиндра, и по счету всех частиц в пропорциональном счетчике, стенками которого служила сама мишень.

В качестве любопытного примера использования мишеней в народном хозяйстве отметим применение слоев урана-235 толщиной 5 мг/см^2 на алюминиевой фольге толщиной 50 мкм для контроля за полнотой извлечения алмазов в технологических линиях объединения "Якуталмаз". Пробные алмазы заворачивались в такую фольгу и облучались потоком нейтронов в реакторе. Осколки деления проникали в поверхность алмаза и "метили" его. Эффективность извлечения меченых алмазов контролировалась радиометрическими средствами.

Число делящихся ядер на мишенях определялось с помощью полупроводниковых детекторов по собственной альфа-активности нуклидов. Большое разнообразие поступающих заказов потребовало разработки и изготовления нестандартных, не выпускаемых нашей промышленностью детекторов. Эта, казалось бы, далекая от основного направления группы задача была решена своими силами при определяющем вкладе в эту работу С. И. Лашаева.

Погрешность калибровки зависит от точности определения геометрии регистрации и уменьшается, если размеры детектора позволяют отдалить его от мишени при сохранении эффективности регистрации. Наибольший изготовленный поверхностно-барьерный кремниевый детектор площадью 50 см^2 с энергетическим разрешением 100 кэВ был использован в рамках международного сличения мишеней из урана-235. Для калибровки мишеней с неоднородным активным слоем было создано устройство с детектором таких же размеров и компенсирующим экраном. Эффективность регистрации такого устройства была проверена на точечном источнике и оказалась постоянной ($0,196 \pm 0,001$) в пределах 0,5 % при смещении источника на 15 мм от центрального положения.

Для измерения малых активностей был создан уникальный 2 π -детектор. Детектор имеет углубление, в которое вводится мишень размером до 24 мм, и регистрирует все частицы, вылетающие из мишени. Он обладает достаточно высоким разрешением (40 кэВ), что позволяет учитывать присутствие активных примесей. С его помощью можно калибровать партии идентичных мишеней малого размера и мишени с активным слоем толщиной до 2 мг/см^2 . Цилиндрический детектор диаметром 5 мм с чувствительным слоем на боковой поверхности использовался для измерения неоднородности распределения плотности урановых слоев на внутренней поверхности протяженных цилиндров. С конвертером из слоя тетрафторида урана-235, напыленного на чувствительную поверхность, такой детектор был использован для измерения нейтронных потоков в критсборках и в активных зонах атомных реакторов.

Канальный детектор с чувствительной областью на внутренней поверхности цилиндра диаметром 5 мм и длиной 46 мм с разрешением 35 кэВ применялся для калибровки игольчатых мишеней диаметром 1 мм. Подобный детектор большего диаметра нашел применение в установке для контроля загрязненности радиоактивных источников тепла на основе плутония-238, используемых в кардиостимуляторах. Устройство позволяет измерять загрязненность наружной поверхности источников на уровне 0,1 Бк. Наконец, кольцевые детекторы площадью 3 см^2 , уже применявшиеся для исследования ядерных реакций на пучках заряженных частиц, были использованы в открытии в 1980 г. кардинально нового способа калибровки, позволившего на несколько порядков снизить предел измеряемого коли-

чества малоактивных нуклидов и распространить метод на калибровку мишеней из стабильных изотопов.

Речь идет о применении резерфордовского обратного рассеяния альфа-частиц от радиоизотопного источника. Оказалось, что частицы от стандартного источника "ФАКТ-1" на основе полония-210, рассеянные на мишени из урана на подложке из нержавеющей стали и зарегистрированные кольцевым детектором в угле ~ 1 стерадиан, имеют спектр, на котором пик от рассеяния на уране достаточно узок и четко отделен от ступени, связанной с рассеянием на подложке. Скорость счета при облучении 1 мг урана составляла 200 имп/сек, что в ~ 100 раз превышает счет собственной активности. Для количественной оценки числа ядер проводится сравнение с реперной мишенью из урана-235, число ядер на которой определено по собственной активности. Таким образом можно проводить и элементный анализ слоев; было измерено соотношение золота и палладия в окне полупроводникового детектора, установлено присутствие вольфрама ($1,1 \pm 0,2$) мкг/см² в напыленном слое ванадия толщиной 24 мкг/см².

Метод может быть распространен на измерения толщины разнообразных покрытий.

За 23 года работы мишенной группы было изготовлено свыше 8000 мишеней по 660 заявкам. Продукция группы используется в Санкт-Петербурге, Гатчине, Сосновом Бору, Москве, Дубне, Обнинске, Протвино, Димитровграде, Нововоронеже, Свердловске, Челябинске, Новосибирске, Сыктывкаре, Томске, Красноярске, Якутске, Киеве, Харькове, Минске, Риге, Тбилиси, Сухуми, Баку, Ереване, Алма-Ате, Ташкенте и на многих предприятиях отрасли, а также в Багдаде, Брауншвейге, Гренобле, Дармштадте, Дрездене, Тюбингене, Лунде, Уппсале, Юваскюле.

РАЗРАБОТКА НЕРАЗРУШАЮЩИХ МЕТОДОВ АНАЛИЗА СОСТАВА ТОПЛИВА АТОМНЫХ РЕАКТОРОВ

П. И. Федотов

Введение

Разработка и совершенствование неразрушающих методов анализа (НМА) состава изделий, содержащих делящиеся ядра, широкое использование этих методов, особенно в последние 15-20 лет, стимулировались, в основном, двумя факторами: экономическим и социально-политическим. Прежде чем рассмотреть эти факторы, необходимо остановиться на специфике неразрушающих методов. Анализ состава изделия без его разрушения позволяет существенно сократить время его анализа, делает возможным проведение измерения в месте хранения изделий или прямо в технологической цепочке по изготовлению или переработке контролируемых изделий. Кроме того, эти методы позволяют проводить, в случае конфликтных ситуаций, повторные измерения на тех же образцах. Применение неразрушающих инструментальных методов создает хорошие предпосылки для автоматизации процедуры измерений, что в совокупности с экспрессностью используемых методов позволяет переходить к массовому контролю продукции атомной промышленности.

Следует отметить и такой важный момент, связанный с тем, что на определенных этапах технологического процесса переход к следующему циклу, в силу требований ядерной и радиационной безопасности или необходимости оптимизации процесса, невозможен без измерения или оценки количества делящихся материалов в изделии неразрушающими методами. Существует ряд таких ситуаций, когда из-за уникальности исследуемого изделия или его высокой стоимости применение разрушающих методов, в принципе, невозможно.

В силу вышесказанного, понятен как интерес предприятий атомной промышленности к неразрушающим методам, так и смысл экономического фактора, которые стимулируют развитие неразрушающих методов, о чем говорилось выше.

Что касается социально-политического фактора, то он связан с развитием и применением системы гарантий. Национальные, региональные системы гарантий и Система гарантий Международного агентства по атомной энергии (МАГАТЭ) направлены на недопущение несанкционированного изъятия или хищения делящихся материалов из сферы мирного использования с целью создания взрывных устройств или иных изделий для использования их в немирных целях. Система гарантий предусматривает проведение с помощью штата инспекторов плановых и чрезвычайных инспекций на предприятиях атомной промышленности с целью проверки баланса делящихся материалов. Одним из наиболее важных и эффективных компонентов этих инспекций является использование неразрушающих методов, которые позволяют экспрессно и на месте получить необходимые данные. По-видимому, нет необходимости доказывать важность деятельности МАГАТЭ в области нераспространения ядерного оружия, учитывая возрастающую сложность международной ситуации и рост числа государств, чей технический и научный потенциал позволяет им изготовить ядерное оружие.

Лаборатория неразрушающих методов анализа состава делящихся материалов была организована под руководством П. И. Федотова в 1973 г. Ее первоочередной задачей была разработка неразрушающих методов и аппаратуры для анализа выгорания и состава отработавшего топлива энергетических реакторов ВВЭР и РБМК, а также отработавшего топлива судовых реакторов (СР). Первоочередность разработки НМА отработавшего топлива диктовалась безотлагательными потребностями предприятий по радиохимической переработке топлива, выгружаемого из активных зон энергетических и судовых реакторов, и практическим отсутствием таких методов, ввиду их сложности, связанной со спецификой исследуемых объектов, о чем сказано ниже. Результаты неразрушающего анализа выгорания и состава топлива были крайне необходимы также для корректировки программ расчета кампании выгорания и состава облученного топлива. В дальнейшем в тематику лаборатории были включены и работы, связанные с анализом состава свежих, "необлученных", тепловыделяющих сборок (ТВС) реакторов различного типа.

1. ОТРАБОТАВШЕЕ ТОПЛИВО

Изучение выгорания, накопления изотопов трансурановых элементов (ТУЭ) и продуктов деления (ПД) - одна из важнейших проблем ядерной энергетики, от решения которой в значительной степени зависит задача оптимизации топливного цикла и углубления понимания процессов, происходящих в активной зоне реактора во время кампании облучения топлива.

При разработке НМА отработавших сборок необходимо учитывать следующие особенности ТВС как объектов такого анализа:

- большую длину и диаметр измеряемых ТВС, вследствие чего сборки имеют неоднородное распределение делящихся нуклидов и ПД по длине и диаметру. Это приводит к необходимости применять аппаратуру сканирующего типа;

- высокую плотность ядерного материала, что требует использовать для анализа топлива лишь излучение с большой проникающей способностью;

- интенсивное нейтронное и гамма-излучение (сотни тысяч - миллионы кюри на сборку), что обуславливает необходимость дистанционного управления и автоматизации процесса измерения и создает специфические условия для работы детектирующей аппаратуры;

- сложный элементный и изотопный состав топлива, который накладывает существенные ограничения при выборе метода и аппаратуры для измерения сборок.

Приступая в 1973 г. к разработкам неразрушающих методов анализа отработавшего топлива, мы взяли за основу два метода:

- гамма-спектрометрический, основанный на регистрации гамма-излучения продуктов деления;
- нейтронный, в котором регистрируется собственное нейтронное излучение накопившихся в топливе актиноидов (нейтроны спонтанного деления, (α, n) -реакции на кислороде и примесях легких ядер, входящих в состав топлива), а также нейтронов, возникающих за счет жесткого гамма-излучения продуктов деления в (γ, n) -реакции в конвертерах, располагаемых вокруг топлива во время измерений.

1.1. Гамма-спектрометрический метод

В результате гамма-спектрометрических измерений необходимо было получить следующие данные:

- о распределении выгорания, концентраций долгоживущих продуктов деления, изотопов урана и ТУЭ по высоте и поперечному сечению ТВС для верификации реакторных программ;
- экспериментальные данные о радиационных характеристиках отработавших ТВС, необходимые для оптимизации технологических процессов при переработке облученных ТВС, для проектирования судовых контейнеров и отработки условий безопасного транспортирования ТВС реакторов различных типов.

Для решения этих задач в горячей камере Нововоронежской АЭС были созданы установки для нейтронного и гамма-сканирования твэлов и ТВС реакторов ВВЭР-365 и ВВЭР-440. На этой установке совместно с сотрудниками Нововоронежской АЭС были получены экспериментальные данные о распределении долгоживущих продуктов деления (^{106}Ru , $^{134,137}\text{Cs}$) и о выгорании топлива по высоте и поперечному сечению ТВС этих реакторов.

Сравнение расчетных и экспериментальных данных показало, что на концах всех исследуемых ТВС имеются систематические расхождения между расчетом и экспериментом, которые составляют 30-50 %. Было установлено, что эти расхождения обусловлены приближенным учетом в расчетах (программа БИПР) влияния краевых эффектов на выгорание топлива в ТВС. Результаты измерения среднего выгорания в ТВС (погрешность измерения 4-5 %) в пределах 10-15 % согласуются с результатами расчета.

Одновременно с помощью разрушающих методов (лаборатории А. В. Степанова, Б. Н. Беляева, гатчинское отделение) были выполнены измерения выгорания и концентраций изотопов U, Pu, Am, Cm и Np приблизительно в 50 образцах топлива ВВЭР-365 и ВВЭР-440. Образцы топлива (куски твэлов длиной несколько сантиметров) были получены из твэлов, в которых распределение концентраций долгоживущих продуктов деления по высоте было измерено на установке гамма-сканирования твэлов в горячей камере Нововоронежской АЭС. Образцы твэлов транспортировались в гатчинское отделение Радиевого института, где их растворяли и в аликвотах растворов измеряли концентрации продуктов деления - мониторов выгорания ($^{134,137}\text{Cs}$, $^{145,146,148}\text{Nb}$) и изотопов урана и ТУЭ.

Сравнение экспериментальных данных (разрушающий метод) по концентрациям основных изотопов U и Pu с расчетными данными (программа УНИРАСОС) показало, что имеются систематические расхождения между ними, которые составляют для различных нуклидов от 8 до 15 %. Аналогичные измерения изотопного состава были выполнены и в образцах топлива ВВЭР-1000 и РБМК-1000.

Экспериментальные данные об изотопном составе топлива в зависимости от выгорания, полученные прецизионными разрушающими методами, использовались также для исследования корреляций между отношением активностей ^{134}Cs и ^{137}Cs в топливе, выгоранием и концентрациями изотопов U и Pu. Отношение активностей ^{134}Cs и ^{137}Cs в дискретных позициях по высоте твэла или ТВС можно измерить гамма-спектрометрическим методом без использования образцового твэла или ТВС с известным выгоранием топлива. В 1984 г. на ана-

литической секции Министерства была утверждена инструкция Радиевого института "Выгорание топлива АЭС. Измерение выгорания топлива и содержания изотопов U и Pu в отработавших ТВС методом гамма-спектрометрии продуктов деления" (метод изотопных корреляций).

Дальнейшее развитие метода изотопных корреляций было связано с разработкой экспериментально-расчетного метода (ЭРМ) определения выгорания топлива, содержания изотопов урана и ТУЭ и долгоживущих продуктов деления в отработавших твэлах и ТВС экспериментальных реакторов. Этот более общий метод состоит в вычислении интегрального потока нейтронов, выгорания и изотопного состава топлива в данной позиции измерения по высоте твэла или ТВС по экспериментальным значениям концентрации ^{137}Cs , отношения активностей ^{134}Cs и ^{137}Cs или по таким интегральным радиационным характеристикам ТВС, как удельный выход гамма-квантов или удельный выход нейтронов.

Важное преимущество последних двух вариантов экспериментально-расчетного метода состоит в том, что удельный выход нейтронов и гамма-квантов можно измерить в дискретных позициях по высоте ТВС непосредственно в бассейне-хранилище отработавшего топлива более простыми техническими средствами, не требующими использования громоздкого коллиматора гамма-излучения и спектрометрической аппаратуры.

ЭРМ позволяет также учесть локальные особенности спектра нейтронов, в потоке которых формировался изотопный состав топлива в исследуемом твэле или ТВС. Поэтому ЭРМ после отработки на образцах топлива использовался для измерения распределения выгорания, жесткости спектра нейтронов и концентраций изотопов урана и плутония по поперечному сечению ТВС. Полученные экспериментальные данные использовались для верификации реакторной программы ПЕРМАК.

Для испытания и отработки ЭРМ в промышленных условиях в бассейне-хранилище 5-го энергоблока Нововоронежской АЭС была создана опытная установка для нейтронного и гамма-сканирования ТВС ВВЭР-1000. На этой установке выгорание и содержание изотопов актинидных элементов в ТВС ВВЭР-1000 можно измерить четырьмя способами: по отношению активностей ^{134}Cs и ^{137}Cs , концентрации ^{137}Cs , удельному выходу гамма-квантов и удельному выходу нейтронов.

На опытной установке Нововоронежской АЭС проведены измерения выгорания топлива в нескольких десятках ТВС ВВЭР-1000 с различной историей облучения и выгоранием от 30 до 50 Гвт-сут/т U. Получены данные, в которых остро нуждались проектанты и расчетчики. В настоящее время в бассейне-хранилище завода РТ-2 создается упрощенный вариант такой установки и разрабатывается проект штатной установки контроля выгорания топлива в ТВС ВВЭР-1000.

1.2. Нейтронный метод

Топливо ВВЭР. Привлекательность методов, основанных на регистрации собственно-го или индуцированного нейтронного излучения, обусловлена следующими причинами:

- высокая проникающая способность нейтронов существенно упрощает учет эффекта поглощения при прохождении нейтронов через вещество ТВС;
- простота и надежность аппаратуры, используемой для регистрации нейтронов;
- нейтронные измерения могут быть выполнены сразу после извлечения ТВС из реактора, в то время как гамма-спектрометрические измерения могут быть проведены только после соответствующего времени выдержки ТВС;
- в случае использования (γ, n) -реакции с применением конвертеров (Be, D_2O) фото-нейтроны генерируются γ -излучением (в основном, ^{144}Ce и ^{106}Ru) с энергией 1,8-2,3 МэВ, поглощение которых в веществе ТВС в 5-6 раз меньше, чем поглощение гамма-излучения с энергией 500-800 кэВ, которое используется обычно в гамма-спектрометрическом методе.

Первые измерения на кусках отработавших твэлов из ТВС ВВЭР-365 НВАЭС дали неожиданные результаты. Суть метода измерения состояла в следующем: если участок твэла

окружить веществом-мишенью (конвертером), для которого энергия порога (γ, n)-реакции равна $E_n(\gamma, n)$, то γ -излучение ПД, содержащихся в топливе с энергией $E_n > E_n(\gamma, n)$, будет генерировать в мишени фотонейтроны, которые регистрируются счетчиком нейтронов. В том случае, когда в качестве мишени используется замедлитель нейтронов (вода), не генерирующий фотонейтроны, - будет регистрироваться собственное нейтронное излучение топлива.

Расчет по программе POP (для реакторов ВВЭР-365, ВВЭР-440), которая учитывает накопление ТУЭ вплоть до ^{242}Pu , дает величину собственного нейтронного потока для топлива с выгоранием 28 Мвт-сут/т U, равную ~ 3 нейтронам на грамм топлива в секунду. Измерения дали величину потока, на два порядка превышающую расчетную. Для объяснения наблюдаемого эффекта необходимо было допустить, что этот поток, в основном, обусловлен накоплением нуклидов с более высоким выходом нейтронов, чем у ^{240}Pu и ^{242}Pu . Такими нуклидами могут быть ^{242}Cm ($T_{1/2} = 162$ дня) и ^{244}Cm ($T_{1/2} = 18$ лет). Проведенные через два месяца повторные измерения не обнаружили снижения нейтронного потока, которое должно было бы наблюдаться при наличии в топливе заметного количества ^{242}Cm .

Для объяснения наблюдаемого нейтронного потока количество накопившегося в топливе ^{244}Cm должно составлять ~ 20 мг/кг топлива с выгоранием около 28 Мвт-сут/т U. Этот результат был подтвержден данными разрушающего анализа.

Нами была обнаружена сильная зависимость величины нейтронного потока от выгорания. При изменении выгорания в 2,5 раза - от 12 до 30 Мвт-сут/т U - поток нейтронов возрос в 60 раз, т. е. величина нейтронного потока является очень чувствительным параметром при изменении выгорания ядерного топлива. Дальнейшие исследования показали, что при двухлетней выдержке топлива 95 % нейтронного потока обусловлено ^{244}Cm . (Проектная выдержка топлива не менее 3 лет).

Далее было показано, что среди долгоживущих продуктов деления, испускающих гамма-излучение с энергией, большей пороговой для Be ($E_n = 1,67$ МэВ) и дейтерия (тяжелая вода, $E_n = 2,23$ МэВ), для времени выдержки топлива более полугода фотонейтроны могут генерироваться только гамма-излучением нуклидов ^{106}Ru и ^{144}Ce . При этом на дейтерии фотонейтроны генерируются гамма-излучением ^{106}Ru , а на Be - гамма-излучением как ^{106}Ru , так и ^{144}Ce .

^{144}Ce является прямым продуктом деления, поэтому должна существовать линейная зависимость между концентрацией ^{144}Ce в топливе и выгоранием, что подтверждается гамма-спектрометрическими измерениями.

Выход ^{106}Ru при делении ^{239}Pu в 12 раз превышает его выход при делении ^{235}U . Поэтому величина концентрации ^{106}Ru в топливе позволяет определить вклад плутония в полное выгорание.

Данные нейтронных измерений на образцах твэлов позволили сконструировать и изготовить несколько вариантов опытных установок для определения выгорания и состава отработавшего топлива методом нейтронного сканирования твэлов и ТВС в горячей камере и в бассейне-хранилище Нововоронежской АЭС.

Полученная простая зависимость между нейтронным потоком и выгоранием

$$N = k W^\alpha,$$

где: N - поток нейтронов; W - выгорание; k и α - коэффициенты, зависящие от типа реактора и начального обогащения топлива, - позволила экспериментально исследовать зависимость накопления ^{244}Cm от начального обогащения топлива в ТВС. Сравнение экспериментальных данных с результатами расчета, выполненного по программе УНИРАСОС для ТВС реакторов ВВЭР-365 и ВВЭР-440, показало удовлетворительное согласие расчетных и экспериментальных данных.

Полученные экспериментальные данные о высоких значениях выхода нейтронов потребовали серьезной проектной корректировки транспортных контейнеров и ряда технологических узлов при переработке топлива.

В 1976 г. автор на совещании экспертов МАГАТЭ в Вене предложил использовать метод нейтронного сканирования в Системе гарантий МАГАТЭ для идентификации отработавших сборок и определения выгорания в ТВС легководных реакторов. В настоящее время этот метод используется при проведении инспекций МАГАТЭ на предприятиях топливного цикла в странах, подписавших договор о нераспространении ядерного оружия.

Топливо РБМК. Конструкция, компоновка и топливо реактора РБМК-1000 существенно иные, чем у реакторов ВВЭР, поэтому скорость образования нуклидов и изотопный состав отработавшего топлива РБМК должны заметно отличаться от соответствующих характеристик топлива ВВЭР.

Ко времени проведения исследований топлива РБМК-1000, начатых нами на Ленинградской АЭС в 1979 г., отсутствовали какие-либо экспериментальные данные об изотопном составе топлива и характеристиках его нейтронного излучения. Потребность же в этих данных была крайне велика по причинам, о которых уже говорилось при обсуждении исследований с топливом ВВЭР.

Была разработана и изготовлена установка для нейтронного сканирования твэлов и ТВС топлива РБМК в защитной камере Ленинградской АЭС, проведен такой же цикл исследований, как и с топливом ВВЭР. С использованием результатов разрушающего анализа образцов топлива РБМК-1000, выполнявшегося одновременно с неразрушающими измерениями, были получены зависимости нейтронного потока от выгорания, вклад плутония и урана в выгорание, распределение выгорания в ТВС по высоте и др. В частности, были получены важные данные, показывающие, что при выгорании около 20 Мвт-сут/т U (проектное выгорание) и выше преимущественный вклад в полное выгорание дает плутоний, нарабатывающийся в ТВС, в то время как для топлива ВВЭР вклад плутония при таких величинах выгорания не превышает 30 %.

Сравнение экспериментальных данных по изотопному составу топлива и распределения выгорания по ТВС с расчетными показало заметное их расхождение, что привело к необходимости существенной корректировки расчетных программ.

Топливо судовых реакторов (СР). Метод, основанный на регистрации собственного и индуцированного нейтронного излучения, был использован для определения содержания урана в топливе СР, а также для идентификации вида топлива в этих ТВС. Неполнота, а часто и отсутствие сведений о глубине выгорания и типе ТВС СР, находящихся в бассейне-хранилище, обусловили необходимость разработки метода и аппаратуры для определения этих характеристик с целью обеспечения ядерной безопасности и формирования партий ТВС для их переработки. Эти ТВС при полной внешней идентичности имели различное начальное обогащение и элементный состав топлива.

Наиболее перспективным оказался метод, основанный на регистрации нейтронов, возникающих в результате деления ^{235}U при облучении ТВС нейтронами ^{124}Sb -Be-источника. Энергия облучающих нейтронов, равная 24 кэВ, исключает возможность деления ^{235}U , что упрощает анализ результатов измерений.

Выделение нейтронов деления (Φ_2) на большом фоне ^{124}Sb -Be-источника (Φ_1) осуществлялось на основе различия в длинах замедления в воде этих двух групп нейтронов (13 и 6,25 см соответственно). Варьируя расстояние между системой источник нейтронов - образец - детектор, а также используя кадмиевый экран (нейтроны источника термализуются раньше нейтронов деления) между ^{124}Sb -Be-источником и детектором, удалось достигнуть отношения $\Phi_2/\Phi_1 \sim 500$.

Установка, размещенная в бассейне-хранилище ПО "Маяк", прошла производственные испытания и использовалась для формирования партий топлива СР на переработку.

2. НЕОБЛУЧЕННЫЕ ЯДЕРНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Установки для обнаружения, измерения и идентификации ядерных материалов, основанные на методе регистрации собственного нейтронного излучения, можно разделить на две группы.

В первую группу входят установки, анализирующие образцы, которые можно разместить внутри детектирующего устройства. Установки представляют собой цилиндрические многокольцевые сборки счетчиков тепловых нейтронов, окруженные замедлителем (полиэтилен, оргстекло) с центральным каналом для исследуемых объектов. Объем измеряемых образцов - от 0,5 до 100 литров. Максимальная эффективность регистрации нейтронов делительного спектра составляет 41 %. Регистрация совпадений позволяет проводить не только количественный, но и нуклидный анализ делящихся ядер, различать нейтронные потоки, обусловленные спонтанным делением, от потоков нейтронов, возникающих в (α, n) -реакции.

Ко второй группе установок, использующих регистрацию собственного нейтронного излучения образцов, относятся поисковые нейтронные детекторы, представляющие собой сборки гелиевых или борных счетчиков, объединенных конструктивно в системы с большей чувствительностью. Они предназначены для дистанционного поиска объектов, испускающих нейтроны (военные объекты, остатки космических спутников и др.). В рамках решения поисковых задач была разработана аппаратура для проведения как стационарного контроля (мониторинга) объектов, так и для мобильных измерений, при которых регистрирующие системы располагались на транспортных средствах (машине, вертолете). В результате проведенных работ получен ряд важных данных, позволяющих оптимизировать процесс поиска и выбрать наиболее подходящую конструкцию регистрирующей аппаратуры.

2.1. Контроль качества необлученного топлива

По мере совершенствования эксплуатационных характеристик как энергетических, так и судовых реакторов, возрастали требования к контролю качества продукции на различных этапах изготовления ТВС, начиная с топливных таблеток и кончая целыми ТВС.

Одной из таких задач является обнаружение в ТВС твэлов с обогащением, отличающимся от штатного. Особенно опасно наличие твэлов с обогащением, большим чем номинальное, так как в этом случае при работе реактора в месте нахождения этого твэла возникает локальный перегрев, что приводит к выводу ТВС из строя.

Для разработки методов такого контроля в лаборатории был спроектирован и построен стенд СКАТ, который позволял проводить измерения на ТВС как в сухом, так и в "мокром" канале.

Новосибирский завод НЗХК, выпускающий ТВС для ВВЭР-1000 и СТ-500, изготовил специально для Радиевого института полномасштабную (только меньшей высоты) ТВС, в которой можно было помещать твэлы различного обогащения. Разработанный в лаборатории П. И. Федотова метод основан на облучении ТВС внешним коллимированным потоком нейтронов. При этом в процессе измерения происходит вращение ТВС. Не останавливаясь на деталях происходящих в ТВС процессов, отметим, что при наличии нестандартного твэла в ТВС полученный функциональный отклик зависит как от величины дефекта, так и от места его нахождения.

Стенд включает электронную аппаратуру, детекторы излучения, водный бассейн для формирования измерительного канала, устройство для перемещения исследуемого объекта. Для облучения исследуемых ТВС используются изотопные источники нейтронов (^{244}Cm и $^{124}\text{Sb} + \text{Be}$). Стенд включает также радиометрическую аппаратуру, при помощи которой осуществляется контроль нейтронного и гамма-излучения.

Для отработки методов определения количества делящихся материалов в изделиях и ТВС со сложными геометрической структурой и составом (например, ТВС СР) были разработаны и построены стенды ЭСНАКТ и ЭСНАРТ, позволяющие проводить измерение как на целом изделии, так и на его отдельных структурных элементах, не извлекая их из изделия. Стенд ЭСНАРТ включает до 60 измерительных каналов. Рабочая камера позволяет размещать объекты с максимальным поперечным размером до 29 см. В качестве источников нейтронов использовались изотопные источники ^{252}Cf , $^{124}\text{Sb} + \text{Be}$ и $^{241}\text{Am} + ^7\text{Li}$. Регистрировались

как мгновенные, так и запаздывающие нейтроны деления. Канальный принцип построения системы (источники облучающих нейтронов - детекторы нейтронов) позволяет, наряду с определением концентрации делящихся материалов в анализируемом объекте, выявлять возможные азимутальные и радиальные неравномерности его загрузки. Осевые неравномерности протяженных объектов измеряются при сканировании, когда эти объекты перемещаются в центре кольцевых соосных элементов, из которых собраны детектирующая и облучающая части стенда ЭСНАРТ.

На стендах СКАТ и ЭСНАРТ был выполнен большой объем исследований на различных объектах, содержащих делящиеся материалы, что позволило разработать установки для их использования на предприятиях ядерного топливного цикла.

2.2. Радиометрический метод контроля плотности топливных таблеток ВВЭР

Как показывает опыт эксплуатации водо-водяных энергетических реакторов, вынужденные остановки реакторов часто происходят вследствие дефектов и последующей разгерметизации твэлов. Одной из причин этого является внутреннее гидрирование циркониевой оболочки твэлов, происходящее вследствие повышенного содержания влаги в топливных таблетках. Особую опасность в отношении повышенного содержания влаги представляют недоспеченные таблетки с низкой плотностью (ниже 10,0-10,2 г/см³), обладающие развитой пористостью, значительным количеством дефектов структуры и, соответственно, высокой сорбционной способностью.

Уменьшение влаги в таблетках может быть достигнуто несколькими способами, но наиболее надежным, эффективным и дешевым в процессе производства таблеток является простое исключение таблеток с плотностью ниже 10,4 г/см³.

Для этого необходимо было разработать систему контроля плотности таблеток, которая позволяла бы производить не выборочный однопроцентный контроль с производительностью 40 таблеток в час, как это делалось ранее, а 100 % контроль с производительностью несколько тысяч таблеток в час.

Такая установка (система БАРС) была разработана и изготовлена в 1979 г. совместно с заводом НЗХК.

Измерение плотности таблеток основано на гамма-абсорбционном методе с использованием в качестве гамма-источника ¹³⁷Cs. Система БАРС предусматривает возможность работы как в автономном режиме, так и с ЭВМ. Система имеет следующие технические характеристики: производительность 5000 таблеток в час (в двухканальном варианте), диапазон измерения плотности 10,0-10,9 г/см³, среднеквадратичная погрешность измерения плотности 0,05 г/см³. Высокую стабильность и быстродействие системы удалось реализовать благодаря разработке нового метода дискриминации импульсов с компенсацией нестабильности усиления сдвигом нулевого уровня.

Результаты работы лаборатории в области неразрушающих методов анализа делящихся материалов уже в первые годы деятельности получили международное признание. Практически не было ни одного сколько-нибудь заметного международного совещания или конференции по ядерному топливному циклу, где не были бы представлены работы лаборатории. Были налажены тесные контакты с МАГАТЭ и странами СЭВ. Начальник лаборатории П. И. Федотов входил в состав постоянных экспертов МАГАТЭ в области нераспространения ядерного оружия. К сожалению, в силу ряда обстоятельств, с начала 80-х годов международные контакты были практически прекращены.

В настоящее время лаборатория испытывает, как и институт в целом, серьезные трудности (недостаточное финансирование, резкое уменьшение численности сотрудников). Однако экспериментальная база сохранилась, в значительной степени сохранен научный потенциал сотрудников, что позволяет верить (и для этого появились основания), что возможности этой в общем-то уникальной лаборатории будут востребованы в полной мере.

Организатором и научным руководителем представленных в этой статье разработок был начальник лаборатории П. И. Федотов.

Разработка гамма-спектрометрического направления исследования выгорания и состава отработавшего топлива проводилась группой Б. А. Бибичева, в работе которой на разных этапах принимали участие В. П. Майоров, Ю. М. Протасенко, М. А. Разуваева, В. В. Кожарин.

Отработка нейтронных методов анализа делящихся материалов, разработка стендов и установок, проведение измерений на них как в лабораторных, так и производственных условиях проводилась группами Н. М. Казаринова (А. А. Воронков, А. Г. Коренков, В. А. Маевский, С. В. Правдин, Д. В. Смирнов, З. Ф. Шереметьева) - топливо ВВЭР, РБМК, СР - и Ю. А. Бабенко (А. А. Случаев, М. А. Разуваева) - топливо ВВЭР, СР.

Разработка стендов ЭСНАРТ и ЭСНАКТ (включая электронику) осуществлялась группой Ю. А. Бабенко с сотрудниками Ленинградского технологического института О. П. Никотиным и И. М. Козловым.

Разработка электронных блоков для гамма-спектрометрического метода и, частично, нейтронных методов обеспечивалась группой А. К. Шереметьева (А. М. Калашников, А. М. Иванов, И. Ю. Петров, В. И. Андреевская, О. В. Фугель, А. Л. Малкин).

В решении некоторых вопросов, связанных с разработкой систем автоматизации физических измерений для стендов СКАТ и ЭСНАРТ, принимали участие сотрудники лаборатории Н. К. Ласточкина (Н. К. Ласточкин, А. Г. Олив, В. М. Карасев, Р. А. Королева).

Разработка контроля плотности топливных таблеток была выполнена группой А. К. Шереметьева совместно с сотрудниками НЗХК Д. Ф. Зенковой, С. И. Козловым и А. К. Ивановым.

ТВЕРДОТЕЛЬНЫЕ ТРЕКОВЫЕ ДЕТЕКТОРЫ И ИХ ПРИМЕНЕНИЯ

В. А. Николаев

В начале 60-х годов американскими физиками Р. Л. Флейшером, П. Б. Прайсом, Р. М. Уокером, а также - независимо - сотрудниками ЛЯР ОИЯИ В. П. Перелыгиным и С. П. Третьяковой в практику регистрации тяжелых заряженных частиц был введен метод твердотельных трековых детекторов (ТТД), который стал дальнейшим развитием трекового метода для ядерных исследований. В отличие от фотометода, достаточно хорошо развитого к тому времени в работах Л. В. Мысовского, А. П. Жданова, Н. А. Перфилова, Н. Р. Новиковой, В. И. Захарова, метод ТТД был основан на эффекте образования треков в диэлектрических твердых материалах, что обусловило ряд особенностей, которые обеспечили ему новые применения во многих лабораториях мира и в том числе в Радиовом институте.

В первое время наиболее распространенными типами ТТД были обыкновенные натрий-силикатные стекла. Оказалось, что осколки ядерного деления или другие тяжелые ионы с $dE/dx > 15 \text{ МэВ} \cdot \text{мг}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$ при облучении стеклянных пластин производят в них радиационные повреждения, которые после травления в плавиковой кислоте проявляются в виде треков - углублений конической формы с диаметром на поверхности стекла $\sim 10 \text{ мкм}$. Такие треки легко могут быть подсчитаны с помощью микроскопа с небольшим увеличением $\sim 100\times$, т. е. с большим полем зрения, достаточным для быстрого просмотра детектора площадью $\sim 1 \text{ см}^2$. При этом все частицы с меньшими удельными энергетическими потерями (легкие ионы, протоны, α -, β -частицы) не образуют треков вплоть до потоков $\sim 10^{15} \text{ см}^{-2}$ и более. Нейтроны и γ -кванты могут создавать фоновые треки в стекле только в результате реакции деления очень малых примесей урана и тория. Стеклянный трековый детектор был общедоступен, не требовал никакого дополнительного оборудования, кроме простейшего

микроскопа, мог работать при довольно высоких температурах, иметь практически любые размеры, выдерживать удары, вибрацию и т. п. Благодаря этим свойствам стеклянные трековые детекторы использовались в 60-х - 70-х годах практически во всех лабораториях института, занимающихся делением ядер в научных или научно-прикладных целях, в том числе для измерений периодов полураспада спонтанного деления, сечений деления, угловых распределений осколков деления различных радионуклидов с высокой удельной α -активностью при использовании нейтронов, фотонов, ускоренных дейтронов, α -частиц, ионов (лаборатории К. А. Петржака, Ю. А. Немилова, Н. А. Перфилова, А. Н. Протопопова и др).

Кроме стекол, в эти годы Ю. А. Селицкий с сотрудниками начал использовать в качестве ТТД естественные и искусственные слюды, разработал эффективные методы устранения фона спонтанного деления в детекторе. Впоследствии в результате интенсивного изучения процесса образования треков в диэлектриках в мировой практике стали использовать различные типы ТТД на основе стекол, минералов, полимерных материалов, обладающих различными порогами регистрации, позволяющими регистрировать не только осколки деления и другие тяжелые ионы, но и легкие ионы (фрагменты, ядра отдачи), α -частицы, на интенсивном фоне более легких частиц, чем регистрируемые. При разработке отечественных α -чувствительных нитратцеллюлозных трековых детекторов для массовых измерений в Переславском филиале института Химфотопроект значительный вклад был внесен сотрудниками Радиевого института (группа В. А. Николаева), а первые образцы отечественных детекторов типа CR-39 были получены О. Е. Шигаевым.

Спектрометрия осколков деления с помощью стекол. Сейчас, в 1997 г., когда разработано и всесторонне исследовано большое количество различных типов ТТД, трековых устройств и методов, в том числе, для целей спектрометрии излучений и идентификации частиц, интересно отметить, что практически до конца 60-х годов бытовало устойчивое мнение, что ТТД - это только регистратор частиц без возможности спектрометрии их по энергиям. Во всяком случае, это казалось очевидным для ТТД с высоким порогом регистрации - стекол, - поскольку видимая часть трека от осколка деления в стекле после травления оказывается существенно короче длины пробега и составляет всего 5-7 мкм. Диаметры же треков при перпендикулярном падении осколков к поверхности детектора отличаются от среднего значения всего на 5 %, хотя средние энергии, массы, заряды осколков различаются примерно в 1,5 раза. В. А. Николаев предположил, что такое слабое различие треков на поверхности стекла связано с тем, что диаметр трека зависит от dE/dx осколка. Эта величина имеет малую дисперсию для разных осколков в начале пробега, хотя в середине пробега она существенно различна для осколков разных масс. Экспериментально подтвердив это предположение, удалось предложить и разработать новый метод измерений энергий осколков деления с помощью стекол со специально подобранными по толщине фильтрами. Спектры диаметров треков осколков деления в таких стеклянных детекторах аналогичны соответствующим энергетическим спектрам.

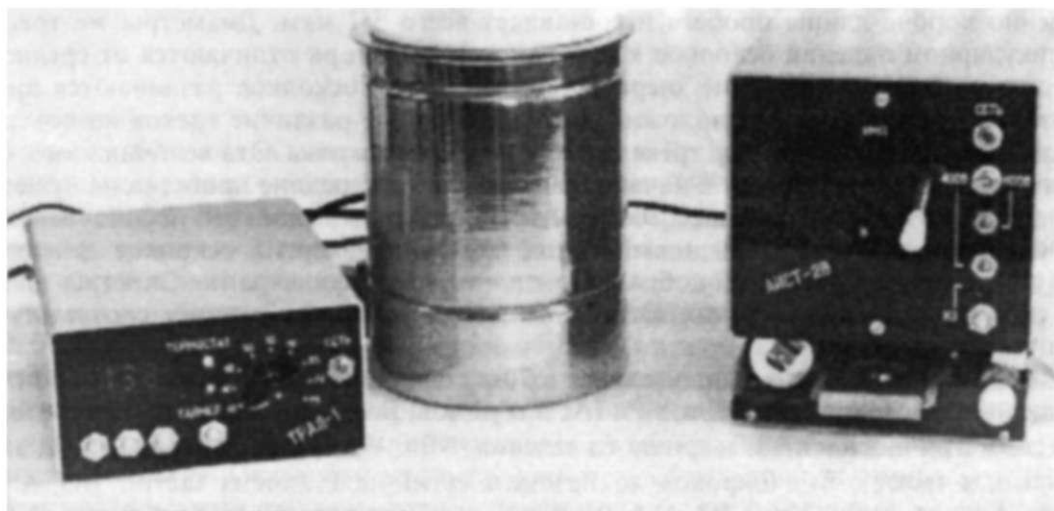
Разработанный метод использовался в 70-х годах в цикле исследований спонтанного и вынужденного деления ^{238}Pu , ^{239}Pu , ^{240}Pu (А. В. Громов, В. А. Николаев, А. Н. Протопопов), а также симметричного и асимметричного деления ^{226}Ra , ^{227}Ac , ^{209}Bi нейтронами, γ -квантами, дейтронами, α -частицами в широком диапазоне энергий налетающих частиц. (Ю. А. Селицкий, Е. А. Жагров, И. М. Кукс, Ю. А. Немилов, В. А. Николаев, С. В. Хлебников, В. Б. Фунштейн). Без разработанного трекового метода спектрометрии осколков деления получение спектрометрической информации о делении этих ядер было бы практически невозможно из-за их высокой удельной α -активности, низкой делимости вблизи порога деления, высокой загрузки детекторов фоновым излучением.

В 70-х - 80-х годах метод был модифицирован для фосфатных и кварцевых стекол, при этом для калибровок и исследований использовался уникальный ташкентский масс-сепаратор осколков деления, позволяющий выделять осколки с заданными массой, энергией, эффективным зарядом (В. Е. Копченков, В. А. Николаев совместно с ИЯФ Узбекистана).

Автоматизация трековых измерений. Широкомасштабное внедрение метода ТТД в практику (например, для дозиметрических целей) требует автоматизации измерений, поскольку микроскопный способ снятия информации трудоемок и не исключает влияния субъективного фактора. За решение проблемы автоматизации трековых измерений взялась группа под руководством В. А. Николаева, которая затем, по инициативе А. С. Кривохатского, была преобразована в лабораторию трековых методов регистрации ядерных частиц. А. С. Кривохатский непосредственно участвовал в организации и проведении многих работ лаборатории. В 80-х - 90-х годах в работе трековой группы и лаборатории принимали активное участие И. Б. Воробьев, И. А. Гаврилова, А. В. Громов, А. И. Дмитриев, А. В. Евдокимов, А. В. Козунов, А. Е. Козлов, В. Е. Копченков, С. М. Кривоногов, Н. Б. Пластинин, Т. С. Потапова, О. Е. Шигаев, А. И. Шипунов. В результате их деятельности был разработан комплекс устройств и методов автоматического счета и измерения размеров треков с плотностью от 1 до 10^8 см⁻²: искровые счетчики треков шести типов для работы с тонкими (< пробега частицы) полимерными детекторами; модифицированная система МАГМО для подсчета и измерения размеров треков в толстых (> пробега частицы) детекторах; метод микрофотометра для измерения высоких ($>10^4$ см⁻²) плотностей треков.

Наиболее широкое распространение на практике получили искровые счетчики треков. На некоторые из них (ИСТРА, "Гектор") получены авторские свидетельства или патенты, и все они обеспечены соответствующей конструкторской и эксплуатационной документацией.

Одновременно исследован ряд тонкопленочных детекторов на основе полиэтилентерефталата, поликарбоната, нитрата целлюлозы, разработаны методики их использования применительно к методу искрового пробоя, изучены особенности их применения при интенсивном фоновом облучении нейтральными и легкими заряженными частицами.



Комплекс АИСТ-2 - ТРАЛ, разработанный для массового потребителя

Автоматизированный искровой счетчик треков АИСТ-2 и малогабаритное термостатированное травильное устройство ТРАЛ (показаны на рисунке) разработаны специально для массового потребителя, метрологически аттестованы и выпускаются в Радиовом институте малыми сериями. На их базе созданы измерительные комплексы для регистрации, спектрометрии и дозиметрии нейтронов, радоновых измерений, радиометрии α -загрязнений твердых и жидких объектов. В этих работах, кроме сотрудников лаборатории трековых ме-

тодов, активное участие принимали Б. М. Александров, А. Е. Денисов, П. С. Солошенко, С. М. Соловьев, В. И. Юревич, Р. М. Яковлев.

Трековые методы спектрометрии и дозиметрии нейтронов. В качестве базового нейтронного трекового детектора разработан набор ДНЕСТР, предназначенный для регистрации тепловых, промежуточных и быстрых нейтронов и специально приспособленный для съема информации методом искрового пробоя. Набор содержит мишени ^{235}U , ^{238}U , ^{237}Np , ^{238}Th , помещенные в кадмиевые и борные экраны, и лавсановые трековые детекторы. Спектрометрический набор прошел тестирование в полях монохроматических нейтронов с энергией 1-15 МэВ, получаемых на нейтронных генераторах Радиевого института, а также в опорных полях изотопных источников с защитой ИФВЭ. В. И. Юревичем разработана методика восстановления дифференциальных нейтронных спектров на основе показаний пороговых детекторов.

На базе набора ДНЕСТР разработана также модификация ДНЕСТР-ВЭ для регистрации нейтронов с энергиями от тепловых до нескольких ГэВ. Модифицированный набор содержит дополнительно нитратцеллюлозный детектор, регистрирующий нейтроны с порогом ~ 3 МэВ по реакциям (n, α) и ядрам отдачи, детектор на основе ^{209}Bi или ^{210}Pb (порог 70-90 МэВ), а также фрагментационные детекторы на основе Cu , Cd , Ti с порогом в несколько сотен МэВ (В. А. Николаев, В. И. Юревич).

Метод применен в большом цикле измерений пространственных и энергетических характеристик нейтронов, испускаемых из массивных мишеней при облучении их протонами с энергиями 0,5-4 ГэВ на ускорителе ЛВЭ ОИЯИ. В этих экспериментах было использовано ~ 1000 детекторов, что было бы невозможно без автоматизации подсчета треков.

Набор ДНЕСТР применен также для оценки потоков нейтронов различных энергетических групп в скважинах под аварийным 4-м блоком ЧАЭС. Показано, что форма энергетического спектра хорошо описывается представлением для смягченного спектра нейтронов деления. Потоки нейтронов сильно зависят от точки измерения, а их абсолютные значения невелики ($\sim 100 \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$).

Дозиметрические характеристики набора ДНЕСТР изучались экспериментально относительно показаний штатных радиационных мониторов, установленных за верхней и боковой защитами серпуховского протонного синхротрона на 70 ГэВ ИФВЭ. Результаты измерений дозовой чувствительности сравнивались с расчетными значениями, полученными в ИФВЭ. Показана хорошая сходимости экспериментальных и расчетных значений, разработан и испытан (совместно с ИФВЭ) нейтронный альbedo-трековый индивидуальный дозиметр, пригодный для работы в сложных радиационных условиях (рассеянные нейтроны, протоны, мезоны, γ -излучение) при протяженном энергетическом спектре нейтронов (от тепловых до сотен МэВ). Создана опытная партия дозиметров и считывающей аппаратуры для работы в условиях ИФВЭ.

В результате лабораторных опытов и облучения детекторов ДНЕСТР на атомных ледоколах "Сибирь", "Россия", "Советский Союз", "Таймыр" разработан специальный высокочувствительный нейтронный трековый дозиметр для персонала атомных ледоколов (минимально измеряемая доза $\sim 0,1$ мБэр). Параллельная эксплуатация трековых дозиметров с альбедными дозиметрами ALNOR на а/л "Таймыр" показала, что трековые дозиметры обладают в ~ 100 раз более высокой чувствительностью и значительно более низкой стоимостью, чем альбедные при близких характеристиках по погрешности измерений. После метрологической аттестации аналогичный комплекс был поставлен на эксплуатацию на химвкомбинате "Маяк".

Трековый метод в радоновых измерениях. Одной из наиболее широкомасштабных реализаций трекового метода в мировой практике является его применение в радоновых измерениях. Пространственные распределения концентраций почвенного радона используются в целях разведки месторождений урана, поиска нефтяных и газовых месторождений, оценки радоноопасности территорий и в других целях. Концентрация радона в почвах в течение суток может изменяться до двух раз, поэтому интегральные во времени методы измерений

приобретают особое значение. Одновременные измерения в почвах сразу по десяткам точек позволяют адекватно измерить профили концентраций почвенного радона.

Концентрация радона в помещениях в течение суток может изменяться на порядок и более, поэтому интегральные методы измерений еще более обоснованы, чем в почвах. Измерения объемной активности радона в воздухе жилых помещений в течение 1-3 месяцев позволяют надежно определить соответствие данного помещения нормативам и оценить среднегодовую дозу, получаемую его обитателями от радона и дочерних продуктов его распада. Это очень важно в аспекте "проблемы радона", которая в 80-х годах признана важнейшей глобальной проблемой радиационной гигиены. Суть проблемы в том, что огромное количество людей на планете, находясь в помещении, получают, не зная того, от накапливающегося радона и ДПР дозу на легкие, превышающую допустимую для профессионалов, причем иногда в десятки и сотни раз.

Комплекс АИСТ-ТРАЛ в модификации для радоновых измерений, содержащий набор (100 шт.) трековых радиометров, истрочной счетчик, травильное устройство, пригоден для измерений объемной активности радона с чувствительностью ~ 15 Бк/м³ (при экспозиции 1 месяц) как в почвах, так и в помещениях. Он метрологически аттестован, а также входит в комплект аппаратуры ТРЕК-РЭИ-1, зарегистрированный в Государственном реестре средств измерений. Комплект допущен к применению в Российской Федерации, рекомендован к использованию в федеральной целевой программе "Радон" и для оснащения центров санэпиднадзора. С помощью трекового комплекса АИСТ-ТРАЛ проведены тысячи обследований жилых и производственных помещений в разных регионах России, Украины, Белоруссии, Казахстана.

Трековые радиометры для измерений α -загрязнений твердых и жидких объектов. Для измерений распределений α -загрязнений различных твердых поверхностей, а также по глубине грунта разработан специальный трековый радиометр, который может применяться как для картирования загрязнений на территориях с шагом измерения 1-10 м и более, так и для изучения характера распределения α -активности на малых (мм - см) объектах, а также для поиска и изучения характеристик "горячих" частиц (плотности распределения, размеров, α -активности). Радиометр использован в 1986 г. в зоне ЧАЭС для работы в условиях высокого β -, γ -фона (>3 Р/ч), контроля дезактивированных поверхностей с чувствительностью $0,01 \alpha\text{-см}^{-2}\cdot\text{мин}^{-1}$, изучения распределения α -активности в грунтах по глубине, радиографии оконных стекол, аэрозольных фильтров. Аналогичные измерения были проведены в 1990 г. в 30-км зоне в Чернобыле и в 1993 г. в Томске после аварии на Сибирском химическом комбинате.

Трековые погружные детекторы для измерений удельной α -активности воды также использовались в Чернобыле, а в 1993 и 1994 гг. - в работах вокруг затонувшей атомной подводной лодки (АПЛ) "Комсомолец". Расстановка детекторов осуществлялась Ан. В. Степановым с помощью глубоководного аппарата "МИР". Экспозиции детекторов составляли от 20 суток до 1 года. ТТД имели защитные фторпластовые пленки, предохраняющие детекторы от воздействия морской воды. В данном случае ТТД работали в "ждушем" режиме, т. е. могли зарегистрировать возможную утечку плутония за пределы АПЛ, независимо от времени начала процесса в период экспозиции. Радиографический анализ детекторов мог бы обнаружить "горячие" гидрозолы. Полученные данные об отсутствии утечки плутония за пределы АПЛ не противоречат результатам других методов.

Таким образом, с применением разработанного в Радиовом институте аппаратно-методического комплекса на базе твердотельных трековых детекторов и автоматических считывающих устройств проведены крупные циклы исследований по физике деления ядер, пространственно-энергетическим характеристикам нейтронов в различных нейтронных экспериментах, выполнен большой объем измерений для целей радоновой и нейтронной дозиметрии, α -дозиметрии в зоне ЧАЭС, при этом во многих случаях условия проведения экспериментов и измерений были таковы, что без разработанных трековых методов и аппаратуры

получение результатов было бы затруднено или невозможно. Результаты разработок внедрены на десятках предприятий страны.

Л и т е р а т у р а

1. Nikolaev V. A. // Nucl. Instr. and Meth., 1977, v. 147, p. 283-285.
2. Nikolaev V. A., Kopchenov V. E., Kozunov A. V., Krivonogov S. M., Plastinin N. B. // Nucl. Tracks Radiat. Meas., 1993, v. 21, N 3, p. 429-432.
3. Nikolaev V. A. // Radiation Measurements, 1995, v. 25, N 1-4, p. 337-354.
4. Nikolaev V. A., Vorobjev I. B., Yurevich V. I., Yakovlev R. M. // Nucl. Tracks Radiat. Meas., 1991, v. 19, N 1-4, p. 541-544.
5. Gromov A. V., Kozunov A. V., Krivokhatskiy A. S., Nikolaev V. A., Yurevich V. I., Prokopenko V. S. // Nucl. Tracks Radiat. Meas., 1993, v. 21, N 3, p. 383-386.
6. Nikolaev V. A., Vorobyev I. B., Kozunov A. V., Krivokhatskiy A. S. (там же, p. 425-428).
7. Nikolaev V. A., Vorobiev I. B., Gevitz V. B., Gromov A. V., Kozlov A. E. // Radiation Measurements, 1995, v. 25, N 1-4, p. 641-642.
8. Nikolaev V. A., Buzynniy M. G., Vorobiev I. B., Gromov A. V., Krivokhatskiy A. S., Los I. P., Zelenskiy A. V., Tomilin Yu. A. // Nucl. Tracks Radiat. Meas., 1993, v. 21, N 3, p. 433-436.

МАГНИТНАЯ АЛЬФА-СПЕКТРОСКОПИЯ

Р. Б. Иванов

В начале 50-х годов среди многих направлений ядерно-спектроскопических исследований едва ли не самой отсталой оказалась альфа-спектроскопия. Методика изучения альфа-распада не обеспечивала хорошей точности измерений энергий и интенсивностей альфа-переходов. Между тем, сведения о свойствах тяжелых ядер представляли значительный интерес как с чисто научной, так и с практической стороны. Известно, что одним из наиболее точных методов измерения энергии заряженных частиц является магнитный анализ. В связи с этим Б. С. Желеповым был выдвинут проект создания магнитного альфа-спектрометра в Радиовом институте.

Основное назначение такого прибора заключалось в возможности обнаружения малоинтенсивных альфа-переходов, для чего требовалась высокая светосила. Было известно, что значительное увеличение светосилы магнитных спектрометров может быть достигнуто, если использовать принцип двойной фокусировки частиц на угол $\pi\sqrt{2}$. Теория такой фокусировки в аксиально симметричном неоднородном магнитном поле была разработана для бета-спектрометрии. Спектрометры, в которых использовалось поле такого типа, имели оптимальное соотношение между разрешением прибора и его светосилой. Это и послужило основой проекта, реализация которого началась в 1953 г. Предполагалось, что новый прибор при разрешающей способности $\Delta H_p/H_p$ порядка 0,1 % будет обладать светосилой порядка 0,3 % от 4π .

Работы по созданию альфа-спектрометра продолжались около пяти лет. Были подготовлены и размещены заказы на изготовление электромагнита, полюсных наконечников, камеры спектрометра и необходимого вспомогательного оборудования. Контроль за их выполнением, а в дальнейшем за монтажом установки осуществлял под руководством Б. С. Желепова сотрудник лаборатории ядерной спектроскопии В. Г. Чумин. В Радиовом институте потребовалось оборудовать специальное помещение в нижнем этаже корпуса А. В нем на 1,8 м был углублен пол, а для проведения монтажных работ частично разобрана наружная стена здания. Эти работы в основном были завершены к 1958 г. Тогда же для налад-

ки и запуска прибора в эксплуатацию Б. С. Джелепов привлек еще двоих сотрудников лаборатории, В. Г. Недовесова и Р. Б. Иванова.

Имеются все основания утверждать, что к моменту начала работы и в течение последующих нескольких лет ни в СССР, ни за рубежом не имелось подобной аппаратуры. Все известные по литературным данным альфа-спектрометры обладали относительно невысокой светосилой, не превышающей 0,1 % от 4π, а их разрешающая способность - полуширина линии - $\Delta H\alpha/H\alpha$ - составляла 0,05-0,08 %.

Магнитный альфа-спектрометр был построен на базе электромагнита СП-37 циклотронного типа. Его размеры: длина - 3,5 м, ширина - 1,4 м, высота - 2,3 м; вес - 70 т. Полюсные наконечники, диаметром 1,0 м, имели специальный профиль для создания неоднородного поля заданной конфигурации. Высота рабочего зазора в центре магнита составляла 16 см. Для питания электромагнита предназначался специальный мотор-генератор мощностью 88 кВт. Он вырабатывал постоянный ток напряжением до 230 В, силой до 400 А и был снабжен стабилизатором, поддерживавшим заданный ток с точностью 0,03 %. Наибольшее значение напряженности поля в центре электромагнита достигало 20 килоэрстед.

Вакуумная камера альфа-спектрометра, весом около 500 кг, была изготовлена из латуни и имела внутренний диаметр 100,5 см, высоту - 12 см. Соответствующие устройства позволяли без нарушения вакуума производить смену радиоактивных источников, регулировку расходимости фокусируемого пучка альфа-частиц по горизонтальному и вертикальному углам, а также смену толстослойных фотопластинок, использовавшихся для регистрации альфа-частиц. Для контроля за стабильностью магнитного поля во время измерений в центре магнита помещался датчик протонного резонанса. Схема камеры со снятой крышкой представлена на рис. 1.

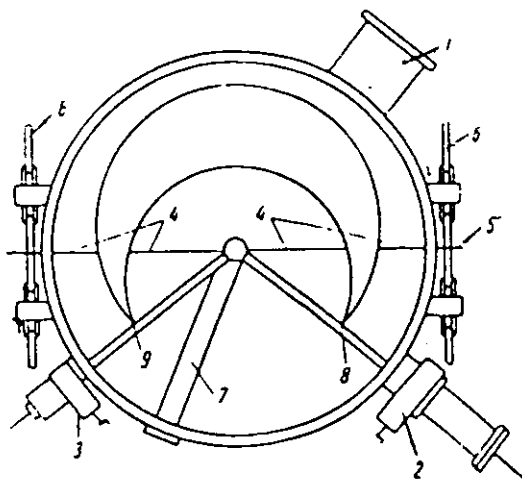


Рис. 1. Камера α-спектрометра:

1 - откатной патрубок; 2 - шлюзовое устройство для смены α-источников; 3 - шлюзовое устройство для смены фотопластинок; 4 - диафрагмы; 5 - штоки; 6 - рельсы; 7 - полость для датчика протонного резонанса; 8 - источник; 9 - фотопластинка

Одной из основных задач, которую предстояло решить для запуска спектрометра, было измерение топографии магнитного поля, проверка его соответствия условиям фокусировки и, в случае необходимости, проведение корректировки поля. Следует отметить, что единственное устройство, с помощью которого в то время оказывалось возможным выполнить подобную работу, была поворачивающаяся на 180° катушка, соединенная с баллистическим гальванометром. Для надежных измерений топографии требовалось провести около 10 измерений в каждом из 8 радиальных направлений в центральной плоскости симметрии и в таком же количестве радиальных направлений в плоскостях симметрии, параллельных центральной, но расположенных выше и ниже ее на 2 и 4 см. В каждом из этих измерений напряженность поля в центре зазора электромагнита должна была сохраняться неизменной. Затем устанавливалось другое значение поля в центре магнита, и вся процедура измерений повторялась снова. Это было необходимо, чтобы выяснить, не изменяется ли топография при из-

менении напряженности поля вследствие возникновения краевых эффектов или магнитного насыщения полюсов. Результаты этих измерений показали, что экспериментальные точки наилучшим образом ложатся на расчетную кривую распределения поля, если радиус равно-весной орбиты равен 33,5 см.

После того как были завершены методические работы, магнитный альфа-спектрометр вошел в строй действующих приборов, обладая следующими характеристиками: разрешение - 10 кэВ, светосила 0,28 % от 4π. Это позволяло исследовать препараты активностью до 10⁻⁵ мкКи в расчете на изучаемый альфа-переход, если ограничиться продолжительностью измерений 100 часов. Можно утверждать, что по совокупности этих параметров спектрометр оказался уникальным.

Уже первые исследования альфа-спектров с помощью нового прибора доказали возможность получения ценных научных результатов. Вместе с тем, возникли проблемы, относящиеся к качеству используемых в экспериментах источников альфа-излучения. Методика их изготовления, вполне пригодная для измерений в ионизационных камерах или сцинтилляционных спектрометрах, не соответствовала условиям, достижимым в магнитной спектроскопии. Суть заключалась в том, что полуширина спектральных линий зависит от толщины активного слоя используемых источников. Как показали специальные исследования, если она превышает 10 мкг/см², происходит расширение спектральных линий и увеличиваются "хвосты" этих линий в мягкой области спектров. Это явление вызвано торможением испускаемых альфа-частиц в веществе источника и не вызывает заметного ухудшения результатов, если измерительная аппаратура обладает невысоким разрешением. Магнитный альфа-спектрометр оказался в этом случае исключением, поэтому в процессе дальнейших работ оказалось необходимым создать специальную установку для напыления активности в вакууме на стеклянную или кварцевую подложку. Такой метод позволял получать наилучшую толщину и однородность препаратов, а также придавать источникам размеры и форму (как правило, полосок шириной от 0,1 до 2 мм и высотой от 5 до 20 мм), нужные для решения поставленной задачи. Существуют и другие факторы, учет которых оказался необходимым для изготовления качественных источников. Это структура поверхности подложки, наличие в исходном растворе посторонних примесей, температурный режим возгонки данного препарата и т. д. В какой-то мере качество использованных при наладке альфа-спектрометра источников помешало лучше установить оптимальное соотношение между разрешением и светосилой прибора. В последующих измерениях оно составляло 6-8 кэВ при светосиле 0,21 % от 4π.

Начиная с 1958 г., с помощью альфа-спектрометра был исследован распад более полутора десятков изотопов тяжелых элементов, среди которых значительную часть составляли трансурановые элементы (ТУЭ): плутоний, америций и кюрий. На протяжении десятилетия были получены новые данные об энергиях и интенсивностях альфа-переходов, уточнены ранее известные данные, дополнены схемы распада отдельных нуклидов. Это был период наиболее интенсивных работ на приборе, который использовался не только в научных целях, но и многократно применялся для проведения анализов альфа-активности различных образцов смесей ТУЭ. В общей сложности за это время появилось около 30 работ - статей и отчетов, содержащих полученные результаты.

К концу 60-х годов в научно-исследовательской деятельности, связанной с альфа-спектрометром начал возникать определенный кризис. Он был вызван тем, что количество пригодных для изучения в институте нуклидов оказалось исчерпанным. Это относилось к сравнительно долгоживущим изотопам и ни в какой мере не характеризовало общую ситуацию с исследованиями альфа-распада. Отчасти возникновению такого положения способствовало появление в начале 60-х годов в ИАЭ им. И. В. Курчатова еще одного спектрометра подобного типа. Там изотопы ТУЭ также стали объектами исследования. Появление высококачественных полупроводниковых альфа-детекторов упростило решение некоторых прикладных вопросов. Их использование позволяло во многих случаях отказаться от трудоемких измерений на магнитном спектрометре.

Один из вариантов продолжения научной работы состоял в использовании ускорителя ЛЯП ОИЯИ для облучения ториевой мишени, из которой можно было получить подходящие для исследований нуклиды. Осуществление этой возможности позволило исследовать альфа-распад актиния-225 ($T_{1/2} = 10$ суток) и его производных. Однако организация облучений в Дубне с последующей транспортировкой мишеней в Радиевый институт была сопряжена с определенными трудностями. Кроме того, в отделе ядерной спектроскопии ОИЯИ в 1966 г. также был построен магнитный альфа-спектрометр, поэтому оказалось более рациональным проводить дальнейшие научные исследования там совместно с физиками Дубны. Таким образом, после 1970 г. альфа-спектрометр в Радиевом институте стал эпизодически использоваться только для решения отдельных задач аналитического характера.

Следует отметить особое значение магнитного анализа для смесей трансурановых элементов. Это вызвано следующими обстоятельствами. В ряде случаев наиболее интенсивные альфа-переходы различных изотопов ТУЭ имеют близкие энергии. Например, основные альфа-группы плутония-239 и -240 (5155 и 5168 кэВ) отличаются всего на 13 кэВ. Рис. 2 иллюстрирует подобную ситуацию.

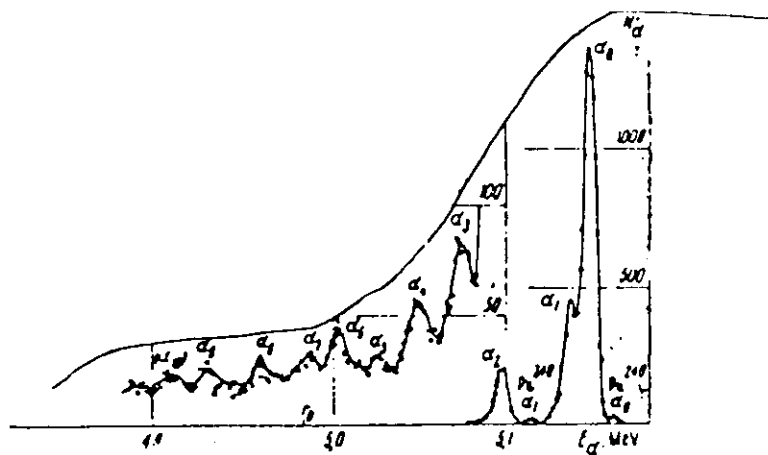


Рис. 2. Участок альфа-спектра смеси изотопов ^{239}Pu и ^{240}Pu

В данном случае в источнике имелась небольшая примесь плутония-240. Легко убедиться, что даже при разрешении 8 кэВ в этом эксперименте основные альфа-группы (α_0) этих изотопов полностью не разделяются. Это доказывает и наличие неразделенных альфа-переходов плутония-239 (α_0 и α_1), энергетическая разность которых также составляет 13 кэВ. Тем не менее, определение количественного состава смеси изотопов в этом случае можно провести достаточно надежно. Подобная задача становится значительно более сложной, если возрастает относительное содержание в смеси плутония-240. "Хвост" его основной линии накладывается на альфа-группы плутония-239, поэтому для проведения анализа необходимо или раскладывать суммарный спектр на составляющие, или определять содержание этих нуклидов в смеси по интенсивностям других альфа-групп этих изотопов, например α_2 плутония-239 и α_1 плутония-240 (см. рис. 2).

Можно привести еще ряд примеров энергетической близости основных альфа-групп среди изотопов ТУЭ. Это пары: ^{241}Pu (4896 кэВ) и ^{242}Pu (4900 кэВ); ^{241}Am (5486 кэВ) и ^{238}Pu (5498 кэВ); ^{245}Cm (5362 кэВ) и ^{246}Cm (5386 кэВ) и т. д. Определение процентного содержания комбинации этих изотопов иногда оказывалось трудной задачей даже для магнитного

спектрометра. Между тем, такие сведения часто требовались для решения технологических вопросов, причем важную роль играла точность измерений. По этой причине, несмотря на наличие полупроводниковых альфа-детекторов, значительно ускоряющих процедуру получения информации, метод магнитного анализа во многих случаях оставался предпочтительным вследствие лучшего разрешения.

На протяжении всего периода эксплуатации магнитного альфа-спектрометра состав группы сотрудников, ответственных за проведение измерений, частично менялся. Так, вскоре после завершения строительства прибора перешел на работу в ОИЯИ В. Г. Чумин. В 1962 г. в исследованиях начал участвовать В. П. Чечев, а позже, после перехода В. Г. Недовесова и В. П. Чечева в лабораторию Ю. В. Хольнова, в группу вошла М. А. Михайлова. Бесперебойную эксплуатацию прибора обеспечивали А. Н. Метельков и В. Ф. Родионов.

Разумеется, выполнение большинства исследований стало возможным благодаря усилиям многих сотрудников. Активное участие в наладке спектрометра и решении методических вопросов принимал В. Н. Делаев, с помощью К. И. Яковлева была создана установка для измерений магнитного поля методом протонного резонанса, Л. Н. Москвин проводил химическую обработку и подготовку многих препаратов для исследований. Помощь в работе на разных этапах исследований оказывали сотрудники лабораторий А. П. Жданова, Д. М. Зива, А. Н. Мурина, В. М. Комлева, Н. А. Перфилова. В сотрудничестве с лабораторией В. М. Вдовенко, а в дальнейшем А. С. Кривохатского было проведено большинство исследований ТУЭ. Совместно с сотрудниками лаборатории Ю. В. Хольнова был выполнен заметный объем прикладных работ по паспортизации ОСАИ, о чем более подробно сказано в статье В. П. Чечева настоящего сборника.

ПРИКЛАДНАЯ ЯДЕРНАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ В РАДИЕВОМ ИНСТИТУТЕ В 60-е - 70-е ГОДЫ

В. П. Чечев

Прикладная ядерная спектроскопия как самостоятельная наука оформилась в 60-х годах в результате, с одной стороны, развития методов исследований, связанных с применением на практике радиоактивных нуклидов и ядерных излучений и, с другой стороны, в связи с освоением нового класса приборов ядерной спектроскопии, основанных на полупроводниковой технике. Полупроводниковые детекторы дали возможность в условиях производства проводить экспрессные анализы и создавать компактные приборы для регистрации ионизирующих излучений и тем самым расширили область применения радионуклидов.

Основное направление прикладной ядерной спектроскопии в 60-х годах было связано с применением теоретической и экспериментальной ядерной спектроскопии в различных областях науки, техники и медицины. В этом отношении весьма логичным выглядело решение об организации в Радиовом институте в 1964 г. лаборатории прикладной ядерной спектроскопии (руководитель Ю. В. Хольнов) с привлечением в ее штат в основном специалистов из научной школы члена-корреспондента АН СССР, основателя ядерной спектроскопии в стране Б. С. Желепова.

Одной из первых задач сотрудников новой лаборатории стало обеспечение измерительного парка лаборатории прецизионными спектрометрическими и радиометрическими установками и разработка методик измерений на этих приборах. Прежде всего была создана гамма-спектрометрическая аппаратура на основе имеющихся в то время Ge(Li)-детекторов коаксиального типа. Затем была разработана аппаратура для абсолютных радиометрических измерений (2π -пропорциональный счетчик и установка $4\pi\alpha(\beta)\text{-}\gamma(X)$ -совпадений). Одновременно в сотрудничестве со специалистами лаборатории Б. С. Желепова Р. Б. Ивановым

и В. Ф. Родионовым для прецизионных измерений спектров альфа-излучающих нуклидов интенсивно использовался большой магнитный $\pi/2$ альфа-спектрометр этой лаборатории. В этот период (1964-1971 гг.) подготовку и проведение спектрометрических и радиометрических измерений, анализ полученных результатов измерений осуществляли ведущие специалисты лаборатории А. М. Гейдельман, Ю. Г. Егоров, В. Г. Недовесов, П. И. Федотов, В. П. Чечев, Г. Е. Шукин. Химическое разделение элементов в радиоактивных препаратах проводили Ю. Л. Черешкевич и Л. И. Шур. Можно выделить две крупные проблемы, решенные лабораторией в рассматриваемый период: 1) анализ радиоизотопной чистоты радионуклидных препаратов, применяемых в народном хозяйстве и 2) создание совместно с лабораторией Д. М. Зива комплекса образцовых спектрометрических источников альфа-излучения (ОСАИ) с прочно фиксированным слоем радиоактивного вещества.

При решении первой задачи был применен комбинированный анализ, включающий хроматографическое разделение элементов и гамма-спектрометрию. Сравнительно невысокое содержание примесей в радионуклидных препаратах делает затруднительным прямое ядерно-спектрометрическое определение их содержания. Это связано с тем, что в гамма-спектрах на фоне сильного излучения основного радионуклида оказывается невозможной количественная идентификация примесных радионуклидов. Комплексная схема анализа предусматривала групповое разделение элементов с последующей спектрометрической идентификацией примесей непосредственно в выделенной группе или после разделения ее на отдельные элементы. При этом одновременно использовались ионообменная и распределительная хроматография с неподвижной органической фазой. Такой подход оказался особенно плодотворным при определении примесей в препаратах редкоземельных элементов. Всего было исследовано более 50 наименований препаратов. Исследования показали, что большинство примесей в радионуклидных препаратах вызвано объективными причинами, а именно недостаточной химической чистотой исходного сырья, используемого для облучения.

Важное направление методических разработок в области прикладной ядерной спектроскопии связано с созданием образцовых спектрометрических источников излучений, предназначенных для калибровки спектрометрических установок. Ядерно-спектрометрические методы анализа применяются в этом случае как на стадии разработки, так и при аттестации опытных партий образцовых источников. Лаборатория прикладной ядерной спектроскопии приняла активное участие в разработке таких источников для целей калибровки альфа-, бета-, гамма-спектрометрической аппаратуры. Чтобы обеспечить градуировку гамма-спектрометров в диапазоне энергии гамма-излучения от 30 кэВ до 2,7 МэВ, в 70-х годах была начата разработка образцовых спектрометрических гамма-источников (ОСГИ). Расширение и совершенствование комплектов ОСГИ в дальнейшем стало одной из долговременных задач лаборатории. Для градуировки бета-спектрометрической и радиометрической аппаратуры были разработаны образцовые спектрометрические источники конверсионных электронов (ОСИКЭ).

Однако наиболее важной разработкой лаборатории в области создания образцовых средств измерений в 60-е и 70-е годы можно считать метрологическое обеспечение производства образцовых спектрометрических альфа-источников (подробнее см. статью "Метрология радионуклидов и метрологическое обеспечение радионуклидной продукции"). Внедрение ОСАИ обеспечило альфа-счетные и альфа-спектрометрические промышленные и исследовательские установки отечественными образцовыми средствами высокого класса. При разработке ОСАИ для контроля их спектрометрического качества были проведены прецизионные измерения собственной полуширины альфа-линий источников ($\Delta_{\text{ист}}$) с помощью уже упомянутого магнитного альфа-спектрометра. Эти измерения можно отнести к классическим примерам развития методов прикладной ядерной спектроскопии на основе достижений основной спектроскопической науки в целом.

Для определения параметра ОСАИ $\Delta_{\text{ист}}$ был использован анализ формы линии, полученной на магнитном альфа-спектрометре (рис. 1). Экспериментально наблюдаемая полу-

ширина линии $\Delta_{\text{эксп}}$ является функцией параметра $\Delta_{\text{ист}}$: $\Delta_{\text{эксп}} = f(\Delta_{\text{ист}}) < (\Delta_{\text{ист}} + \Delta_{\text{приб}})$. Отсюда для данного спектрометра по известной приборной форме линии можно определить $\Delta_{\text{ист}}$, если $\Delta_{\text{приб}}$ не превышает значительно $\Delta_{\text{ист}}$, т. е. необходимо использовать прибор с высоким разрешением, каким и является магнитный альфа-спектрометр с двойной фокусировкой. На рис. 2 представлена зависимость собственной полуширины альфа-линий ОСАИ $\Delta_{\text{ист}}$ от наблюдаемой с помощью этого прибора величины $\Delta_{\text{эксп}}$.

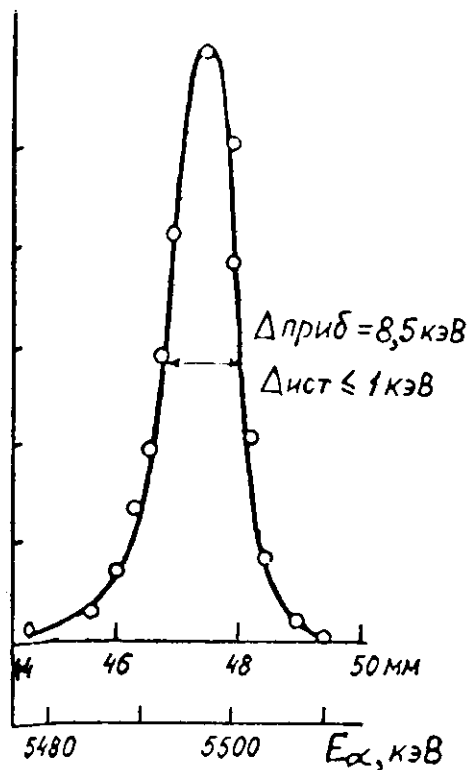


Рис. 1. Приборная форма линии магнитного альфа-спектрометра

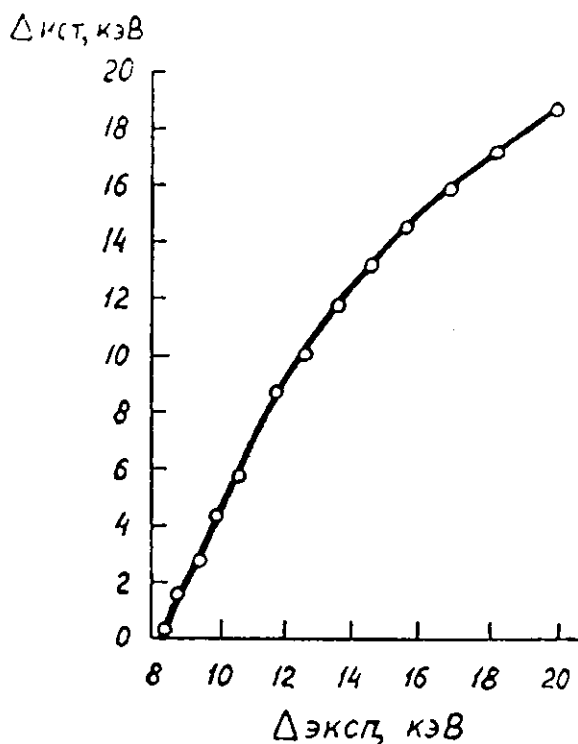


Рис. 2. Зависимость собственной полуширины альфа-линий ОСАИ от наблюдаемой

В заключение этого очерка отметим, что в середине 70-х годов сформировалась еще одна существенная задача прикладной ядерной спектроскопии, связанная с разработкой рекомендованных значений ядерно-физических характеристик широко применяемых радионуклидов.

Гигантский объем информации по свойствам атомных ядер и все возрастающее применение ядерных излучений в различных областях народного хозяйства привели в середине 70-х годов к необходимости определения из совокупности опубликованных данных наиболее достоверных значений ядерно-физических характеристик (ЯФХ) радиоактивных нуклидов. Специалисты, работающие с радионуклидами, для получения сведений об их основных характеристиках обычно использовали составленные на основе оригинальных работ сборники ядерных данных, компиляции, справочники и таблицы. Однако даже лучшие из них не могли полностью удовлетворить потребности различных отраслей науки и производства, поскольку подавляющее большинство таких справочников базировалось не на наиболее достоверных, а на выбранных значениях ЯФХ и, главное, в них не уделялось должного внимания анализу погрешностей и разброса экспериментальных результатов.

Для правильного определения достоверного значения ЯФХ и его погрешности из множества опубликованных результатов измерений, часто не перекрывающихся, требуются дополнительные исследования, получившие название "оценки ядерных данных". Оценка как

метод определения из совокупности экспериментальных и теоретических результатов рекомендованных значений ЯФХ включает отбор и анализ данных, внесение поправок в результаты оригинальных работ с учетом современных значений констант, нормалей и реперов и статистическую обработку отобранных данных по принятым правилам.

Эта важная задача для широко применяемых радионуклидов впервые в нашей стране стала решаться в лабораториях Б. С. Желепова и Ю. В. Хольнова. В 1974 г. в лаборатории прикладной ядерной спектроскопии Ю. В. Хольнова была сформирована специальная группа сотрудников (В. П. Чечев, Ш. В. Камынов, Н. К. Кузьменко, Л. М. Бак), которая занималась оценкой данных распада радионуклидов, применяемых в народном хозяйстве. И в последующие годы (1980 - 1984) эта группа при участии Ю. В. Хольнова и В. Г. Недовесова разработала и выпустила в свет три справочника оцененных значений ядерно-физических характеристик 250 радионуклидов, применяемых в народном хозяйстве, медицине и научных исследованиях. Эти справочники стали настольными книгами многих специалистов, работающих в атомной промышленности.

Л и т е р а т у р а

1. Прикладная ядерная спектроскопия: Сб. статей. Вып. 1-13. М.: Атомиздат, 1970-1984.
2. Хольнов Ю. В., Чечев В. П., Камынов Ш. В., Кузьменко Н. К., Недовесов В. Г. Характеристики излучений радионуклидов, применяемых в народном хозяйстве. Оцененные данные: Справочник. М.: Атомиздат, 1980.
3. 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.
4. 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.

ЛИКВИДАЦИЯ ПОСЛЕДСТВИЙ АВАРИИ НА ЧЕРНОБЫЛЬСКОЙ АЭС^{*)}

Е. Б. Андерсон, Л. А. Плескачевский, А. А. Римский-Корсаков

ВВЕДЕНИЕ

Значительный научно-технический потенциал, накопленный в Радиевом институте и базирующийся на синтезе фундаментальных и прикладных исследований, ярко проявил себя в работах по ликвидации последствий аварии на Чернобыльской АЭС. К этим работам специалисты института были привлечены в начале мая 1986 г.

^{*)} О работах других коллективов Радиевского института в зоне аварии на ЧАЭС см. также в статьях В. Н. Ушатского, Ю. В. Дубасова; Ю. В. Кузнецова; Е. Б. Андерсона, В. Г. Савоненкова (примеч. ред.).

1. РАБОТЫ ПО ДИАГНОСТИКЕ АВАРИЙНОГО БЛОКА И ИЗУЧЕНИЮ РАДИАЦИОННОЙ ОБСТАНОВКИ НА ПРОМПЛОЩАДКЕ ЧАЭС. 1986 г.

1.1. Изучение газоаэрозольного выброса из аварийного блока и загрязненности приземного слоя воздуха

1.1.1. Вертолетная программа

Для осуществления контроля за состоянием разрушенной зоны реактора и эффективностью мер по ликвидации радиоактивных выбросов в начале мая 1986 г. специалистами Радиевого института (А. А. Римский-Корсаков, П. И. Федотов и др.) совместно с МО СССР была отработана методика отбора проб воздуха с борта вертолета непосредственно из шлейфа дымового выброса горящего реактора. Отобранные пробы подвергались затем гамма-спектрометрическому анализу на спектрометре, доставленном в Чернобыль из Радиевого института. При этом оценивалась суммарная мощность выброса, а также температура внутри активной зоны реактора по соотношениям выходов различных нуклидов. Были получены важнейшие данные о масштабах и динамике выброса из 4-го блока ЧАЭС.

Регулярные измерения показали, что с 12-16 мая 1986 г. выброс резко упал. Измерения с целью контроля выброса из аварийного блока с отбором проб с борта вертолета проводились сотрудниками Радиевого института до начала августа 1986 г. (Б. Ф. Петров, А. Г. Прусаков и др.). Полученные результаты были включены в известный доклад СССР, представленный в МАГАТЭ, сообщались на ряде международных конференций и совещаний.

Результаты измерений включены в общую базу данных Радиевого института по радиационной обстановке на ЧАЭС и в 30-км зоне.

1.1.2. Измерения с помощью аппаратуры, установленной на тросе, протянутом над развалом 4-го блока ЧАЭС

Продолжением работ по контролю над газоаэрозольным выбросом из 4-го блока ЧАЭС стали проведенные сотрудниками Радиевого института совместно со специалистами ряда других организаций измерения с использованием аппаратуры, установленной на тросе, протянутом над развалом 4-го блока ЧАЭС (август - сентябрь 1986 г., Б. Ф. Петров, Л. А. Плескачевский и др.). Эти измерения впервые напрямую продемонстрировали, что к концу августа 1986 г. 4-й блок ЧАЭС перестал являться источником загрязнения приземного слоя воздуха радионуклидами. Одновременно с этим проводилось изучение дисперсного состава радиоактивных аэрозолей, в ходе которого было показано, что над поверхностью развала преобладают радиоактивные аэрозоли с диаметром частиц свыше 1 мкм.

Измерения концентраций радионуклидов в воздухе были проведены также непосредственно в центральном зале 4-го блока ЧАЭС сразу же после его перекрытия трубным настилом (Э. М. Пазухин и др.).

Неожиданно и при этом стабильно низкие величины удельных концентраций радионуклидов над развалом 4-го блока, полученные в ходе вышеупомянутых работ, побудили сотрудников Радиевого института, проводивших эти измерения, совместно с представителями НИФХИ им. Л. Я. Карпова и ИАЭ им. И. В. Курчатова обратиться в Правительственную комиссию с предложением об изменении проекта укрытия 4-го блока, который предполагал организацию обязательной принудительной вентиляции после полного перекрытия развала. В предложении рекомендовалось использовать естественную конвекцию, оставив принудительную вентиляцию в качестве резервной на случай непредвиденных ситуаций. Как известно, это предложение в конечном счете было принято. Результаты включены в общую базу данных Радиевого института.

1.1.3. Оперативный контроль радиоактивной загрязненности приземного слоя воздуха

В конце мая 1986 г. руководство Министерства среднего машиностроения СССР поручило Радиевому институту создать лабораторию радиометрии при отделе дозиметрического контроля Управления строительства-605 (УС-605) - организации, на которую было возложено сооружение "саркофага" (позднее - объекта "Укрытие"). Программа деятельности лаборатории учитывала, прежде всего, производственные потребности УС-605: оперативный контроль состояния радиоактивной загрязненности воздушной среды на промплощадке ЧАЭС и в других местах размещения персонала УС-605 (г. Чернобыль и др.), а также определение концентраций наиболее токсичных радионуклидов в грунте, питьевой воде и т. д. (В. Д. Дмитриев, Э. М. Пазухин, Б. Ф. Петров, Л. А. Плескачевский, С. К. Васильев, А. Г. Прусаков, А. А. Филатенков, Л. В. Драпчинский и др.).

В мае - июне 1986 г. отбор проб воздуха на промплощадке ЧАЭС проводился с помощью бортовой системы бронетранспортера, объезжавшего станцию по периметру. В июле - ноябре регулярный отбор проб воздуха осуществлялся в ряде контрольных точек на территории ЧАЭС и в ее помещениях с помощью переносных приборов со спектрометрическими фильтрами. В Чернобыле контроль загрязненности приземного слоя воздуха был реализован с использованием высокопроизводительного пробоотборника конструкции Радиевого института.

По результатам, полученным в ходе измерений загрязненности приземного слоя воздуха, немедленно принимались меры воздействия на конкретные источники этого загрязнения - очаги загрязненности на промплощадке и в рабочих помещениях ликвидировались с помощью широкомасштабных пылеподавляющих процедур.

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

- существовали значительные (в десять раз и более) колебания суммарной активности в течение 1-2 суток, которые обусловлены как масштабом и характером проводимых на промплощадке работ, так и конкретными метеоусловиями;

- практически повсеместно концентрации радионуклидов в приземном слое воздуха в июне - ноябре 1986 г. постепенно снижались. Однако в районе 4-го блока ЧАЭС, вследствие пылеобразования в ходе интенсивных строительно-монтажных работ, концентрации радионуклидов в сентябре 1986 г. были выше, чем в июне;

- сравнение относительного содержания гамма-излучателей в воздухе на промплощадке и в удалении (15-20 км) от ЧАЭС показывало, что механизмы формирования радиоактивной загрязненности воздуха в этих случаях различны: на территории ЧАЭС - пылеобразование в ходе интенсивных строительно-монтажных работ, а для отдаленных точек - миграция радионуклидов, определяемая их физико-химическими свойствами, в частности высокой летучестью окисных форм рутения.

Полученные результаты, а также результаты совместных с НИФХИ им. Л. Я. Карпова работ по изучению дисперсного состава аэрозолей и совместных с ВНИИНМ исследований, осуществленных в ходе запуска вентсистемы 3-го и 4-го блоков, включены в общую базу данных Радиевого института.

Таким образом, специалисты Радиевого института сыграли определяющую роль в работах по контролю за газоаэрозольным выбросом из аварийного 4-го блока ЧАЭС практически с момента начала работ по ликвидации последствий аварии и вплоть до запуска вентсистемы объекта "Укрытие".

1.2. Работы по оценке количества топлива вокруг аварийного блока и изучению радиационной обстановки в ходе сооружения объекта "Укрытие"

1.2.1. Измерения с борта вертолета

Для изучения радиационной обстановки в районе 4-го блока и оценки количества ядерного топлива, попавшего в машинный зал 4-го блока и оказавшегося в районе "завала", с 17 мая 1986 г. специалистами Радиевого института (А. А. Римский-Корсаков и др.) было начато систематическое сканирование развала 4-го блока и территории вокруг него с борта вертолета, на котором был установлен коллимированный гамма-детектор (детектор с узкой диаграммой направленности), сопряженный с разработанным в Радиевом институте портативным гамма-спектрометром "СПИН-6000".

Проведенная серия измерений позволила значительно уточнить радиационную обстановку вокруг аварийного блока. Оценка количества топлива, оказавшегося в непосредственной близости к 4-му блоку с его северной стороны, дала величину 0,7-1 тонну. Результаты измерений включены в общую базу данных Радиевого института.

1.2.2. Изучение радиационной обстановки на промплощадке ЧАЭС.

Май 1986 г.

В мае 1986 г. с использованием установки "Тунец-М" специалистами Радиевого института проводилось изучение радиационной обстановки на промплощадке ЧАЭС (Ю. Г. Петров, И. И. Тютюгин и др.). Гамма-датчики установки, размещенные по территории станции, передавали информацию на центральный пульт по кабелям. В период измерений мощность дозы в различных точках составляла от 0,4 до 22 Р/ч. 21 мая было произведено сканирование южной стенки машинного зала 4-го блока по дороге перед фасадом в 15 м от здания. Наибольшее скопление радиоактивных материалов было обнаружено в районе пролома в стене: здесь мощность дозы гамма-излучения достигала 900 Р/ч.

1.2.3. Измерения над развалом и трубным настилом перекрытия развала 4-го блока ЧАЭС

В августе - октябре 1986 г. специалистами Радиевого института (Б. Ф. Петров, Л. А. Плескачевский и др.) совместно с теоретико-расчетной группой ИАЭ (Р. В. Арутюнян, А. М. Дыхне, Е. В. Ткаля и др.) была разработана и реализована программа измерений спектральных и угловых характеристик интенсивных гамма-полей вокруг 4-го блока, что было связано с практическими потребностями, возникавшими в процессе сооружения "Укрытия". Так, спектральный состав гамма-излучения над развалом 4-го блока напрямую определял параметры биологической защиты, которую предполагалось разместить над перекрытием блока, а величина мощности экспозиционной дозы гамма-поля на кровле объекта обуславливала радиационную обстановку вокруг блока. В ходе реализации программы были проведены измерения "жесткости" спектра гамма-излучения непосредственно над развалом 4-го блока и над его перекрытием (трубным настилом), измерен вклад в мощность дозы над перекрытием блока от излучения, перерассеянного в воздухе, снята "карта" гамма-поля над 4-м блоком и др.

Совокупность полученных данных легла в основу "Требований, предъявляемых к состоянию "Укрытия" IV блока Чернобыльской АЭС" (решение Правительственной комиссии N 255 от 21.10.86 г.).

Накопленный в этих измерениях опыт позволил специалистам Радиевого института выполнить в октябре 1986 г. комплекс работ по исследованию эффективности разделительной стены между помещениями 3-го и 4-го блоков (В. Д. Дмитриев, Л. В. Драпчинский и др.).

1.2.4. Изучение радиационной обстановки в машинном зале 3-го блока ЧАЭС

В апреле - мае 1987 г. с помощью разработанного в Радиевом институте коллимированного детектора было проведено детальное изучение спектральных и угловых характеристик гамма-полей в машинном зале 3-го энергоблока ЧАЭС и на его кровле (Л. В. Драпчинский, Б. Ф. Петров). Эти работы были направлены на оценку влияния различных источников на радиационную обстановку, в том числе на оценку возможного влияния "Укрытия". Проведенные измерения показали, что определяющим является вклад от радиоактивного загрязнения кровли самого машинного зала 3-го блока. Полученные данные послужили основой мероприятий по коренному улучшению радиационной обстановки в машинном зале, готовящемся к запуску 3-го блока.

1.3. Гамма-спектрометрические измерения

Наличие в составе лаборатории радиометрии РИ-УС-605 (см. 1.1.3) высококвалифицированных специалистов и современной измерительной техники (в частности автоматизированного гамма-спектрометрического комплекса) позволило ей решать широкий круг задач, далеко выходящих за рамки ее штатных обязанностей. Специфика ситуации, сложившейся в 30-км зоне, заключалась, в частности в том, что практически все организации, принимавшие участие в работах по ликвидации последствий аварии на ЧАЭС, испытывали острую потребность как в оперативной количественной информации о концентрациях и изотопном составе гамма-излучающих радионуклидов, которую можно было бы получать непосредственно в Чернобыле, так и в помощи по научному осмыслению этой информации.

Уже в июле 1986 г. лаборатория стала основным оперативным измерительным центром Чернобыля: значительная часть оперативной количественной информации по программам организаций МСМ СССР, МО СССР, Госкомгидромета, Минздрава и др. была получена именно в спектрометрическом центре Радиевого института (С. К. Васильев, Б. Ф. Петров, Л. А. Плескачевский, А. Г. Прусаков, Э. М. Пазухин и др.). За время существования лаборатории (6 месяцев) было проведено около 10000 анализов изотопного состава и суммарных концентраций гамма-излучателей в образцах различного происхождения.

Следует отметить, что полученная в лаборатории информация зачастую предопределяла выработку ответственных управленческих решений.

Представление о масштабе и тематике совместных работ лаборатории дает таблица.

В 1986 г. часть полученных данных была включена в Банк данных Правительственной комиссии, создававшейся в Чернобыле силами сотрудников ИАЭ (Р. В. Арутюнян, Л. А. Большов, А. М. Дыхне, В. П. Киселев и др.).

Таблица

Обеспечение Радиевым институтом программ исследований данными по концентрациям и изотопному составу гамма-излучающих радионуклидов

№ пп	Название организации	Кол- во проб	Тематика совместных работ
1	УС-605	1600	Загрязненность приземного слоя воздуха на промплощадке ЧАЭС и в ближней зоне
2	Минобороны СССР	359	Дезактивация 1-3-го блоков ЧАЭС. Загрязненность пищевых продуктов
3	ОНИС (х/к "Маяк")	1302	Радиозэкологическая обстановка в 30-км зоне, на Украине и в Белоруссии
4	ИАЭ	302	Радиационная обстановка на промплощадке и в 30-км зоне. Эффективность цеолитсодержащих плотин
5	Госкомгидромет	283	Пылеветроперенос радионуклидов. Общая оценка радиационной обстановки в 30-км зоне
6	Минздрав СССР	174	Санитарно-гигиеническая обстановка в местах размещения персонала, работающего в 30-км зоне
7	Институт физики АН СССР	369	Загрязнение воздушной среды, пылеветроперенос
8	Институт нефтехимии АН СССР	313	Эффективность пылеподавления. Эффективность методов очистки сточных вод ПуСО
9	НИФХИ им. Л. Я. Карпова	191	Изучение дисперсного состава аэрозолей. Эффективность аэрозольных фильтров
10	ВНИИНМ	643	Дезактивация военной техники. Эффективность пылеподавления. Запуск вентсистемы 3-4-го блоков
11	ВНИПИЭТ	250	Эффективность дезактивации г. Припять и строительной техники
12	НИКИМТ	131	Эффективность сухой дезактивации крыш 1 - 3-го блоков
13	ЧАЭС	156	Запуск вентсистемы 1 и 2-го блоков. Оценка радиационной обстановки внутри 1 - 3-го блоков

2. ПОСЛЕАВАРИЙНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НА 4-М БЛОКЕ ЧАЭС (ОБЪЕКТЕ "УКРЫТИЕ")

Научно-обоснованное решение вопроса об угрозе, которую представляет разрушенный 4-й блок ЧАЭС для населения и окружающей среды, выработка оптимальной концепции его долговременного безопасного захоронения требовали проведения детального изучения послеаварийного состояния объекта. Прежде всего это относилось к ядерному топливу, попавшему в результате аварии в различные помещения 4-го блока, путям его распространения, количеству и физико-химическим формам.

Эта информация весьма существенна и для создания сценария процесса развития аварии на 4-м блоке ЧАЭС, и для проведения объективных оценок радиозэкологических последствий аварии (в частности для реконструкции характеристик источника выброса), а также для общих представлений о тяжелых авариях на АЭС и др.

Стандартные приемы и методики, позволяющие проводить подобные исследования в интенсивных гамма-полях с величинами МЭД, и нынеходящими до тысяч Р/ч, в обстановке, осложненной наличием разрушенных строительных конструкций, больших массивов

"свежего" бетона, попавшего в помещения блока при сооружении "Укрытия", в мировой практике отсутствуют. Поэтому проведение послеаварийных исследований на 4-м блоке ЧАЭС потребовало как качественной модернизации существующих методик, так и создания новых методов и приборов.

Послеаварийные исследования продемонстрировали, что получение достоверной количественной информации о таком сложном объекте, каким является разрушенный 4-й блок ЧАЭС, невозможно без применения комплекса взаимодополняющих физических, радиохимических и геолого-минералогических методов, опирающихся при этом на развитую расчетную базу. В частности, одни физические методы, основанные на измерении характеристик радиационных полей и тепловых потоков, принципиально не могут дать точной информации без привлечения результатов ядерно-физического и радиохимического анализа образцов. Исследования специалистов, базировавшиеся на сочетании ядерно-физических, радиохимических и геолого-минералогических методов, в полной мере проявили уникальные возможности Радиевого института.

2.1. Определение количества топлива в помещениях объекта "Укрытие"

2.1.1. Определение количества топлива в бассейне-барботере 4-го блока ЧАЭС

Помещения бассейна-барботера, являясь частью штатной системы локализации проектной аварии, расположены под перекрытием подаппаратных помещений и отделяются от него помещениями парораспределительных коридоров.

Интенсивные источники излучения в бассейне-барботере, создававшие гамма-поля с МЭД до 20000 Р/ч, которые связывались с ядерным топливом, проникшим в нижние помещения 4-го блока, были обнаружены в ходе работ на аварийном блоке еще в октябре - ноябре 1986 г. Однако вопрос о количестве этого топлива и его физико-химических характеристиках до начала проведения нижеописанных работ (1988-1989 гг.) оставался открытым.

Были и другие причины, вызывавшие интерес к послеаварийному состоянию бассейна-барботера. По инициативе Е. П. Велихова в мае 1986 г. в филиале ИАЭ им. И. В. Курчатова были выполнены теоретико-модельные расчеты возможности теплового разрушения конструкций расплавленным топливом и попадания больших массивов высокоактивного топлива в грунт и грунтовые воды (программа "Расплав", Р. В. Арутюнян, Л. А. Большов, А. М. Дыхне и др.). Расчеты продемонстрировали, что в неблагоприятных сценариях развития аварии (а именно они прежде всего принимались во внимание, учитывая тяжесть возможных последствий) существует заметная вероятность проплавления фундаментной плиты 4-го блока и последующего проникновения топлива в грунт. Следствием этого явилось сооружение в очень сжатые сроки охлаждаемой плиты-ловушки под фундаментом 4-го блока, непосредственно под помещениями бассейна-барботера. Таким образом, послеаварийные исследования в барботере могли, с одной стороны, подтвердить (или опровергнуть) правильность принятого решения об установке охлаждаемой плиты, а с другой - послужить основой для верификации проведенных в 1986 г. теоретико-модельных расчетов.

В ходе исследований, проведенных специалистами Радиевого института (Б. Ф. Петров, Л. А. Плескачевский, А. Б. Блинов, А. Г. Прусаков и др.), были развиты дистанционные методы определения количества и распределения топлива, основанные на регистрации его гамма-излучения, и создана оригинальная аппаратура, применявшаяся для работ в бассейне-барботере. Локализация источников гамма-излучения проводилась с использованием дистанционно-управляемых устройств на основе коллимированных гамма-детекторов, позволяющих измерять дифференциальные характеристики гамма-полей - их угловые (и, в принципе, спектральные) распределения.

Конкретные условия работ в помещениях объекта "Укрытие" - высокие уровни МЭД гамма-излучения в наиболее информативных точках, сложный рельеф поверхности, наличие

конструкций, ограничивающих передвижение - диктовали чрезвычайно жесткие условия к характеристикам создаваемых установок. Важнейшими были: работоспособность в полях до сотен Р/ч и надежное выделение "полезного" сигнала от удаленных источников на фоне рассеянного излучения, возможность ориентации коллимированного детектора в широком диапазоне углов с привязкой результатов гамма-сканирования и телевизионного (визуального) наблюдения, а также достаточно малые габариты и вес системы, обеспечивающие, в случае необходимости, возможность ручной транспортировки.

Одновременно с работами по изучению радиационной обстановки и локализации источников излучения проводился регулярный отбор проб так называемых "топливосодержащих масс" - продуктов взаимодействия расплавленного топлива с конструкционными материалами, которые проникли в помещения бассейна-барботера в процессе развития аварии. Их последующий всесторонний анализ осуществлялся в лабораториях Радиевого института с использованием комплекса гамма-спектрометрических, радиохимических, рентгенофлуоресцентных и геолого-минералогических методов (см. 2.2).

Восстановление характеристик обнаруженных источников излучения проводилось с применением методов статистической регуляризации.

В ходе вышеописанных работ впервые была детально изучена радиационная обстановка в бассейне-барботере, оценено количество попавшего в его помещения топлива, детально исследованы образцы новообразований.

Данные проведенных исследований продемонстрировали, что предлагавшийся в 1986 г. вариант останковки топлива путем заливки бетоном помещений бассейна-барботера мог бы привести к непредсказуемым последствиям вплоть до проплавления топливом фундаментной плиты, поскольку под этим бетоном оказалась бы значительная (около 14 тонн) масса "горячего" топлива, характеризовавшегося в мае - июне 1986 г. большим тепловыделением.

Результаты работы докладывались на ряде международных конференций и совещаний.

2.1.2. Локализация источников интенсивного гамма-излучения и оценка количества топлива в центральном зале 4-го блока

Центральный зал 4-го блока ЧАЭС относится к наиболее труднодоступным районам объекта "Укрытие", возможности проникновения в которые даже для диагностических исследований крайне ограничены. Работы по изучению радиационной обстановки в этом помещении и оценке количества топлива, сосредоточенного в каналах верхней биологической защиты реактора, были проведены специалистами Радиевого института (Б. Ф. Петров, Л. А. Плескачевский, А. Г. Прусаков, В. Н. Душин, И. В. Евдокимов и др.) в 1989 - 1991 гг.

Для поиска и идентификации основных источников интенсивных гамма-полей специалистами Радиевого института был разработан и изготовлен ориентированный на экстремальные условия центрального зала дистанционно управляемый измерительный комплекс на основе коллимированного детектора, установленного на самоходной платформе (рис. 2.1).

Детекторная часть системы, рассчитанная на работу в гамма-полях с МЭД до нескольких сотен Р/ч, обеспечивала точную фиксацию направления коллимированного детектора в широком диапазоне углов и была совмещена с телевизионной камерой, осуществлявшей привязку результатов теле- и гамма-сканирования.

На основе измерения характеристик гамма-полей в сочетании с телевизионным наблюдением, а также с использованием для интерпретации полученных данных теоретико-модельных расчетов, базирующихся на методе Монте-Карло, проведена оценка количества ядерного топлива, сосредоточенного на верхней биологической защите реактора: 10-30 тонн. Нижняя величина - 10 тонн - получена из обработки результатов в предположении, что все

топливо этой зоны, являющейся определяющим источником гамма-полей в центральном зале, сосредоточено в тонком слое.

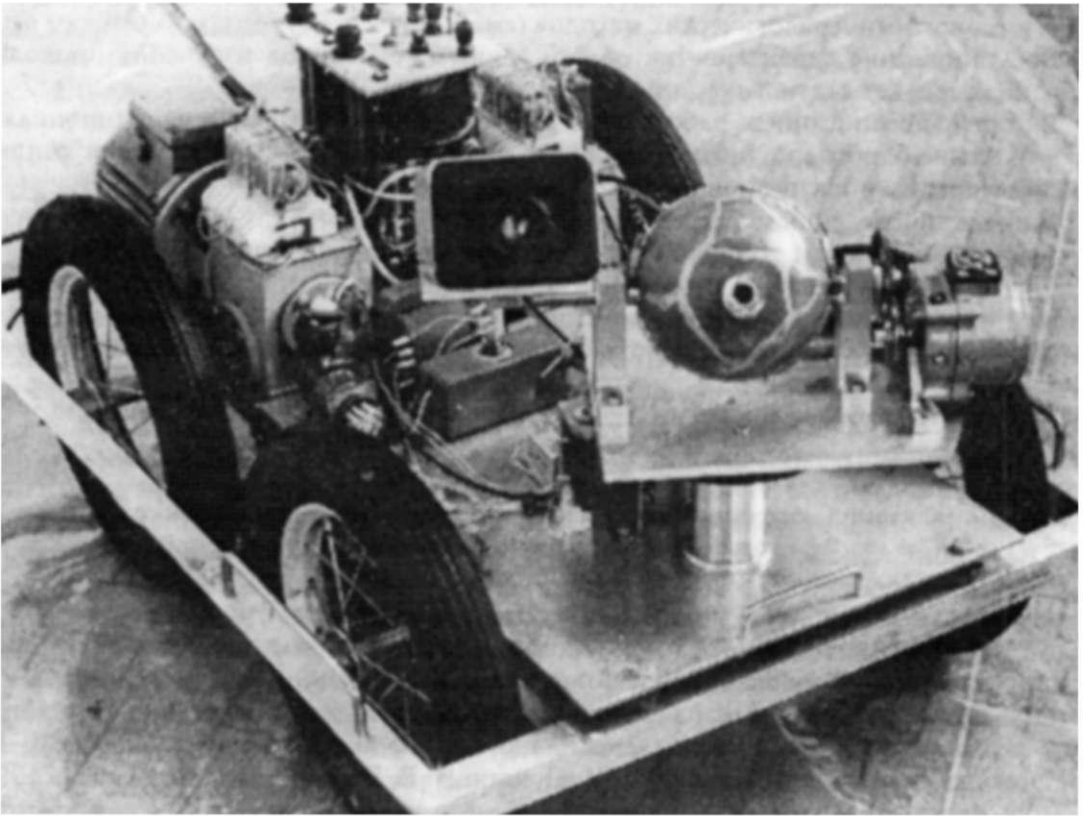


Рис. 2.1. Дистанционно-управляемый измерительный комплекс, установленный на самоходной платформе

Верхняя оценка - 30 тонн - получена в предположении, что коллимированным детектором "просмативались" неповрежденные сборки. При этом сопоставление результатов гамма-сканирования и данных видео- и фотонаблюдений, демонстрирующих наличие значительного скопления технологических каналов на верхней поверхности биологической защиты, делает эту оценку (30 тонн) предпочтительной.

В ходе работ определено также количество топливной "пыли", внедренной в стены центрального зала, - до 1 тонны.

2.2. Радиохимические и минералого-геохимические исследования новообразований 4-го блока ЧАЭС и "горячих" частиц

В течение активной стадии развития аварии в районе шахты реактора происходило плавление различных материалов и образование стекловидных масс ("лав"), включающих ядерное топливо, элементы циркониевых оболочек топливных сборок, материалы засыпки нижней крышки реактора, а также материалы, использовавшиеся в ходе работ по ликвидации аварии. Лавообразные массы, содержащие ядерное топливо, проникли в ряд помещений аварийного блока, застывая там в виде топливосодержащих скоплений (топливосодержащих масс). Исследования их физико-химических и геолого-минералогических свойств, а также аналогичных свойств "горячих" частиц, выбрасывавшихся из зоны реактора в течение активной стадии аварии, являлись чрезвычайно актуальными и по следующим основным причинам.

1. Выявление закономерностей, последовательности и физико-химических условий техногенного минералообразования на аварийном 4-м блоке ЧАЭС, а также механизмов образования "горячих" частиц позволяет получить уникальную информацию о сценарии развития аварии - его кинетике, максимальных температурах, достигавшихся в ходе аварийного процесса и т. д.

2. Данные по содержанию в новообразованиях и в "горячих" частицах урана, трансурановых элементов и продуктов деления необходимы как для оценки количества топлива, оставшегося в 4-м блоке, так и для проведения объективных оценок радиозэкологических последствий аварии на ЧАЭС (например, для оценки выброса летучих продуктов деления).

3. Новообразования 4-го блока ЧАЭС подвергаются деструкции (в качестве примера можно сослаться на образование "рыжих пятен" - растворимых соединений урана на поверхности стекловидных топливных масс), что представляет собой источник заметной радиационной опасности. Для принятия научно обоснованного решения о дальнейшей судьбе объекта "Укрытие" необходим прогноз длительного поведения новообразований, основанный на детальном изучении их физико-химических свойств.

Высококвалифицированные кадры радиохимиков, в том числе специалисты в области радиохимии ядерного топлива, сильная геолого-минералогическая школа, берущая начало от В. И. Вернадского, наличие экспериментальных установок, рассчитанных на работу с высокоактивными образцами (горячие камеры, установки для рентгенофлуоресцентного анализа, растровой электронной микроскопии и др.) позволили Радиевому институту получить в 1988-1991 гг. ряд принципиально важных результатов (Е. Б. Андерсон, Б. Е. Бураков, Ю. В. Дубасов, А. С. Кривохатский, Э. М. Пазухин, В. Г. Савоненков и др.).

2.2.1. Исследования новообразований 4-го блока ЧАЭС

2.2.1.1. Радиохимические исследования

Из совокупности радиохимических исследований топливосодержащих масс из различных помещений 4-го блока, проведенных специалистами института в 1988-1991 гг., сделаны следующие выводы.

1. Результаты анализа образцов, отобранных на путях распространения топливосодержащих масс, свидетельствуют о том, что как по вертикальному, так и по горизонтальному разрезу 4-го блока содержание топлива в лавовых массах меняется слабо, оставаясь в пределах 5-15 %. Вероятно, что в процессе развития аварии образовалось несколько проплавов в нижней крышке реактора, которые явились источниками топливосодержащих масс с различным содержанием топлива. В результате проведенных исследований обнаружены две модификации топливосодержащих масс:

"коричневая" керамика с содержанием топлива 10-12 %; направление растекания - по вертикали (парораспределительные коридоры, 1-й и 2-й этажи бассейна-барботера);

- "черная" керамика с содержанием топлива 4-5 %; направление растекания - по горизонтали (помещения 304, 301 и далее к "слоновой ноге" - первому новообразованию, обнаруженному в ходе работ еще в 1986 г.).

2. Данные прямого радиохимического определения количества урана в образцах новообразований из 4-го блока дают величину весового содержания урана 5-15 %, что хорошо согласуется с результатами гамма-спектрометрии, определяющей количество слаболетучего ^{144}Ce , скоррелированного с топливом. При этом молярное отношение урана и циркония практически во всех пробах близко к единице, что подтверждает предположение о возможности образования в процессе развития аварии уран-циркониевой эвтектики - $(\text{UZr})\text{O}_2$.

3. В пробах присутствуют значительные количества магния - 120-180 мг/г. Вероятнее всего, его источником является оливин-форстерит, который образуется при разложении материала биологической защиты реактора - серпентинита - при температуре выше 500 °C.

4. По данным оптических наблюдений "черная" и "коричневая" керамики состоят из стеклообразной матрицы, насыщенной различными по размерам и морфологии включениями.

2.2.1.2. Ультралокальные исследования

Работы по ультралокальному исследованию чернобыльских "лав" и техногенных минералов, возникших в результате аварии, с использованием методов растровой электронной микроскопии и электронзондового микроанализа (Electron Microprobe Analyses) были развернуты в Радиовом институте в 1989-1990 гг. (Е. Б. Андерсон, Б. Е. Бураков, Э. М. Пазухин и др.). Ниже приведены основные результаты этих исследований.

1. Установлено, что матрица "коричневой" и "черной" керамик представляет собой силикатное стекло, содержащее в качестве примесей Al, Fe, K, Ca, Mg, Zr, U. Окраска "лав" определяется степенью насыщенности стекол включениями, прежде всего тонкодисперсными, а также наличием или отсутствием в составе стекол железа. В качестве включений в матрице выявлены следующие фазы: кристаллический урансодержащий силикат Zr, соединение UZrO_2 , оксиды урана и циркония, сфероидальные металлические включения.

2. Оксиды урана в чернобыльских "лавах" характеризуются исключительным разнообразием. По химическому составу они делятся на две группы: оксиды урана с примесью циркония и стехиометрические диоксиды урана - UO_2 . Округлые и каплевидные включения оксидов урана являются результатом переплавления части ядерного топлива в локальных участках реактора. Они должны были образовываться при температуре 2500-2600 °C - ниже температуры плавления "твэльного" диоксида урана (2750 °C). Вероятно, включения данных оксидов урана характеризуют начальную стадию формирования "лав".

3. В чернобыльских "лавах" был обнаружен уникальный техногенный минерал - высокоурановый силикат циркония $[\text{Zr}, \text{U}]\text{SiO}_2$, который является характерным включением во всех разновидностях "лав" (рис. 2.2). Образование хорошо ограненных и сравнительно крупных (до 500 мкм) кристаллов высокоуранового силиката циркония указывает на существование стабильных условий формирования: относительно долгого остывания матричного расплава и отсутствия резких температурных градиентов. Детальный анализ условий возникновения этого минерала имеет важное значение для восстановления температурных условий на определенных стадиях аварийного процесса.

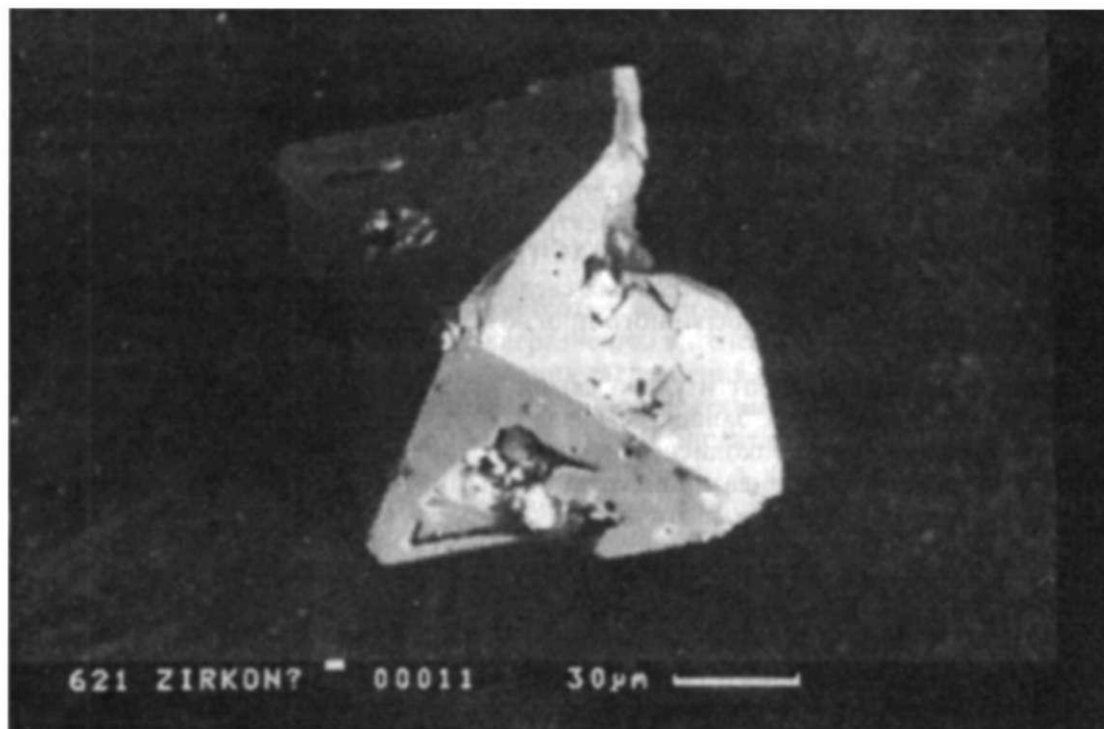


Рис. 2.2. Кристалл техногенного минерала

Основные выводы, сделанные в ходе ультралокального изучения чернобыльских топливосодержащих масс, сводятся к следующему.

1. Авария на 4-м блоке ЧАЭС характеризуется взаимодействием ядерного топлива и металлического "твэльного" циркония с образованием $Zr-U-O$ расплава и цирконий-содержащих оксидов урана. Насыщение оксидов урана примесью циркония привело к снижению их температуры плавления. Максимальные температуры, которые удалось восстановить по наличию в топливосодержащих массах переплавленных оксидов урана с примесью циркония, составляют 2500-2600 °С. Процесс плавления ядерного топлива имел место в локальных участках реактора.

2. Наиболее типичным примером техногенного минералообразования, характеризующего аварию на 4-м блоке ЧАЭС, является кристаллизация высокоуранового циркония в топливосодержащих массах. Этот процесс протекал в температурном интервале 1600-1660 °С, который удерживался в "лавах" не менее нескольких суток.

3. Минералообразование на объекте "Укрытие" продолжается. В результате взаимодействия топливосодержащих масс с окружающей средой при наличии интенсивных гамма-полей происходит химическое разрушение стеклообразных "лав" с возникновением на их поверхности вторичных нестойких минеральных фаз урана. Этот процесс требует особого контроля, так как способен резко ухудшить радиационную обстановку на объекте "Укрытие".

Результаты проведенного цикла радиохимических и геолого-минералогических исследований неоднократно докладывались на ряде международных конференций и совещаний. В течение ряда лет эти исследования велись в рамках сотрудничества между Радиевым институтом, IPSN (Институтом ядерной защиты и безопасности, Франция) и Институтом проблем безопасного развития атомной энергетики РАН.

2.2.2. Исследования "горячих" частиц

Ультралокальные исследования "горячих" частиц, отобранных в июне 1986 г. в районе "рыжего" леса, а также в последующие годы непосредственно у объекта "Укрытие" и в пределах 30-км зоны, с применением методов растровой электронной микроскопии, электронно-зондового микроанализа и гамма-спектрометрии были начаты в Радиевом институте в 1990 г. (Е. Б. Андерсон, Б. Е. Бураков, Э. М. Пазухин и др.). Эти исследования были направлены как на получение дополнительных сведений, детализирующих сценарий развития аварии, так и на разработку долгосрочного прогноза длительного поведения "горячих" частиц в окружающей среде.

В ходе проведенных работ изучено свыше 800 "горячих" частиц, отобранных преимущественно по направлению "западного следа", оказалось, что более 97 % "горячих" частиц представляло собой или мелкодиспергированное топливо, или соединения, включающие продукты взаимодействия топлива с конструкционными материалами реактора - цирконием и нержавеющей сталью. Была разработана рабочая модель классификации этих частиц.

1. "Горячие" частицы топливного типа представляют собой либо неизменные осколки твэлов с микроблочной структурой и отдельные микроблоки (район "западного следа"), либо частицы с зернистым и пластинчатым микрорельефом (топливо, подвергшееся значительным механическим воздействиям, пробы отобраны непосредственно у 4-го блока). Все "горячие" частицы топливного типа обеднены по цезию в 2,5-3,5 раза, а в частицах, отобранных в районе "рыжего" леса в 1986 г., радиоцезий вообще отсутствует.

2. К "горячим" частицам топливно-конструкционного типа относится класс соединений типа $Zr-U-O$ (см. 2.2.1), составляющий ~ 50 % от всех частиц "западного следа". Эти частицы носят следы температурных и химических воздействий и резко обеднены по радиоцезию и сурьме.

3. Другой класс этого типа частиц - соединения типа $(Zr-U-O + Fe-Cr-Ni)$, представляющие стальную матрицу с включениями $Zr-U-O$. Частицы этого типа отличаются повышенным содержанием Ru (и наличием Co).

4. "Горячие" частицы гибридного типа, представляющие результат взаимодействия топливных и конструкционных материалов с материалами, использовавшимися при засыпке горящего реактора. Такие частицы для "западного следа" являются редкими (выделены из проб, отобранных западнее пос. Янова). К частицам этого типа, в которые топливо попало путем механического захвата, относится класс алюмосиликатов $Fe-Ca-Si-Al-O$ и класс силикатов магния и железа $Mg-Fe-Si-O$ (с микровключениями активности в виде $Zr-U-O$).

Важность проведенных ультралокальных исследований "горячих" частиц из 30-км зоны ЧАЭС трудно переоценить: уже из вышеприведенного краткого перечисления их типов и классов могут быть сделаны существенные выводы о сценарии протекания аварии. В частности, для оценки ее общих радиоэкологических последствий немаловажным является то обстоятельство, что все "горячие" частицы, связанные с первым периодом аварии (до начала мероприятий по засыпке горящего реактора), обеднены по радиоцезию в 2,5-3,5 раза.

3. ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ В РАСПРЕДЕЛЕНИИ РАДИОАКТИВНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ

В 1989-1991 гг. специалистами Радиевого института в рамках Единой государственной программы работ по преодолению последствий аварии на ЧАЭС совместно с Институтом проблем безопасного развития атомной энергетики РАН был осуществлен крупномасштаб-

ный комплекс исследований, посвященных изучению статистических закономерностей в распределении радиоактивного загрязнения от аварии на ЧАЭС. В эти работы, осуществлявшиеся под руководством В. Н. Душина, Б. Ф. Петрова и Л. А. Плескачевского, был вовлечен широкий круг специалистов Радиового института (Е. Б. Андерсон, Б. Е. Бураков, С. К. Васильев, А. Д. Геденов, И. В. Евдокимов, В. П. Тишков и др.). Работы включали как прецизионные гамма-спектрометрические и радиохимические анализы проб из населенных пунктов, расположенных на различном расстоянии от аварийного 4-го блока ЧАЭС, анализ полученных в ходе работ данных, так и статистическое исследование всей совокупности имеющейся информации о радиоактивном загрязнении территорий вследствие аварии на ЧАЭС (базы данных Росгидромета).

Показано, что пространственное распределение поверхностной плотности активности гамма-излучателей в почве, обусловленное гетерогенностью радиоактивных выпадений из-за среднемасштабных турбулентностей атмосферы и неравномерностью миграции, подчиняется логарифмически нормальному закону. При этом величины дисперсий различаются для локальной (десятки метров) и промежуточной (сотни метров) статистики. Статистический анализ совокупности имеющихся данных по загрязнению населенных пунктов Брянской области показал, что в целом по области распределения загрязнения радиоцезием и радиостронцием описываются логарифмически нормальными зависимостями. При этом была обнаружена "избыточная" дисперсия, относящаяся к результатам определения загрязнения радиостронцием (по сравнению с радиоцезием). Было показано, что в целом по населенным пунктам Брянской области неопределенность измерения радиостронция троекратна.

Проведен поиск пространственных корреляций, которые связывали бы между собой загрязнение почв различных территорий как радиоцезием, так и радиостронцием. Показано, что в почвах дальней зоны соотношения активностей ^{90}Sr и ^{137}Cs хорошо описываются линейной моделью, позволяющей оценивать загрязненность территорий радиостронцием из данных по загрязнению радиоцезием. Это связывается с отсутствием значимого вклада топливной (слаболетучей) компоненты в формирование радиоактивного загрязнения почв дальней зоны.

Полученные результаты положены в основу методов валидации и верификации имеющихся данных по загрязнению территорий вследствие аварии на Чернобыльской АЭС. Эти методы являются ныне одним из ключевых элементов системы поддержки принятия решений по защите населения и территорий от радиационного риска.

Физика, которая была, есть и будет (небольшое послесловие)

Теперь, если Вы прочитали предыдущие страницы, вы сами можете судить о том, какова она и чего стоит наша физика. Мне остается только добавить несколько слов, которые не могли сказать авторы отдельных статей, описывавшие свои направления.

Конечно же, все наши и экспериментальные, и теоретические исследования имеют не только общие исторические корни, но и настоящую тесную связь между собой - как в пределах одной области, например физики деления, так и всех физических работ института. В институте существует и еще более общая связь - всего физического направления с исследованиями радиохимиков.

Это взаимодействие легче всего проследить на уже упомянутом примере физики деления, которой в той или иной степени посвящена почти половина статей физического раздела. Все рассмотренные проблемы: вероятность распада из основного состояния (спонтанное деление), вероятность развала на тяжелые осколки под действием нейтронов, γ -квантов, легких и тяжелых заряженных частиц различной энергии - от порога реакции до энергий несколько ГэВ (сечения деления), свойства тяжелых продуктов реакции - их массовые, энергетические и угловые распределения, свойства излучений, сопровождающих реакцию, т. е. нейтронов, легких заряженных частиц и γ -квантов - суть различные стороны одного

многограннейшего явления, называемого делением ядер. Механизм этого давно открытого явления настолько сложен, что служит предметом интенсивного изучения и в наше время. С пониманием этого механизма связывается надежда на понимание коллективного движения ядерной материи, связи коллективных и одночастичных степеней свободы ядра - природы и величины сил внутреннего ядерного трения.

Однако деление ядер - хотя и самый сложный, но все же один из видов ядерных превращений. Близким к нему коллективным процессом можно считать сравнительно недавно обнаруженное явление кластерной радиоактивности, названное нами F-распадом. Чтобы интерпретировать наблюдаемые характеристики процесса деления, надо знать механизмы других ядерных реакций, конкурирующих с ним или предшествующих ему. Это относится прежде всего к делению ядер при высоких энергиях, где деление следует за каскадом нуклонов или кластеров, выбитых в прямых взаимодействиях падающих частиц с нуклонами или кластерами ядра. По-видимому, есть что-то внутренне общее между делением и мультифрагментацией тяжелых ядер - также широко изучаемом сейчас в нашем институте и во всем мире ядерном превращении. Широко известные каналовые эффекты деления ядер и свойства спонтанноделящихся изомеров - не что иное, как проявление квантовых характеристик ядер в сильнодеформированном состоянии.

Многие аспекты реакции деления трудно было бы понять, не прибегая к данным ядерной спектроскопии - области ядерной физики, также основательно изучаемой и представленной в настоящем сборнике.

Что касается связи работ по физике деления с исследованиями радиохимиков, то можно сказать, что и за рубежом, и у нас они "породнились" еще до открытия самого процесса деления - в поисках трансурановых элементов: "родственные" отношения сыграли решающую роль в процессе открытия и продолжают развиваться в наши дни. Многие фундаментальные и прикладные результаты, например по выходам и зарядовым распределениям осколков деления, по определению коэффициента использования ядерного горючего при взрыве, просто не могли бы быть получены без тесной совместной работы химиков и физиков института.

Физические работы объединены как духовной, так и материальной базой. Они выполнены на общей ускорительной технике, на спектрометрах нейтронов, заряженных частиц и γ -квантов, отличающихся друг от друга типом детектирующих устройств, но в пределах каждого типа близких для разных экспериментов, на мишенях, изготовленных и взвешенных одной группой.

Физические исследования - это целостная система, непрерывная цепочка идейных и технологических звеньев, ни одно из которых не должно быть утрачено. Здоровье каждого звена - залог здоровья всего организма. Я не знаю, какого цвета будет обложка нашего сборника, но, надеюсь, не красного, и мы никогда не попадем в "Красную книгу" науки - нашей жизни.

Начальник отдела ядерной физики
В. П. Эйсмонт

НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

ВВЕДЕНИЕ

В начале 90-х годов стало очевидно, что снижение объемов Государственного заказа по оборонной тематике может привести к потере рабочих мест для значительной части сотрудников, традиционно занятых в этой области. Этого можно избежать, используя высокую профессиональную квалификацию сотрудников, а также имеющийся передовой опыт разработок в области радиохимической технологии в новых сферах деятельности. С этой целью по инициативе Л. Б. Шпунта на базе возглавляемой им лаборатории приказом директора института А. И. Карелина - научного руководителя проблемы - был создан отдел конверсии (начальник отдела - Л. Б. Шпунт).

Помимо продолжающихся работ, направленных на развитие радиохимической технологии, в отделе возник ряд новых направлений. Одно из них вытекает непосредственно из основной деятельности Минатома, но связано с разработкой принципиально нового подхода к решению традиционных задач. Труднейшую проблему ядерной энергетики - проблему обращения с радиоактивными отходами - предлагается решить на основе использования экологически наиболее чистого уран-ториевого ЯТЦ. Другие направления деятельности отдела являются результатом поиска и освоения новых нетрадиционных для института областей применения собственных научных разработок.

В начале 1992 г. в связи с конверсией оборонной промышленности Минатом приступил к реализации программы, направленной на создание в России индустрии микроэлектроники и волоконнооптических систем связи. Новый отдел взял на себя функции разработчика фторидной технологии производства моносилана и поликремния. Развитием работ по этой тематике является разработка новых технологических процессов, в которых природный тетрафторид кремния используется в качестве исходного материала.

Другим направлением исследований является развитие и широкое внедрение способов переработки продуктов, содержащих редкие и редкоземельные металлы, их извлечение и очистка. Особое место в тематике отдела занимают работы, связанные с развитием сухих фторидных методов вскрытия и комплексной переработки минерального сырья. Отделом разрабатываются малоотходные технологии, включающие прямое фторирование лопаритовых и апатитовых концентратов.

Плазмохимические методы получения новых материалов в форме нанодисперсных порошков, таких как окислы кремния и некоторых металлов, карбид кремния, также являются предметом исследований и разработок отдела.

Все эти работы направлены на воссоздание в России и развитие на новом уровне производств, утраченных в результате распада СССР, конверсию предприятий Минатома с образованием на них новых рабочих мест, выпуск конкурентоспособной продукции.

Л. Б. Шпунт

ЯДЕРНАЯ ЭНЕРГЕТИКА НА ОСНОВЕ ТОРИЕВОГО ГОМОГЕННОГО РЕАКТОРА

А. И. Карелин

По инициативе Радиевого института ряд предприятий Минатома и Миннауки прорабатывает концепцию нового ядерного топливного цикла.

Хорошо известно, что в последние годы во всем мире сложилось устойчивое негативное отношение определенной части общественности к развитию ядерной энергетики.

Причин этого обстоятельства две:

- недостаточно надежная и безопасная работа ядерных реакторов;
- не решена проблема обращения с радиоактивными отходами.

Первая из них может считаться к настоящему времени в значительной степени решенной.

После аварий на АЭС в Три-Майл-Айленде (США) и в Чернобыле в мире создано несколько поколений новых ядерных реакторов, надежность и безопасность работы которых повышена примерно на два порядка, что может быть признано достаточным для дальнейшего развития ядерной энергетики.

В России также ведутся работы по повышению надежности и безопасности действующих и нового поколения ядерных реакторов и достигнуты позитивные результаты, позволяющие осуществлять строительство замещающих мощностей на атомных станциях.

Однако вторая проблема - обращение с радиоактивными отходами ядерной энергетики - не устранена еще во всем мире.

К настоящему времени уже накоплены, а к середине наступающего столетия еще пополнятся огромные количества долгоживущих радиоактивных материалов и отходов.

Удовлетворительное решение этой проблемы пока не выработано. Более того, в рамках действующей стратегии уран-плутониевого ядерного топливного цикла ее решение вряд ли возможно. Транспортирование делящихся материалов отработавшего ядерного топлива на большие расстояния по воде и суше, сложная переработка топлива на радиохимических заводах, хранение высокофонового плутония, трансплутониевых элементов, нептуния и загрязненного радиоактивными изотопами урана являются сами по себе сложными проблемами, требующими больших постоянных финансовых затрат. Поэтому любое существенное нарушение в обращении с такими материалами (преднамеренное или непреднамеренное) может вызвать значительный экологический инцидент. И тогда оппоненты разумно задают вопрос: "Как Вы можете предлагать развитие ядерной энергетики, если Вы не решили основную проблему, проблему обращения с радиоактивными материалами и отходами?"

Устранить недоверие общественности к развитию ядерной энергетики можно только разработкой и созданием новых ядерных технологий производства тепловой и электрической энергии.

Поставленную задачу можно решить на основе давно известного уран-ториевого ядерного топливного цикла (U-Th ЯТЦ), внося в него кардинальные усовершенствования. По ряду технических, экономических и политических причин уран-ториевый топливный цикл в традиционном его исполнении коммерчески не используется в ядерной энергетике ни в одной стране мира. Альтернативу традиционной концепции развития ядерной энергетики на основе твердотопливных реакторов представляет концепция каскадных жидкосолевых ядерных реакторов (КЖСР) на основе расплавов фторидных солей. В последнее время по инициативе сотрудников РНЦ "Курчатовский институт" в России возник интерес к разработке жидкосолевых гомогенных технологий в решении проблем ядерной энергетики.

На наш взгляд, на базе гомогенных КЖСР с внешним источником возбуждения нейтронов можно создать ядерно- и экологически безопасный топливный цикл ядерной энерге-

тики, полностью исключаящий наработку и накопление трансурановых элементов, больших количеств долгоживущих радиоактивных отходов, и тем самым исключить предпосылки к возникновению глобальных экологических катастроф.

Мы предлагаем создать ядерный топливный цикл на основе ториевого гомогенного реактора с внешним источником возбуждения нейтронов. Принципиальная технологическая схема предлагаемого топливного цикла изображена на рисунке.

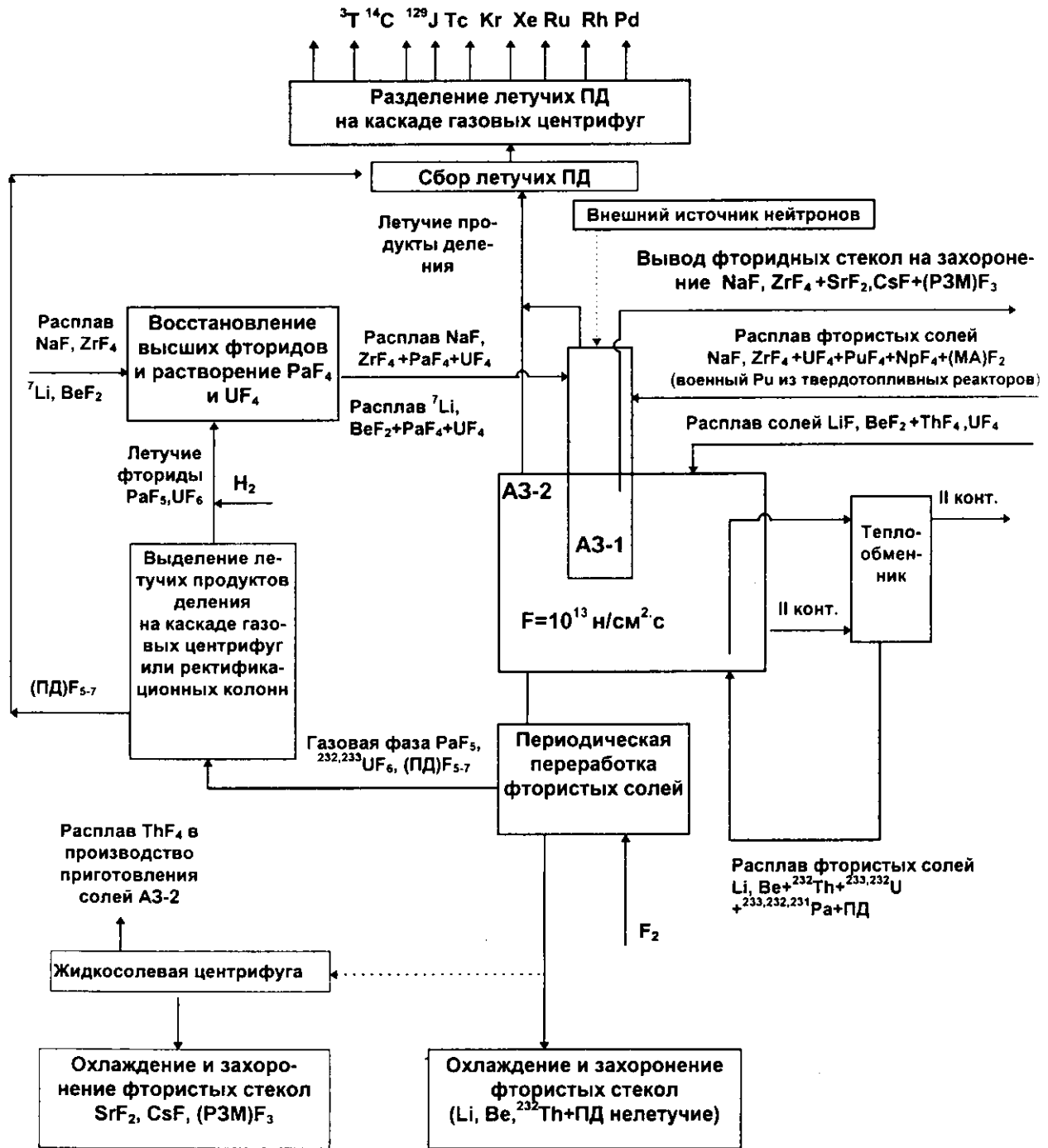
Работу ториевого гомогенного реактора предлагается организовать в так называемом "доминирующем режиме распада", при котором практически не происходит накопления ядер актинидов с массовым числом более 235, а содержание протактиния-233 не превышает нескольких десятков граммов на 1 тонну тория-232, при практически полном отсутствии изотопов протактиния-234 и ^{234m}Pa . Проведенные расчеты накопления ядер актинидов в зоне АЗ-2 при нейтронных потоках от 10^{13} до 10^{15} н/см²·с показали, что наименьшее накопление протактиния-234 происходит при нейтронном потоке 10^{13} н/см²·с. Этот эффект объясняется конкуренцией между двумя процессами: образованием урана-233 из протактиния-233 и превращением путем захвата нейтрона протактиния-233 в протактиний-234. Группа ученых назвала такой режим работы "доминирующим режимом распада".

Таким образом, при длительной стационарной работе КЖСР в режиме "доминирующего распада" нет необходимости постоянного быстрого удаления из топливной соли протактиния-233 (его равновесное содержание и так мало). В указанных условиях ториевый гомогенный реактор с внешним источником возбуждения нейтронов на двух подкритически активных зонах может работать в условиях самообеспечения делящимся материалом с коэффициентом воспроизводства $k_{\infty} \geq 1,0$ при периодической подпитке воспроизводящим материалом - тетрафторидом тория.

При этом летучие продукты деления в малом объеме (менее 50 м³ в год /ГВт (эл.)) без разбавления инертным газом собираются и фракционируются по массам на индивидуальные вещества, которые могут быть использованы в промышленности (Xe, Kr, Rh, Pd) или отправлены на длительное хранение и захоронение (I, Tc) в малых количествах (20-30 кг в год на 1 ГВт (эл.)) в твердом виде. Все нелетучие продукты деления периодически выводятся из контура в виде радиационно- и термостойких фторидных стекол и хранятся до распада на 90 % (100 лет) с естественным охлаждением и последующим использованием. Весь комплекс ядерной установки размещается под землей на глубине не менее 50 м.

Преимущества предлагаемой новой технологии производства тепловой и электрической энергии следующие:

- исключается наработка и накопление трансурановых элементов (нептуния, плутония, америция и кюрия) и большого количества долгоживущих высокорadioактивных отходов, тем самым полностью решается проблема обращения с отходами;
- топливный цикл полностью замыкается и работает в режиме самообеспечения делящимся материалом с периодической подпиткой воспроизводящим неделящимся природным материалом - тетрафторидом тория;
- полностью исключается сброс радиоактивных газов в атмосферу (отсутствует труба газовых радиоактивных выбросов);
- полностью исключается транспортирование по воде и суше облученного ОЯТ, плутония и ТПЭ, нептуния, урана, загрязненного радиоизотопами, высокорadioактивных отходов и больших количеств делящихся материалов. Следовательно, исчезают риски и прецеденты к возникновению глобальных экологических катастроф на всем топливном цикле;
- подземная компоновка АЭС с КЖСР резко повышает экологическую безопасность, поэтому АЭС может быть вплотную приближена к потребителю тепла, в том числе и крупного города. Это позволяет утилизировать практически все тепло и не загрязнять тепловыми сбросами окружающую среду; ни при каких аварийных обстоятельствах не создается ситуация (предлог) для проведения эвакуации населения, непосредственно проживающего вблизи всего ядерного комплекса, а не только АЭС;



Принципиальная технологическая схема ториевого топливного цикла с использованием каскадного жидкосолевого реактора

- примерно в 1000 раз уменьшается количество захораниваемых высокорadioактивных отходов;
- себестоимость электроэнергии снижается не менее, чем в 2 раза.

Резюмируя вышеизложенное, можно сделать главный вывод о том, что уже в настоящее время возможно исключить все нерешенные проблемы и недостатки "военного" U-Pu ЯТЦ, использовать дополнительные аргументы, которые позволят склонить мнение общественности к дальнейшему развитию ядерной энергетики как основы наиболее экологически чистого, концентрированного, дешевого вида энергии и в ближайшее время приступить к созданию замещающих мощностей АЭС на новой стратегической основе.

Большая ресурсоемкость развития принципиально новых направлений ядерной энергетики требует для их реализации объединения усилий всего мирового сообщества. Указанная проблема является не только (и не столько) российской, поэтому мы предлагаем разработать соответствующую Международную программу. На первом этапе программы предлагается создать в кратчайшие сроки международный промышленный модуль для демонстрации общественности всех указанных преимуществ предлагаемого ядерного топливного цикла.

Для этого у нас в России есть все - сырье, материалы, специалисты высокой квалификации, способные вывести ядерную энергетику из кризиса.

УПАКОВКА ВЫСОКОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ (ВАО) С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КВАРЦЕВОГО СТЕКЛА ДЛЯ ДЛИТЕЛЬНОГО ХРАНЕНИЯ С ПОСЛЕДУЮЩИМ ЗАХОРОНЕНИЕМ

А. И. Карелин, Л. Б. Шпунт

В настоящей статье изложен подход авторов к проблеме изоляции ВАО. Проблема радиоактивных отходов является, без преувеличения, одним из главных факторов, влияющих на перспективу развития ядерной энергетики. Существуют два основных общепринятых подхода к методам локализации и удаления таких отходов из среды обитания человека:

- окончательное удаление с помощью глубинного захоронения в геологические формации, не подверженные в обозримом будущем значимым изменениям;
- надежное капсулирование и контролируемое длительное хранение.

Точка зрения авторов данной работы состоит в том, что на современном уровне знаний и развития технологии, а также общественного мнения, наиболее правильным (в том числе с учетом жизни будущих поколений) подходом к проблеме обращения с радиоактивными отходами является их контролируемое длительное хранение в форме, исключающей проникновение во внешнюю среду. Надежным способом изоляции радиоактивных отходов является многобарьерная изоляция. К каждому из барьеров предъявляются свои специфические требования, основными из которых являются:

- химическая инертность;
- отсутствие трещин и пор;
- термодинамическая устойчивость.

Например, главные требования Системы приемки отходов в США к форме отходов:

- 1) радиоактивные отходы должны быть твердыми;
- 2) гранулированные формы отходов должны быть уплотнены (отверждены) (например, посредством введения в герметизирующую матрицу) для ограничения доступности частиц и возможности генерации новых частиц;

3) горючие радиоактивные отходы должны быть переведены в негорючую форму в том случае, если нельзя показать, что пламя, охватывающее упаковки с отходами, содержащими горючие материалы, не будет оказывать неблагоприятного воздействия на другие упаковки с отходами, любые структуры, системы и компоненты, важные для безопасности хранилища или его способности изолировать отходы.

Основной особенностью предлагаемого способа является использование чистого кварцевого стекла в качестве одного из барьеров, препятствующих распространению радионуклидов в окружающую среду. Общий вид предлагаемой упаковки представлен на рисунке.

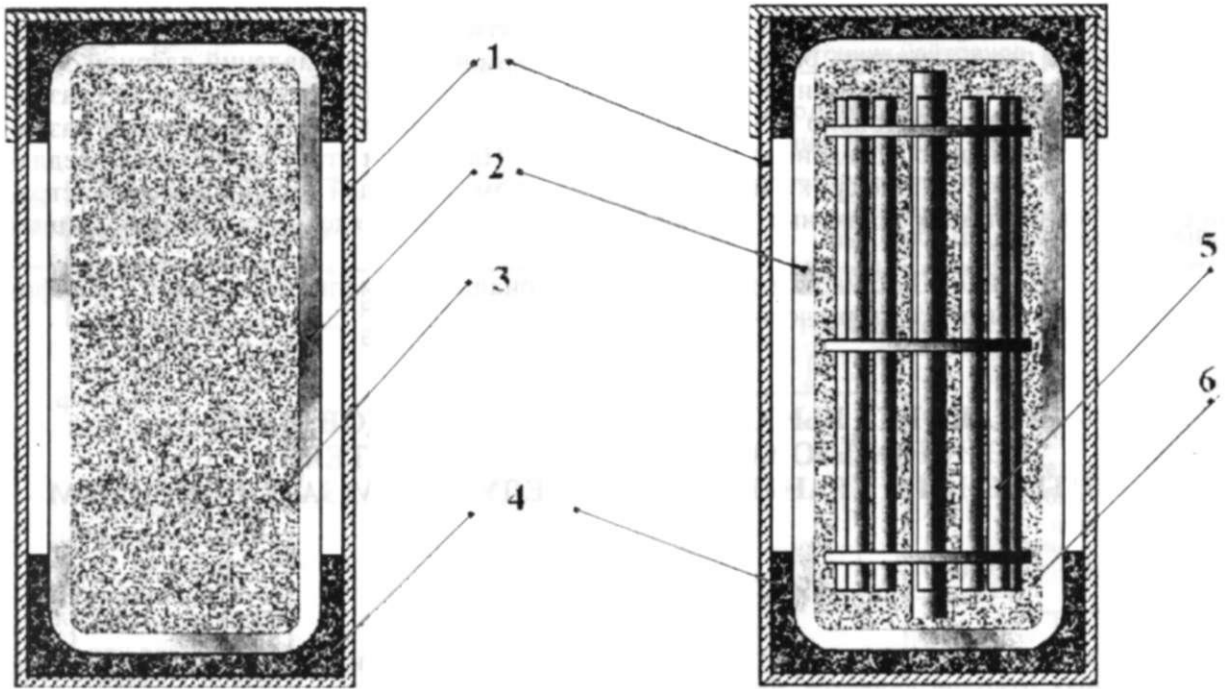


Схема упаковки кальцината ВАО и отработавшей топливной сборки с использованием кварцевого стекла и метода изостатического обжатия:

1 - внешний металлический контейнер; 2 - оболочка из кварцевого стекла; 3 - первичная герметизирующая матрица; 4 - амортизирующие элементы из кварцевой керамики; 5 - отработавшая топливная сборка; 6 - керамический наполнитель

Внешним изолирующим барьером является кварцевый чехол. Для его изготовления возможно использование одного из двух видов кварцевого стекла: либо вакуум-плавленного, либо стекла марки КС-4В. Первое - дешевле, второе - более чистое и вследствие этого более радиационно-стойкое. Будущие исследования покажут, какой из этих материалов окажется предпочтительнее. Технология производства таких стекол и изделий из них разработана и освоена Институтом химии силикатов Российской Академии наук (ИХС РАН).

Оценка тепло- и газовыделения при хранении ВАО-кальцината в упаковке, изображенной на рисунке, проведена для кальцината от переработки 1 т топлива ВВЭР-1000. ВАО-кальцинат от переработки 1 т топлива по экстракционной технологии весит 35 кг, его тепловыделение в зависимости от срока хранения после выгрузки из реактора показано в табл. 1. Для проведения расчетов использовалась модель упаковки диаметром 200 мм. Все расчеты, результаты которых приведены в таблицах 1-2, выполнены А. А. Римским-Корсаковым.

Таблица 1

Тепловыделение кальцината ВАО и температура наружной стенки упаковки

Время от момента выгрузки ОЯТ из реактора, годы	Тепловыделение кальцината ВАО, Вт	Температура на поверхности упаковки, хранящейся в воздухе, °С
3	2200	210
5	1100	140
10	670	115
20	500	90
50	280	70
100	80	35

Таблица 2

Парциальное давление радиогенного гелия без учета его диффузии из упаковки

Время от создания упаковки, годы	Число молей радиогенного гелия	Парциальное давление гелия, МПа
1	0.03	0.006
10	0.08	0.016
100	0.20	0.04
1000	0.38	0.07
10000	0.80	0.12
10000000	4.87	0.8

С учетом того, что кварц является материалом "прозрачным" для гелия, его выделение в процессе хранения не создаст условий для нарушения целостности упаковки.

Разработка герметизирующей матрицы для различного типа ВАО является наиболее актуальным и важным направлением развития работ. Состав и способ изготовления таких матриц должен существенно различаться в зависимости от типа отхода. В качестве стандартной формы первичной герметизирующей матрицы в США принята матрица боросиликатного стекла.

В настоящее время существуют еще два альтернативных подхода к переработке ВАО:

- перевод неразделенных отходов в керамическую форму типа синрок;
- разделение ВАО с последующим остекловыванием Cs-Sr фракции и переводом актинидной фракции в керамическую форму.

Первый подход, с нашей точки зрения, более привлекателен. Этот способ упаковки может обеспечить более высокую концентрацию радионуклидов в герметизирующей матрице, однако требует получения кальцината ВАО. Кальцинат ВАО предлагается получать одним из двух альтернативных способов: в специальном кальцинаторе непрерывного действия, либо подачей воднохвостового раствора в плазму специального плазмотрона. Каждый из перечисленных способов имеет свои преимущества и недостатки. Использование плазмохимических способов для получения кальцината ВАО непосредственно из воднохвостового раствора требует значительного объема исследований. Однако технологические достоинства подобной операции настолько очевидны, что некоторые затраты на НИР безусловно оправданы.

С нашей точки зрения, плазмохимические способы получения кальцината ВАО из воднохвостовых растворов экстракционной переработки ОЯТ обладают следующими технологическими преимуществами:

- отпадает необходимость в узле глубокой выпарки высокоактивных, содержащих значительные количества экстрагента воднохвостовых растворов;
- снимается проблема накопления межфазных осадков, выводимых из процесса с воднохвостовым раствором.

Следует особо подчеркнуть, что предлагаемый способ упаковки не требует предварительного разделения ВАО на фракции. В предлагаемом способе синтез минералоподобных матриц для иммобилизации ВАО и включение их в защитную оболочку из кварца может быть осуществлен с помощью одной операции - горячего изостатического прессования. Применение этого метода позволяет существенно оптимизировать процесс синтеза многокомпонентных матриц с использованием в качестве основного исходного компонента кварцевого стекла. Предполагается, что введение в состав кальцинированных ВАО порошков двуокиси кремния, металлического циркония или алюминия позволит провести одностадийный синтез многокомпонентной матрицы за счет химического взаимодействия в системе ВАО - металл - SiO_2 . Таким образом, надежная фиксация ВАО будет достигнута как за счет надежной первичной герметизирующей матрицы, так и за счет химически и радиационно-устойчивой наружной оболочки.

ТЕТРАФТОРИД КРЕМНИЯ - ИСХОДНЫЙ МАТЕРИАЛ ДЛЯ НОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Л. Б. Шпунт

В начале 1992 г. в связи с конверсией Минатом приступил к реализации программы, направленной на создание в России полупроводниковой индустрии и волоконно-оптических систем связи. Радиевый институт взял на себя функции разработчика фторидной технологии производства моносилана и поликристаллического кремния. Сотрудники отдела конверсии в течение многих лет до этого занимались разработкой и изучением процессов переработки облученного урана. Тем не менее, высокая квалификация и ответственное отношение к делу позволили исследователям, работающим над новой проблемой, быстро освоить ее методологию и добиться серьезных результатов. Группа в составе В. А. Королева, В. А. Карелина, Л. Г. Маширова, В. Г. Питалева, М. С. Полякова, А. Ю. Шильникова, Б. В. Андропова, С. А. Кокиной, В. С. Щукина разработала и освоила способы получения чистых тетрафторида кремния и моносилана, наметила и разрабатывает технологические процессы получения чистых материалов с использованием тетрафторида кремния.

Россия обладает огромными, практически неограниченными запасами природного сырья для производства тетрафторида кремния. Кольский апатит – исходное сырье для производства минеральных удобрений – содержит до 3 % фтора. В технологическом процессе получения удобрений фтор локализуется, в основном, в виде тетрафторида кремния и улавливается в форме кремнефтористоводородной кислоты или ее солей. Например, Череповецкий “Аммофос” производит в год до 45 тыс. тонн кремнефтористоводородной кислоты.

Технология производства чистого тетрафторида кремния позволяет использовать в качестве исходного материала кремнефторид натрия, кальция или кремнефтористоводородную кислоту. Из исходного гексафторсиликата натрия получается тетрафторид кремния с содержанием основного вещества не ниже 99,995 %. Одной из стадий технологии получения тетрафторида кремния является процесс гранулирования гексафторсиликата натрия с помощью золя кремниевой кислоты. (Высушенные гранулы имеют удовлетворительную механическую прочность). В таблице приведен химический состав тетрафторида кремния, полученного терморазложением кремнефтористоводородной кислоты.

Содержание примесей в полученном SiF_4 , млн⁻¹

Элемент	Zn	P	Pb	Mn	Ca	La
SiF_4	0.03	<0,02	0.002	<0,006	<0,006	<0.02
Элемент	Sb	B	Cr	Ti	Al	As
SiF_4	<0,006	0.0012	<0.02	0.003	0.058	<0,006
Элемент	Fe	Mg	Mo	Cu	V	Ni
SiF_4	0,048	0,025	<0,002	0,002	<0,002	0,002

Использование гранулированного кремнефторида натрия существенно снижает пыление, что повышает чистоту получаемого продукта, а также позволяет получать гранулированный фторид натрия, являющийся товарным продуктом. Полученный таким способом фторид натрия может быть использован в качестве адсорбента в процессах очистки газовых потоков от тетрафторида кремния и фтористого водорода.

Области применения тетрафторида кремния весьма разнообразны и находятся в различных стадиях разработки.

Использование тетрафторида кремния для получение пленок аморфного и микрокристаллического кремния

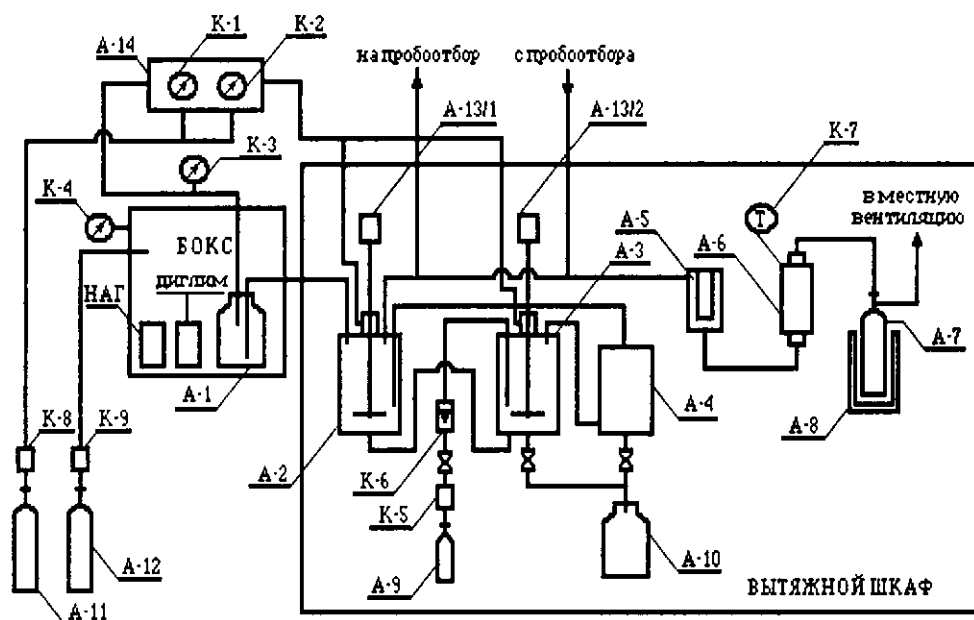
Тетрафторид кремния используется индивидуально либо в смеси с моносиланом в качестве эпитаксиального газа в технологии производства полупроводниковых приборов, солнечных батарей, различного рода детекторов и индикаторов с использованием техники тлеющего разряда. Предварительные оценки свидетельствуют о том, что введение фтора в пленку позволит получить новые свойства; в частности, такие пленки будут обладать большей устойчивостью во времени, т. е. меньшей скоростью деградации. Работы в этом направлении проводятся совместно с сотрудниками Физико-технического института РАН.

Получение моносилана

Конверсия тетрафторида в моносилан проводится с использованием в качестве гидрирующего агента натрийалюминийгидрида (НАГ) и гидридов других металлов. По разработанной технологии на укрупненной лабораторной установке Радиевого института произведены партии моносилана. На рисунке представлена смонтированная в Радиевом институте укрупненная лабораторная установка для конверсии тетрафторида кремния в моносилан.

В процессе экспериментов получены килограммовые количества моносилана. В настоящее время разработана и испытана аппаратура, найден способ контроля полноты выхода продукта и анализа качества. Процесс основан на реакции нуклеофильного замещения фтора на водород, протекающей в органическом растворе между алюмогидридом натрия и тетрафторидом кремния. Растворителем служит диглим (диметилловый эфир диэтиленгликоля). Реакция протекает быстро с выходом близким к 100 % при температуре 35 °С; благодаря термостатированию реактора процесс осуществляется при контролируемой температуре. Созданная установка позволяет проводить процесс как в периодическом, так и в непрерывном режиме при противотоке реагентов (газообразного тетрафторида кремния и раствора алюмогидрида натрия). Концентрация моносилана на выходе из реактора непрерывно контролируется хроматографически, одновременно проводится контроль возможного проскока тетрафторида. Моносилан проходит через колонку с гранулированным фторидом натрия при температуре 300 °С, что исключает попадание тетрафторида в моносилан. Отработанный диглим после отделения криолита возвращается в процесс в узел приготовления раство-

ра натрийалюмогидрида. Созданная установка позволяет испытывать и совершенствовать аппаратуру и технологические режимы процесса.



Аппаратурная схема установки:

А-1 – сосуд для раствора НАГ; А-2, А-3, А-4 – аппараты конверсии; А-5 – криогенная ловушка; А-6 – колонка для улавливания следов SiF_4 ; А-7 – баллон для намораживания SiH_4 ; А-8 – сосуд Дюара; А-9 – баллон с SiF_4 ; А-10 – сосуд для приема отработанного раствора НАГ; А-11 – баллон с гелием; А-12 – баллон с аргонem; А-13/1-2 – двигатели для мешалок; А-14 – блок регулировки расхода газа; К-1,2,3,4 – манометры; К-5,8,9 – редукторы; К-6 – ротаметр; К-7 – термopapa

Плазмохимический синтез соединений кремния

Разработка и исследование процессов плазмохимического синтеза соединений кремния и некоторых металлов проводится на специально созданной опытной лабораторной установке в Радиевом институте, в составе которой имеется генератор мощностью 20 кВт с рабочей частотой 1,76 МГц. В качестве плазмообразующего газа используются аргон или атмосферный воздух. Прямим синтезом из тетрафторида кремния в плазме атмосферного воздуха синтезирован нанодисперсный порошок SiO_2 , впервые полученный на Сибирском химическом комбинате. Размер частиц полученного порошка находится в диапазоне 5-100 нм. Разрабатываются процессы получения карбида и нитрида кремния. Синтезированы окись циркония и циркон (ZrSiO_4).

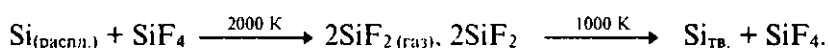
Парофазный синтез высококачественного кварцевого стекла

По технологии и на установках НПО "Кварц" производится кварцевое стекло методом плазменного наплава. Исходным материалом в этом процессе является тетрахлорид кремния, плазмообразующим газом - атмосферный воздух. Эксперименты, проведенные совместно с сотрудниками и на установках НПО "Кварц", показали, что замена тетрахлорида на тетрафторид позволяет получить кварцевое стекло, удовлетворяющее техническим требованиям на плазменное стекло. Были синтезированы образцы кварцевого стекла из тетрафторида кремния в плазме атмосферного воздуха без дополнительного добавления воды. Тестирование образцов показало, что они удовлетворяют техническим требованиям на парофазное кварцевое стекло.

Разработка методов получения поликристаллического кремния

Одним из наиболее перспективных направлений в использовании тетрафторида кремния является производство на его основе поликристаллического кремния для микроэлектроники. Главной тенденцией в развитии индустрии поликремния является замена трихлорсилана на моносилан в процессе терморазложения с получением поликремния. Процесс производства моносилана из тетрафторида кремния может оказаться конкурентоспособным по отношению к разрабатываемому способу его получения из тетрахлорида. Повышение конкурентоспособности фторидной технологии лежит на пути поиска более дешевого и доступного гидрирующего агента взамен натрийалюминийгидрида. В настоящее время нашим коллективом проводятся работы по изучению гидрирующих свойств ряда гидридов, в частности гидридов натрия и лития.

Помимо очевидного способа производства поликремния из моносилана нами разрабатывается весьма перспективный процесс, описываемый уравнениями:



Оценочные термодинамические расчеты показали, что при определенных условиях выход поликристаллического кремния в этом процессе достигает 25 % и выше. Приведенная технологическая схема аналогична процессу получения высокочистого алюминия в соответствии с уравнениями:



При организации непрерывного противотока расплавленного алюминия и газообразного трифторида алюминия происходит глубокая очистка алюминия от имеющихся примесей.

Получение сплавов кремния с металлами

Еще одной областью применения тетрафторида кремния являются процессы получения сплавов кремния с рядом металлов, в частности с алюминием (силумин), магнием. Процесс проводится путем продувания SiF_4 через расплав соответствующего металла. Проведенные эксперименты показали техническую осуществимость такого способа.

Все технологические процессы с тетрафторидом кремния малоотходны и комплексно используют сырье. Перспективность технологий на основе использования тетрафторида кремния обусловлена прежде всего практически неограниченной сырьевой базой, низкой стоимостью тетрафторида, накопленным громадным опытом работы с соединениями фтора, особенно в атомной промышленности.

РАЗРАБОТКА СПОСОБОВ ВЫДЕЛЕНИЯ И ОЧИСТКИ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Г. П. Никитина

В 1988 г. в связи с конверсией предприятий оборонной отрасли была поставлена задача утилизации фосфогипса, отхода сернокислотной переработки апатитов на минеральные удобрения. В то время в нашей стране ежегодно перерабатывалось на удобрения более 20 млн. тонн апатитового концентрата (из них около половины - по сернокислотной технологии). Из каждой тонны апатитового концентрата, перерабатываемого сернокислотным методом, образуется около 1,4-1,6 тонны фосфогипса. В ходе переработки 60-80 %, а иногда до 90 % суммы окислов редкоземельных элементов от их массы в апатитовом концентрате теряется с фосфогипсом. Массовая доля редких земель в фосфогипсе достигает 0,4-0,6 %. Отвалы фосфогипса в мире и в нашей стране огромны и увеличиваются с угрожающей скоростью. Только на ПО "Фосфорит" отвалы фосфогипса в 1987 г. оценивались в 27 млн. тонн и увеличивались со скоростью около 2 млн. тонн в год. Таким образом, в то время только на этом предприятии в отвальном фосфогипсе содержалось 120-140 тыс. тонн редких земель. Это особенно впечатляет, если учесть, что производство редкоземельных элементов в США в те годы достигало 22 тыс. тонн в год; в мире - около 34 тыс. тонн в год.

Известны два способа извлечения редкоземельных элементов из фосфогипса: выщелачивание минеральными кислотами и карбонизация фосфогипса с последующим разложением минеральной кислотой и экстракционным извлечением редкоземельных элементов из раствора неразбавленным трибутилфосфатом.

Проверка и оптимизация этих процессов были осуществлены большим коллективом сотрудников под руководством Л. Б. Шпунта и Г. П. Никитиной (В. П. Егорова, А. А. Листопадов, А. Н. Червяков, В. М. Александрук, А. Ю. Шильников, Т. А. Демьянова, В. В. Прусаков, А. В. Малиновская).

Было показано, что комплексная переработка отвального фосфогипса, включающая его карбонизацию, растворение карбонатов кальция и редкоземельных элементов в азотной кислоте и последующий экстракционный передел с использованием неразбавленного трибутилфосфата обеспечивает примерно 99 %-ное извлечение редкоземельных элементов от их массы в фосфогипсе. Осаждением гидроокисей РЗЭ и иттрия из резкстрактов получены окисные концентраты с массовой долей редких земель от 60 до 92 %. В оптимальных условиях масса твердых отходов этой переработки варьирует от 0,6 до 10 % от исходной массы фосфогипса. В результате переработки получают также два вида удобрений: кальциевая селитра и сульфат аммония.

Исследование процессов выщелачивания редкоземельных элементов из фосфогипса минеральными кислотами показало, что редкие земли наиболее эффективно выщелачиваются разбавленной (2,5 моль/л) азотной кислотой при температурах 30-80 °С. Глубина выщелачивания в этих условиях достигает 75 %. Добавки комплексонов, нитрилотриметилфосфоновой или ацетогидроксамовой кислот и ИМ-50 в мольном отношении к РЗМ, равном (2-5)/1, не влияют на выщелачивание. Оксиэтилендифосфоновая кислота при ОЭДФК/РЗЭ, равном (1,5-10)/1, увеличивает степень выщелачивания до 85 %.

На основании проведенных исследований сформирована технологическая схема и рассчитаны материальные потоки узлов отмывки фосфогипса от редкоземельных элементов, фтора и фосфора, а также экстракционного передела упаренных щелоков с использованием синтетических жирных кислот (C₇-C₉). Показано, что отмытый фосфогипс содержит около 0,015 % фтора, менее 0,2 % фосфора и не более 0,008 % азотной кислоты и пригоден для производства строительных материалов или для конверсии в сернистый газ с последующим получением серной кислоты.

Предлагаемые процессы являются ресурсосберегающими, практически безотходными и могут быть рекомендованы к внедрению на производствах сернокислотной переработки апатитов на минеральные удобрения.

Второе направление разработок связано с предполагаемой организацией производства редкоземельной продукции из хлоридного плава, побочного продукта переработки лопарита на Соликамском магниевом заводе. Хлоридный плав является перспективным сырьем для наработки неодима, необходимого в производстве мощных магнитов, поскольку массовая доля неодима достигает 12 % от суммы редкоземельных элементов в хлоридном плаве, а массовая доля хлоридов РЗЭ в плаве составляет 65 %.

В качестве головной операции экстракционной переработки плава на индивидуальные редкоземельные элементы было предложено осуществить замену аниона (хлорида на нитрат) с последующим разделением РЗЭ с помощью неразбавленного трибутилфосфата по известным схемам. Замену аниона и сброс основных примесных элементов (Ca, Sr, Na) предполагалось осуществлять посредством экстракции редкоземельных элементов из солянокислых сред 50 %-ным раствором технической смеси синтетических жирных кислот (C₇-C₉) в нормальном додекане. При этом оказалось, что в рассматриваемых системах распределение редкоземельных элементов и степень их извлечения в СЖК+С₁₂H₂₆ (50/50) существенно зависят от pH равновесного водного раствора:

$$\lg D_{LH} = (4,24 \pm 0,39) + (1,43 \pm 0,39) \text{pH}.$$

Максимально достигаемые концентрации редкоземельных элементов в органической фазе зависят от степени нейтрализации жирных кислот и при нейтрализации на 55-75 % составляют 60-70 г/л. При pH=5,0-5,6 извлекается 99,5-100 % РЗЭ за одну ступень. Экстракция редкоземельных элементов с использованием синтетических жирных кислот обеспечивает эффективную очистку от хлорид-иона. Коэффициенты очистки РЗЭ от Cl⁻-иона варьируют от 2·10² до 1·10³ при осветлении экстракта фильтрацией или центрифугированием. Более высокие коэффициенты очистки (2·10³-8·10³) достигаются осветлением экстракта промывкой водой (O/B=4-5/1).

Таким образом, экстракция редкоземельных элементов с помощью синтетических жирных кислот может быть рекомендована в качестве головной операции экстракционной переработки хлоридного плава на индивидуальные редкоземельные элементы.

Третье направление разработок связано с созданием схемы экстракционного рафинирования скандия. В 1992-1993 гг. на базе НПО "Радиовый институт им. В. Г. Хлопина" планировалось создание производства по выпуску металлического скандия высокой чистоты (99,99 %). Поскольку в качестве исходного материала предполагалось использовать оксид скандия чистотой 99,0 %, в разрабатываемой технологической схеме следовало предусмотреть тысячекратное снижение содержания примесей в скандиевом сырье, поступающем на металлургический передел. Предполагалось осуществить аффинажную экстракционную схему, включающую два полных противоточных очистных каскада. Экстракцию следовало проводить из кислых нитратных сред (8 и 11,5 моль/л HNO₃) в неразбавленный трибутилфосфат.

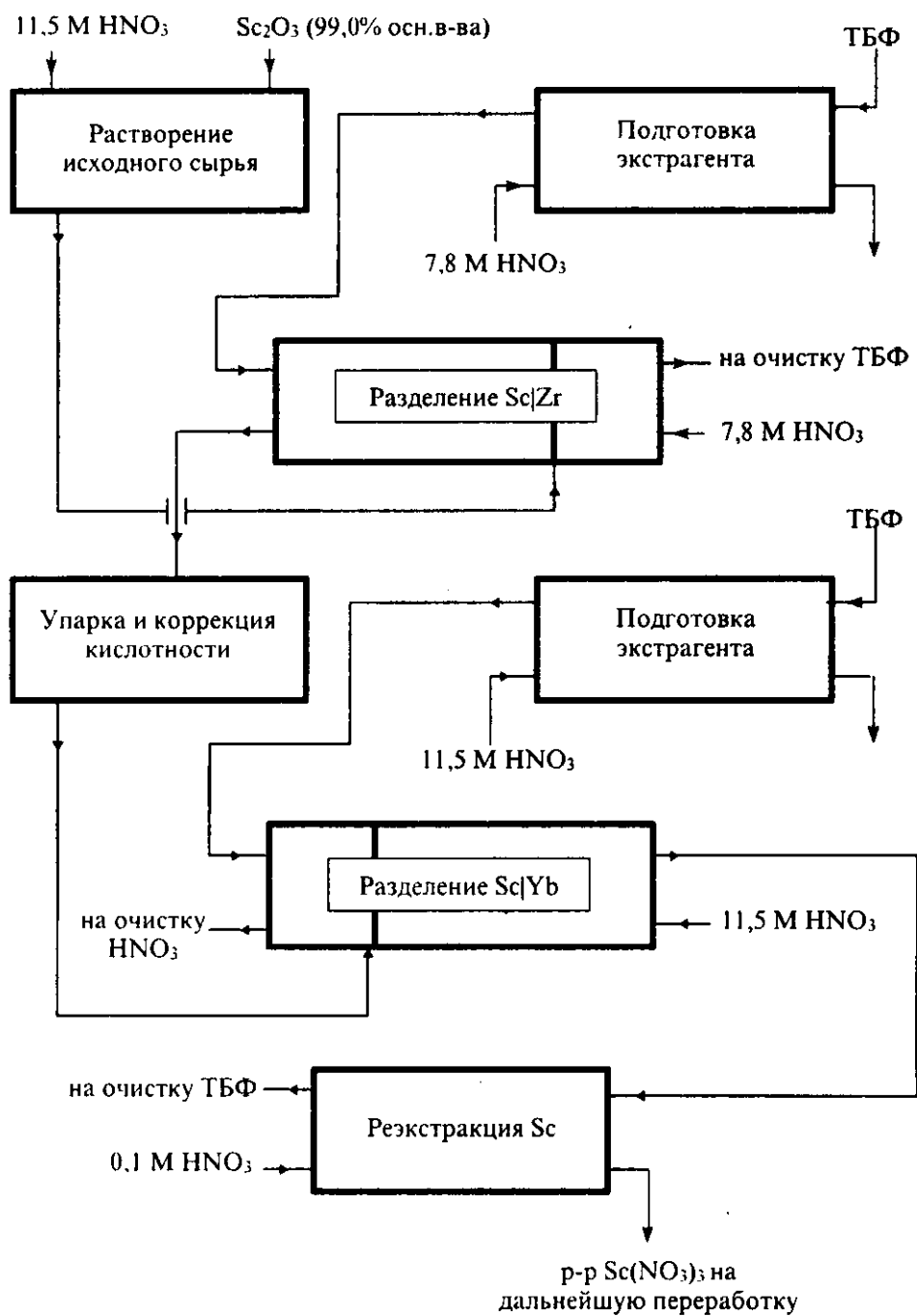
Таким образом, задача сводилась к определению рабочих параметров экстракционных каскадов (соотношения потоков, кислотности, количества ступеней), на одном из которых скандий отделялся бы от группы лучше экстрагирующихся примесей, оставаясь преимущественно в водной фазе, а на другом - от хуже экстрагирующихся, максимально переходя в органическую фазу. В качестве моделей лучше- и хуже экстрагирующихся примесей были выбраны Zr и Yb, соответственно. Каскады предполагалось питать растворами с высокой концентрацией скандия (~1 моль/л).

Разработка этой схемы проводилась под руководством Л. Б. Шпунта и А. А. Листопадова группой сотрудников (М. Ю. Киршин, Г. П. Никитина, В. П. Егорова, А. Ю. Шильников, В. В. Лякин, К. В. Перепеч, Н. В. Середкина). Достаточно детальное исследование

изотерм экстракции скандия в рассматриваемых условиях и коэффициентов распределения Zr и Yb позволило подобрать эмпирические взаимозависимости коэффициентов распределения всех участников процесса. Эти уравнения в совокупности с уравнениями почасового материального баланса по всем трем компонентам и составили основу расчетной модели. С целью достижения требуемой очистки при минимальных потерях Sc проводились многочисленные расчеты каскадов с различным количеством ступеней в экстракционной и промывной частях и при различных соотношениях потоков. В результате была предложена модель, которая может быть использована для построения реального каскада.

На базе проведенных исследований была сформирована схема экстракционного рафинирования скандия. Фрагмент компоновки технологической схемы представлен на рисунке. Схема предполагает регенерацию и возвращение в процесс всех реагентов и может быть осуществлена как практически безотходная.

В процессе снятия изотерм экстракции Sc и HNO_3 была обнаружена практическая независимость коэффициентов распределения азотной кислоты от концентрации скандия при кислотностях выше 7,5 моль/л. Азотная кислота при таких концентрациях экстрагируется в ТБФ так, как будто она не имеет конкурентов. Выяснением причин наблюдаемого явления занимались Г. П. Никитина, А. А. Листопадов, К. Б. Папков, В. П. Егорова, Н. В. Середкина. Для этого были исследованы ИК-спектры продуктов взаимодействия трисольватов тринитратов скандия, $\text{Sc}(\text{NO}_3)_3 \cdot 3\text{ТБФ}$, с растворами азотной кислоты в четыреххлористом углеороде. Было показано, что в результате этого взаимодействия образуются комплексы общей формулы $\text{Sc}(\text{NO}_3)_3 \cdot m\text{HNO}_3 \cdot 3\text{ТБФ}$ ($m=1-7$), в которых молекулы азотной кислоты (по крайней мере, первые три) не входят в первую координационную сферу скандия и не вытесняют из нее ТБФ, а присоединяются посредством водородной связи средней силы к атомам кислорода нитрато-групп скандия. Сравнение ИК-спектров экстрактов Sc из азотной кислоты (8 и 12 моль/л) в растворы трибутилфосфата в CCl_4 после вычитания из них поглощения, обусловленного $\text{ТБФ} \cdot n\text{HNO}_3$, показало их практически полное сходство со спектрами модельных растворов $\text{Sc}(\text{NO}_3)_3 \cdot m\text{HNO}_3 \cdot 3\text{ТБФ}$. Исследование спектров экстрактов гадолиния и иттербия из сильноокислых растворов (7-8, 12 моль/л HNO_3) в $\text{ТБФ} + \text{CCl}_4$ продемонстрировало, что и в этих системах в органическую фазу экстрагируются комплексы состава $\text{Ln}(\text{NO}_3)_3 \cdot m\text{HNO}_3 \cdot 3\text{ТБФ}$, в которых молекулы азотной кислоты входят во вторую координационную сферу лантаноида при $m=1-3$ также в результате возникновения Н-связи между протоном кислоты и атомом кислорода нитрато-группы лантаноида.



Фрагмент технологической схемы экстракционного рафинирования Sc

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Е. И. Ильенко

Отдел научно-технической информации (ОНТИ) начали создавать в Радиевом институте в конце 1962 года после перехода института из системы Академии наук СССР в систему Минсредмаша. С 1963 г. ОНТИ вошел в структуру института как самостоятельное подразделение.

Создание отделов информации в институтах и на промышленных предприятиях было в те годы обязательным не только в системе атомной промышленности. Это были годы становления нового вида научной деятельности в стране. В АН СССР в 50-х годах был создан Всесоюзный институт научной и технической информации (ВИНИТИ), и научно-информационная деятельность (НИД) стала развиваться, в первую очередь, в тех отраслях промышленности, которые были связаны с передовой техникой и технологией - авиационной, радиотехнической, электронной, судостроительной, атомной и др. НИД рассматривалась как органическая составная часть научных исследований и разработок и как один из основных факторов, способствующих повышению эффективности и росту производительности научного труда. Ученый-экспериментатор освобождался от значительной части весьма трудоемкой работы по поиску необходимой ему информации в большом объеме научной литературы. Он получал ее по своим запросам в виде готовых библиографических подборок или в форме рефератов, переводов или аналитических обзоров. Шел процесс разделения труда в науке. Он был закреплён в форме централизованной общегосударственной системы научно-технической информации (НТИ).

В Радиевом институте 60-е годы были для ОНТИ годами становления и комплектования кадров.

Тематика работ отдела с самого начала была целенаправленно связана, главным образом, с проблемами радиохимии, радиохимической технологии, получения и использования радионуклидов, а позднее и с более широким кругом проблем ЯТЦ. Такая направленность соответствовала развитию работ в институте - с нею было связано более 50 % всех научно-исследовательских работ (НИР).

Начальником ОНТИ с самого момента его создания была назначена Е. И. Ильенко - радиохимик, до этого работавшая в лаборатории Б. П. Никольского. Основной состав отдела формировался также из химиков^{*)}, многие из которых имели уже большой стаж работы в лабораториях института. В группе анализа и обобщения информации работали (и работают), в основном, сотрудники, имеющие ученую степень кандидатов химических наук.

Таким образом, с 70-х годов в ОНТИ сложился устойчивый коллектив высококвалифицированных специалистов, которые работали в отделе, как правило, более 10 лет, что делало их специалистами высокого класса и в области научно-технической информации.

Создание ОНТИ было принято в институте неоднозначно. Часть сотрудников, в том числе из руководящего состава, считала это нецелесообразным, что, естественно, вызывало много сложностей в работе отдела. Становлению и развитию ОНТИ помогала поддержка со стороны администрации института (директоров В. М. Вдовенко, а затем Л. Н. Лазарева, за-

^{*)} Попытки, сделанные в свое время, вовлечь в работу ОНТИ физиков встретили сопротивление со стороны руководства физических отделов. Оно не считало возможным выделять ресурсы для развития работ по научно-технической информации. В результате ОНТИ развивался только за счет химических отделов и, соответственно, работы велись, в основном, в их интересах. ОНТИ не считал возможным заниматься вопросами, по которым не имел специалистов.

местителей директоров Г. С. Сеницыной, С. Л. Фаддеева), а также со стороны руководства Научно-технического управления, специалистов-радиохимиков и организаторов научно-технической информации Министерства, которые признали правильность выбранного отдела направления развития (А. К. Круглов, В. И. Землянухин, Д. Д. Соколов, А. Ф. Царенко, Н. А. Раков, В. Н. Сельдешев и др.).

К началу 70-х годов отдел стал уже признанным центром информации в области радиохимии. В 1972 г. приказом Министра он был назначен головным в отрасли по этим проблемам и стал называться ГОНТИ (Головной отдел научно-технической информации).

К этому времени формирование отдела, в основном, закончилось, сложились формы его работы, нашедшие отражение в структуре отдела:

- группа справочно-информационной работы;
- группа патентной информации;
- группа автоматизации информационных работ;
- группа анализа и обобщения НТИ;
- группа пропаганды научно-технических достижений (организация конференций, сообщений, выставок и т. п. мероприятий);
- редакционно-издательская группа;
- группа оперативной полиграфии и другие.

Главными задачами отдела было:

- оперативное информирование о поступающей новой научно-технической литературе по установленной тематике и создание базы данных (БД) для ретроспективного поиска;
- анализ и обобщение информации с целью определения мирового уровня исследований, разработок и тенденций развития интересующих областей науки и технологии;
- выполнение функций головного отдела НТИ и организация обеспечения информацией в области радиохимии предприятий отрасли по их запросам.

Оперативная информация

Для организации оперативного информирования и создания структуры базы данных (БД) был разработан классификатор ("Тематический рубрикатор: Радиохимия"), учитывавший все основные направления современной радиохимии и информационные интересы абонентов нашей системы. На первых этапах рубрикатор содержал около 400 рубрик и дополнялся по мере появления новой тематики.

Предмет современной радиохимии не имеет строгих границ и поэтому создание рубрикатора представляло определенную сложность. Реальная современная прикладная и теоретическая радиохимия переросла все существующие определения этой науки. Радиохимические исследования теснейшим образом связаны с физической, неорганической, аналитической, коллоидной химией, электрохимией, химией высоких температур и т. д., то есть информация по радиохимии должна была захватывать и другие области наук.

Научная классификация - весьма специфичная и сложная область научной деятельности. Работа по совершенствованию классификации велась в отделе постоянно. Сотрудники отдела участвовали также в создании классификатора отраслевой, а затем и государственной системы НТИ (Е. И. Ильенко, Э. С. Кальницкая).

Для оперативного информирования исследователей было организовано издание еженедельного Библиографического бюллетеня "Радиохимия" (позднее он вошел в серию отраслевых библиографических изданий и стал называться "Указатель отечественной и зарубежной литературы. Серия: Радиохимия"). В качестве источников информации использовались отечественные (70-80 наименований) и иностранные (200-300 наименований) периодические издания, труды конференций, сборники, монографии, препринты и другие публикации, а также информация об изобретениях в СССР и о зарубежных патентах. Иностранные источники приводились в переводе на русский язык. Бюллетень содержал 8-10 тыс. сообщений в год. Он поступал во все заинтересованные лаборатории института, в библиотеку и направлялся на ряд предприятий отрасли.

В связи с повышением спроса на бюллетень в начале 70-х годов его издание было передано в ЦНИИАтоминформ, где тираж был увеличен до 230-250 экземпляров и где появились подписчики из институтов АН СССР и из других отраслей народного хозяйства (всего ~50 предприятий отрасли и ~70 "чужих" подписчиков). К бюллетеню привлекала внимание достаточная полнота информации и высокая оперативность. Это было существенно потому, что задержка информации в централизованном Реферативном журнале ВИНТИ в те годы составляла от полугода до двух лет.

Подготовку бюллетеня с отбором из первоисточников, переводом на русский язык и рубрикацию материалов обеспечивала группа сотрудников ГОНТИ (Э. С. Кальницкая, Ю. М. Котова, А. А. Панова, Т. А. Робина, Г. А. Куманева, В. С. Богданова, Л. Н. Головина, Л. З. Горелик, позднее Н. С. Колесникова, Н. В. Спевак, Ю. А. Копейкин и др.).

Библиографический бюллетень "Радиохимия" прекратил свое существование в связи с резким сокращением отраслевых изданий в 1988 г., просуществовав 25 лет (с 1963 г.).

Оперативное информирование абонентов продолжалось путем обеспечения их запросов с помощью действовавшей в Радиевом институте автоматизированной системы распределения информации, о которой будет рассказано ниже.

Автоматизированные информационно-поисковые системы

Ретроспективный поиск информации с наибольшей эффективностью мог быть организован с помощью автоматизированной информационно-поисковой системы (АИПС). В Радиевом институте ставилась задача формирования базы данных (БД) на основе материалов библиографического бюллетеня "Радиохимия", так как готовых БД, специализированных в этой области, не существовало.

АИПС в те годы в нашей стране еще только начинали развиваться, и в большинстве случаев это были разработки лишь на уровне эксперимента. Поэтому создание АИПС не было тривиальной задачей, как это стало уже в 80-х и тем более 90-х годах, когда стали доступны международные информационные сети.

Разработку АИПС в ОНТИ Радиевого института начали в 1970 г., вскоре после получения институтом первой ЭВМ - машины второго поколения, "Минск-22". Система была введена в эксплуатацию в 1974 г. после накопления достаточной БД.

Разработанная АИПС САРПИ (система автоматизированного ретроспективного поиска информации) имела собственное математическое и лингвистическое обеспечение; стандартных пакетов программ в то время мы еще не имели. Это была весьма примитивная, но принятая на том этапе система дескрипторного типа без грамматики, как и внедренная годом позже в ЦНИИАтоминформ отраслевая АИПС САРИ^{*)}. Система обеспечивала возможность многоаспектного поиска информации с достаточной полнотой и точностью, но требовала трудоемкой ручной подготовки. Стремясь к максимальной экономии ручного труда, в САРПИ были введены элементы автоматической обработки информации в виде системы автоматического цифрового кодирования. Появление в институте вычислительной техники нового поколения, ЭВМ ЕС-1033, дало возможность модернизировать систему. После проведенного в ГОНТИ сравнительного исследования разных типов АИПС, локальная САРПИ была преобразована в систему с использованием естественного языка на основе ввода полных текстов библиографий и рефератов. Новое математическое и лингвистическое обеспечение предусматривало автоматическое индексирование, что исключало наиболее трудоемкий ручной процесс при формировании БД. Таким образом, была создана система с достаточно высоким уровнем автоматизации, опережающим отраслевой уровень.

^{*)} САРИ - система автоматизированного распределения информации. В систему САРИ вводилась информация о непубликуемых отраслевых материалах, главным образом об отчетах по научно-исследовательским работам. Информация САРИ содержала библиографию и ключевые слова (без рефератов).

В конце 70-х годов, когда ЦНИИАтоминформ адаптировал пакет прикладных программ (ППП) CDS/ISIS для ЭВМ типа ЕС, этот ППП стало возможным использовать в Радиевом институте для эксплуатации Международной системы информации по атомной науке и технике - ИНИС (INIS)^{*)}, отраслевой САРИ и локальной САРПИ. Для поддержания прежнего уровня автоматизации САРПИ потребовались лишь некоторые доработки в системе автоматического индексирования, так как ППП CDS/ISIS/ЕС не воспринимал цифровую информацию, дефисы и некоторые другие символы, необходимые для индексирования химических текстов.

Отраслевая САРИ была внедрена в Радиевом институте в полном объеме, ИНИС - выборочно, по тематике, соответствующей тематическим направлениям работ Радиевого института, включая радиохимию, ядерную физику, радионуклиды, радиационную химию и др.

Таким образом, к 1980 г. Радиевый институт имел развитую АИПС с политематическим охватом информации.

Отдельные системы были объединены в рамках единой технологической схемы в Комплексную автоматизированную систему информационного обеспечения (КАСИО). Оперативное информирование и ретроспективный поиск осуществлялись в подсистемах:

- публикуемая (общедоступная) информация по радиохимии и смежным областям химии (собственный ввод);
- изобретения в СССР и зарубежные патенты в области радиохимии и смежных областях химии (собственный ввод)^{**) ;}
- непубликуемая (труднодоступная) отраслевая информация, система САРИ;
- публикуемая и непубликуемая зарубежная информация из системы ИНИС.

Кроме того, ГОНТИ Радиевого института направлял на договорной основе запросы еще в две информационные системы:

- Всесоюзного института межотраслевой информации (ВИМИ);
- ИНПАДОК (Международная система патентной документации), которая эксплуатировалась в Ленинградском центре НТИ (ЛенЦНТИ).

Такое дополнение локальных систем собственного ввода "внешними" базами данных позволило ГОНТИ значительно расширить тематику информационного поиска. К середине 80-х годов на информационное обеспечение было взято более 90 % всех выполняемых в Радиевом институте научно-исследовательских работ, включая ядерную физику.

К началу 90-х годов общая БД всех подсистем КАСИО составляла более 400 тыс. документов с глубиной ретроспективного поиска в локальных подсистемах более 20 лет.

Кроме лабораторий Радиевого института КАСИО обеспечивала информацией еще 24 предприятия отрасли.

Общее количество постоянных запросов к концу 80-х годов колебалось около 10 тыс. Количество ответов в год достигало 1,5 млн.

В 80-х годах в Радиевом институте была разработана также автоматизированная фактографическая информационно-поисковая система (ФИПС) по проблемам радиохимии и радиохимической технологии. Для реализации этой системы использовались стандартные ППП, которые дополнялись собственными программами, дававшими широкие возможности для предварительного машинного анализа информации с целью вывода ее в заданной выходной форме. Это была интересная и весьма перспективная система, получившая поддержку при обсуждении на международных семинарах.

^{*)} Система создана и до настоящего времени поддерживается в МАГАТЭ.

^{**) Патентная подсистема собственного ввода создавалась потому, что она была более информативна, чем международная система ИНПАДОК. В локальную систему вводилась полная библиография с рефератом содержания патентов на русском языке. ИНПАДОК содержал только названия патентов на языках оригиналов и основные поисковые признаки.}

Однако эта система прошла лишь период экспериментальной проверки и не была реализована в широком масштабе в связи с резко изменившейся в стране в конце 80-х годов ситуацией с научными исследованиями и разработками.

Эта ситуация немедленно отразилась и на всей системе КАСИО. Уже в 1990 г. почувствовался резкий спад интереса пользователей, количество запросов сократилось как внутри института, так и от других предприятий. С распадом СССР начали выбывать из числа пользователей предприятия, расположенные в отделившихся государствах. Централизованное финансирование для поддержания систем прекратилось. У бывших пользователей систем не было ни средств, ни интереса к продолжению этого взаимодействия, так как многие из них вынуждены были искать свои новые пути. Просуществовав в таких условиях два года, в 1992 г. КАСИО была законсервирована.

Теперь, в 1997 г., совершенно очевидно, что она никогда не будет восстановлена. За эти годы информационные системы изменились принципиально. Сменились поколения вычислительной техники. Успешно действует имеющая мировое значение информационная система INTERNET. Мы надеемся, что Радиевый институт вернется к широкому использованию автоматизированного поиска информации, но это будет уже на новом уровне.

В заключение следует отметить, что создание и работа всех АИПС осуществлялась в Радиевом институте очень небольшой группой. Руководителем работ была Е. И. Ильенко, основным исполнителем и руководителем группы - В. С. Дейнов. Группа состояла из трех человек, в нее в разные годы входили Е. М. Найвельт, Л. И. Улина, А. В. Липатова, И. К. Степанищева, Е. В. Волин и др.

Постоянное содействие внедрению АИПС оказывал начальник Информационно-вычислительного центра Радиевого института В. И. Червяков.

Обзорно-аналитическая информация

Систематический анализ информации - это самостоятельное направление в научной деятельности. В ГОНТИ Радиевого института оно стало развиваться с начала 70-х годов.

Свою основную задачу ГОНТИ видел в том, чтобы систематически рассматривать состояние и мировой уровень работ по основным проблемам радиохимии и радиохимической технологии, определять наиболее актуальные и перспективные направления, тенденции развития каждой из рассматриваемых областей и проводить сопоставление с развитием отечественной науки. Для анализа выбирались проблемные вопросы, требующие детальной проработки больших объемов информации.

Результатом анализа был выпуск серий обзоров, в каждой из которых проблема рассматривалась в определенном аспекте. Например, серия обзоров была посвящена деятельности Национальных ядерных центров и крупных фирм, работающих в области атомных наук в США, Франции, Великобритании, Японии, ФРГ, Италии. При этом наиболее детально были рассмотрены направления исследований и результаты работ этих организаций в области радиохимии, ядерной, радиационной химии. Обобщающий обзор содержал систематизацию основных направлений проводившихся в те годы исследований и разработок в области радиохимии в мире.

70-е - 80-е годы были годами активного развития радиохимической промышленности за рубежом. Поэтому в эти годы большая серия обзоров ГОНТИ была посвящена систематическому анализу состояния и развития зарубежной радиохимической промышленности и технологии переработки ядерного топлива. Была рассмотрена деятельность радиохимических заводов и укрупненных установок в США, Франции, Великобритании, Бельгии, Японии, ФРГ, Италии, Индии, а также проекты создания новых радиохимических заводов. Эти обзоры в течение многих лет дополнялись ежегодными справками о новых результатах, новых ситуациях и тенденциях в радиохимической промышленности.

Одновременно с этим рассматривались и некоторые отдельные проблемные вопросы радиохимической технологии:

- переработка разных категорий радиоактивных отходов (РАО) радиохимических производств;
- аналитическое обеспечение радиохимической технологии;
- контроль и автоматизированные системы управления на радиохимических заводах;
- извлечение отдельных радионуклидов из РАО и возможности их использования;
- технологическое оборудование, новые процессы и методы в технологии и др.

Систематический анализ информации позволил сотрудникам ГОНТИ начать подготовку монографии по вопросам радиохимической технологии. Эта работа заинтересовала ряд ведущих специалистов отрасли, и в результате совместной работы (В. И. Землянухин и А. Ф. Царенко - от Министерства, Е. И. Ильенко, Л. Н. Лазарев и Л. Г. Царицына - от Радиевого института и А. Н. Кондратьев - от ВНИПИЭТ) была издана монография "Радиохимическая переработка ядерного топлива АЭС" (М.: Атомиздат, 1983). В 1989 г. вышло второе издание, дополненное новыми материалами.

Середина 70-х годов была отмечена началом международной дискуссии о возможных путях развития ЯТЦ, которая не завершилась и до настоящего времени. Мир поделился на сторонников замкнутого или открытого ЯТЦ в ядерной энергетике. ГОНТИ внимательно следил за ходом и результатами дискуссии на разных ее этапах и активно участвовал в формировании новых представлений о путях развития ядерной энергетике.

Была проведена большая работа с анализом экономических, экологических и технических аспектов замкнутого и открытого ЯТЦ. В этой связи рассмотрены также проблемы способов хранения ОЯТ и различные варианты захоронения отходов ядерной энергетике - в виде непереработанного ОЯТ или в виде высокоактивных отходов (ВАО) переработки ОЯТ, в том числе после их фракционирования. Рассмотрены возможные варианты трансмутации, повторных циклов использования плутония в разных типах ядерных реакторов, технологии изготовления МОХ-топлива для этих реакторов и т. д.

Результаты таких анализов использовались руководством Радиевого института и Министерства в соответствующих дискуссиях в нашей стране и за рубежом при обсуждении стратегии развития ЯТЦ в СССР, а затем и в России.

В середине 70-х годов, когда было принято решение о строительстве в стране крупномасштабного завода переработки ОЯТ АЭС с реакторами ВВЭР-1000 (см. статью Л. Н. Лазарева в этом сборнике), в ГОНТИ начали систематические исследования конъюнктуры мирового рынка переработки ОЯТ АЭС. Впоследствии, уже в 90-х годах, после распада Советского Союза и Совета Экономической Взаимопомощи (СЭВ) бывших социалистических стран, этот вопрос приобрел особую актуальность при рассмотрении целевого назначения завода РТ-2.

Процесс создания завода РТ-2 потребовал информационной проработки таких новых для ГОНТИ направлений, как рассмотрение законодательств передовых стран мира, регламентирующих работу ядерных предприятий и обращение с радиоактивными материалами.

Специальное внимание уделялось социологическим аспектам развития ядерной энергетике. Это было особенно важно для формирования объективного общественного мнения о возможном влиянии завода РТ-2 на экологию региона его расположения.

В Радиевом институте был подготовлен ряд обзоров, разработана, изготовлена и размещена на ГХК выставка, предназначенная для проведения разъяснительной работы среди населения и общественных организаций. Совместно с Радиологическим центром ГХК был подготовлен ряд других материалов.

В настоящее время внимание ГОНТИ сосредоточено на анализе информации о способах безопасного обращения с ОЯТ АЭС с целью определения оптимальных путей развития ядерной энергетике с учетом новых взглядов на этот вопрос. Другой актуальной проблемой является поиск способов безопасного обращения с делящимися материалами, высвобождающимися в результате сокращения ядерных вооружений. Работа ведется в тесном взаимодействии с руководством отделения радиохимической технологии Радиевого института (Р. И. Любцев, Л. Н. Лазарев).

Обзоры ГОНТИ вызывали неизменный интерес специалистов как в самом институте, так и в других организациях. Об этом свидетельствует большое количество поступавших запросов (например, в 1984 г. - от 114 предприятий, в 1985 г. - от 106 предприятий, из них ~45 предприятий отрасли).

Ежегодно ГОНТИ выпускал 5-8 обзоров. Многие обзоры получали непосредственное отражение в работах института, инициировали проведение ряда исследований, помогали находить новые, оригинальные направления (например, для созданной в конце 70-х годов лаборатории отверждения ВАО или при разработке методов электрохимической стабилизации валентных состояний актинидов и др.). Сведения о полезности и практическом использовании информации поступали и из других организаций.

В начале 90-х годов, когда с изменением ситуации в стране многие коллективы института, не имея традиционного финансирования, начали искать возможности применения своего опыта и знаний в других областях, не связанных с радиохимией, ГОНТИ помогал ряду лабораторий ориентироваться в возможных новых направлениях работ. Был подготовлен ряд обзоров, связанных с разработками безотходных технологий в гальваническом, некоторых металлургических производствах, с проблемами обезвреживания отходов ряда производств и извлечением из них ценных компонентов, с проблемами получения новых, в том числе полупроводниковых материалов и др.

Система дифференцированного обеспечения руководства (ДОР). На базе группы анализа информации ГОНТИ в 1975 г., в соответствии с принятыми в отраслевой системе НТИ нормами, в Радиевом институте была создана система ДОР. ДОР - это своеобразная форма краткой обзорно-аналитической (иногда реферативной) информации, ориентированной на интересы конкретных руководителей. В систему ДОР Радиевого института включалась информация по наиболее актуальным в каждый период времени проблемам радиохимии, радиохимической технологии и общим проблемам ЯТЦ. Основная их задача - ориентировать руководство в тенденциях развития определенных разработок, в появлении новых перспективных путей решения конкретных задач, т. е. в содействии планированию развития собственных разработок, выработке политики и идеологии развития работ в отрасли.

Периодичность выпуска справок составляла ~2 справки в месяц (20-25 справок в год). Как показывали опросы абонентов, такое количество они считали оптимальным.

В ГОНТИ Радиевого института к середине 80-х годов образовался устойчивый круг абонентов, включавший руководящий состав Радиевого института, 25 предприятий отрасли и специалистов Министерства, всего ~80 человек. Со многими из них поддерживалась регулярная связь, обновлялись их запросы. Около 25-30 % справок готовились по специальным конкретным разовым запросам. Таким образом, справки ДОР являются не случайным набором фактов, а целенаправленной информацией. Система ДОР Радиевого института регулярно получала высокую оценку абонентов.

На основе информационно-аналитических исследований в ГОНТИ создаются фактографические БД и тематические досье.

Руководителем работ ГОНТИ по анализу информации является Е. И. Ильенко, бесменным (с 1975 г.) руководителем группы - Л. Г. Царицына. В состав группы в разные годы входили Л. А. Кочеванова, О. М. Лилова, Л. Е. Никольская, М. А. Яценко-Хмелевская и др.; в настоящее время - Н. А. Степанова, Г. Н. Суворова, В. Б. Колокольцов, А. Я. Гилянов. В работе группы принимали участие также Н. А. Абрамова, Ю. М. Котова, А. А. Панова.

Другие направления работы ГОНТИ

Отдел информации выполнял в институте много функций и другого характера. Среди них следует упомянуть организацию издательской деятельности. Несмотря на то, что отдел смог создать лишь очень слабую полиграфическую базу, в институте регулярно выпускались препринты, а также отраслевой сборник "Вопросы атомной науки и техники. Серия: Радио-

химия", за которую ГОНТИ был назначен ответственным (редакторы: Н. П. Белякова, М. А. Бутомо, О. Д. Федорова).

Интересную работу проводят переводчики. Имея высокую квалификацию, знания в области основных направлений работ института и владея современной терминологией, они, параллельно с их основной деятельностью, разрабатывают словари, пособия для ведения переписки и документации в международном сотрудничестве, ведут словари современной терминологии в области ЯТЦ и совместно с химиками ГОНТИ создают тезаурусы, толковые словари (Ю. М. Котова, А. А. Панова, Н. А. Абрамова, Е. И. Ильенко).

ГОНТИ в течение многих лет осуществлял всю подготовительную работу для государственной регистрации НИОКР института, пока существовала эта государственная система (В. В. Осипова, В. В. Волина, Л. И. Улина и др.). Отдел был постоянным организатором научных публикаций и участия института в конференциях, научных школах, совещаниях и т. п. (Л. Н. Степанова, Г. С. Александрова и др.), а также выполнял ряд других функций. В организацию работы отдела большой вклад внесли Г. А. Куманева, Л. Н. Головина, И. К. Степанищева, Л. Н. Степанова.

ОБ ИСТОРИИ РАДИЕВОГО ИНСТИТУТА

РАБОТЫ ПО ИСТОРИИ РАДИЕВОГО ИНСТИТУТА

Н. А. Абрамова

В. И. Вернадский говорил, что история науки и техники "... является не только областью знания, имеющей огромное значение для выявления истины, ее изучение необходимо и для правильной оценки современного знания и техники. ..."

Исторический взгляд на развитие работ характерен для Радиевого института практически с первых лет его существования. Впервые история создания и становления Радиевого института была описана в статьях Л. В. Мысовского "Государственный Радиевый институт при Академии Наук и его деятельность" (1925) и В. Г. Хлопина "Государственный Радиевый институт, его задачи и достижения" (1926), а затем П. И. Толмачева "Государственный Радиевый институт" (1935).

Юбилейные даты становятся поводом для своеобразного подведения итогов. Развитие научных направлений института в историческом плане рассматривалось в юбилейных сборниках: "25 лет Радиевого института", статьи которого были написаны В. Г. Хлопиным, П. И. Лукирским, А. А. Гринбергом и И. Е. Стариком; "35 лет Радиевого института" - сборник, который был подготовлен И. Е. Стариком, В. М. Вдовенко, Б. П. Никольским, А. А. Гринбергом, Н. А. Перфиловым и Э. М. Иоффе; "Радиевый институт им. В. Г. Хлопина. К 50-летию со дня основания" - сборник, написанный большой группой ведущих сотрудников института, под общей редакцией Б. П. Никольского.

К 60-летию института были опубликованы статьи Л. Н. Лазарева и А. К. Круглова "Радиевому институту им. В. Г. Хлопина - 60 лет", Л. Н. Лазарева и Н. А. Абрамовой "К шестидесятилетию Радиевого института им. В. Г. Хлопина". В первой статье излагались основополагающие работы института, которые обогатили мировую и отечественную науку, сыграли важную роль в освоении внутриядерной энергии и из которых родились новые крупные научные направления. Во второй статье рассказывалось, в основном, о тех исследованиях института, к которым применимы слова: "впервые в мире. . .", "впервые в нашей стране. . .".

Д. Г. Алхазовым, В. П. Шиловым и В. П. Эйсмонтом к шестидесятилетию института был выпущен препринт Радиевого института "Первый в Европе. История создания и довоенных лет циклотрона Радиевого института", а Н. А. Перфиловым, К. А. Петржаком и В. П. Эйсмонтом - препринт "От радиоактивности - к физическим основам атомной энергетики", в котором описываются зарождение физики ядра и ее экспериментальной базы в институте в довоенные годы, современные исследования в области ядерной физики и перспективы дальнейшего развития. Последний позже вошел в сборник "Очерки по развитию ядерной физики в СССР".

В 60-х годах по инициативе директора института В. М. Вдовенко под руководством Б. П. Никольского была написана первая история секретных работ института (Е. И. Ильенко, Т. В. Ковалева); история развития радиохимических исследований, создание первых промышленных технологий выделения плутония из облученного урана, полония из облученного висмута, урана-233 из облученного тория, описаны разра-

ботки экстракционной и сорбционной технологий, разработка методов определения КПИ при проведении ядерных взрывов и некоторые другие. В отборе и обсуждении материалов принимали участие ведущие сотрудники института.

В 70-х годах в институте была создана специальная группа для работы по истории, в состав которой входили М. П. Ковальская и М. И. Жилкина, позднее Н. А. Абрамова; руководила работой группы заместитель директора института Г. С. Сеницына. В задачу группы входили сбор и систематизация материалов, относящихся к истории института, работа по формированию личных фондов ученых и их пополнению. Были сформированы личные фонды А. П. Ратнера и А. Г. Самарцевой, пополнены фонды И. Е. Старика и Б. А. Никитина, в стадии оформления находятся личные фонды Д. М. Зива, Б. П. Никольского и В. И. Парамоновой, В. И. Гребенщиковой и др.. М. И. Жилкина составила картотеку публикаций о Радиевом институте и его ученых, охватывающую период со времени создания института до 1980 г. Собирались воспоминания сотрудников о своих учителях и коллегах. Была подготовлена и в 1987 г. издана книга "Академик В. Г. Хлопин. Очерки, воспоминания современников".

Работа по истории института активизировалась после приказа министра Е. П. Славского о подготовке материалов к истории создания и развития атомной промышленности нашей страны. Тогда, с конца 1978 г., под общим руководством Г. С. Сеницыной был организован систематический выпуск материалов по истории развития научных направлений, по которым работали в Радиевом институте.

Так под научным руководством директора института Л. Н. Лазарева и Г. С. Сеницыной группой специалистов института (Н. А. Абрамова, С. А. Бартенев, Н. Б. Высокоостровская, Б. Я. Зильберман, Е. И. Ильенко, А. М. Клемина, Ю. А. Копейкин, В. П. Попик, С. А. Стрелков, Л. Б. Шпунт, Н. Н. Щепетильников) были описаны работы, связанные с созданием и промышленным освоением экстракционных технологий переработки стандартных урановых блоков и твэлов энергетических реакторов, работы в области сорбционных технологий получения плутония-238 и переработки ряда промышленных продуктов. В 1985 г. эти материалы вышли в 2-х томах под общей редакцией Е. И. Ильенко.

Были выпущены материалы по истории развития аналитических исследований в институте за периоды 1970-1975, 1976-1980 и 1981-1985 гг., материалы о создании методов контроля производства для реконструируемых заводов Б (Г. С. Сеницына, Н. А. Абрамова, Г. А. Акопов, В. М. Александрук, В. В. Бердилов, А. В. Степанов, и др.), о создании и развитии неразрушающих ядерно-физических методов анализа состава и выгорания отработавшего топлива энергетических реакторов (П. И. Федотов), о совершенствовании экстракционных процессов (Г. С. Сеницына, Л. Б. Шпунт), о совершенствовании процессов растворения облученных урановых блоков (Г. С. Сеницына, В. И. Андреев), материалы о разработках радионуклидных источников различного назначения (В. В. Федоров) и ряд других.

В соответствии с приказом министра были написаны также очерки об ученых института, сыгравших важную роль в становлении и развитии атомной промышленности. В очерках использовались материалы архива института, а также некоторые материалы Основного отраслевого фонда и группы фондов ПО "Маяк". Действенную помощь в получении этих материалов оказали начальник НТУ Министерства А. К. Круглов и директор завода 35 ПО "Маяк" М. В. Гладышев.

По собранным материалам и воспоминаниям сотрудников института были написаны очерки (с библиографий трудов) об академике В. И. Вернадском и В. Г. Хлопине, членах-корреспондентах АН СССР Б. А. Никитине, И. Е. Старике, В. М. Вдовенко, о проф. А. П. Ратнере, а также краткие очерки о Л. В. Мысовском, об академике П. И. Лукирском, К. К. Аглинцева, Г. В. Горшкове, Л. В. Комлеве, В. И. Парамоновой, М. В. Посвольском, Д. М. Зиве (Г. С. Сеницына, Н. А. Абрамова, Е. Б. Андерсон, Р. В. Брызгалова, О. В. Ложкин, Т. И. Куракина, З. П. Морозова, В. В. Смирнов).

Работа Г. С. Сеницыной "Из неопубликованных материалов В. И. Вернадского", написанная по материалам фондов Радиевского института, была издана Комиссией по разработке научного наследия академика В. И. Вернадского при Президиуме АН СССР. Ею же с соавторами был опубликован целый ряд статей о В. И. Вернадском и В. Г. Хлопине, о постановке ими проблемы овладения внутриядерной энергией, об их роли в практической работе по этой проблеме.

По просьбе Г. С. Сеницыной академик Б. П. Никольский оставил свои "Воспоминания" о работе по созданию первой советской технологии выделения плутония из облученного урана, о пуске первого плутониевого завода, о людях с которыми ему довелось работать в то время. При этой работе для уточнения того или иного факта и дат также использовались материалы Основного отраслевого фонда и фондов ПО "Маяк". Эти "Воспоминания" в 1996 г. изданы в виде препринта Радиевского института.

Подобные же воспоминания оставил и проф. Ю. М. Толмачев - участник первого испытания советского ядерного оружия.

Проводился сбор и систематизация материалов и по "новой" истории института. На основе этих материалов в 1984-1989 гг. выпускались альбомы-летописи, где в фотографиях и коротких текстах отражены основные события научной и общественной жизни института за прошедший год (Г. С. Сеницына, М. П. Ковальская, Н. А. Абрамова, Г. Н. Ковалев и др.). Подобные же альбомы-летописи примерно раз в пять лет выпускали и в отделах института. Выпускались и отдельные тематические альбомы, например альбом-летопись, посвященный участию сотрудников института в работах по ликвидации аварии на ЧАЭС и другие.

В 1972 г. по инициативе Н. А. Перфилова была составлена и под его редакцией издана "Библиография научных трудов сотрудников физического отдела Радиевского института им. В. Г. Хлопина". Эту работу возобновили в 80-х годах, тогда был составлен и выпущен библиографический указатель трудов сотрудников РИАН, выполненных и опубликованных в военные, 1941-1945 годы, а затем указатель трудов, опубликованных в 1981-1985 гг. Выпущен также "Указатель научных трудов, хранящихся в фондах РИ", указатель состоит из 5 томов и охватывает 1923-1981 гг. (Г. С. Сеницына, Н. А. Абрамова, Т. В. Ковалева, Т. А. Робина и др.).

В институте проводились расширенные заседания НТС, физические и химические семинары, посвященные памятным датам. Так были отмечены 120-летие и 130-летие со дня рождения В. И. Вернадского, 100-летие В. Г. Хлопина и А. Е. Ферсмана, 95-летие Л. В. Мысовского, 90-летие П. И. Лукирского, Б. П. Никольского, И. Е. Старика, Б. А. Никитина, А. П. Ратнера, Г. В. Горшкова, Д. М. Зива, М. Ф. Пушленкова, даты, связанные с именами других ученых.

К семинарам готовились стенды, выставки, альбомы, посвященные ученым.

Естественным продолжением и развитием работ по истории было создание по инициативе и усилиями Г. С. Сеницыной музея Радиевского института. В 1988 г. такой музей при Радиевом институте был открыт, и до конца 1994 г. его работу возглавляла Галина Сергеевна, а затем Е. А. Шашуков. Все материалы, собранные и оформленные группой истории, были переданы в музей. Дальнейшая работа по сбору исторических материалов стала проводиться уже в рамках работы музея.

Из последних по времени событий следует отметить первый Международный симпозиум "Наука и общество: история советского атомного проекта", состоявшийся в мае 1996 г. На этот симпозиум сотрудниками института было представлено 6 докладов, отражающих роль и значение Радиевского института, его ученых в решении задач проекта. В некоторых из них впервые было рассказано о работах, ранее строго засекреченных. Подобные материалы, ранее не известные даже специалистам атомной науки и поэтому представляющие особый интерес, были представлены целым рядом институтов и организаций.

МУЗЕЙ РАДИЕВОГО ИНСТИТУТА им. В. Г. ХЛОПИНА

Е. А. Шашуков

В 1988 г., к 125-летию со дня рождения академика В. И. Вернадского (1863-1945), в исторически первом главном здании института на ул. Рентгена, д. 1 был открыт музей Радиевого института. В состав музея входят мемориальный рабочий кабинет Вернадского-Хлопина, два зала, где представлены материалы, отражающие жизнь и деятельность этих выдающихся ученых и организаторов науки, а также зал, где сохранена главная часть первого в Европе циклотрона - магнит с ускорительной камерой.

Стенды экспозиции в зале, носящем имя В. И. Вернадского (бывшем актовом зале института), представляют весь его жизненный и творческий путь. Особое внимание уделено вопросам, связанным с изучением и глубоким осмыслением В. И. Вернадским радиоактивных явлений, с его обобщающими представлениями о роли этих явлений в жизни Земли и Космоса. Отражена большая организаторская деятельность В. И. Вернадского в многочисленных комиссиях, экспедициях, в создании специализированных лабораторий и институтов, в том числе в организации совместно с ближайшим соратником - В. Г. Хлопиным Радиевого института в 1922 г.

В зале В. И. Вернадского представлены также тематические выставки, посвященные различным памятным датам, а также жизни и деятельности ученых, внесших весомый вклад в изучение явления радиоактивности. Эти выставки периодически обновляются. В этом же зале проводятся торжественные собрания сотрудников института, лекции и семинары для студентов, школьников и преподавателей.

В другом зале - зале им. В. Г. Хлопина - представлен жизненный и творческий путь ближайшего соратника В. И. Вернадского и его преемника на посту директора института с 1939 г. академика В. Г. Хлопина (1890-1950). На стендах представлена деятельность В. Г. Хлопина, начиная с организации производства радия из отечественного сырья вплоть до разработки технологии выделения плутония из облученного урана и участия в обеспечении испытаний советского атомного оружия.

Сердцем музея является мемориальный кабинет Вернадского-Хлопина. В центре старинный стол черного дерева с инкрустациями, настольная лампа, письменный прибор и личные вещи В. Г. Хлопина. На овальном столике у стены первые приборы для изучения радиоактивности, образцы урановых минералов. В кабинете находится также шкаф красного дерева с книгами из библиотеки В. Г. Хлопина. На шкафу фотографии В. Г. Хлопина и М. А. Пасвик-Хлопиной, а также фарфоровая ваза - подарок В. Г. Хлопину от сотрудников института в день его шестидесятилетия.

В числе представленных документов свидетельства об аттестации препаратов радия в зарубежных радиологических центрах.

Музей тесно сотрудничает с архивом института, где хранятся документы, отражающие деятельность института и его выдающихся ученых, В. Г. Хлопина, Б. А. Никитина, А. П. Ратнера, И. Е. Старика и др.

Много сил и энергии в организацию музея и его успешную работу вложили Г. С. Синицына (создатель и первый директор музея) и В. Р. Клокман, которые начинали свою деятельность в институте еще при жизни В. Г. Хлопина.

Музей тесно взаимодействует с ГОНТИ (нач. Е. И. Ильенко), службами главного инженера (А. М. Эпштейн) и другими подразделениями института. Неоценимую поддержку и помощь музею оказывает НПП "Кирси" НПО РИ (дир. М. Л. Савопуло).

Большую роль в становлении и развитии музея сыграли также С. В. Бутомо, М. И. Жилкина, А. Б. Коротина, Г. Н. Ковалев, М. П. Ковальская, Т. И. Куракина, А. Г. Романчук, О. В. Чеплагина, И. М. Цариковская, Е. А. Шашуков, который с конца 1994 г. является его заведующим.

СОКРАЩЕНИЯ:

АЭС - атомная электростанция
ВАО - высокоактивные отходы
ВВЭР - водо-водяной энергетический реактор
ВИМИ - Всесоюзный институт межотраслевой информации, Москва
ВМФ - Военно-морской флот
ВНИИМ им. Д. И. Менделеева - Всероссийский (ранее Всесоюзный) научно-исследовательский институт метрологии им. Д. И. Менделеева, С.-Петербург
ВНИИНМ - Всероссийский (ранее Всесоюзный) научно-исследовательский институт неорганических материалов им. акад. А. А. Бочвара, ныне ГНЦ "ВНИИНМ", Москва
ВНИИПИПТ - Всероссийский (ранее Всесоюзный) научно-исследовательский институт промышленной технологии, Москва
ВНИИПромгаз - Всероссийский научно-исследовательский институт газовой промышленности, Москва
ВНИИРТ - Всесоюзный научно-исследовательский институт радиационной технологии, ныне ВНИИТФА, Москва
ВНИИТФ - Всероссийский (ранее Всесоюзный) научно-исследовательский институт технической физики, г. Челябинск-70
ВНИИТФА - Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики и автоматизации, Москва
ВНИИФТРИ - Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиационных измерений, Москва
ВНИИХТ - Всероссийский (ранее Всесоюзный) научно-исследовательский институт химической технологии, Москва
ВНИИЭФ - Всероссийский (ранее Всесоюзный) научно-исследовательский институт экспериментальной физики, ныне Российский федеральный ядерный центр "ВНИИЭФ", г. Саров (Арзамас-16)
ВНИИЯГ - Всероссийский (ранее Всесоюзный) научно-исследовательский институт ядерной геофизики, Москва
ВНИПИЭТ - Всероссийский (ранее Всесоюзный) проектный и научно-исследовательский институт комплексной энергетической технологии, ныне Всероссийское проектно-конструкторское, научно-исследовательское и технологическое объединение "ВНИПИЭТ" (ВО "ВНИПИЭТ"), С.-Петербург
ВНТИЦ - Всероссийский (ранее Всесоюзный) научно-технический информационный центр, Москва
ВСЕГЕИ - Всероссийский (ранее Всесоюзный) геологический институт, С.-Петербург
ВСНХ - Высший Совет народного хозяйства
ГЕОХИ - Институт геохимии и аналитической химии им. В. И. Вернадского, Москва
ГИН РАН - Геологический институт Российской Академии наук, Москва
ГИПХ - Государственный институт прикладной химии, ныне РНЦ "Прикладная химия", С.-Петербург
ГИРЕДМЕТ - Государственный научно-исследовательский и проектный институт редкометаллической промышленности, Москва
ГИХС - Институт горно-химического сырья, Москва
ГКАЭ - Государственный комитет по атомной энергии, Москва
ГКИАЭ - Государственный комитет по использованию атомной энергии, Москва
ГлавАПУ - Главное архитектурно-планировочное управление
ГКО - Государственный комитет обороны
ГНЦ РФ - Государственный научный центр Российской Федерации
ГРИ - Государственный Радиевый институт (см. РИ, РИАН)
ГСПИ-11 - см. ВНИПИЭТ

ГХК (комбинат 815) - Горно-химический комбинат, г. Железногорск (Красноярск-26)
 ГЦ - Государственный центр
 ЕрФИ - Ереванский физический институт
 ЖРО - жидкие радиоактивные отходы
 Заводы Б - радиохимические заводы по переработке облученного урана
 ИАЭ им. И. В. Курчатова - Институт атомной энергии им. И. В. Курчатова, ныне РНЦ "Курчатовский институт", Москва
 ИГЕМ РАН - ныне Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН, Москва
 ИМГ АН СССР - Институт молекулярной генетики АН СССР (ныне РАН), Москва
 ИОНХ АН СССР - Институт общей и неорганической химии им. Н. С. Курнакова АН СССР (ныне РАН), Москва
 ИПГ им. Е. К. Федорова - Институт прикладной геофизики, Москва
 ИРЕА - Институт чистых химических реактивов, Москва
 ИСО - Международное общество стандартизации
 ИТОХП ЧСАН - Институт теоретических основ химической промышленности Чехословацкой Академии наук
 ИТЭФ - Институт теоретической и экспериментальной физики, Москва
 ИФП АН СССР - Институт физических проблем им. П. Л. Капицы, Москва
 ИФХАН - Институт физической химии Академии наук, Москва
 КБ АТО - Конструкторское бюро автотранспортного оборудования, г. Мытищи
 КБ-11 - ныне ВНИИЭФ, г. Саров (Арзамас-16)
 Комбинат 815 - Горно-химический комбинат (ГХК), г. Железногорск (Красноярск-26)
 Комбинат 816 - Сибирский химический комбинат (СХК), г. Снежинск (Томск-7)
 Комбинат 817 - ПО "Маяк", г. Озерск (Челябинск-40)
 Лаборатория № 2 (впоследствии ЛИПАН, ИАЭ) - ныне РНЦ "Курчатовский институт"
 ЛАЭС - Ленинградская атомная электростанция им. В. И. Ленина
 ЛенЦНТИ - Ленинградский центр научно-технической информации
 ЛИЯФ - Ленинградский институт ядерной физики, ныне СПбИЯФ
 ЛМИ им. акад. И. П. Павлова - Ленинградский (ныне С.-Петербургский) медицинский институт им. акад. И. П. Павлова
 ЛТИ им. Ленсовета - Ленинградский технологический институт, ныне С.-Петербургский государственный технологический университет
 ЛФТИ - Ленинградский физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе
 ЛЯР ОИЯИ - лаборатория ядерных реакций Объединенного института ядерных исследований, г. Дубна
 МАГАТЭ - Международное агентство по атомной энергии
 Минатом - Министерство РФ по атомной энергии
 Мингео - Министерство геологии, ныне Комитет РФ по геологии и использованию недр.
 Минсредмаш - Министерство среднего машиностроения, ныне Минатом
 Минсудпром - Министерство судостроительной промышленности
 НВАЭС - Нововоронежская атомная электростанция
 НЗХК - Новосибирский завод химических концентратов
 НИИ-9 - ныне ГНЦ "ВНИИНМ" (см. ВНИИНМ), Москва
 НИИ-10 - ныне ВНИИХТ
 НИИАР - научно-исследовательский институт атомных реакторов, ныне ГНЦ "НИИАР", г. Димитровград
 НИИПМ - Научно-исследовательский институт пластмасс, Москва
 НИИХИММАШ - Научно-исследовательский институт химического машиностроения, Москва
 НИИЭФА - Научно-исследовательский институт электрофизической аппаратуры им. В. Д. Ефремова, С.-Петербург

НИКИМТ - Научно-исследовательский и конструкторский институт монтажной технологии, Москва

НИР - научно-исследовательская работа

НИС - научно-исследовательское судно

НИФТИ - Научно-исследовательский физико-технический институт Красноярского государственного университета, г. Красноярск

НИФХИ - Научно-исследовательский физико-химический институт им. Л. Я. Карпова, ныне ГНЦ "НИФХИ им. Л.Я.Карпова", г. Обнинск

НПО - научно-производственное объединение

НТС - научно-технический совет

ОИЯИ - Объединенный институт ядерных исследований, г. Дубна

ОКП - общий классификатор продукции

ОКР - опытно-конструкторская работа

ПромНИИПроект - Всероссийский научно-исследовательский и проектный институт промышленной технологии, Москва

ПО "Маяк" - производственное объединение "Маяк" (ранее комбинат 817), г. Озерск (Челябинск- 40)

ПЯВ - подземный ядерный взрыв

РИ - Радиевый институт им. В. Г. Хлопина

РИАН - Радиевый институт Академии наук СССР (до 1962), ныне НПО "Радиевый институт им. В. Г. Хлопина", С.-Петербург

РМС - радиометрическая станция

РНЦ - Российский научный центр

РТ-2 - завод по регенерации отработавшего ядерного топлива, г. Железногорск (Красноярск-26)

СвердНИИХиммаш - Свердловский научно-исследовательский институт химического машиностроения, г. Свердловск

СКБ ГИТ АН СССР - Специальное конструкторское бюро гидроимпульсной технологии АН СССР (ныне РАН), г. Новосибирск

СНХ СССР - Совет народного хозяйства СССР

СПбГТУ - С.-Петербургский государственный технический университет

СПБИЯФ - С.-Петербургский институт ядерной физики им. Б. П. Константинова

СХК - Сибирский химкомбинат, г. Снежинск (Томск-7)

СЭВ - Совет Экономической Взаимопомощи

ТВС - тепловыделяющие сборки

твэл - тепловыделяющий элемент

ТПЭ - трансплутониевые элементы

ТУЭ - трансурановые элементы

УФТИ - Украинский физико-технический институт, г. Харьков

ФТИ им. А. Ф. Иоффе - Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе, С.-Петербург

ФЭИ - Физико-энергетический институт, ныне ГНЦ "Физико-энергетический институт", г. Обнинск

ЦЗЛ - центральная заводская лаборатория

ЦКБМ - Центральное конструкторское бюро машиностроения, С.-Петербург

ЦНИИАИ - см. ЦНИИатоминформ

ЦНИИатоминформ - Центральный научно-исследовательский институт управления, экономики и информации Минатома России, Москва

ЧАЭС - Чернобыльская атомная электростанция

ЭНИКМАШ - Экспериментальный научный институт кузнечно-прессового машиностроения, г. Воронеж

ИМЕННОЙ УКАЗАТЕЛЬ

В указателе приводятся краткие сведения о сотрудниках Радиевого института, упоминаемых в статьях сборника; в связи с необходимостью сокращения объема в указатель включены только сотрудники, проработавшие в институте не менее 20 лет.

Годы после знака "РИ:" указывают период работы сотрудника в Радиевом институте; если стоит знак "РИ с", то следующий за ним год означает, что сотрудник работает в Радиевом институте с этого года до настоящего времени. Далее приводятся годы, когда сотрудник занимал наиболее высокую должность (или с какого года), затем ученая степень и награды. После косой черты (/) указываются страницы сборника, на которых приводится фамилия сотрудника.

Например, запись: Ильин Петр Ильич - РИ: 1948-1977; 1955-1974 - снс; кфмн. Медаль "За доблестный труд" / 7, 28, 54 означает, что Ильин Петр Ильич работал в Радиевом институте с 1948 по 1977 годы и в 1955-1974 гг. занимал должность старшего научного сотрудника. Имеет ученую степень кандидата физико-математических наук. Награжден медалью "За доблестный труд". О нем говорится в сборнике на страницах 7, 28, 54.

Запись: Ильин Илья Ильич - РИ с 1959 - мнс, инж.; с 1981 - снс; кхн / 20, 35 означает, что Ильин Илья Ильич работает в Радиевом институте с 1959 г. по настоящее время, сначала работал в должности мнс, затем инж., а с 1981 г. занимает должность снс. Имеет ученую степень кандидата химических наук. О нем говорится на страницах 20 и 35 сборника.

Запись: Ильин Олег Ильич - РИ: 1948-1968 - лаб., мнс; 1973-1994 - снс, с 1990 - зав. лаб.; дхн / 18, 27, означает, что Ильин Олег Ильич работал в РИ с 1946 по 1968 гг. в должности сначала лаборанта, затем мнс. С 1968 г. по 1973 г. в РИ не работал, а затем в 1973-1994 гг. снова работал, но уже старшим научным сотрудником, а в 1990-1994 гг. заведовал лабораторией. Имеет ученую степень доктора химических наук. В сборнике о нем говорится на страницах 18 и 27.

Сокращения:

АТЦ - аварийно-технический центр;

в. инж. - ведущий инженер;

внс - ведущий научный сотрудник;

ген. дир. - генеральный директор;

гл. нс - главный научный сотрудник;

ГОНТИ - головной отдел научно-технической информации;

дгмн - доктор геолого-минералогических наук;

дир. - директор;

дмн - доктор медицинских наук;

дозим. - дозиметрист;

дфмн - доктор физико-математических наук;

дхн - доктор химических наук;

зав. - заведующий;

зав. лаб. - заведующий лабораторией;

зав. отд. - заведующий отделом;

зам. - заместитель;

засл. деят. - заслуженный деятель;

ИАЦ - информационно-аналитический центр;

ИВЦ - информационно-вычислительный центр;

инж. - инженер;

ИТЦ - инженерно-технический центр;

кбн - кандидат биологических наук;

кгмн - кандидат геолого-минералогических наук;

кмн - кандидат медицинских наук;

КНТСЗС - (отдел) координации научно-технических связей с зарубежными странами;

ктн - кандидат технических наук;

кфмн - кандидат физико-математических наук;

кхн - кандидат химических наук;

лаб. - лаборант;
 мнс - младший научный сотрудник;
 нач. - начальник;
 нач. гр. - начальник группы;
 нач. лаб. - начальник лаборатории;
 нач. отд. - начальник отдела;
 НИОС - научно-исследовательский отдел стандартизации;
 НПО - научно-производственное объединение;
 НПП - научно-производственное предприятие;
 нс - научный сотрудник;
 НТЦ - научно-технический центр;
 НЭК - научно-экспериментальный комплекс;
 ОНТИ - отдел научно-технической информации;
 отд. - отдел;
 проф. - профессор;
 РМС - радиометрическая станция;
 рук. - руководитель;
 снс - старший научный сотрудник;
 спец. - специальный;
 станд. - стандартизация;
 ст. инж. - старший инженер;
 ст. лаб. - старший лаборант;
 ст. техник - старший техник;
 чл.-корр. АН СССР (РАН) - член-корреспондент Академии наук СССР (РАН);
 эксперим. - экспериментальные;
 ЯФИ - ядерно-физические исследования.

А

Абдулахатов Мурат Камалович - РИ с 1970; с 1990 - снс / 96, 100
 Абрамов Михаил Ефимович - РИ: 1956-1983; 1962-1974 - инж. / 78
 Абрамова Лидия Ивановна - РИ: 1948-1978; 1949-1974 - мнс; кхн / 65, 68, 69, 79, 113, 145
 Абрамова Нина Алексеевна - РИ с 1951 - мнс; 1977-1981 - нач. гр.; с 1996 - нс / 7, 14, 29, 30, 113, 308-312
 Авдеев Олег Александрович - РИ с 1973 - ст. лаб., техник; с 1983 - инж. / 104
 Авдейчиков Владимир Владимирович - РИ: 1964-1992; 1976-1992 - снс; дфмн. Медаль "За трудовое отличие" / 194, 208, 209, 213, 214
 Авдзейко Галина Владимировна - РИ: 1938-1980; 1959-1973 - снс; кхн / 78, 122
 Аглинцев Константин Константинович (1905-1964) - РИ: 1949-1964 - зав. лаб.; дтн, проф. Ордена Ленина (2), "Знак Почета" (2), медали / 69-71, 230, 311
 Адамов Виктор Михайлович - РИ с 1963; с 1996 снс; кфмн / 100, 105, 166, 240, 242
 Акопов Георгий Абрамович - РИ с 1964; с 1974 - зав. лаб.; кхн / 38, 42, 44, 46, 96, 113, 311
 Александров Борис Михайлович - РИ с 1962 - мнс; с 1974 - ст. инж. / 78, 124, 226, 240, 242, 243, 263
 Александрова Галина Степановна - РИ с 1963; с 1974 - инж., ст. инж. ГОНТИ / 7, 309
 Александровский Игорь Андреевич - РИ: 1970-1993; 1975-1993 - инж. / 78
 Александрук Виталий Маркиянович - РИ с 1954; 1974-1991 - снс; с 1991 - внс; кхн / 104, 105, 122, 220, 298, 311
 Алексеев Вадим Александрович - РИ с 1967 - мнс; с 1993 - нс / 79, 109
 Алексеева Нина Алексеевна - РИ: 1953-1983 - мнс / 79, 102
 Алой Альберт Семенович - РИ с 1973; с 1986 - нач. лаб.; кхн / 40, 44, 81, 93-95, 109
 Алхазов Дмитрий Георгиевич (1909-1982) - РИ: 1930-1945; дфмн. Гос. премия. 1940-1945 - снс / 164, 189, 310
 Алхазов Илья Дмитриевич - РИ с 1957; 1986-1990 - нс; с 1990 - в. инж. / 166, 186, 214, 215, 239
 Альтерман Эрих Исаевич - РИ: 1963-1988; с 1968 - инж. / 93
 Аляпышев Олег Александрович - РИ с 1956; с 1966 - инж., мнс; 1975-1992 - нач. комплексной бригады; с 1991 инж. / 130
 Амелогова Наталья Ивановна - РИ: 1952-1977; 1960-1977 - снс; дтн / 112
 Ананьева Лидия Александровна - РИ с 1960; 1963-1983 - мнс; с 1983 - экономист / 79

Андерсон Евгений Борисович - РИ с 1971 ; с 1990 - зам. ген. дир. по науке НПО " Радиевый институт"; дгмн / 40, 41, 44, 46, 119, 121, 126-129, 131, 272, 281, 282, 284, 285, 311
 Андреев Валентин Борисович - РИ с 1955; с 1971 - оператор / 78
 Андреев Володар Иванович - РИ: 1955-1988; 1973-1977 - нач. отд., с 1977- 1988 - зав. лаб.; кхн. Ордена Отеч. войны, Дружбы народов, "Знак Почета"; медали / 29-31, 34-36, 44, 51, 311
 Андреев-Савельев Валентин Михайлович - РИ с 1977 - инж. / 103
 Андреева Наталия Романовна - РИ с 1962 - мнс; с 1986 - инж. / 79
 Андреевская Вера Игоревна - РИ: 1975-1996; 1980-1996 - инж. / 260
 Андронов Борис Владимирович - РИ с 1966 ; 1994-1996 - в. инж.- технолог, с 1996 в НТИЦ "Новые технологии" - нс / 33, 37, 50, 78, 294
 Антипов Аркадий Алексеевич - РИ с 1972 ; с 1988 - ст. инж. / 140
 Аполлонова Антонина Никитична - РИ: 1945-1987; 1963-1980 - снс; кхн / 65, 79
 Арсентьева Вера Петровна - РИ: 1956-1994 - лаборант, техник / 33
 Артемьев Юрий Михайлович - РИ: 1952-1979 - мнс; кфмн. Медаль "За трудовое отличие" / 65, 78, 165
 Архипов Владимир Александрович (1936-1995) - РИ: 1954-1995; 1973-1995 - нач. лаб.; кхн. Орден "Знак Почета" / 137, 138, 143, 145, 160

Б

Бабаджаниянц Наталья Владимировна - РИ: 1962-1996; 1966-1974 - мнс / 226
 Бабаин Василий Александрович - РИ с 1975; с 1989 - снс; кхн / 42, 111
 Бабенко Андрей Викторович - РИ с 1973; с 1985 - инж. / 78
 Бабенко Юрий Анатольевич - РИ: 1964-1991; 1989-1991 - снс; кфмн / 260
 Бак Любовь Михайловна - РИ с 1971; с 1979 - инж. / 272
 Бак Михаил Абрамович (1912-1977) - РИ: 1949-1977; с 1970 - зав. лаб.; дфмн. Ордена Трудового Красного Знамени, "Знак Почета", медали / 65, 79, 221
 Балув Анатолий Викторович - РИ: с 1971; с 1990 - внс; кхн / 111, 116, 140, 141
 Баранов Александр Иванович - РИ с 1965 - механик; с 1990 - в. инж. / 223
 Баранов Владимир Ильич - РИ: 1926 - 1939 - зав. лаб.; дфмн, проф. Орден Трудового Красного Знамени / 120
 Баранов Игорь Александрович - РИ с 1954; с 1989 - внс; дфмн / 165, 191, 193, 223, 226
 Баранов Юрий Иванович - РИ с 1966 - мнс; с 1990 - нс / 73, 75, 78
 Барбанель Юрий Абрамович - РИ с 1958; с 1966 - снс, с 1991 - внс; дхн / 114, 115
 Бартнев Сергей Александрович - РИ с 1957; с 1991 - нач. лаб.; с 1996 - нач. сектора; ктн / 7, 29, 30, 33, 35, 113, 117, 133, 145, 146, 311
 Батенков Олег Игнатьевич - РИ с 1973 ; с 1990 - снс; кфмн / 166, 185, 186, 241
 Бедарева Лидия Яковлевна (1933-1995) - РИ: 1963-1993 - лаборант / 78
 Белов Лев Михайлович - РИ: 1957-1982; 1957-1979 - мнс / 48, 78
 Белова Элеонора Аркадьевна - РИ: 1966-1995; 1966-1995 - мнс, техник / 78
 Беляев Борис Николаевич - РИ с 1957; с 1978 - зав. лаб.; дфмн / 44, 96, 102-106, 169, 194, 200, 204, 206, 254
 Белянин Юрий Иванович - РИ: 1955-1994; 1959-1986 - мнс / 165
 Беляцкий Анатолий Федорович - РИ: 1963-1987; с 1963 - мнс, ст. инж. / 135, 145
 Бердилов Владимир Васильевич (1935-1986) - РИ: 1958-1986; с 1973 - зав. лаб.; ктн / 44, 96, 97, 104, 311
 Бибилова Галина Васильевна - РИ: 1957-1987 - лаборант / 78
 Бибилов Борис Анатольевич - РИ с 1964; с 1992 - внс; кфмн / 36, 103, 222, 260
 Бирюков Евгений Игнатьевич - РИ с 1957; с 1971 - снс; кфмн / 73, 78, 124
 Блинов Владимир Андреевич (1923-1994) - РИ: 1954-1994; с 1971- снс; ктн / 71, 78, 87, 92, 123
 Блинов Михаил Васильевич (1928 -1993) - РИ: 1951-1993; 1978-1986 - зав. лаб.; с 1986 - внс; кфмн. Медаль "За трудовую доблесть" и др. / 78, 165, 166, 184-186, 193
 Блинова Нина Ивановна - РИ: 1952-1976 - мнс. Медаль "За трудовое отличие" и др. / 65, 79, 116
 Блохин Владимир Михайлович - РИ с 1962; с 1976 - лаб.-дозим. / 78
 Бобров Алексей Иванович - РИ с 1967; 1967-1986 - мнс; с 1986 - лаб.; кхн / 78
 Боброва Вера Николаевна - РИ с 1951; 1963-1975 - зав. лаб.; кхн / 148, 159
 Богатин Виктор Иванович (1937-1984) - РИ: 1961-1984; 1962-1984 мнс.; кфмн / 208-212
 Богданов Виктор Георгиевич - РИ: 1966-1995; 1989-1995 - нс / 210, 213
 Богданова Вера Сергеевна - РИ с 1969 - инж. ГОНТИ / 304

Бочков Александр Александрович - РИ: 1969-1997; с 1982 - снс; кхн / 112
 Бризмейстер Константин Александрович - РИ: 1943-1962; с 1953 - снс; ктн. Именная премия СМ СССР. Орден "Знак Почета" / 19
 Брызгалова Руфина Валентиновна - РИ с 1943; с 1973 - снс; кхн. Именная премия СМ СССР. Орден "Знак Почета" / 22, 73, 78, 108, 113, 127, 128, 131, 311
 Бугорков Сергей Спиридонович (1909-1970) - РИ: 1945-1970 - мнс. Именная премия СМ СССР / 65, 68 - 70, 242
 Буев Петр Григорьевич (1913-1978) - РИ: 1955-1978 - лаб. Орден Красной Звезды, медали / 78
 Буляница Леонид Семенович - РИ с 1955; с 1968 - снс; кхн / 79, 102, 104, 111
 Бунцев Вячеслав Васильевич - РИ с 1964; с 1993 - инж. Медаль "За трудовое отличие" / 153-155
 Бутомо Сергей Викторович - РИ с 1963; с 1984 - ученый секретарь института; кхн / 7, 8, 14, 73, 78, 126, 127, 145, 313
 Быков Валерий Николаевич - РИ: 1969-1992 - слесарь, механик / 78
 Быков Виктор Александрович - РИ с 1971; с 1990 - зам. нач. отд.; кхн / 137, 138
 Быкова Алевтина Ивановна - РИ: 1968-1996; с 1969 - лаб., ст. техник /
 Быховский Дмитрий Николаевич - РИ с 1953; 1963-1996 - снс; с 1996 внс; дхн / 30, 38, 42, 46, 113, 114
 Быченков Владислав Серафимович - РИ: 1959-1978; с 1962 - мнс; кфмн / 195, 204

В

Варламова Наталия Аркадьевна - РИ с 1963; с 1966 - мнс, инж. / 79
 Васильев Александр Алексеевич - РИ с 1974; с 1993 - в. инж. / 138, 139
 Васильев Владимир Иванович - РИ с 1961; с 1968 - мнс, инж. / 73, 78
 Васильев Сергей Константинович - РИ с 1972; 1992-1995 - снс; с 1995 - нач. службы АТЦ; кфмн / 274, 276, 285
 Вдовенко Виктор Михайлович (1906-1978) - Чл.-корр. АН СССР. РИ: 1946 -1972; 1953-1972 - дир. РИ и зав. лаб.; дхн. Именная премия СМ СССР, премия им. В. Г. Хлопина. Ордена Ленина (2), Трудового Красного Знамени (3), "Знак Почета" (2), Октябрьской Революции; медали / 16, 22, 23, 25, 31, 34, 42, 69, 71, 72, 110, 114, 115, 117, 118, 122, 123, 148, 167, 269, 302, 310, 311
 Венедиктова Регина Васильевна - РИ: 1948-1976 - мнс. Медаль "За трудовое отличие" / 65, 79
 Вениг Павел Николаевич - РИ: 1950-1983 - ст. лаб., слесарь-механик / 78, 223
 Вериго Александр Брониславович (1893-1953) - РИ: 1923- 1953; 1941-1945 - зам. дир. РИ (в блокадном Ленинграде); 1939-1953 - зав. лаб.; дфмн, проф. Ордена Ленина, Трудового Красного Знамени (2), медали / 12, 20, 25, 216
 Вернадский Владимир Иванович (1863-1945) - академик РАН, АН СССР. Основатель Радиового института. 1922-1939 - директор института и зав. геолого- минералог. отделом / 8-11, 82, 119-121, 132, 161, 164, 183, 187, 216, 220, 221, 310-313
 Веселов Виктор Константинович - РИ с 1974; с 1989 - снс / 36
 Вешиков Андрей Станиславович РИ с 1962; с 1989 - инж. / 186, 187
 Виноградова Валентина Константиновна - РИ: 1953-1993 - мнс / 78
 Витенко Валерий Афанасьевич - РИ с 1969; 1992-1995 - нач. лаб.; с 1995 - дир. НТЦ ЯФИ / 166, 185, 241
 Власов Николай Александрович - РИ: 1945-1954; с 1951 - снс; кфмн, доц. Гос. премия / 65, 66, 68, 69, 189
 Воден Валентин Гаврилович - РИ: 1952-1985; с 1956 - снс; кхн. Ордена "Знак Почета", Отеч. войны, медали / 32-34, 100, 110
 Водоватов Валерий Алексеевич - РИ с 1973; 1986-1992 - снс; с 1992 - снс НПП КИРСИ / 115, 171
 Волина Валентина Валентиновна - РИ: 1962-1993 - мнс; с 1974 - ст. инж. ГОНТИ / 309
 Волков Борис Николаевич - РИ с 1963; с 1972 - нач. отд. ТБ, РБ и ТБ / 79
 Волков Николай Федорович - РИ: 1935-1956 - мнс. Именная премия СМ СССР. Медаль "За трудовое отличие" и др. / 11, 16
 Волкова Екатерина Алексеевна - РИ: 1954-1991; 1960-1991 - снс; кхн / 134-136, 145, 160
 Воронин Александр Сергеевич - РИ: 1976-1996; 1988-1996 - ст. инж. / 249
 Воронков Александр Алексеевич - РИ с 1974; с 1986 - нс / 260
 Воронцова Вера Николаевна - РИ с 1973; с 1984 - лаб.-дозим. / 79
 Высокоостровская Нонна Борисовна (1930-1991) - РИ: 1953-1991; 1985-1991 - нач. лаб.; кхн. Орден Трудового Красного Знамени, медали / 30, 35, 100, 101, 111, 113, 114, 145-148, 154, 160, 311
 Высторобская Елена Исааковна - РИ с 1962; с 1991 - инж. / 79, 242
 Вьюгина Ангелина Федоровна (1923-1997) - РИ: 1948-1991; 1950-1977 - мнс; кхн / 16

Вяткин Владимир Ефимович - РИ: 1963-1992; 1988-1992 - нач. лаб.; с 1996 - снс; кхн / 44, 93, 113

Г

Гаврилин Сергей Стефанович - РИ с 1975; с 1978 - инж.; с 1986 - нс / 78

Гаврилов Борис Петрович - РИ с 1969 - инж. / 86

Гаврилов Виктор Васильевич - РИ с 1977; с 1990 - снс; кхн / 36

Гаврилов Виталий Михайлович - РИ с 1963 - мнс, нач. гр.; с 1990 - зам. нач. лаб. / 78, 87, 89, 92, 123

Гаврилова Ирина Андреевна - РИ с 1969; с 1993 - инж. / 262

Гайдук Генрих Иванович - РИ: 1954-1985 - мнс; кхн / 78, 151

Галкин Борис Яковлевич - РИ с 1958; с 1996 - зам. дир. по науке; кхн. Орден "Знак Почета" / 37, 38, 40, 41, 43, 44, 46, 58, 114, 145

Гальцев Петр Анатольевич - РИ: 1964-1997; с 1993 - снс / 104

Гамов Георгий Антонович (1904-1968) - РИ: 1931-1934 - нс 1 разр. / 163, 189, 215-217, 221

Ганза Евгений Алексеевич - РИ: 1971-1995; 1989-1995 - снс; кфмн / 194, 208, 213, 238

Гевирц Владимир Борисович - РИ с 1968; с 1994 - снс / 78, 106

Геденов Андрей Дмитриевич - РИ с 1971; с 1979 - снс; с 1992 - НПП КИРСИ; кхн / 285

Геденов Лев Иванович (1916-1996) - РИ: 1947-1996; 1963-1987 - нач. лаб.; кфмн. Гос. премия. Ордена Красной Звезды. Отеч. войны (2), медали / 38, 44, 65, 68, 69, 71-73, 87-92

Гейдельман Анатолий Маркович - РИ: 1967-1992; 1990-1992 - внс; кхн / 102, 155, 157, 159, 270

Герасименко Борис Федорович - РИ с 1977; с 1986 - нс; кфмн / 241

Гербаневская Мария Михайловна (1906-1978) - РИ: 1940-1971 - мнс. Именная премия СМ СССР.

Медали "За трудовое отличие (2) / 79, 110

Гинзбург Фаня (Фрида) Лазаревна - РИ: 1947-1979; 1960-1974 - снс; кхн / 112

Головина Лидия Николаевна - РИ с 1969; 1972-1990 - зам. нач. отдела; с 1990 - печатник / 304, 309

Головлев Виктор Георгиевич - РИ с 1975; 1980-1984 - мнс; с 1984 - нач. ОКИПиА / 78

Голубев Валерий Антонович - РИ с 1962; с 1969 - инж. / 76, 78, 151

Гордеева Людмила Сергеевна - РИ: 1963-1993; 1971-1988 - снс / 148

Гордеева Наталья Александровна - РИ: 1936-1978 - лаборант / 16

Горелик Людмила Зусмановна - РИ 1969-1992 - ст. техник, инж. ГОНТИ / 304

Горский Аркадий Григорьевич - РИ с 1969 - мнс, инж. / 32

Горшков Георгий Васильевич (1904-1983) - РИ: 1932-1973; 1949-1972 - зав. лаб.; дтн, проф. Гос. премия, именная премия СМ СССР. Ордена Ленина. Трудового Красного Знамени (2), "Знак Почета", медали / 19, 23, 25, 65, 68, 69, 142, 145, 184, 193, 204, 311, 312

Горшков Николай Георгиевич - РИ с 1973; с 1988 - нс; кхн / 115

Гофман Феликс Эргардович - РИ с 1975; 1979-1986 - нач. гр.; с 1986 - нс / 38, 97

Гращенко Станислав Макарович - РИ с 1957; 1973-1995 - снс; кхн. Именная премия СМ СССР / 82, 92, 122, 220

Гребенщикова Вера Ильинична (1908-1985) - РИ: 1933-1975; 1962-1974 - зав. лаб.; дхн. Премии: Ленинская, именная СМ СССР, им. В. Г. Хлопина. Ордена Красной Звезды, Трудового Красного Знамени, "Знак Почета" / 15, 16, 22, 25, 72, 79, 108, 118, 311

Григорьев Орест Павлович - РИ: 1951-1987; 1968-1977 - зам. нач. отд. ТБ и РБ. Орден Отеч. войны, медали / 78

Гридасов Геннадий Григорьевич - РИ с 1973 - мнс; с 1990 - инж. / 56

Гринберг Александр Абрамович (1898-1966) - академик АН СССР, засл. деят. науки и техники РСФСР. РИ: 1943-1966; 1943-1948 - зав. химич. отделом; 1948-1966 - зав. лаб. Гос. премия, именная премия СМ СССР, премии им А.М. Бутлерова и Л.В. Писаржевского. Ордена Ленина, Трудового Красного Знамени, Красной Звезды, медали / 16, 30, 31, 42, 43, 113-115, 310

Гритченко Зигфрид Георгиевич - РИ с 1955; с 1966 - снс; кфмн / 42, 78, 87-89, 92, 93

Громова Евгения Антоновна - РИ с 1975; с 1992 - инж.-технолог / 153, 223

Грудский Михаил Яковлевич - РИ с 1969; с 1992 - внс; кфмн / 235, 236

Гугель Елена Сергеевна - РИ: 1961-1986; с 1965 - мнс / 79

Гудов Вадим Иванович - РИ: 1962-1970 - мнс; с 1981 - снс; кфмн / 140

Гуревич Анна Моисеевна (1906-1982) - РИ: 1943-1974; с 1937 - снс; дхн. Ленинская премия, именная премия СМ СССР. Ордена Трудового Красного Знамени, "Знак Почета", медали / 12, 15, 16, 22, 29, 31, 113, 114

Гурин Дмитрий Николаевич - РИ: 1975-1990; 1986-1990 - нач. лаб. / 78, 126

Гусев Дмитрий Иванович (1922-1992) - РИ: 1980-1992; 1985-1987 - нач. лаб.; дмн, проф. Ордена Красной Звезды, Отеч. войны, медали / 37, 42, 44, 78, 90, 91

Д

Давыдов Юрий Владимирович - РИ с 1972; с 1988 - инж. / 223
 Данилевич Соломон Иосифович - РИ: 1947-1981; 1964-1974 - снс; кгмн / 121, 122
 Дейнов Вячеслав Сергеевич - РИ: 1970-1992 - мнс, ст инж. / 306
 Дементьева Надежда Степановна - РИ: 1956-1986 - лаб.; с 1985 - инж. / 79
 Демьянов Виктор Алексеевич - РИ с 1972 - мнс; с 1983 - ст. инж. / 154
 Демьянова Тамара Александровна - РИ с 1960; 1960-1986 - мнс, с 1986 инж. / 105, 112, 298
 Желепов Борис Сергеевич - чл.-корр. РАН. Засл. деят. науки и техн. РФ. РИ: с 1945; 1954-1986 - нач. лаб. 1986-1995 - гл. нс; с 1995 - нач. лаб. Гос. премия. Ордена Трудового Красного Знамени (2), "Знак Почета", Отеч. войны, медали / 65, 66, 68-71, 145, 155, 158, 169, 171, 176, 181, 184, 189, 265, 266, 269, 272
 Дмитриев Алексей Иванович - РИ: 1963-1993; с 1971 - мнс, ст. инж. / 79, 262
 Дмитриев Владимир Дмитриевич - РИ с 1973; с 1997 - зам. нач. отд.; кфмн / 162, 166, 183, 184, 186, 194, 195, 241, 274, 275
 Дмитриев Владимир Никифорович - РИ с 1968 - оператор / 68, 69
 Довгиленко Анатолий Савельевич - РИ: 1970-1992; с 1990 - снс; ктн. / 139, 156
 Домкин Виталий Дмитриевич - РИ с 1970; с 1985 - снс; кфмн / 105, 106, 169, 194, 200
 Доницкий Анатолий Георгиевич - РИ с 1971; 1985-1990 - зам. нач. службы АСУ синхротрона; с 1990 - зам. нач. лаб. / 168, 185, 191
 Драпчинский Леонард Вячеславович - РИ с 1954; с 1995 - внс; кфмн / 65, 78, 166, 186, 187, 237, 238, 240-242
 Дубасов Юрий Васильевич - РИ с 1963; с 1994 - нач. отдела; дхн. Гос. премия. Орден "Знак Почета" / 7, 63, 71-78, 114, 123, 124, 129, 130, 243, 274-276, 281
 Дубасова Нелли Алексеевна - РИ: 1956-1994; 1968-1973 - мнс / 79
 Дубровин Валерий Семенович (1940-1994) - РИ: 1965-1994; 1988-1994 - зам. нач. отд.; кхн / 78, 79, 113, 126-128, 146
 Душин Виктор Николаевич - РИ с 1975; 1984-1995 - снс; с 1995 - зам. дир. АТЦ; кфмн / 36, 239, 240, 279, 285
 Душин Роман Борисович - РИ с 1970; с 1990 - снс / 115
 Дьяченко Александр Трофимович - РИ с 1976; с 1989 - нс; кфмн / 169, 214, 229

Е

Евдокимов Александр Викторович - РИ с 1975; с 1994 - в. инж. / 78, 79, 262
 Евдокимов Александр Германович - РИ с 1972; с 1977 - инж., мнс; с 1990 - нс / 97
 Егоров Юрий Сергеевич - РИ: 1964-1992 - снс; ктн / 102, 155-157, 270
 Егорова Вера Павловна - РИ с 1966 - инж.; с 1996 - НТЦ "Новые технологии" / 56, 298-300
 Егорова Ирина Григорьевна - РИ с 1971 - лаб., ст. техник; с 1981 - инж. / 96
 Екимов Сергей Петрович - РИ: 1967-1991; 1989-1991 - снс; кхн / 140
 Елизарова Ангелина Николаевна - РИ: 1953-1996; 1990-1996 - нс; кхн / 83, 92, 93
 Елисеева Инна Михайловна - РИ: 1960-1980; 1965-1980 - мнс, ст. техн.; с 1992 - уборщица / 78
 Елистратов Михаил Семенович - РИ с 1971 - лаборант / 78
 Ермилов Виктор Константинович - РИ с 1969; 1984-1997 - лаб.-дозим. / 78
 Ерофеев Сергей Петрович - РИ с 1972; с 1982 - инж. / 78, 153-155
 Ершаков-Альмари Али Васильевич - РИ с 1961 - ст. лаб., дозим. / 78
 Есимантовский Вячеслав Михайлович - РИ с 1972; с 1991 - внс; ктн / 42, 45, 112
 Ефимова Екатерина Ильинична - РИ: 1957-1987; 1971-1973 - снс; кхн / 78
 Ефремова Тамара Ивановна - РИ с 1953; с 1962 - мнс. Медаль "За трудовую доблесть" / 33

Ж

Жабров Борис Федорович - РИ: 1960-1993; 1962-1972 - инж. / 78
 Жагров Евгений Афанасьевич - РИ: 1960-1980 - мнс; кфмн / 261

- Жданов Александр Павлович (1904-1969) - РИ: 1925-1969; 1939-1969 - зав. лаб.; 1940-1944 - зав. физич. отд.; дфмн, проф. Гос. премия. Ордена Ленина, Трудового Красного Знамени, медали / 10, 11, 123, 187, 188, 203, 204, 211, 260, 269
- Жеребцова Калерия Ивановна (1913 -1993) - РИ: 1943-1981; 1948 -1974 - мнс / 223
- Жилкина Марина Ивановна - РИ: 1953-1983 - мнс; кхн / 78, 311, 313
- Жуков Геннадий Иванович - РИ: 1964-1995 - лаб., механик. Орден Трудовой Славы 3 ст. / 78
- Жуковский Николай Никитич - РИ с 1950; 1964-1974 и с 1993 - снс; кфмн. Ордена Красной Звезды, Отеч. войны, медали / 180, 181
- Журавлева Зоя Александровна - РИ: 1960-1983 - лаборант / 78, 79

З

- Завороткин Алексей Александрович - РИ с 1971; 1974-1987 - нач. гр.; с 1988 - ст. инж. / 97
- Зайцев Борис Николаевич - РИ с 1975 - снс; кхн / 45, 101, 111
- Залецкий Эдуард Георгиевич - РИ с 1960; 1970-1990 - ст. инж.; с 1990 - методист по физкультуре / 79
- Заманский Владимир Яковлевич - РИ с 1966, с 1984 - снс; кхн / 101
- Захаренков Василий Федорович - РИ: 1969-1994; с 1974 - инж, мнс / 79, 131
- Захаров Владимир Иванович (1933-1996) - РИ: 1958-1991 - снс; кфмн / 194, 204, 260
- Зеленцова Людмила Александровна - РИ с 1968; 1977-1988 и с 1993 - инж. / 155
- Зив Валентина Спиридоновна - РИ: 1963-1994 - мнс, инж. / 79, 109, 113
- Зив Давид Моисеевич (1915-1967) - РИ: 1938-1967; 1954-1967 - зав. лаб.; дхн, проф. Ленинская и Гос.(2) премии, именная премия СМ СССР. Орден "Знак Почета", медали / 65, 68, 69, 113, 133-135, 142, 143, 160, 184, 269, 270, 311, 312
- Зильберман Борис Яковлевич - РИ с 1959; с 1986 - нач. лаб.; дтн. Орден Дружбы народов, медали / 32, 34, 35, 37, 40, 46, 96, 110, 111, 311
- Зыков Михаил Петрович - РИ с 1976, с 1986 - снс; кхн / 133, 153-155

И

- Иванов Роберт Борисович - РИ с 1951; с 1993 - нач. лаб.; кфмн. Медаль "За трудовое отличие" / 65, 69, 145, 180, 265, 266, 269
- Иванов Юрий Евграфович (1940-1995) - РИ: 1963-1995; 1992-1995 - внс, зам. нач. отд.; кхн / 56, 113, 137, 146, 147
- Иванова Клавдия Сергеевна - РИ: 1945-1983; 1970-1973 - снс; кхн / 78, 121, 122, 124
- Иванова Людмила Михайловна - РИ с 1953; с 1972 - снс; кхн. Орден Трудового Красного Знамени, медаль "За трудовую доблесть" / 87-89, 92
- Иванова Нина Григорьевна - РИ: 1964-1994 - лаборант / 79
- Игнатов Владимир Александрович (1934-1994) - РИ: 1958-1994; 1981-1994 - снс; кхн / 32
- Ильенко Елена Ивановна - РИ с 1952; с 1962 - нач. ОНТИ, ГОНТИ; кхн / 7, 14, 26, 29, 30, 35, 39, 46, 113, 114, 302, 303, 306-311, 313
- Ильин Александр Семионович - РИ с 1969 - инж.-технолог / 42
- Ильин Николай Николаевич - РИ: 1971-1993; с 1982 - ст. инж. / 78
- Ильинская Татьяна Александровна - РИ: 1952-1976 - мнс / 65, 79, 116
- Инькова Елена Николаевна - РИ с 1958; 1969-1974 - снс; с 1974 - мнс; кхн / 99
- Иоффе Эсфирь Моисеевна (1904-1962) - РИ: 1935-1962; с 1944 - снс; кхн. Премия им. В. Г. Хлопина. Орден "Знак Почета", медаль "За трудовую доблесть" и др. / 109, 118, 310
- Ипполитов Владимир Трофимович - РИ с 1961; 1983-1990 - нач. отд.; с 1990 - снс; кфмн / 36
- Исупов Владимир Константинович - РИ с 1974; с 1976 - зав. лаб.; кхн. Орден "Знак Почета" / 36, 37, 41, 44, 46, 114
- Исхакова Ольга Александровна - РИ с 1977 - инж. / 42, 95

К

- Казанкин Юрий Николаевич - РИ с 1962; с 1972 - снс; кхн / 33, 78, 106, 109
- Казаринов Николай Михайлович - РИ с 1954; с 1973 - снс; кфмн / 36, 65, 166, 185, 193, 241, 260
- Калинин Генрих Владимирович - РИ: 1960-1993 - слесарь, механик, лаб. / 78
- Калинин Николай Николаевич - РИ с 1980 - снс; с 1992 - нач. лаб.; кхн / 93

- Кальницкая Эрика Сергеевна - РИ: 1963-1986; 1966-1974 - мнс / 303, 304
- Каменцев Александр Александрович - РИ с 1971; с 1991 - снс, с 1993 - нач. лаб. / 79, 126
- Каминский Юрий Леонович - РИ с 1975 - зав. лаб.; кхн. Гос. премия / 133, 150, 160
- Карелин Александр Иванович - РИ: 1990-1996 - ген. дир. НПО "Радиовый институт", с 1996 - гл. нс НТЦ "Новые технологии"; дтн. Гос. премии (2). Ордена Ленина, Трудового Красного Знамени, "Знак Почета" / 33, 50, 51, 287, 288, 291, 294
- Касаткин Владимир Петрович (1925-1977) - РИ: 1954-1977; 1964-1971 - гл. инж.; с 1971 - снс; ктн / 69, 78, 236
- Касаткина Евгения Николаевна - РИ: 1962-1994; с 1971 - мнс, инж. / 78
- Кацапов Владимир Иванович - РИ с 1955; с 1962 - нач. отд. РБ и ТБ; с 1986 - внс; ктн / 73, 74, 78, 124, 126, 151
- Кацапов Сергей Владимирович - РИ с 1972; с 1992 - нс / 79
- Качалов Владимир Александрович (1927-1990) - РИ: 1954-1990; 1968-1974 - ст. инж. / 134, 135
- Кетов Акендин Иванович (1934-1986) - РИ: 1961-1986; 1972-1979 - зав. лаб.; с 1979 - снс; дтн, проф. / 73, 126
- Кишин Михаил Юрьевич - РИ с 1975; с 1995 - снс, с 1996 - НТЦ "Новые технологии" / 57, 299
- Киселева Римма Николаевна - РИ с 1961; с 1968 - мнс / 32
- Клемина Алевтина Михайловна - РИ с 1972; с 1976 - мнс, инж.; кхн / 113, 117, 311
- Клюман Валентина Рудольфовна (1915-1984) - РИ: 1943-1984; 1973-1984 - зав. лаб.; дхн, проф. Премия им. В. Г. Хлопина. Ордена Трудового Красного Знамени, "Знак Почета", медали / 72, 79, 109, 118, 143, 313
- Князев Виктор Александрович - РИ с 1965; с 1986 - инж. Медаль "За трудовую доблесть" / 74, 76, 78
- Ковалев Геральд Никитич - РИ с 1960; 1960-1987 - мнс; с 1987 - лаб. / 7, 312, 313
- Ковалева Татьяна Васильевна - РИ: 1946-1983; 1951-1973 - снс; кхн, доц. Именная премия СМ СССР. Орден "Знак Почета", медали "За трудовую доблесть", "За трудовое отличие" / 16, 22, 31, 34, 110, 310, 312
- Ковалевич Виктор Алексеевич - РИ: 1960-1990 - лаборант / 78
- Коваленко Сергей Семенович - РИ: 1963-1994; 1973-1982 - нач. отд.; 1982-1989 - зам. дир. по науке; 1989-1994 - внс.; дфмн, проф. / 78, 166, 169, 186, 237, 238, 242
- Ковалова Елена Александровна - РИ: 1967-1995 - мнс / 78
- Ковальская Мария Павловна - РИ: 1945-1983; 1951-1983 - снс; 1972-1974 - и.о. зав. лаб.; кхн. Орден Трудового Красного Знамени, медали / 31, 34, 79, 109, 110, 311-313
- Коварская Елена Николаевна - РИ с 1965 - мнс, инж. / 78
- Козулин Эдуард Михайлович - РИ: 1969-1990; с 1989 - снс; кфмн / 166, 186
- Козунов Андрей Владимирович - РИ: 1969-1993 - мнс / 262
- Козырев Игорь Витальевич - РИ: 1972-1993 - мнс, инж. / 78
- Кокина Светлана Андреевна - РИ с 1974, с 1994 - в. инж. / 100, 294
- Колгушкин Павел Григорьевич (1924-1986) - РИ: 1945-1983 - механик-электрик / 78
- Колесникова Наталья Сергеевна - РИ: 1959-1989; 1959-1974 - мнс / 109, 113, 304
- Колин Виктор Васильевич - РИ с 1973; с 1992 - нс / 79, 115
- Колкер Зинаида Яковлевна - РИ: 1949-1979 - лаборант / 78
- Колобов Евгений Анатольевич - РИ с 1968, с 1990 - снс; ктн / 154, 155
- Колокольцов Владимир Борисович - РИ с 1956; с 1986 - нс; кхн / 114, 308
- Колычев Валентин Борисович - РИ с 1955; с 1972 - снс; кхн / 65, 78, 113
- Колычева Татьяна Ивановна - РИ с 1976; с 1980 - инж. / 94
- Колядин Анатолий Борисович - РИ с 1974; с 1990 - внс; кхн / 36
- Комаров Владимир Николаевич - РИ с 1969; с 1979 - снс; кхн / 110, 135
- Комлев Леонид Васильевич (1904-1979) - РИ: 1929-1979; с 1938 - зав. лаб.; дгмн, проф. Ордена Трудового Красного Знамени, "Знак Почета", медали / 11, 71, 72, 82, 119-122, 220, 269, 311
- Копалкин Юрий Александрович - РИ с 1961; с 1975 - снс; кхн. Медаль "За трудовую доблесть" / 29, 42, 101, 145
- Копейкин Юрий Анатольевич - РИ: 1970-1990; с 1973 - мнс, ст. инж. / 32, 304, 311
- Копченев Валентин Евгеньевич - РИ с 1977; 1977-1993 - инж., мнс / 79, 261, 262
- Коренков Андрей Геннадиевич - РИ с 1975; с 1986 - нс / 260
- Корнилов Юрий Александрович - РИ: 1954-1985; 1969-1974 - ст. инж. / 142, 145
- Корилова Раиса Ивановна - РИ: 1958-1994 - лаборант / 78
- Коробулин Юрий Григорьевич - РИ с 1971; с 1976 - инж., мнс / 106, 200

- Королев Владимир Алексеевич - РИ с 1973; 1995-1996 - внс, с 1996 - НТЦ "Новые технологии"; кти / 294
- Королев Евгений Вячеславович - РИ с 1974; с 1997 - зам. ген. дир. по экономике, кфмн / 36, 240
- Корсунский Виталий Яковлевич - РИ: 1963-1995 - лаб., слесарь, инж. / 78, 171
- Корчевцева Алла Федоровна - РИ с 1962 - лаборант / 78
- Костина Мария Павловна - РИ с 1954 - лаб.-фотометрист, ст. техник / 78
- Косточкин Олег Игоревич - РИ с 1959; с 1990 - снс; кфмн / 166, 186, 187, 239, 240, 242
- Костров Виктор Николаевич - РИ: 1967-1994 - мнс, инж. / 75, 78, 130
- Котлин Валерий Павлович - РИ с 1965 - мнс, ст. инж., с 1995 - нс; кхн. Медаль "За трудовую доблесть" / 78, 115
- Котова Юлия Михайловна - РИ с 1963 - инж., мнс., ст. переводчик / 304, 308, 309
- Котович Людмила Ивановна - РИ с 1963 - лаб. / 32, 100
- Кочеванова Лидия Алексеевна - РИ: 1955-1984; 1966-1972 - снс; кхн / 30, 113, 114, 308
- Кочергин Сергей Алексеевич - РИ: 1973-1994 - инж. / 78
- Кочергин Станислав Михайлович - РИ с 1974; с 1980 - инж., мнс / 78
- Кочеров Николай Павлович - РИ: 1958-1978 - снс; РИ: 1983-1987 - нач. лаб.; кфмн / 194, 204
- Крамаровский Яков Михайлович - РИ с 1970; с 1994 - снс; кфмн / 215, 240
- Кривохатский Анатолий Сергеевич (1930-1993) - РИ: 1956-1993; 1973-1993 - нач. отд.; дхн, проф. Гос. премии (2). Орден "Знак Почета", медали / 71, 74, 75, 77, 78, 117, 122-124, 126-128, 130, 226, 242, 269, 281
- Крижанский Лев Михайлович - РИ с 1949; 1963-1978 - зав. лаб.; с 1978 - снс; кфмн / 44, 102, 103, 140, 184, 204, 249
- Криницын Алексей Павлович - РИ с 1975; с 1990 - снс; кхн / 38, 42, 96
- Крисюк Ирина Тимофеевна (1929-1989) - РИ: 1953-1976; с 1954 - мнс; кфмн / 65, 69, 241
- Крутов Юрий Дмитриевич - РИ: 1968-1994; 1972-1990 - ст. инж. / 171
- Крылов Алексей Яковлевич (1915-1986) - РИ: 1945-1986; 1964-1979 - снс; кгмн. Орден Отеч. войны, медали / 122
- Крылов Владимир Николаевич - РИ: 1967-1996; 1990-1995 - нач. лаб.; дхн / 113
- Крылов Лев Иванович - РИ с 1955; с 1984 - нач. лаб. (до 1996 - отд.) станд.; кхн / 29, 35, 133, 145, 146, 158
- Куделин Борис Константинович - РИ с 1975; с 1988 - снс; кхн / 150, 151
- Кузина Муза Григорьевна - РИ: 1952-1973; с 1969 - снс; кхн / 112
- Кузнецов Борис Сергеевич - РИ с 1956; с 1977 - снс; кти / 93, 94, 112
- Кузнецов Михаил Иванович - РИ: 1954-1989; 1970-1988 - снс; кфмн / 65, 66, 78, 165, 193
- Кузнецов Юрий Владимирович - РИ с 1957; с 1977 - нач. отд.; дхн, проф. Орден "Знак Почета" / 39, 44, 46, 81, 83, 84, 87, 90-93, 112, 117, 122, 220
- Кузьменко Николай Константинович - РИ с 1974; с 1991 - снс; кфмн / 156, 272
- Кузьменков Анатолий Михайлович - РИ с 1974; с 1978 - инж. / 223
- Кузьмин Виктор Николаевич (1929-1993) - РИ: 1954-1993; 1971-1993 - снс; кфмн / 203, 212, 223, 239
- Кузьмина Маргарита Анатольевна - РИ с 1954; с 1990 - нс; кхн / 38
- Кузьмина Татьяна Евгеньевна РИ с 1974; с 1994 - инж.-технолог / 249
- Кукс Илья Минеевич (1932-1978) - РИ: 1957-1978; 1977-1978 - снс; кфмн / 165, 184, 203, 204, 261
- Куликов Сергей Михайлович - РИ с 1956; 1973-1990 - снс; кти / 32, 33, 48, 79
- Куманева Галина Андреевна - РИ: 1953-1988; с 1954 - мнс, ст. инж., рук. гр. / 32, 110, 304, 309
- Куракина Наталья Сергеевна - РИ: 1960-1995; 1990-1995 - нс; кхн / 73, 78
- Куракина (Мазина) Татьяна Иосифовна - РИ с 1968 - мнс / 79, 311, 313
- Курринен Константин Александрович - РИ: 1974-1995; 1989-1995 - нс / 152
- Курчатов Игорь Васильевич (1903-1960) - Академик АН СССР. Один из руководителей работ по созданию атомной промышленности СССР. РИ: 1937-1940 - зав. циклотронной лаб., зав. физич. отделом / 11, 23, 27, 164, 183, 188, 193
- Куценко Валентина Илларионовна - РИ с 1963; с 1967 - ст. лаб., техн. / 154, 155
- Куценко Николай Вакулович - РИ: 1960-1995; 1960-1972 - мнс; 1972-1995 - гл. инж. РИ / 30, 35, 78
- Кучеров Адольф Самойлович - РИ: 1960-1980; 1960-1973 - гл. инж. ускорителя / 166, 223
- Кубарсепп Лидия Рудольфовна - РИ с 1963; с 1968 - инж. / 78

- Лазарев Ким Федорович - РИ: 1957-1987; 1969-1984 - снс; кхн / 78, 82, 92, 220
- Лазарев Леонард Николаевич - РИ с 1964; 1972- 1989 - директор РИ, с 1989 - гл. нс; дхн. Гос.премия.
Орден Трудового Красного Знамени, медали / 14, 26, 31, 33-35, 38, 39, 41, 43, 45, 51, 58, 78, 89, 112, 152, 302, 307, 310, 311
- Ласточкин Николай Константинович - РИ: 1974- 1994; 1984-1994 - нач. лаб.; ктн / 260
- Лашаев Сергей Иванович - РИ с 1975; с 1989 - снс; ктн / 249, 251
- Лашевский Иван Онуфриевич - РИ с 1973 - инж. / 36
- Лебедев Евгений Львович - РИ с 1973; с 1981 - инж., ст. инж. / 76, 78
- Лебедев Лев Степанович - РИ с 1960; с 1986 - нач. службы установки/ 166, 170, 223
- Легин Владимир Корнельевич - РИ с 1960; с 1987 - нач. лаб.; кхн. Орден "Знак Почета" / 7, 39, 44, 78, 81, 83, 84, 87, 90-93, 112
- Легин Евгений Корнельевич - РИ с 1959; с 1976 - снс; кхн Премия им. В. Г. Хлопина / 84, 110-112, 114, 116, 118
- Лилова Ольга Михайловна - РИ: 1954-1985; с 1958 - мнс / 205, 308
- Липовский Александр Александрович (1925-1985) - РИ: 1954-1985; с 1973 - нач. отд. дхн. Орден Дружбы народов, медали / 44, 102, 103, 111, 112
- Ловцюс Альгерд Викентьевич - РИ: 1947-1996; 1954-1986 - мнс; 1986-1990 - нач. гр.; с 1990 - инж. Орден Отеч. войны 2 ст. / 102-104, 184
- Ловцюс Галина Павловна - РИ: 1954-1979; с 1974 - снс; кхн / 78
- Логинов Евгений Николаевич - РИ с 1975; 1979-1988 - нач. гр.; с 1988 - ст.инж.; с 1994 - НТЦ "РИОН" / 170
- Ложкин Олег Владимирович - Чл.-корр. РА естеств. наук. РИ с 1951; 1973- 1986 - зав. физ. отд.; с 1986 - внс; дфмн, проф. / 7, 202, 204-215, 218, 311
- Ломаев Николай Иванович - РИ с 1978; 1978-1989 - зам. гл. инж.; с 1996 - инж. НТЦ "Новые технологии". Ордена Ленина, Трудового Красного Знамени, "Знак Почета" / 37, 45
- Лукинов Борис Андреевич - РИ с 1964 - механик. Орден Трудовой славы 3 ст. / 78
- Лукирский Петр Иванович (1894-1954) - академик АН СССР, дфмн, проф. РИ: 1944-1954 - зав. физ. отд., с 1946 - зав. лаб. Ордена Ленина, Трудового Красного Знамени (2), медали / 10, 189, 203-205, 310-312
- Любцев Рэм Иванович - РИ с 1960; с 1972 - зав. (с 1996 - дир.) отделением; кхн. Орден Трудового Красного Знамени/ 30, 33-35, 37, 38, 41, 43-46, 96, 307
- Лякин Вячеслав Викторович - РИ с 1966 - мнс, ст. инж., инж. Орден "Знак Почета"/32, 33, 42, 299
- Ляпин Владимир Григорьевич - РИ с 1975; 1989-1996 - в. инж; с 1996 - нс. Орден "Знак Почета"/ 186, 214, 215

М

- Мазалов Юрий Анатольевич - РИ: 1964-1992 - лаборант / 78
- Мазина Т.И. - см. Куракина Т.И.
- Мазурек Юрий Вацлавович (1913- 1985) - РИ: 1958-1978; с 1961 - снс; ктн. Орден Красной Звезды, медали / 134
- Майоров Валерий Павлович - РИ с 1973; с 1987 - нач. лаб.; кхн / 44, 260
- Макарова Инна Федоровна - РИ с 1961 - лаб.- фотометрист / 78
- Макарова Татьяна Петровна - РИ с 1953; с 1983 - снс; кхн / 102-104, 145
- Макарычев-Михайлов Михаил Николаевич - РИ с 1973; с 1994 - снс; ктн / 32, 42
- Максимов Валерий Федорович - РИ: 1966-1993 - мнс / 78
- Максимов Игорь Николаевич - РИ с 1963; 1977-1983 - нач. гр.; с 1986 - нс; кхн / 71, 73, 78, 123, 124
- Маликов Игорь Михайлович - РИ с 1964 - шофер, слесарь, уборщик / 78
- Малимонова Светлана Ивановна - РИ с 1971 - лаб.; с 1986 - инж. / 79
- Малинин Геннадий Владимирович - РИ с 1962; с 1986 - внс; кхн / 116, 137, 138
- Малкин Александр Львович - РИ: 1969-1990 - лаб., инж. / 78, 260
- Малкин Лев Захарович (1925-1994) - РИ: 1952-1994; с 1955 - мнс; кфмн. Ордена Красной Звезды, Отеч. войны 1 степ., медаль "За трудовое отличие" и др. / 65, 79, 186
- Малышев Николай Александрович - РИ: 1960-1992; 1968-1984 - снс; кхн / 96
- Малышева Людмила Павловна - РИ: 1964-1986 -лаборант / 79
- Малышенков Алексей Васильевич - РИ с 1961; с 1995 - нс НПП КИРСИ / 236
- Марков Вячеслав Васильевич - РИ с 1963 - ст. лаб., ст. техник / 78

- Марков Герман Сергеевич - РИ с 1958; с 1992 - внс.; кхн / 30, 96, 98-101, 111, 113, 114
 Марков Сергей Лазаревич - РИ: 1975-1996; с 1984 - инж./ 139
 Мартынов Юрий Сергеевич - РИ с 1956; 1970-1984 - ст. инж.; с 1984 - лаб., дозим. / 78
 Мартыш Галина Григорьевна - РИ: 1961-1987; с 1962 - мнс / 204
 Маслова Раиса Ивановна - РИ с 1964 - лаб., техник / 240
 Матвиенко Владимир Иванович - РИ: 1953-1994; 1971-1994 - снс; кфмн / 73, 78
 Матюханов Валерий Георгиевич - РИ: 1972-1992; 1988-1990 - ст. инж. / 240
 Матюхов Лев Георгиевич (1933-1991) - РИ: 1974-1991; 1977-1990 - зам. нач. отделения, отд. / 37
 Маширов Леонид Георгиевич - РИ с 1959; с 1991 - внс; кхн / 110, 115, 294
 Мельникова Августа Александровна - РИ: 1948-1978 - мнс / 109
 Меркулова Мария Сергеевна - РИ: 1930-1951; с 1934 - снс, доц.; кхн. Премия им. В. Г. Хлопина. Медаль "За трудовую доблесть" / 107, 118
 Метельков Александр Николаевич - РИ: 1947-1994 - механик. Орден Отеч. войны, медали / 269
 Мещеряков Михаил Григорьевич - РИ: 1936-1947; 1941-1947 - зав. циклотронной лаб.; кфмн. Орден "Знак Почета" / 15, 19, 164, 165, 189
 Митягина Валентина Степановна - РИ с 1974; с 1990 - снс; кхн / 116, 140, 141
 Михайлов Алексей Алексеевич - РИ с 1963; с 1996 - нач. лаб.; ктн / 133-136, 138
 Михайлов Борис Аркадьевич - РИ: 1965-1991; 1990-1991 - нс; кхн / 137, 159
 Михайлов Олег Дмитриевич - РИ: 1961-1995; 1967-1972 - нач. ОКИПиА, с 1972 - инж., лаб. / 78
 Михайлова Майя Андреевна - РИ с 1958; с 1993 - снс.; кфмн / 180, 244, 269
 Мишин Владимир Яковлевич - РИ с 1974; с 1989 - снс; кхн / 36, 116
 Мишин Евгений Николаевич - РИ с 1974; с 1996 - снс / 33, 37
 Моисеенко Елена Семеновна - РИ с 1970; с 1985 - ст. техник / 79
 Мордберг Евгений Леонидович - РИ: 1954-1966; с 1958 - мнс, рук. гр.; кхн. Медаль "За трудовое отличие" / 30, 113
 Мордвинов Виктор Викторович - РИ с 1972 - шофер; с 1992 - дозим. / 76, 78
 Морозова Зинаида Петровна - РИ: 1953-1993; 1957-1993 - мнс; кхн / 29, 311
 Морозова Зоя Евгеньевна - РИ: 1966-1995; 1983-1995 - инж. / 79
 Мортиков Юрий Вадимович - РИ с 1973; с 1979 - инж. / 236
 Мосенков Александр Федорович - РИ с 1960 - механик эксперим. стендов / 223
 Москалев Михаил Николаевич - РИ с 1967- шофер; с 1980 - дозим. / 78
 Москалев Павел Николаевич - РИ: 1974-1995 - снс; дхн / 114, 116
 Москалькова Эльза Александровна - РИ: 1952-1992; 1953-1986 - мнс. Медаль "За трудовую доблесть" / 65, 69, 70, 116
 Мостицкий Петр Иванович (1912-1995) - РИ: 1937-1977 - лаб., механик / 19
 Мосяж Вячеслав Михайлович - РИ: 1972-1994; 1990-1994 - снс; кфмн / 97
 Мошков Михаил Михайлович - РИ с 1973; с 1992 - нач. отд. КНТСЗС / 100, 111
 Мурин Андрей Николаевич - РИ: 1939-1963; 1954-1963 - зав. лаб., дхн, проф. / 16, 23, 108, 184, 204-206, 269
 Мурин Юрий Андреевич - РИ с 1976; с 1989 - снс; кфмн / 208, 211, 213-215
 Муштатный Владимир Алексеевич - РИ с 1966; с 1988 - ст. инж.; с 1992 - НПП КИРСИ / 236
 Мысовский Лев Владимирович (1888 - 1939) - РИ: 1922-1939 - зав. физич. отд., зав. лаб. и ученый секретарь; д. физ. н., проф. / 9-11, 163, 164, 172, 173, 187-189, 202, 216, 221, 260, 310-312
 Мясоедов Дмитрий Николаевич (1913-1968) - РИ: 1947-1968 - мнс; ктн. Именная премия СМ СССР. Медаль "За трудовое отличие" / 134

Н

- Недовесов Владимир Георгиевич - РИ: 1954-1991; с 1966 - снс; 1982-1991 - нач. лаб.; кфмн. Медаль "За трудовое отличие" / 135, 138, 155, 156, 159, 160, 180, 266, 269, 270, 272
 Немилов Юрий Антонович (1913-1996) - РИ: 1947-1996; 1947-1986 - зав. лаб.; дфмн, проф. Именная премия СМ СССР. Ордена Красной Звезды, Отеч. войны, медали / 65, 68, 69, 140, 165, 166, 169, 184, 189, 193, 217, 222, 223, 237, 249, 261
 Нестеров Юрий Иванович - РИ с 1968 - инж. / 38
 Нечай Геннадий Николаевич - РИ с 1961; с 1986 - внс; кхн. Орден "Знак Почета" / 72, 73, 78, 126-128
 Никитин Алексей Васильевич (1933-1984) - РИ: 1958- 1984 - слесарь, механик / 78

- Никитин Борис Александрович (1906-1952) - чл.-корр. АН СССР. РИ: 1923-1952; 1950-1952 - дир. РИ и зав. лаб. Гос. премии (2), именная премия СМ СССР. Ордена Ленина, Трудового Красного Знамени (2). Спец. награды СМ СССР / 12, 16, 17, 19, 22, 23, 25, 27, 42, 68, 106-109, 204, 205, 311, 313
- Никитин Игорь Григорьевич - РИ с 1975; с 1983 - ст. инж., инж.-технолог / 138
- Никитина Галина Петровна - РИ с 1952; с 1995 - внс; кхн. Медаль "За трудовую доблесть" / 32, 53, 56, 110, 113, 137, 146, 147, 160, 298-300, 311, 312
- Никитина Наталья Иосифовна (1934-1987) - РИ: 1963-1987 - мнс; кхн / 72, 78, 93
- Никитина Светлана Антоновна - РИ с 1954; с 1986 - нс; кхн / 102, 105, 112
- Николаев Вадим Аркадьевич - РИ с 1963; с 1988 - нач. лаб.; кфмн, дтн / 79, 260, 261, 263
- Николаев Дмитрий Сергеевич - РИ: 1939-1987; 1962-1976 - зав. лаб.; кгмн / 71, 72, 78, 82, 117, 124
- Никольская Любовь Евгеньевна (1916-1979) - РИ: 1943-1979; 1951-1973 - снс; кхн. Медаль "За трудовую доблесть" / 113, 308
- Никольский Борис Петрович (1900-1990) - академик АН СССР. Герой соц. труда. Засл. деят. науки и техники. РИ: 1948-1990 - зав. лаб. и зав. хим. отд. Премии: Ленинская, Гос. (2), именная СМ СССР, им. В. Г. Хлопина. Ордена Ленина (2), Октябрьской Революции; специальные награды СМ СССР / 16, 22, 23, 25, 27-31, 34, 42, 44, 98, 101, 113, 114, 117, 118, 145, 146, 302, 310-312
- Новиков Геннадий Сергеевич - РИ с 1963 - мнс, инж.; с 1996 - в. инж. / 38
- Новикова Нинель Романовна - РИ: 1952-1975; 1964-1975 - снс; ктн / 194, 204, 260
- Носков Геннадий Андреевич - РИ: 1971-1993; с 1980 - лаб.-дозим. / 78
- Носов Александр Александрович - РИ с 1975; с 1986 - нс / 244

О

- Обнорский Владимир Владимирович - РИ с 1971; с 1989 - снс; кфмн / 226
- Обухов Анатолий Иванович - РИ с 1955; с 1995 - нач. лаб.; кфмн / 194, 195
- Обухова Майя Евгеньевна (1930-1978) - РИ: 1955-1978; с 1957 - мнс; кхн / 32
- Оводова Наталья Александровна - РИ с 1967; с 1970 - ст. лаб., техник / 139
- Окамин Вадим Михайлович - РИ: 1963-1994; 1978-1994 - снс; ктн / 137, 139, 160
- Окунев Николай Сергеевич - РИ с 1973; с 1985 - зам. нач. отд. / 78
- Омельченко Марина Георгиевна (1938-1992) - РИ: 1963-1992 - лаборант / 78
- Орлов Владимир Иванович - РИ: 1972-1989 - нач. лаб.; ктн. Орден Дружбы народов / 38, 44, 96, 97
- Орлова Татьяна Евгеньевна - РИ: 1976-1996; с 1983 - инж. / 89
- Орловский Анатолий Викторович - РИ: 1964-1992; с 1990 - в. инж. / 166
- Осипова Валентина Владимировна - РИ: 1952-1979 - мнс, ст. инж. Медаль "За трудовое отличие" / 65, 79, 309

П

- Павлов Юрий Васильевич - РИ: 1972-1994 - шофер / 206
- Павлова (Сусорова) Нина Александровна (1926-1967) - РИ: 1948-1967 - мнс / 68
- Пазухин Эдвард Михайлович - РИ с 1960; с 1988 - внс; кхн / 30, 35, 79, 108, 124, 130, 131, 273, 274, 276, 281, 282, 284
- Палладиев Анатолий Андреевич - РИ: 1960-1995; 1982-1995 - нач. лаб.; кхн / 44, 74, 78, 106, 152
- Панкин Александр Васильевич - РИ: 1969-1992; с 1979 - инж. / 223
- Панов Георгий Федорович - РИ: 1972-1996 - лаборант / 78
- Панова Алла Аркадьевна - РИ с 1976 - инж.; с 1989 - переводчик / 304, 308, 309
- Панова Элла Алексеевна - РИ: 1968-1996 - лаборант / 79
- Пантелеев Юрий Анатольевич - РИ: 1969-1985 - мнс; РИ с 1990 - снс; кхн / 42, 89, 92
- Панферов Александр Андреевич - РИ с 1965; с 1981 - ст. инж. / 137
- Панфилова Галина Григорьевна (1924-1989) - РИ: 1948-1979; 1952-1979 - мнс, ст. инж. / 29
- Парамонова Валентина Ивановна (1903-1984) - РИ: 1947-1984; 1962-1984 - зав. лаб.; дхн. Премии: Ленинская, именная СМ СССР. Ордена Трудового Красного Знамени (2), медали / 16, 29, 31, 34, 42, 43, 101, 113, 114, 117, 145, 146, 148, 160, 311
- Парфенов Сергей Владимирович - РИ с 1965 - механик, лаборант. Орден "Знак Почета" / 78
- Пасвик-Хлопина Мария Александровна (1885-1955) - РИ: 1922-1955; с 1926 - нс I разр., с 1945 - снс; кхн. Ордена Красной Звезды, "Знак Почета", медали / 9, 11, 16, 107, 313
- Пахомов Сергей Аркадьевич - РИ с 1977; с 1991 - снс / 78

- Перепеч Константин Вениаминович - РИ с 1972 - мнс; с 1996 - НТЦ "Новые технологии" / 299
- Пермяков Василий Михайлович (1896-1961) - РИ: 1933-1961; 1939-1959 - зав. лаб.; кхн. Орден "Знак Почета", медали / 133
- Перфилов Николай Александрович (1908-1989) - РИ: 1932 - 1982; 1953-1982 - зам. дир. по науке, одноврем. зав. лаб. и нач. физич. отд.; дфмн. Ордена Ленина, Трудового Красного Знамени, "Знак Почета", медали / 11, 167-169, 183, 187-189, 193-195, 197, 203-211, 242, 249, 260, 261, 269, 310, 312
- Першин Артур Степанович - РИ: 1962-1988; 1986-1988 - нс; кхн / 108
- Петржак (Митрофанова) Галина Ивановна - РИ: 1941-1983; 1966-1974 - зав. лаб.; кхн. Именная премия СМ СССР. Орден "Знак Почета", медаль "За трудовую доблесть" и др. / 42, 43, 113
- Петржак Константин Антонович - РИ с 1936; 1947-1986 - зав. лаб.; дфмн, проф. Засл. деят. науки и техники РСФСР. Гос. премии (2), именная премия СМ СССР. Ордена Трудового Красного Знамени (2), "Знак Почета", Отеч. войны 2 ст., медали / 11, 15, 20, 65, 69-72, 166, 183, 184, 186-189, 193, 221, 237, 238, 240, 242, 249, 261, 310
- Петров Станислав Павлович - РИ с 1972; с 1981 - инж. / 223
- Петров Юрий Георгиевич - РИ: 1956-1994; 1971-1994 - зав. лаб. Орден Дружбы народов / 65, 72-74, 78, 124, 128-130, 275
- Петрунин Валерий Викторович - РИ с 1974 - слесарь / 223,
- Петухов Вячеслав Владимирович - РИ: 1970-1995 - лаборант, техник / 78
- Питалев Вячеслав Георгиевич - РИ с 1962; с 1990 - снс; кхн / 294
- Пластинин Николай Борисович - РИ: 1972-1994 - инж. / 78, 262
- Плескачевский Леонид Андреевич - РИ с 1969; 1982-1989 - зам. нач. отд.; с 1991 - снс / 240, 272-276, 278, 279, 285
- Плюшев Владимир Анатольевич - РИ с 1975; с 1989 - снс; кфмн / 210, 211, 213
- Плющева Нина Африкановна - РИ: 1955-1978; 1972-1974 - мнс / 145
- Победоносцев Лев Анатольевич - РИ с 1958; 1977-1986 - снс; кфмн / 222
- Подкаменева Валерия Борисовна - РИ: 1958-1994 - лаборант, техник / 79
- Полесицкий Александр Ефимович (1907-1944) - РИ: 1925- 1944; с 1938 - зав. лаб.; 1941-1944 - зав. химич. отделом; дхн, проф. Гос. премия / 12, 107, 207, 217
- Положенская Лидия Петровна - РИ: 1950-1980; 1966-1971 - снс; кхн / 114
- Поляков Михаил Сергеевич - РИ с 1966; с 1995 - снс; с 1996 - НТЦ "Новые технологии"; кхн / 100, 294
- Попик Владимир Петрович - РИ с 1957; с 1974 - зав. лаб.; кхн. Медаль "За доблестный труд" / 30, 35, 38, 44, 96, 100, 101, 113, 145, 311
- Поплаухин Игорь Петрович - РИ с 1974 - слесарь; с 1987 - механик / 223
- Попов Юрий Серафимович - РИ с 1965; с 1992 - нач. лаб. / 78
- Попова Нина Никитична - РИ: 1947-1975; с 1948 - мнс; кхн. Именная премия СМ СССР / 22
- Посвольский Михаил Владимирович (1914-1984) - РИ: 1950-1980; 1958 -1980 - снс; дхн. Ленинская премия. Ордена Трудового Красного Знамени, Красной Звезды, медали / 29-31, 98, 99, 113, 114, 311
- Поспелов Юрий Николаевич - РИ с 1964; с 1985 - снс.; кхн / 42, 84, 87, 90-92
- Потапов Владимир Гаврилович - РИ: 1959-1996; 1973-1996 - снс; ктн / 73, 79, 124, 151, 152
- Поталова Татьяна Сергеевна - РИ с 1964; с 1977 - мнс, инж. / 79, 153, 262
- Похитонов Юрий Алексеевич - РИ с 1975; 1984-1993 - нач. лаб.; с 1993 - снс; кхн. / 38, 44
- Преображенская Лидия Дмитриевна - РИ: 1951-1983; 1963-1983 - снс; кхн / 78, 79, 102-104
- Преображенский Борис Константинович - РИ: 1950-1983; с 1957 - снс; кхн / 100, 103, 204, 205
- Приходцева Валерия Павловна - РИ с 1952; с 1973 - снс; кфмн / 244
- Прокудина Александра Федоровна - РИ: 1946-1950; 1958-1977 - мнс. Именная премия СМ СССР. Медаль "За трудовую доблесть" и др. / 108
- Простяков Александр Павлович - РИ: 1971-1994 - лаб. Медаль "За трудовую доблесть" / 78
- Протасенко Юрий Мстиславович - РИ с 1975; с 1986 - нс / 153, 260
- Протопопов Алексей Николаевич - РИ: 1950-1979; 1959-1973 - зав. лаб.; ктн. Гос. премии (2). Ордена Трудового Красного Знамени (2) / 65, 69, 70, 165, 166, 183-185, 187, 191, 193, 249, 261
- Прусаков Александр Гордеевич - РИ: 1971-1996; с 1971 - мнс, инж. / 240, 273, 274, 276, 278, 279
- Прусаков Виктор Владимирович - РИ: 1974-1995; с 1983 - инж. / 298
- Прямиков Александр Александрович - РИ: 1972-1992; 1972-1983 - ст. инж. / 33, 50
- Пурина Евгения Арсентьевна - РИ: 1955-1996 - лаборант / 78
- Пушленков Михаил Федорович (1904-1994) - РИ: 1945-1990; 1954-1986 - зав. лаб.; дтн, проф. Премии: Ленинская, именная СМ СССР. Ордена Ленина, Трудового Красного Знамени, Красной Звезды, "Знак Почета", Отечеств. войны, медали / 31-34, 37, 42, 43, 48, 49, 110, 111, 145, 312, 313

Р

- Ратнер Александр Петрович (1906-1956) - РИ: 1927-1956; с 1947 - зав. лаб.; дхн, проф. Премии: Гос., именная СМ СССР. Ордена Ленина, Красной Звезды, "Знак Почета". Спец. награды СМ СССР / 12, 16, 22, 23, 25, 27-29, 71, 107, 108, 114, 311, 312
- Рик Георгий Рудольфович - РИ: 1938-1957; 1944-1957 - снс; 1947-1951 - ученый секретарь; кфмн; доц. Премия СМ СССР. Орден "Знак Почета", медали / 184
- Римский-Корсаков Александр Андреевич - РИ с 1959; 1989-1996 - зам. дир. по науке и нач. лаб.; с 1996 - ген. дир. НПО "Радиовый институт" и нач. лаб.; дфмн. Медаль "За трудовое отличие" / 7, 204, 207, 218, 236, 244, 272-275, 292
- Робина Татьяна Андреевна - РИ: 1968-1995 - мнс, ст. инж. ГОНТИ / 304, 312
- Роговский Олег Павлович - РИ: 1950-1979 - механик, лаб.- дозим. Медали / 78
- Рогозов Борис Иванович - РИ с 1963; с 1982 - нач. лаб.; кхн / 113, 140, 160
- Рогозин Юрий Михайлович - РИ с 1963; с 1980 - нач. лаб.; кхн / 41, 44, 72, 73, 78, 108, 113, 124, 126-128, 131
- Рогозовец Вячеслав Григорьевич - РИ с 1967; с 1993 - в. инж. / 113, 135
- Родионов Владимир Федорович - РИ с 1951; 1965-1978 - мнс, инж. / 269, 270
- Родионов Юрий Иванович - РИ с 1961; 1985-1986 - нач. лаб.; с 1986 - внс, кхн / 79, 109, 124, 152
- Родионова Лидия Петровна - РИ: 1950-1983; с 1952 - мнс. Медаль "За трудовое отличие" / 65, 78, 79
- Розина Нина Нестеровна - РИ с 1967 - ст. лаб., лаб. / 242
- Розовская Наталия Григорьевна (1912-1995) - РИ: 1947-1976 - мнс / 112
- Ролдугин Николай Николаевич - РИ: 1970-1993; с 1973 - мнс, нс; 1981-1993 - зам. нач. лаб. / 236
- Романовский Валерий Николаевич - РИ с 1969; с 1996 - зам. ген. дир. НПО "Радиовый институт" по науке; кхн. Орден "Знак Почета" / 33, 37, 38, 41, 44, 45, 58, 111, 112, 154
- Роснянов Сергей Павлович - РИ: 1960-1995; с 1964 - снс; кхн. Ордена Красной Звезды, Отеч. войны / 78, 87, 92
- Рощинская Эльза Михайловна - РИ с 1956 - лаб., техник / 38
- Рубченя Валерий Андреевич - РИ с 1968; с 1984 - нач. лаб.; дфмн, проф. / 36, 204, 206, 226, 238, 241
- Рукавишников Виктор Николаевич (1895-1960) - РИ: 1922-1946; с 1939 - снс, зам. зав. лаб.; ктн / 163, 164
- Румянцев Борис Васильевич - РИ с 1962; с 1982 - инж, лаб. Орден Трудовой Славы, медали / 78, 166, 187, 239, 242
- Румянцева Людмила Николаевна - РИ: 1963-1996; 1979-1987 - нач. гр. Гос. премия / 148, 150, 160
- Рыжкова Ирина Валериановна - РИ с 1955; с 1990 - нс / 30, 101, 204
- Рязанцев Валерий Иванович - РИ с 1969; с 1979 - нач. гр., нс / 42

С

- Савоненков Владимир Григорьевич - РИ с 1954; с 1976 - зав. лаб.; дтн. Гос. премия / 41, 44, 71-73, 78, 119, 121-130, 281
- Савоненкова Людмила Геннадиевна - РИ с 1973; с 1993 - лаб. / 79
- Савопуло Михаил Леонидович - РИ с 1973; с 1985 - зам. нач. отд.; с 1992 - дир. НПП КИРСИ / 33, 50, 171, 313
- Савченков Юрий Сергеевич - РИ: 1972- 1997; с 1984 - инж. / 76, 78
- Самарцева Анна Георгиевна (1899-1972) - РИ: 1930-1972; 1934-1972 - снс; кхн. Гос. премия, именная премия СМ СССР. Ордена Трудового Красного Знамени, "Знак Почета" (2), медали / 12, 16, 65, 68, 69, 107, 108, 113, 311
- Самойлов Николай Андреевич - РИ с 1962 - мнс, с 1980 - ст. инж. / 135
- Саидгареев Венир Муфасимович - РИ с 1977 - инж. / 166, 186
- Сапрыкин Владимир Филиппович - РИ с 1968; с 1992 - снс.; с 1994 - нач. лаб. / 32, 37, 44, 46
- Селезнев Бронислав Константинович - РИ с 1965; 1968-1974 - гл. инж. ускорителя; с 1974 - ст. инж. / 166
- Селезнев Евгений Викторович - РИ с 1976; с 1979 - мнс; с 1992 - НПП КИРСИ / 171
- Селицкий Юрий Аркадьевич (1929-1992) - РИ: 1954-1992; 1986-1991 - внс; с 1991 - нач. лаб.; дфмн / 145, 152, 153, 165, 169, 184, 191, 193, 223, 261
- Сергеев Борис Васильевич - РИ: 1960-1996 - механик, лаборант / 78
- Серый Александр Пантелеевич - РИ с 1963; с 1971 - инж. / 135

- Силин Юрий Иванович - РИ: 1957-1990; с 1958 - мнс. Орден Отеч. войны, медали / 126, 127
- Симоняк Зинаида Николаевна - РИ с 1960 - мнс; кхн / 42, 83, 84, 92, 93
- Синеева Галина Павловна - РИ: 1953-1995; 1960-1995 - мнс, инж. / 29
- Синицына Галина Сергеевна - РИ с 1946; 1956-1962 - ученый секретарь; 1962 - 1989 - зам. дир. по науке; с 1989 - снс; кхн. Именная премия СМ СССР. Ордена Октябрьской Революции, Трудового Красного Знамени, Отеч. войны / 7, 8, 14, 65, 68, 69, 72, 78, 113, 116, 127, 130, 134, 142, 143, 160, 303, 311-313
- Скирда Николай Васильевич - РИ с 1956; 1977-1988 - зав. лаб.; с 1989 - снс; кфмн / 71, 78, 126, 203
- Сковородкин Николай Витальевич - РИ с 1962; с 1975 - снс; кхн. Гос. премия / 73, 75, 76, 78, 242
- Скоробогатов Альберт Николаевич - РИ: 1953-1995 - шофер, столяр. Орден Трудовой славы / 78
- Смирнов Андрей Николаевич - РИ с 1973; с 1988 - снс; кфмн / 169, 185, 187, 191, 194, 244
- Смирнов Валерий Александрович - РИ с 1963; 1982-1986 - снс; с 1995 - нач. лаб. / 78, 96, 106, 124
- Смирнов Василий Васильевич - РИ с 1952; 1984-1995 - нач. отд.; с 1995 нач. отд. НПП КИРСИ; дфмн, проф. / 65, 69, 162, 170, 171, 204, 230, 232, 235, 236, 311
- Смирнова Елена Александровна - РИ с 1953; с 1993 - внс; дхн. Медаль "За трудовую доблесть" / 7, 73, 79, 110, 124, 130, 131
- Смирнова Валентина Васильевна - РИ с 1962; с 1994 - инж. / 78, 79
- Соколов Александр Меркурьевич (1924-1995) - РИ: 1946-1994; с 1971 - слесарь, механик. Ордена "Знак Почета". Отеч. войны (2), медали / 68-70, 166, 240, 242
- Соколов Вячеслав Александрович - РИ с 1960; с 1994 - нач. отд. / 73, 78, 124, 126, 128, 133, 151, 152
- Соколов Игорь Александрович - РИ: 1967-1992; 1988-1992 - нач. лаб. / 78, 124
- Соколова (Кочикович) Римма Ильинична - РИ: 1947-1971 - лаборант / 79
- Солин Леонид Михайлович - РИ с 1970; с 1992 - нач. лаб.; кфмн / 133, 153, 162, 170, 222, 223
- Солнцева Лидия Федоровна - РИ с 1962; с 1965 - мнс, инж. / 104
- Солнцева Людмила Викторовна (1931-1995) - РИ: 1963-1992 - мнс; кхн / 115
- Соловьев Сергей Михайлович - РИ с 1953; с 1989 - внс; кфмн / 65, 138, 165, 185, 191, 193, 194, 238, 240, 242, 243, 249, 263
- Соловьева Зоя Ивановна (1924-1995) - РИ: 1950-1994; 1961-1994 - снс; кфмн / 207, 210, 211, 213
- Соломенцев Рудольф Александрович - РИ: 1963-1992; с 1964 - инж. / 223
- Солощенко Павел Степанович - РИ: 1968-1993; 1986-1993 - нс / 155, 239, 240, 242, 249, 263
- Сорокина Анна Викентьевна - РИ: 1945-1984; 1958-1979 - снс; кфмн. Гос. премия. Орден "Знак Почета" / 65, 66, 68, 69, 240, 242
- Старик Иосиф Евсеевич (1902-1964) - Чл.-корр. АН СССР. Засл. деят. науки и техники. РИ: 1924-1964; 1946-1963 - зам. дир. по науке и зав. геохим.отд. Премии: Гос. (3), именная СМ СССР. Ордена Ленина (3), Трудового Красного Знамени (2), "Знак Почета", медали. Спец. награды СМ СССР / 22, 23, 25, 65, 68-71, 82, 83, 86, 112, 118-121, 131, 216, 220, 221, 310-313
- Старченко Вадим Александрович - РИ с 1969; с 1996 - зам. дир. отделения. Орден "Знак Почета" / 32, 35, 38, 40, 41, 46, 58, 111
- Стацевич Василий Петрович - РИ: 1962-1993; 1980-1986 - нач. гр.; кхн / 70, 75, 78
- Степанов Александр Васильевич - РИ с 1960; с 1974 - нач. лаб.; дхн / 44, 78, 96, 102-105, 114, 145, 254, 311
- Степанов Андрей Владимирович - РИ с 1972; с 1992 - снс. Медаль к ордену "За заслуги перед Отечеством" / 42, 87, 88, 90, 91
- Степанова Лидия Николаевна - РИ с 1950; с 1993 - зам. нач. отд. / 7, 29, 30, 113, 309
- Стерлядкин Виктор Константинович - РИ: 1962-1982 - лаборант / 78
- Стовбур Виктор Иосифович - РИ с 1972; 1981-1994 - зам. нач. отд.; с 1994 - дир. АТЦ РИ; ктн / 104
- Стрелков Сергей Александрович - РИ с 1974; с 1990 - снс / 100, 113, 147, 154, 311
- Стрельников Александр Васильевич - РИ с 1973; с 1995 - снс / 93
- Стрижов Станислав Григорьевич - РИ с 1968; 1971-1982 - нач. участка / 37
- Струков Виктор Николаевич - РИ с 1977 - инж. / 42, 91
- Суглобов Дмитрий Николаевич - РИ с 1958; 1973-1991 - зав. лаб.; с 1991 - нач. сектора.; дхн, проф. Премии: Гос., им. В. Г. Хлопина / 7, 84, 107, 110, 111, 115, 116, 118
- Суров Николай Андреевич - РИ с 1956 - слесарь. Орден Дружбы народов / 151, 160
- Сусленко Валентин Константинович - РИ с 1960; 1994-1996 - внс; с 1996 - инж. МПП КИРСИ / 212
- Сусорова Нина Александровна - см. Павлова Н.А.
- Суханова Ирина Викторовна - РИ с 1972; 1972-1993 - лаб. / 79
- Суходолов Геннадий Михайлович (1931-1979) - РИ: 1957-1979; с 1972 - снс; кхн / 113, 145
- Сысоева Людмила Николаевна - РИ с 1963 - мнс, инж. / 78

Сытник Леонид Васильевич - РИ с 1973; с 1989 - снс; ктн / 33, 99

Т

- Таразевич Антон Иванович - РИ с 1966; с 1983 - механик / 223
 Тарлер Борис Иосифович - РИ: 1959-1995; 1969-1987 - инж. / 78
 Терин Владимир Николаевич (1927-1988) - РИ: 1957-1988; 1962-1976 - мнс; с 1977 - зам. нач. отд. / 135, 142
 Тетерин Евгений Дмитриевич (1921-1989) - РИ: 1954-1989; 1954-1986 - мнс / 222
 Тетервин Георгий Константинович - РИ: 1954-1985 - лаборант / 78, 106
 Титов Никифор Емельянович - РИ: 1937-1971; 1962-1970 - снс; кфмн. Медаль "За трудовую доблесть" / 204
 Титов Сергей Леонидович - РИ с 1973; 1973 - 1991 мнс; с 1991 - зам. нач. отд. / 32
 Тихонов Николай Сергеевич - РИ: 1964-1984; 1974-1984 - снс, нач. бюро; ктн / 32, 35, 42, 110
 Тишков Виктор Павлович - РИ с 1972; с 1987 - нач. лаб.; ктн / 39, 44, 81, 87-93, 285
 Тишкова Наталия Анатольевна - РИ с 1975; с 1992 - ис / 91, 92
 Толмачев Георгий (Юрий) Маркианович (1905-1992) - РИ: 1938-1991; 1952-1986 - зав. лаб.; дхн. Гос. премия. Ордена Трудового Красного Знамени, "Знак Почета", медали / 63, 65, 67-71, 103, 116, 184, 312
 Трейман Геннадий Оскарович - РИ: 1963-1992; 1983-1992 - нач. лаб.; ктн / 138, 160
 Треушанко Владимир Александрович - РИ с 1977 - мнс; с 1990 - снс; кхн / 36
 Трифонов Виктор Анатольевич - РИ с 1976; с 1996 - в. инж. / 79, 131
 Трофименко Александр Васильевич - РИ с 1977; с 1989 - снс; кхн / 42, 94, 95
 Трофимов Александр Матвеевич (1913-1981) - РИ: 1948-1981; 1951-1959 - ученый секретарь РИ; 1959-1981 - зав. лаб.; кхн. Премия СМ СССР. Медали "За трудовую доблесть" (2) / 16, 29, 35, 44, 72, 78, 109, 113
 Туз Владимир Трофимович (1947-1986) - РИ: 1970-1986; 1972-1986 - мнс / 241
 Турбанов Юрий Павлович - РИ: 1966-1994; 1974-1984 - нач. НИОС / 158, 159
 Тутин Геннадий Александрович - РИ с 1968; с 1989 - внс; кфмн / 168, 169, 187, 192, 193, 244
 Тутов Анатолий Григорьевич - РИ с 1974 - снс; кхн / 94
 Тюрин Григорий Петрович - РИ с 1976 - ст. инж. / 186
 Тютюгин Игорь Ильич - РИ: 1962-1994; 1972-1994 - снс; кфмн / 78, 240, 275

У

- Усачев Владимир Николаевич - РИ с 1954 - мнс, ст. инж., инж. / 32, 33, 101, 110
 Усачева Нина Тарасовна - РИ с 1964 - мнс; с 1986 - инж. / 155
 Усиков Борис Серафимович - РИ с 1963; 1981-1992 - нач. гр.; с 1992 - в. инж. / 78
 Устинов Вячеслав Алексеевич - РИ с 1963; 1974-1982 - зам. зав. лаб. / 138, 139
 Ушатский Вячеслав Николаевич - РИ с 1945; 1957-1986 - зав. лаб.; 1986-1991 - внс, снс, дхн. Гос. премия. Ордена Отеч. войны (3), Красной Звезды, Трудового Красного Знамени, медали. / 63, 65, 66, 68-72, 78, 103, 116, 123, 184

Ф

- Фаддеев Станислав Леонидович - РИ с 1954; 1965-1990 - зам. дир. по науке; с 1991 - внс; кхн. Орден Трудового Красного Знамени, медали / 7, 113, 133, 135, 142, 159, 160, 303
 Фатеев Валерий Федорович - РИ с 1961; 1989-1990 - зам. нач. отд.; с 1992 - в. инж. / 135
 Фатеева Эмма Семеновна - РИ: 1964-1990; 1973-1990 - мнс / 135
 Федоров Владимир Викторович - РИ с 1956; 1973-1996 - нач. отд.; с 1996 - дир. отделения; ктн. Орден Трудового Красного Знамени / 133, 135, 137, 142, 143, 145, 159, 160, 311
 Федоров Юрий Степанович - РИ с 1977; с 1993 - внс; кхн / 40, 99, 111
 Федотов Павел Иванович - РИ с 1954; с 1973 - нач. лаб.; дфмн, проф. Орден "Знак Почета" / 7, 35, 44, 155, 206, 211, 238, 243, 252, 253, 259, 260, 270, 273, 311
 Федяева Татьяна Михайловна - РИ с 1964; с 1966 - ст. лаб. / 155
 Феофилов Олег Григорьевич - РИ: 1954-1991; 1982-1987 - нач. гр. / 135, 142
 Филатенков Анатолий Артемьевич - РИ с 1970; с 1989 - снс; кфмн / 166

Филатова Г. В. - см. Яковлева Г. В.

Филиппов Михаил Семенович - РИ: 1946-1960 - мнс; 1968-1979 - снс; кгмн. Медаль "За трудовое отличие" и др. / 121, 122

Фирсанов Гурий Анатольевич - РИ с 1970; 1980-1990 - нач. гр. / 105

Фицук Лариса Борисовна - РИ с 1974 - лаб., техник / 36

Флегонтов Владимир Михайлович - РИ с 1962; 1974-1984 - нач. РМС; с 1988 - зам. нач. отд. / 78, 87, 89

Фомичев Александр Васильевич - РИ с 1971; с 1990 - снс; кфмн / 166, 186, 187, 198

Фридкин Александр Михайлович - РИ: 1975-1994; 1989-1994 - снс; кхн / 103

Фугель Олег Владимирович - РИ: 1970-1992 - инж., лаб. / 260

Фунштейн Борис Лазаревич (1910-1968) - РИ: 1946-1968 - мнс. Именная премия СМ СССР / 19

Фунштейн Вадим Борисович - РИ: 1967-1994; 1993-1994 - снс; кфмн / 153, 165, 184, 223, 261

Х

Хлебников Сергей Васильевич - РИ с 1973; с 1989 - снс; кфмн / 171, 184, 186, 261

Хлопин Виталий Григорьевич (1890-1950) - академик АН СССР. Герой Соц. Труда. Один из основателей радиевой промышленности СССР и Радиового института. РИ: 1922-1950; 1922-1939 - зам. дир. по науке, с 1939 - дир. РИ. Гос. премия (3), именная премия СМ СССР. Ордена Ленина (3); спец. награды СМ СССР / 8-12, 14-17, 19, 20, 22, 23, 25, 27, 42, 63, 65, 82, 107-109, 113, 119-122, 164, 165, 173, 183, 187-189, 202, 216, 217, 221, 310-313

Хольнов Юрий Васильевич - РИ: 1953-1981; 1963-1981 - зав. лаб.; кфмн / 135, 155, 156, 236, 269, 272

Хормушко Сергей Петрович (1908 -1987) - РИ: 1947-1978; 1958-1974 - снс.; кфмн. Именная премия СМ СССР. Орден "Знак Почета" / 145

Хохлова Зинаида Сергеевна - РИ: 1947-1982; 1963-1974 - снс; кфмн / 203

Храмов Николай Николаевич - РИ с 1964; с 1978- снс; кхн / 79

Ц

Царегородцева Людмила Ивановна - РИ с 1971 - лаборант, техник / 210

Цариковская Ирина Михайловна - РИ: 1956-1990; 1963-1974 - ученый секретарь, с 1974 - мнс / 78, 313

Царицына Людмила Геннадиевна - РИ с 1965; с 1975 - снс; кхн. Медаль "За трудовое отличие" / 205, 307, 308

Цветков Олег Сергеевич - РИ с 1959; с 1971 - снс; кхн / 87, 89, 90, 92, 93, 117, 137, 138

Цирлин Владимир Абрамович - РИ с 1969; с 1989 - нс / 145, 152

Цовбун Яков Минович - РИ: 1950-1993; с 1965 - мнс, инж. / 71, 78

Ч

Чайхорский Аббас Аббасович - РИ: 1955-1986; 1961-1983 - снс; кхн. Ордена Отеч. войны, Красной Звезды, Славы 3 степ., медали / 115, 137, 145

Чеплагина Ольга Валентиновна - РИ с 1977; с 1983 - инж. / 79

Червяков Борис Алексеевич - РИ: 1972-1994; с 1991- снс; ктн / 147, 313

Червяков Владимир Иванович - РИ: 1967-1996; с 1973 - нач. ИВЦ. Медаль "За трудовую доблесть" / 306

Черезов Николай Константинович - РИ с 1968; 1990-1996 - внс; с 1997 - в. инж. КИПиА; кхн / 140, 156, 157

Черешкевич Юрий Львович - РИ: 1968-1992; 1986-1992 - нс / 155, 270

Чернаенко Лев Михайлович - РИ: 1972-1994; 1990-1994 - снс; ктн / 137

Чернышев Валентин Иванович - РИ с 1972 - лаборант / 78

Чернышева Любовь Павловна - РИ: 1951-1976 - мнс / 79

Чернявская Наталья Борисовна - РИ: 1952-1993; 1961-1983 - снс; кхн / 79, 108, 113

Чечев Валерий Павлович - РИ с 1964; с 1993 - нач. лаб. - дир. центра радионуклидных данных.; кфмн / 133, 155-157, 160, 215, 269, 270, 272

Чубаров Игорь Владимирович - РИ с 1973; с 1994 - в.инж. / 78, 152

Чубаров Михаил Николаевич - РИ с 1960; 1984-1992 - нач. лаб.; с 1992 ППО КИРСИ.; кфмн / 106, 171, 236

Чугунов Анатолий Анатольевич - РИ: 1953-1987; 1972-1979 - ст. инж. / 78

Чудновская Галина Павловна - РИ с 1972; с 1995 - нс / 115

Ш

- Шагин Борис Олегович - РИ с 1966; с 1993 - в. инж. / 73, 76, 78
 Шамсутдинов Вадим Андреевич - РИ: 1960-1996 - лаборант / 78
 Шаргаева Зинаида Александровна - РИ с 1968; с 1973 - лаборант / 79
 Шац Минна Максовна - РИ: 1947-1975; 1961-1975 - снс; кхн. Именная премия СМ СССР / 22
 Шашуков Евгений Алексеевич - РИ с 1957; с 1986 - нач. отд.; кхн. Медаль "За трудовую доблесть" / 7, 8, 14, 29, 30, 35, 44, 93, 102, 113, 312, 313
 Шведов Владимир Петрович - РИ: 1940-1947; 1952-1963; 1953-1963 - зав. лаб.; дхн, проф. Ордена Трудового Красного Знамени, "Знак Почета", медали / 87, 88
 Шейдина Лия Давыдовна - РИ: 1946- 1976; 1960-1976 - снс; кхн / 112
 Шереметьев Александр Константинович - РИ: 1967-1996; 1979-1996 - снс; ктн / 260
 Шестаков Анатолий Дмитриевич - РИ: 1964-1991; 1975-1991 - снс; кхн / 148, 150
 Шестаков Бронислав Иванович - РИ с 1953; 1974-1984 - снс; с 1992 - инж. / 113, 116, 133, 145
 Шестакова (Эфрос) Ида Айзиковна (1921-1990) - РИ: 1948-1983; 1969-1974 - снс; кхн / 134, 145, 160
 Шигаев Олег Евгеньевич - РИ с 1964; 1987-1995 - зав. лаб.; с 1995 - снс; кфмн / 194, 195, 261, 262
 Шилов Александр Алексеевич - РИ: 1963-1989 - механик, лаборант / 78
 Шильников Александр Юрьевич - РИ с 1975; с 1996 - снс НТЦ "Новые технологии" / 100, 294, 298, 299
 Шиманская Наталия Станиславовна - РИ: 1946-1986; 1958-1979 - снс; кфмн. Именная премия СМ СССР / 23, 65, 68, 145
 Ширвинский Евгений Викторович (1930 - 1997) - РИ: 1954-1995; 1977-1990 - нач. лаб. Медаль "За доблестный труд" / 79
 Ширяев Борис Михайлович - РИ с 1952; 1963-1987 - мнс; кфмн. Орден "Знак Почета", медали / 65, 165, 166, 185, 187, 193
 Ширяева Лидия Владимировна - РИ: 1950-1994; 1958-1986 - мнс. Медаль "За трудовую доблесть" / 65, 68, 69
 Шишкин Дмитрий Николаевич - РИ с 1972; с 1993 - снс; кхн / 42
 Шлямин Эдуард Александрович - РИ: 1953-1994; 1967-1994 - снс; кфмн / 78, 240
 Шпаков Владимир Иванович - РИ с 1953; с 1969 - снс; кфмн / 78, 153, 166, 186, 238
 Шпунт Алевтина Захаровна - РИ: 1961-1990; с 1968 - инж. / 78
 Шпунт Лев Борисович - РИ с 1960; 1991-1996 - нач. отд.; с 1996 - дир. НТЦ "Новые технологии"; кхн. Гос. премия / 32-35, 37, 44, 47, 48, 50, 51, 110, 287, 291, 294, 298, 299, 311
 Шувалов Олег Николаевич (1931-1995) - РИ: 1955-1988; 1969- 1986 - снс; кхн / 32, 33, 42, 110
 Шумков Валентин Георгиевич (1931-1995) - РИ: 1955-1995; 1973-1995 - зав. лаб.; кхн / 32, 35, 48, 53, 110, 113, 135, 136, 145, 159, 160
 Шур Лидия Ивановна - РИ: 1947-1986; с 1963-1981 - снс, нач. гр.; кхн / 155, 204, 270

Щ

- Щебетковский Виктор Николаевич (1933-1988) - РИ: 1958-1988; 1978-1988 - нач. лаб.; кхн / 44, 93, 112
 Щепетильников Николай Николаевич - РИ: 1956-1988; с 1971 - снс; кхн / 32, 33, 42, 48, 110, 311
 Щепетильникова Наталья Владимировна - РИ: 1970-1993 - лаб., техник / 78
 Щербаков Вадим Алексеевич - РИ с 1955; с 1992 - рук. гр.; кхн / 101, 114
 Щукин Герман Евгеньевич - РИ с 1957; 1981-1993 - снс; кфмн / 135, 138, 155-157, 159, 270

Э

- Эйсмонт Вилен Павлович - РИ с 1953; 1977-1990 - нач. лаб.; с 1996 - дир. отделения; дфмн, проф. Медаль "За трудовую доблесть" / 162, 165, 167, 168, 184, 185, 187, 198, 244, 286, 310
 Эпштейн Аркадий Миронович - РИ с 1969; 1991-1995 - зам. гл. инж.; с 1996 дир. ИТЦ / 78, 313
 Эфрос И.А. - см. Шестакова И.А.

Я

- Ядринцев Валерий Борисович - РИ с 1947; с 1982 - ст. инж. / 65, 68, 69, 137

- Яковлев Владимир Андреевич (1907-1977) - РИ: 1941-1977; 1954-1973 - снс; кфмн. Премии: Гос. , имен-
ная СМ СССР. Орден Трудового Красного Знамени, медали /65, 68, 69, 153 , 223, 242
- Яковлев Константин Иванович - РИ с 1948; с 1964 - мнс, с 1983 - инж. / 155, 269
- Яковлев Роберт Михайлович - РИ: 1958-1994; 1972-1990 - снс; кфмн / 195, 203, 212, 214, 263
- Яковлева Галина Валентиновна (1930-1987) - РИ: 1953-1987; 1963-1986 - снс; кфмн / 65, 68, 69, 73, 78,
124
- Яковлева Лидия Александровна - РИ: 1976-1996 - мнс, нс / 150
- Якунин Михаил Иванович (1911-1984) - РИ: 1945-1984; с 1964 - снс; кфмн. Именная премия СМ СССР.
Орден Красной Звезды, медали / 16, 22, 65, 79, 117
- Ясновицкая Алина Леонидовна - РИ с 1961; с 1963 - мнс / 32

Именной указатель подготовлен Н. А. Абрамовой, А. М. Бежик, А. Я. Гиляновым и В. Н. Ушатским. Группа благодарит сотрудников отдела кадров С. А. Кораблеву, Н. И. Крылову, Е. Н. Белякову и сотрудников группы фондов В. А. Киссель и Т. М. Чекалову за активную помощь в работе.

СОДЕРЖАНИЕ

Из предисловия к сборнику “Радиевый институт им. В. Г. Хлопина. К 50-летию со дня основания”	5
Атом-пресса (Извещение)	5
Предисловие	6
Основание Радиевого института и начальные этапы его деятельности. <i>Е. А. Шашуков, Г. С. Синицына, С. В. Бутomo</i>	8
Радиохимическая технология	13
Введение. <i>Л. Н. Лазарев</i>	13
Технология для военных заводов	14
Создание первой советской технологии выделения плутония из облучен- ного урана. <i>Е. И. Ильенко, Н. А. Абрамова</i>	14
Совершенствование осадительной технологии выделения плутония и внедрение анионообменного аффинажа. <i>Е. И. Ильенко, Л. Н. Лазарев</i>	26
Внедрение экстракционной технологии. <i>Л. Н. Лазарев</i>	31
Небольшое послесловие. <i>Е. И. Ильенко</i>	34
Переработка ядерного топлива энергетических реакторов. <i>Л. Н. Лазарев</i>	35
Разработка технологии завода РТ-2	35
Совершенствование технологии обращения с радиоактивными отходами и обеспечение экологической безопасности производств	38
Развитие структуры института и организация технологических исследова- ний	42
Международное сотрудничество	45
Заключение	46
Некоторые работы в области радиохимической технологии	47
Особенности экстракционного процесса в технологии переработки облу- ченного урана, зависящие от аппаратурного оформления. <i>Л. Б. Шпунт</i>	47
Окислительное растворение металлического плутония и его окисленных форм. <i>Г. П. Никитина</i>	53
Разработка методов нестационарного электролиза для стабилизации ва- лентных форм актинидов. <i>Г. В. Алексенко, В. Г. Васильев, Б. Я. Галкин, В. Н. Романовский, В. А. Старченко</i>	58

Участие в ядерно-взрывных программах СССР. В. Н. Ушатский, Ю. В. Дубасов . . .	63
Разработка радиохимического метода определения коэффициента полезного использования атомного горючего (КПИ) при ядерных взрывах. .	63
Участие в ядерных испытаниях 1949-1962 гг.	67
Подземные ядерные взрывы	71
Радиохимия окружающей среды, обращение с радиоактивными отходами.	
Ю. В. Кузнецов, В. К. Легин, А. С. Алой, В. П. Тишков	81
Радиохимия окружающей среды	81
Обращение с радиоактивными отходами	93
Аналитическая химия. А. В. Степанов.	96
Фундаментальная радиохимия. Д. Н. Суглобов	107
Геохимические исследования. Е. Б. Андерсон, В. Г. Савоненков	119
Геохимия радиоактивных элементов и ядерная геохронология	120
Подземные ядерные взрывы	122
Проблемы захоронения радиоактивных отходов	127
Работы на Чернобыльской АЭС	129
Радионуклиды и изделия из них для науки, техники, медицины. С. А. Барте-нев, М. П. Зыков, А. Г. Кавецкий и др.	133
Введение	133
Радионуклидные источники излучений	133
Радионуклидные источники тепла	136
Радиолюминесцентные источники света	138
Мессбауэровские источники и их практические приложения	139
Разработка технологий получения отдельных радионуклидов	141
Полоний-210	141
Получение и исследование актиния-227	142
Плутоний-238	145
Молибден-99	147
Меченные тритием биологически активные соединения	148
Ядерная медицина	151
Метрология радионуклидов и метрологическое обеспечение производства радионуклидной продукции	155
Работы по стандартизации радионуклидной продукции	158
Заключение	159
Ядерная физика	161
Физика, которая была, есть и будет (небольшое предисловие).	161
В. П. Эйсмонт	
Машинный век института. В. Д. Дмитриев, В. В. Смирнов, Л. М. Солин, В. П. Эйсмонт	162
Воспоминания о спектрометрах. Б. С. Джелепов	171
Деление при низких и средних энергиях. В. Д. Дмитриев	183
Деление и модели ядер. В. П. Эйсмонт	187
Деление ядер при высоких энергиях возбуждения. Б. Н. Беляев, В. Д. Домкин, А. И. Обухов, О. Е. Шигаев	194
Высокоэнергетические ядерные процессы. О. В. Ложкин	202
Ядерная астрофизика в Радиовом институте. Я. М. Крамаровский, П. Чечев	215
Ядерные реакции при низких энергиях. Л. М. Солин	222
Распыление-десорбция ультрадисперсных мишеней ионами за счет неупругих взаимодействий. И. А. Баранов	225
Теоретические исследования атомных ядер. В. А. Рубчяня, С. Г. Явшин	226
Научные основы дозиметрии ионизирующих излучений. В. В. Смирнов	230

Ядерные данные при низких энергиях. <i>Л. В. Дранчинский</i>	237
Ядерные данные для промежуточных энергий. <i>М. А. Михайлова,</i> <i>А. А. Носов, В. П. Приходцева и др.</i>	244
Заключение	248
Разработка методов изготовления и калибровки мишеней из делящихся нук- лидов. <i>С. М. Соловьев</i>	249
Разработка неразрушающих методов анализа состава топлива атомных реак- торов. <i>П. И. Федотов</i>	252
Твердотельные трековые детекторы и их применения. <i>В. А. Николаев</i>	260
Магнитная альфа-спектроскопия. <i>Р. Б. Иванов</i>	265
Прикладная ядерная спектроскопия в Радиевом институте в 60-е - 70-е годы. <i>В. П. Чечев</i>	269
Ликвидация последствий аварии на Чернобыльской АЭС. <i>Е. Б. Андерсон,</i> <i>Л. А. Плескачевский, А. А. Римский-Корсаков</i>	272
Физика, которая была, есть и будет (небольшое послесловие). <i>В. П. Эйсмонт</i>	285
Новые технологии	287
Введение. <i>Л. Б. Шпунт</i>	287
Ядерная энергетика на основе ториевого гомогенного реактора. <i>А. И. Карелин</i>	288
Упаковка высокоактивных отходов (ВАО) с использованием кварцевого стекла для длительного хранения с последующим захоронением. <i>А. И. Карелин, Л. Б. Шпунт</i>	291
Тетрафторид кремния - исходный материал для новых технологий. <i>Л. Б. Шпунт</i>	294
Разработка способов выделения и очистки редкоземельных элементов. <i>Г. П. Никитина</i>	298
Научно-техническая информация. <i>Е. И. Ильенко</i>	302
Об истории Радиевого института	310
Работы по истории Радиевого института. <i>Н. А. Абрамова</i>	310
Музей Радиевого института им. В. Г. Хлопина. <i>Е. А. Шашуков</i>	313
Сокращения	314
Именной указатель	317

**Радиевый институт им. В. Г. Хлопина
К 75-летию со дня основания**

Редакторы: Н. А. Степанова, О. Д. Федорова, Л. Г. Царицына
Компьютерное исполнение: М. В. Богданов
Корректор: Г. С. Александрова

Издательская лицензия
ЛР № 020735 от 1 марта 1993 г.

Заказ № 171.	30.04.1997 г.	Печать офсетная.	Формат бумаги 60x84 1/8
Усл. печ. л. 38.	Уч.-изд. л. 36.	Цена договорная	Тираж 1500 экз.

Отпечатано в типографии ПИЯФ РАН
188350, Гатчина, Орлова роща

Список замеченных ошибок

Стр.	Абзац, строки	Напечатано:	Следует читать:
7	последняя строка	О. Д. Федорова	О. Д. Федоровой
137	последняя строка	В. И. Ярошенко	В. И. Ярошинский
138	абз. 6, строка 3	Г. Я. Чепурнов	Г. Я. Чепурков
140	последняя строка	"...сотрудниками Радиевого института совместно с сотрудниками 1-го Ленинградского медицинского института им. акад. И. П. Павлова (Г. А. Овчинников, проф. Ю. С. Астахов...)"	"...сотрудниками Радиевого института Н. К. Черезовым, Б. И. Рогозовым, Ю. И. Беляевым, Г. А. Овчинниковым совместно с сотрудниками ЛМИ им. акад. И. П. Павлова проф. И. М. Беловым, проф. Ю. С. Астаховым, Б. И. Ржановым и др."
204	абз. 3, строка 5	И. В. Рыжова	И. В. Рыжкова
270	строка 5 сверху	Ю. Г. Егоров	Ю. С. Егоров
314	строка 13 сверху	институт промышленной технологии, Москва	и проектно-изыскательский институт промышленной технологии, Москва