

Т. Д. ИЛЬИНА

ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА В НАУКАХ О ЗЕМЛЕ

ИСТОРИЧЕСКИЙ ОЧЕРК

«НАУКА»

АКАДЕМИЯ НАУК СССР
ИНСТИТУТ ИСТОРИИ ЕСТЕСТВОЗНАНИЯ И ТЕХНИКИ

Т. Д. ИЛЬИНА

4999
6564

ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА В НАУКАХ О ЗЕМЛЕ

ИСТОРИЧЕСКИЙ ОЧЕРК

Ответственный редактор
академик М. А. САДОВСКИЙ



МОСКВА "НАУКА"
1988



Ядерная физика в науках о Земле: Исторический очерк / Т.Д. Ильина. — М.: Наука, 1988. — 259 с. — ISBN 5-02-2-000753-6

В книге впервые систематически изложена история формирования комплекса ядерно-физических наук о Земле, таких, как радиогеология, радиобальнеология, радиогидрогеология, ядерная геохронология, ядерная геофизика и ядерная гидрофизика. Показано, как с помощью этих новых наук решались и решаются сегодня не только некоторые практические задачи, но и разрабатываются фундаментальные вопросы геологических процессов и их взаимосвязи. В книге выделены приоритетные работы русских и советских ученых.

Для научных работников, геологов, геофизиков, историков науки.

Табл. 13. Ил. 45. Библиогр.: 501 назв.

Рецензенты:

Г.И. Войтов, Ю.А. Сурков, Ю.И. Лисневский

И 1903010000-280 170-88—III
042(02)-88

©Издательство "Наука", 1988

ISBN 5-02-000753-6

ОТ РЕДАКТОРА

В предлагаемой книге впервые показана история формирования комплекса прикладных геофизических наук, возникших в результате применения достижений ядерной физики как одной из фундаментальных наук. История создания этих новых наук свидетельствует о возможностях широкого использования фундаментальных наук при решении многих глобальных и конкретных практических задач геологии, геохимии и геофизики.

В книге на большом историческом материале показано формирование радиогеологии, радиобальнеологии, ядерной геохронологии, радиогидрогеологии, ядерной геофизики и ядерной гидрофизики, изучающих перемещение радиоактивных элементов в земной коре, круговорот воды на планете, возраст природных образований и геологических формаций. Автору удалось показать, что количественные данные, получаемые с помощью новых ядерно-физических методов, дают возможность по-новому подойти и к пониманию процессов развития Земли, изучению состояния и эволюции земного вещества.

Фактические данные, собранные и систематизированные автором, убедительно свидетельствуют о взаимосвязи всех природных процессов, о всеобщем значении даже локальных загрязнений природных вод суши и Мирового океана различными техногенными радионуклидами, в том числе осколками испытаний ядерного оружия и отходами атомных производств. Эти исторические сведения помогают оценить последствия распространения радиоактивного выброса радионуклидов в любом регионе планеты и последующего глобального распространения радиоактивного загрязнения Земли, опасного для жизни человека и всей биосферы.

На общем фоне развития той или иной прикладной области автор приводит сведения о многих почти забытых приоритетных работах русских и советских ученых, об их неудачах и поисках новых организационных форм научных исследований, которые не потеряли своей актуальности и ныне. Знакомство с историей формирования прикладных ядерно-физических наук о Земле представит интерес не только для специалистов, занимающихся изучением природных процессов, но и для молодежи, выбирающей направление своей будущей деятельности.

Академик М. А. Садовский

Открытие явления радиоактивности, по существу, было не только открытием физическим, но и открытием геологическим... Оно было основано в конце концов на изучении урановых минералов. Немедленно мир минералов был охвачен в этом направлении работой физиков, минералогов и химиков.

Академик *В. И. Вернадский*

ВВЕДЕНИЕ

Зарождение ядерной физики принято относить ко времени открытия явления радиоактивности урановых минералов, еще до установления факта существования атомного ядра. В первой трети XX в. раздел физики, посвященный изучению структуры атомного ядра, процессов радиоактивного распада и механизма ядерных реакций, принято было называть "радиоактивностью", термин "ядерная физика" вошел в обиход ученых только в 30-х годах [Гайсинский, 1973].

Применение ядерной физики в геологии и формирование новых прикладных ядерно-физических направлений в науках о Земле хронологически следуют за открытием явления радиоактивности урановых минералов и последующих исследований в области ядерной физики.

Всестороннее изучение явления самопроизвольного излучения некоторых минералов в физических и химических лабораториях на первом этапе развития ядерной физики привело к поискам радиоактивных минералов и руд. В результате проведенных с поисковыми целями обследований на радиоактивность горных пород, природных вод, почвы и воздуха уже в начале XX в. выявилась всеобщая распространенность радиоактивных элементов. А это обстоятельство, в свою очередь, привлекло внимание геологов и естествоиспытателей того времени к работам в области ядерной физики. Ученые стремились определить, при каких условиях и с какой скоростью происходит превращение одного радиоактивного элемента в другой, возможно ли сосуществование и накопление различных радиоактивных элементов в минералах в природных условиях и т.д.

Физико-химические исследования радиоактивных минералов и руд в конце XIX — начале XX в. проводились в небольших физических и химических лабораториях, впоследствии превратившихся в своего рода мировые научные центры в области ядерной физики. В таких лабораториях во Франции, Великобритании и других странах были выполнены первые основополагающие работы, которые оказали влияние на развитие новых ядерно-физических направлений в науках о Земле.

Первыми мировыми центрами по изучению радиоактивности были парижские лаборатории в Высшей политехнической школе, где А. Беккерель в 1896 г. открыл явление радиоактивности и продолжал исследования урановых минералов, и в Высшей школе физики и химии, где супруги Кюри изучали различные радиоактивные руды. В 1898 г.

М. Кюри, измеряя степень ионизации воздуха, возникающей под действием солей урана, обнаружила, что излучение солей урана прямо пропорционально количеству содержащегося в них урана, т.е. что радиоактивность — явление атомарное и не зависит от природы соединений урана [Skłodowska-Curie, 1898]. Отклонение от этого правила, по мнению М. Кюри, могло означать присутствие в минералах неизвестных высокоактивных смесей. Открытие новых радиоактивных элементов полностью подтвердило это предположение.

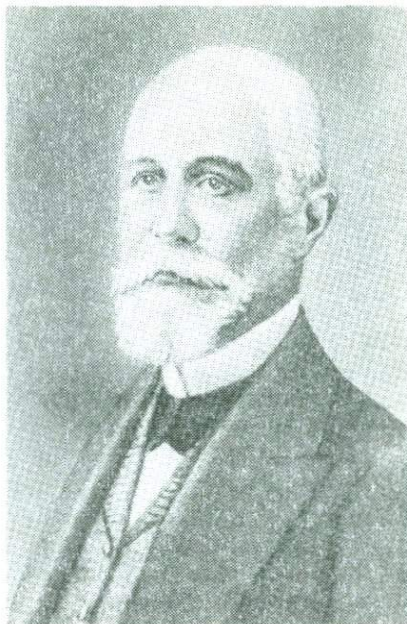
Измерения степени ионизации воздуха вблизи минералов дали возможность М. Кюри также обнаружить самопроизвольное излучение у тория и его соединений, впервые наблюдать радиоактивный газ — эманацию тория.

В том же 1898 г. последовало сообщение об открытии П. и М. Кюри нового радиоактивного вещества, содержавшегося в смоляной обманке и названного ими "полонием" по имени родины М. Кюри [Curie P., M^{me} Curie P., 1898]. При этом впервые открытие нового вещества было сделано не химическим путем, каким до того времени исследовались радиоактивные минералы, а, как подчеркивалось в статье, благодаря "новому способу исследования, который представляли радиоактивные лучи".

С этого времени ученые получили возможность исследовать вещества, содержащиеся в столь малых концентрациях, присутствующие в невидимых и невоспринимаемых количествах, при помощи измерений тока, вызванного действием радиоактивного излучения [Гайсинский, 1973]. Новый метод регистрации радиоактивных излучений оказался в миллионы раз более чувствительным, чем все известные в то время физические и химические методы [Там же. С. 72].

Принцип регистрации излучений радиоактивного элемента для обнаружения этого элемента, впервые примененный при открытии полония, в дальнейшем широко использовался в радиохимии, а также при поисках рассеянных радиоактивных элементов в рудах и минералах, а в настоящее время служит основой многих ядерно-физических методов разведки полезных ископаемых.

Используя новый прием, П. и М. Кюри в 1898 г. смогли выделить из отходов радиоактивных руд еще один элемент, названный ими радием [Curie P., Curie-Skłodowska M., Vemont G., 1898]. Определение физических свойств открытых элементов полония и радия, установ-



Антуан Анри Беккерель (1852—1908)



Пьер Кюри (1859—1906)

ление их атомных весов и места в периодической системе элементов заняло два года изнурительной работы по химической переработке урановых отходов [Curie P., Curie M., 1899]. В процессе этой работы было обнаружено явление наведенной активности. В дальнейшем способность неактивных веществ становиться активными широко использовалась в геофизической разведке полезных ископаемых, в частности при поисках руд, нефти и газа. Принцип наведенной активности широко используется и сейчас, например при дистанционных определениях литологического состава пластов геологического разреза глубоких нефтяных скважин, когда с помощью источника, смонтированного в скважинный прибор, производят

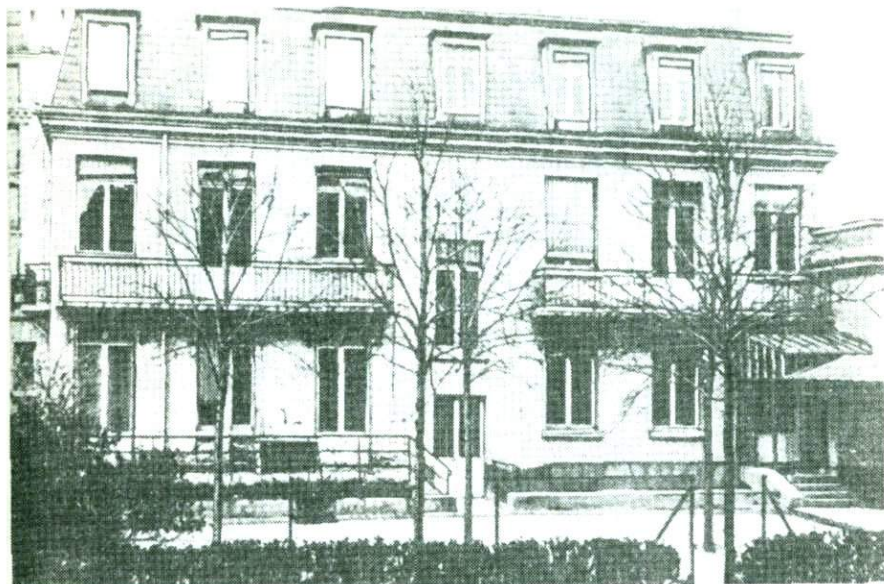
облучение стенок скважин и затем по реакции горной породы определяют ее состав.

После идентификации полония и радия — первых элементов в цепи радиоактивных веществ — в последующие 15 лет было открыто еще около четырех десятков радиоактивных веществ [Гайсинский, 1973].

Большое значение для развития ядерно-физических направлений в науках о Земле имели и другие основополагающие исследования свойств и характера радиоактивных излучений, выполненные П. и М. Кюри. Изучая независимость радиоактивного распада и постоянство его во времени, П. Кюри считал возможным использовать продукты распада в качестве меры абсолютного геологического времени — "радиоактивных геологических часов", учитывать тепло радиоактивного распада в общем тепловом балансе Земли и т.д.

В 1906 г. П. Кюри трагически погиб в уличной катастрофе. Исследования по радиоактивности в лаборатории возглавила М. Кюри¹. Она заменила мужа и на кафедре физики в Сорбонне. В первой вступительной лекции, прочитанной 5 ноября 1906 г., М. Кюри подвела итоги исследований в области радиоактивности и уделила внимание

¹ Лаборатории было присвоено сначала имя П. Кюри, а после смерти М. Кюри лаборатория стала называться просто "лаборатория Кюри". В 1912 г. французское правительство выделило специальные средства на строительство здания лаборатории, которое было закончено в 1914 г. С того времени почти три четверти века всемирно известная лаборатория находится на углу улиц Ульм и П. и М. Кюри в Париже.



Лаборатория П. и М. Кюри в Париже, 1920 г.

возможным приложениям полученных результатов в геологии. Она напомнила об идее Э. Резерфорда о непрерывности распада всей материи в природе. Поэтому для геологии должно возрастать значение теории радиоактивных превращений, что вызывает необходимость активно изучать состав горных пород и других природных образований. Изучение радиоактивности, по ее мнению, будет иметь всевозрастающее значение и для развития других наук.

В последующие годы под руководством М. Кюри продолжались интенсивные исследования радиоактивных элементов, производилась систематическая переработка руд с целью выявления новых радиоактивных элементов и выделения чистых препаратов. В 1910 г. М. Кюри и сотруднику лаборатории А. Дебьерну удалось из нескольких тонн урановых отходов выделить 2 мг вещества, содержавшего 0,1 мг чистого полония [Curie M., Debierne A., 1910a]. Они доказали, что из полония образуется гелий, а также впервые выделили чистый радий [Curie M., Debierne A., 1910b]. В 1911 г. по заданию Международного конгресса по радиоактивности и электричеству они изготовили первый международный эталон радия. В 20-х годах в лаборатории Кюри, помимо исследований природных соединений, начались работы по синтезу новых радиоактивных элементов, успешно развивающиеся в настоящее время во многих лабораториях по ядерной физике.

Почти одновременно с первыми исследованиями радиоактивности в лабораториях Франции, начал свои работы в этой области выдающийся физик Э. Резерфорд (1871—1937). Еще в 1897 г. он совместно с Дж.Дж. Томсоном изучал свойства ионов различного происхождения,



Андре Луи Дебьерн (1874—1949) в лаборатории П. и М. Кюри с остатками радиоактивных веществ для переработки, 1912 г.

в том числе, ионов, образующихся в результате самопроизвольного излучения урана. С 1898 г. он, работая в канадском университете Мак Гила в Монреале, уделял основное внимание исследованиям радиоактивных свойств урана, тория и других минералов. В этой лаборатории, работы которой финансировались без особых ограничений известным в то время миллионером Макдональдом, Э. Резерфорд еще в 1899 г. открыл неоднородность излучения урановых минералов [Rutherford, 1899]. Несколько позднее Э. Резерфорд и Ф. Содди открыли новый элемент торий-Х, являющийся промежуточным продуктом распада между торием и эманацией тория [Rutherford, Soddy, 1902a]. Тогда же они показали, что радиоактивность есть проявление внутриатомного превращения и поэтому может быть использована для наблюдений за химическими превращениями вещества. Это указание оказалось особенно важным для практических приложений ядерной физики, оно было замечено всеми химиками и физиками; об этой возможности говорила М. Кюри во вступительной лекции как о важнейшем этапе изучения радиоактивности.

Э. Резерфорд и Ф. Содди доказали, что эманация тория пред-

ставляет собой инертный газ, что с ураном и торием должен быть связан и другой инертный газ — гелий, редко встречающийся в земных условиях [Rutherford, Soddy, 1902b]. Проследив распад тория на несколько промежуточных элементов, они пришли к выводу, что конечным продуктом распада тория может быть стабильный элемент, оказавшийся, как известно, свинцом.

В 1903 г., последнем в их творческом содружестве, Э. Резерфорд и Ф. Содди усиленно занималась исследованиями урановых соединений, активностью радия и тория. Они определили период полураспада урана- X и скорость его накопления в чистом уране [Rutherford, Soddy, 1903a], провели сравнение активности радия и эманации радия, попытались обнаружить неизвестный элемент — продукт распада, промежуточный между



Эрнст Резерфорд (1871—1937)

радием и эманацией радия [Rutherford, Soddy, 1903b]. Тогда же они высказали предположение об образовании радия при распаде долгоживущих урана и тория, построили первые ряды радиового уранового и ториевого распада [Rutherford, Soddy, 1903c].

В 1905 г. Э. Резерфорд указал на возможность распада всех (а не только радиоактивных) материальных веществ, непрерывно происходящий в природе с ничтожной скоростью и не вызывающий сколько-нибудь заметных электрических и фотоэффектов [Rutherford, 1905]. В Манчестерской университетской физической лаборатории Э. Резерфорд в 1907 г., продолжая исследования причин самопроизвольного излучения некоторых минералов, провел ряд тонких наблюдений за поведением альфа- и бета-частиц (рис. 1). Совместно с Г. Гейгером они измерили заряд, переносимый альфа-частицами, и показали идентичность альфа-частицы дважды ионизированному атому инертного газа гелия, встречающегося в природных условиях [Rutherford, Geiger, 1908]. На основе проведенных экспериментов Э. Резерфорд сформулировал закон рассеяния альфа-частиц атомами различных элементов [Rutherford, 1911]. Изучение особенностей процесса альфа-излучения при прохождении через вещество дало основание Э. Резерфорду подойти к новому пониманию причин радиоактивного распада и предположить возможность существования атомного ядра. В этой статье он представил также теоретическую планетарную модель атома

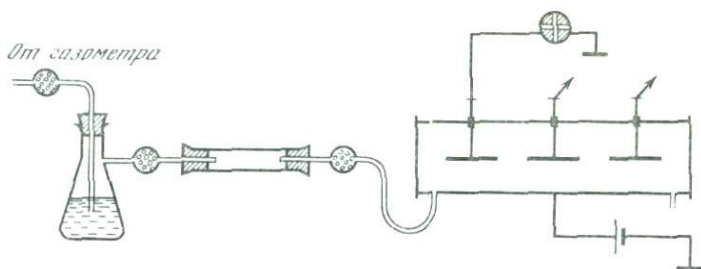


Рис. 1. Схема прибора Э. Резерфорда для регистрации эманыции тория

с центральным зарядом, сконцентрированным в малом объеме.

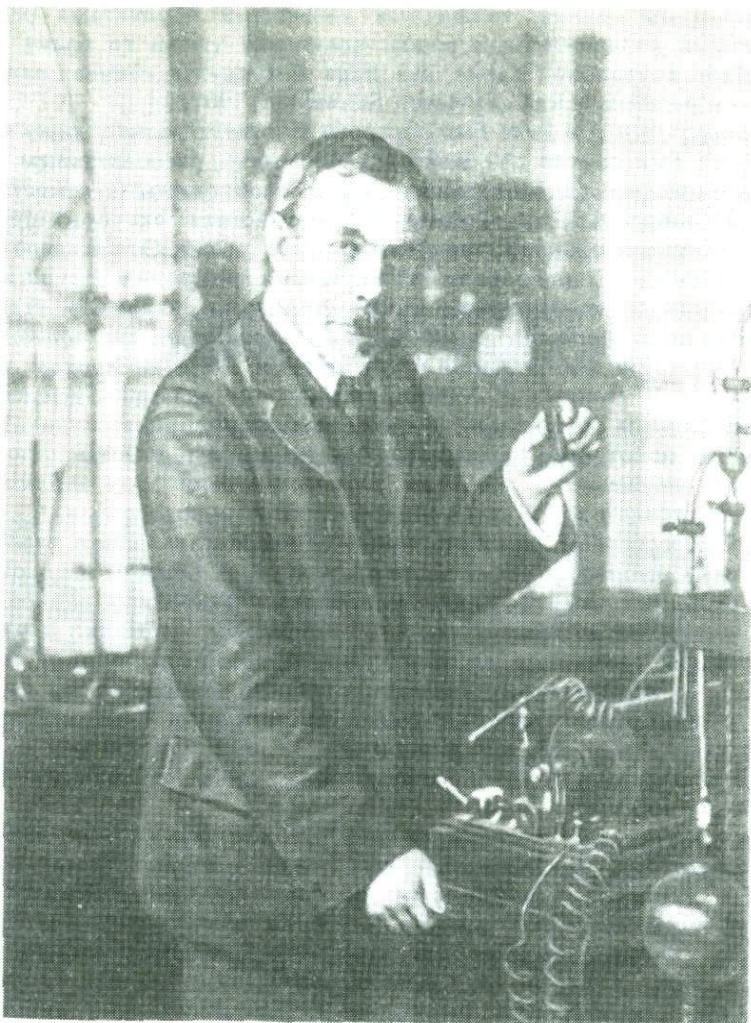
Теоретические работы Э. Резерфорда и Н. Бора по созданию модели атомного ядра объясняли накопленные факты и наблюдения. Они привели к признанию существования атомного ядра и явления радиоактивности (самопроизвольного непрерывного излучения) свойством ядра, что определило направление дальнейших исследований в области ядерной физики на качественно новом уровне.

Под руководством Э. Резерфорда в Манчестерской лаборатории работали многие выдающиеся физики и физикохимики мира: Г. Гейгер, Э. Марсден, Г. Мозли, Дж. Чэдвик и др. Из них 12 ученых стали лауреатами Нобелевской премии. Стажировались в лаборатории и русские физики В.А. Бородавский, Г.Н. Антонов, К.П. Яковлев.

К одним из первых научных центров в области ядерной физики относится и лаборатория Лондонского университета, в которой работал известный английский химик и физик У. Рамзай (1852—1916). К работам У. Рамзая, касающимся непосредственно геологических наук, следует отнести прежде всего доказательство в 1895 г. существования на Земле инертного газа гелия. Впоследствии во многих странах были организованы поиски гелия в природных условиях, начали работу геологические и радиологические экспедиции по изучению так называемого гелиевого дыхания Земли, разработаны гелиевые методы определения абсолютного возраста геологических образований и минералов.

У. Рамзай и переехавший в Лондон Ф. Содди в 1903 г. впервые наблюдали самопроизвольный распад радия (бромид радия) и эманыцию радия с образованием гелия [Ramsay, Soddy, 1903]. Исследования гелия и других инертных газов в Лондонской лаборатории дали возможность У. Рамзаю окончательно выяснить природу эманыции радия и связь гелия с радиоактивными изменениями [Соловьев, 1973]. В Лондонской лаборатории были сделаны многие важные открытия, в том числе, например, открытие О. Ганом в 1905 г. в минерале торияните нового радиоактивного элемента радиотория [Hahn, 1905].

Следует напомнить еще об одном крупном научном центре в области ядерной физики — Институте радия в Вене, оказавшем большое влияние на развитие исследований в этой области в разных странах. Еще до создания этого центра австрийские ученые



Уильям Рамзай (1852—1916) в лаборатории

Ст. Мейер и Э. Швейдлер начали исследования в Венской академии наук и Венском университете. В 1899 г. они обнаружили отклонение радиоактивного излучения в магнитном поле [Meyer, Schweidler, 1899]. После 1905 г., когда Венской академии наук удалось закупить 10 т радиоактивных отходов из рудника Иоachimовсталь, они начали поиски новых радиоактивных элементов. В 1906 г. они доказали существование элемента радия-Х в радиевом семействе и высказали предположение о возможности существования в природе тяжелых радиоактивных элементов с атомным весом 270 (уран-II) [Meyer, Schweidler, 1906]. Ст. Мейер и Э. Швейдлер показали также, что в природе существуют и, вероятно, еще могут быть обнаружены самые

разные типы свинца, являвшиеся конечными продуктами распада различных радиоактивных рядов, поскольку уже в то время были известны в урановой серии два вида Е-продукта свинца: радий-Е₁ (RaE₁) и радий-Е₂ (RaE₂) [Meyer, Schweidler, 1907].

В конце 1910 г. в Вене был построен Институт радия², директором которого был доктор Ст. Мейер. В Институте, располагавшем большими запасами радиоактивных руд и необходимыми средствами, начали проводиться исследования взаимодействия некоторых природных и других жидкостей с радиоактивными газами. Эти исследования были необходимы для понимания механизма миграции вод суши и других геологических процессов. Было установлено, например, что эманация актиния поглощается жидкостью, причем степень поглощения такая же, как и для эманации радия [Nevesy, 1911]. В Венском институте радия Ф. Панет и Д. Хевеши разработали принципы применения радиоактивных элементов в качестве своеобразных индикаторов за ходом некоторых химических процессов. Эти работы положили начало применению в геологии "меченых атомов" для наблюдений за продвижением вод и другими геологическими процессами.

К началу первой мировой войны в результате работ ученых в различных лабораториях и научных центрах в области ядерной физики были доказаны факты непрерывного превращения радиоактивных элементов в лабораторных и природных условиях. Доказано образование радия при распаде урана, образование гелия и свинца различного изотопного состава как конечных продуктов при распаде всех радиоактивных рядов. Это дало возможность в дальнейшем по присутствию того или иного продукта распада или изотопа определять принадлежность его к определенному ранее прошедшему геологическому процессу.

Систематическое изучение изотопного состава горных пород и природных вод, выявление ядерных реакций, происходящих в природных условиях, а также изучение распространения естественных и искусственных радионуклидов в земной коре и Мировом океане привели к формированию таких быстроразвивающихся специализированных наук о Земле, как радиогидрогеология, ядерная геофизика и ядерная гидрофизика. Исследования процессов радиоактивного распада и установление постоянства некоторых соотношений между материнскими и дочерними продуктами распада создали основы для разработки методов определения абсолютного возраста геологических формаций. Ядерные излучения природных объектов стали все шире использоваться в качестве датчиков информации об этих объектах. К настоящему времени под влиянием ядерной физики в науках о Земле сформировались самостоятельные ядерно-физические направления, которым посвящена настоящая работа.

² Средства на строительство Института радия предложил К. Купервизер. В письме Венской академии наук он, не называя своего имени, писал, что озабочен тем, чтобы Австрия не упустила возможности "научно овладеть одним из величайших сокровищ, предоставленных природой, а именно минералом урановой смолки" [Meyer, 1950; Старосельская-Никитина, 1963. С. 197].

ПЕРВЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РАДИОАКТИВНОСТИ ЗЕМНОЙ КОРЫ

1.1. НАЧАЛО СИСТЕМАТИЧЕСКИХ ПОИСКОВ РАДИОАКТИВНЫХ МИНЕРАЛОВ И РУД

Систематические поиски радиоактивных минералов и руд начались в первые годы XX в. Правительственные, научные и общественные организации, а также частные лица в Англии, Канаде, Австро-Венгрии, Соединенных Штатах Америки, России и других странах в той или иной степени стремились оказать финансовую и иную помощь ученым при поисках радиоактивных минералов и исследованиях радиоактивности природных объектов. Интерес к исследованиям радиоактивности природных объектов проявляли также широкие слои населения, поскольку стало известно о возможности лечения тяжелых заболеваний и злокачественных опухолей радиоактивными препаратами и водами.

Поиски радиоактивных минералов и руд оказались, однако, делом весьма сложным из-за чрезвычайного рассеяния радиоактивных элементов и редко встречающихся месторождений. Геохимия радиоактивных элементов к концу XIX в. еще не была изучена, хотя было известно более 60 видов урановых минералов, что по общему количеству видов превышало группу таких распространенных минералов, как олово, цинк, золото, серебро, кобальт, никель [Кокшаров, 1862]. Было известно, что уран, радий и другие элементы, входя в некоторые минералы, не образуют сколько-нибудь значительных скоплений.

Минералогическое изучение территории стран Западной Европы не выявило никаких признаков присутствия богатых радиевых и мезоториевых руд в ряде стран, в том числе в Италии, Швейцарии, Бельгии, Швеции [Вернадский, 1954]. Однако начавшиеся после открытия явления радиоактивности систематические поиски радия и его аналогов привели к определенным положительным результатам. Вскоре во многих странах были открыты месторождения урановых и ториевых минералов: Список известных в то время месторождений составил в 1909 г. Б. Сцилард, русский перевод этой первой сводки под названием "Таблицы руд урана и тория" был издан в Одессе в 1910 г. [Силард, 1910].

Согласно этой сводке, наиболее богатыми месторождениями радиоактивных минералов и руд располагал в то время Американский континент. Там, как оказалось, были издавна известны многочисленные месторождения урановых и ториевых минералов, разработка части из них началась в первые же годы XX в. Так, добыча трансуранов и близких тел производилась в Техасе, Мэриленде, Массачусетсе; уранит добывался вместе с пиритом и золотом в Колорадо. Многочисленные месторождения ванадиевых руд, богатых уранилом, были выявлены в США. В некоторых южных и западных штатах США были найдены россыпи монацитов. В Канаде же богатые радиоактивные руды и минералы в то время не были обнаружены.

На Африканском континенте, Мадагаскаре и в Южной Австралии в начале века, по данным Сциларда, были известны большие запасы урановых минералов. Торианит в 1905—1907 гг. добывался на Цейлоне. На этом же острове было обнаружено множество месторождений минералов, содержащих уран, но больших скоплений радиоактивных рудных тел не оказалось.

В Индии в то время встречались ториевые руды, урансодержащий циртолит и некоторые другие урансодержащие минералы [Силард, 1910]. По более поздним данным Р. Бартона, в Индии добывался и вывозился в Европу монацит из урановой смоляной руды [Burton, 1915].

В Западной Европе, по данным Б. Сциларда, не отмечено сколько-нибудь значительных месторождений радиоактивных минералов и руд, за исключением района Иоachimовсталь. Небольшие месторождения урановых руд были открыты в Испании в пермских отложениях. Выходы фосфатов уранила в трещинах гранитных и метаморфических пород отмечены в районе центрального плато во Франции. В богатой минералами редких земель и редких элементов Норвегии не обнаружено руд радия, а известные скопления радиоактивных минералов оказались настолько незначительными, что не могли окупить стоимость разработки [Вернадский, 1954].

Наиболее богатым в Европе месторождением радиоактивных руд в то время считалось месторождение урановой смоляной руды в Иоachimовстали, в Рудных горах Чехии (ныне ЧССР). В этом старейшем рудном районе в течение нескольких столетий добывались разные металлы, в том числе серебро, золото и редкие металлы. Когда рудные запасы были почти выработаны и, казалось, закончилась ведущая роль этого европейского рудного центра, именно там была найдена урановая смоляная руда, возродившая на некоторое время славу этого района. Из рудников Иоachimовстали ежегодно добывалось почти два десятка тонн настурана, из которых в период с 1909 по 1912 г. было извлечено около 5,5 г хлористого радия [Вернадский, 1954].

Иоachimовстальская руда и ее радиоактивные отходы поставлялись в исследовательские лаборатории и институты Европы. Часть переработанных остатков, из которых извлекался радий, удалось в свое время закупить М. Кюри для лаборатории в Париже. Цены на радиоактивные руды и отходы, а также "отходы отходов" быстро

росли и вскоре радиоактивные руды оказались, по существу, недоступными для многих, и в первую очередь русских, ученых. Поэтому вопрос о поисках радиоактивных руд на территории России для русских ученых оказался жизненно важным.

Минералы, содержащие уран и торий, были известны в России еще в середине XIX в. К ним относятся самарскит, открытый Г. Розе на Урале в 1839 г., чевкинит, монацит, эшинит и другие минералы, содержащие радий и его аналоги. Однако богатые ураном минералы, такие, как медный уранат и урановая слюдка, встречались в России чрезвычайно редко, и то только в частных коллекциях [Жокшаров, 1862]. Месторождения урановых руд или скоплений урановых минералов в России не были известны.

По инициативе отдельных ученых и с их помощью в Петербургском, Московском и других университетах, научных обществах в первые же годы XX в. были предприняты попытки организовать исследования радиоактивности природных объектов. Были проведены определения радиоактивности воздуха, почвы, водных источников.

Русские физико-химическое и минералогическое научные общества широко пропагандировали работы в области радиоактивности. Журнал Русского физико-химического общества (ЖРФХО) информировал читателей обо "всем новом" в этой области. Уже в начале 1896 г. в ЖРФХО был напечатан реферат статьи А. Беккереля "О невидимых лучах, испускаемых солями урана" [1896. Т. 28, вып. 5Б. С. 94]. В том же номере был напечатан реферат его второй статьи "О различных особенностях невидимых лучей, испускаемых солями урана, и излучения противокатодной стенки трубки Крукса" [Там же. С. 95], а в следующем номере того же года реферат статьи "Испускание новых лучей металлическим ураном" [Там же. Вып. 6Б. С. 104]. В дальнейшем ЖРФХО систематически печатал сообщения и обзоры выполненных работ, а также статьи иностранных ученых о проведенных ими исследованиях.

Интерес русских геологов и минералогов к исследованиям в области радиоактивности особенно усилился после опубликования работ, экспериментально доказавших радиоактивный распад. Превращение радия при радиоактивном распаде частично в эманацию радия, а в конечном счете в свинец свидетельствует о непрерывном процессе изменения вещества в природе. И хотя работы У. Рамзая имели "ближайшее отношение к химии и физике, но радиоактивные вещества, открытые в минерале уране (урановой руде), представляют настолько всеобъемлющий интерес, что изучение их в области знания, разработке которого посвящена деятельность Минералогического общества, открывает, можно сказать, новые горизонты", — сказал геолог академик А.П. Карпинский, открывая заседание общества 26 октября 1904 г. [Записки Минералогического общества, 1905. С. 59].

Поиски радиоактивных руд на территории России несколько задержались, поскольку для этого требовалось знание геохимии радиоактивных минералов, которая в то время не была изучена, а минералогия только начинала исследование некоторых геохимических процессов, происходящих в земной коре.



И.А. Антипов (1858—1912)

Изучение геохимии радиоактивных минералов не входило в университетские курсы при обучении геологов, многие геологи и минерологи за всю свою научную жизнь могли никогда не увидеть радиоактивного минерала [Вернадский, 1935a]. Область геохимии радиоактивных минералов, считал В.И. Вернадский, была самой запутанной в минералогии, поскольку все время оставалась с стороне от очередного научного исследования. Изучение геохимии радиоактивных минералов осложнялось еще и тем, что каждый радиоактивный химический элемент имеет свой количественно определенный, но тогда еще неизвестный ход распада, независимый от окружающей обстановки. Поэтому геологи, по существу, оказались не-

подготовленными к пониманию явлений радиоактивности в области химии земной коры, минералогии радиоактивных элементов и т.д. [Вернадский, 1911].

Первым реальным шагом в организации поисков радиоактивных руд в нашей стране был пересмотр образцов геологических коллекций, собранных геологами во время экспедиций и хранившихся в Геологическом комитете. При просмотре проводился специальный химический анализ. Такой анализ на радиоактивность образцов из Тюямуянского рудника редких металлов Ферганской области проводил в 1900 г. И.А. Антипов. Образцы были доставлены в лабораторию Геологического комитета лаборантом Б.Г. Карповым. Внимание И.А. Антипова привлекли два куса несколько необычного известкового шпата с чешуйчатыми налетами [Записки Минералогического общества, 1900]. При анализе чешуйки оказались из медного ураната с содержанием 78,25% зеленой закиси урана.

Ферганская область, откуда были привезены образцы и где могли оказаться богатые радиоактивные руды, сразу же привлекла к себе внимание. Горный инженер Х. Антуанович сделал заявку на разработку урановых, медных и ванадиевых руд в Тюямуяне и организовал "Ферганское общество для добычи редких металлов" [Антипов, 1908]. В течение ряда лет он проводил геологическую разведку на уран при активной помощи И.А. Антипова и Б.Г. Карпова [Записки Минералогического общества, 1908]. В результате разведок в Ферганской области были обнаружены новые неизвестные ванадиевые и урановые минералы, один из них, по предложению И.А. Антипова, был назван ферганитом. Там же геолог К.А. Ненадкевич в 1907—

1908 г. собрал для Геологического комитета коллекцию, в которую вошли все виды местных ванадиевых и урановых руд и образцы всех минеральных видов, сопровождающих руды [Антипов, 1908].

Российская Академия наук также включилась в работу по изучению радиоактивности минералов. В 1907 г. по представлению А.П. Карпинского, Ф.Н. Чернышева и В.И. Вернадского было принято решение начать систематическое изучение на территории России радиоактивных минералов. Академия ассигновала 10 тыс. руб. Подготовительные работы были начаты под руководством В.И. Вернадского [Вернадский, 1922]. Он считал необходимым объединить усилия Академии наук, Геологического комитета и других организаций, создать единый центр руководства работами по поискам радиоактивных минералов в России.

По предложению В.И. Вернадского в сентябре 1910 г. на заседании отделения физико-математических наук была создана Радиевая комиссия. В комиссию вошли А.П. Карпинский, Б.Б. Голицын, Н.Н. Бекетов, Ф.Н. Чернышев и В.И. Вернадский. Вскоре В.И. Вернадский представил в комиссию записку о необходимости изучения радиевых руд Урала, Сибири и Средней Азии. На годичном собрании Академии наук 29 декабря 1910 г. В.И. Вернадский выступил с речью "Задачи дня в области радия" [Вернадский, 1911]. Он обратил внимание русских ученых на важность открытия явления радиоактивности и последующих исследований в этой области, которым, по его мнению, суждено оказать огромное влияние на жизнь человечества, начать новую эру в его истории. В.И. Вернадский одним из первых в России отметил возможные перспективы использования внутриатомной энергии, "... в миллионы раз превышающей все те источники сил, какие рисовались человеческому воображению" [Там же. С. 64]. Он высказал уверенность в необходимости организации государственных исследований радиоактивных руд в стране.

Полное, точное интенсивное исследование свойств радиоактивных минералов, говорил В.И. Вернадский, требует систематических исследований на радий всей земной коры, составления мировой карты радиоактивных минералов. Как не труден этот путь, но В.И. Вернадский не сомневался, что "человечество пойдет по нему, ибо с получением радия, источника лучистой энергии, связаны для него интересы огромного научного и практического значения" [Вернадский, 1911. С. 72]. Работа эта не может быть остановлена. По его мнению, изучение радия и радиоактивных минералов будет иметь общечеловеческое значение. Для каждой страны, для каждого народа неизбежно должны выдвигаться более дорогие для него — его собственные интересы. Поэтому, подчеркивал он, рано или поздно будут изучены и радиевые руды России.

Владение большими запасами радия даст владельцам его силу и власть, говорил В.И. Вернадский, перед которыми может побледнеть то могущество, которое получают владельцы золота, земли, капитала. Поэтому радиевые руды России должны быть исследованы русскими учеными. Во главе работ должны стоять отечественные научные учреждения государственного или общественного характера.



В.И. Вернадский (1863—1945)

Изучение свойств и запасов радиоактивных минералов на территории России не может и не должно больше откладываться [Там же. С. 72].

В 1910 г. Академия наук, как указывалось выше, выделила весьма незначительную сумму на разведку радиоактивных руд, которая дала возможность только приступить к работе. В 1911 г. В.И. Вернадский в связи с почти бедственным положением с финансированием специальных экспедиций обратился за помощью к общественным организациям. По его просьбе московское "Общество содействия успехам опытных наук и их практических применений имени Х.С. Леденцова" выделило на лабораторные работы и исследования в области радиоактивности 3600 руб. [Погодин, Либман, 1971].

В.И. Вернадский проводил активную пропаганду исследований в области радиоактивности. Всеми способами он стремился найти средства для организации радиевых экспедиций. О важности исследований в области радиоактивности В.И. Вернадский сделал сообщение на

Втором съезде деятелей практической геологии и призвал геологов уделять внимание поискам радиоактивных минералов и руд. Он выступал перед журналистами и репортерами газет, популярно разъясняя суть дела и стараясь привлечь внимание различных слоев общества к этой проблеме.

Во многих газетах и журналах России были опубликованы соответствующие статьи с "призывами" В.И. Вернадского к организации поисков радиоактивных руд и исследований радиоактивности. Так, только в 1913 г. в газете "Русские ведомости" были напечатаны две заметки под названием: "О радиевых лучах в России" [1913 г. N 242. 20 окт.] и "Что нужно сейчас для исследований радиевых месторождений России" [1913 г. N 276. 30 ноября].

В результате активной деятельности В.И. Вернадского и успехов в области радиоактивности в других странах изменилось отношение к этому важному научному направлению и в России. В письме от 30 марта 1911 г. В.И. Вернадский сообщал А.Е. Ферсману о том, что "министерство народного просвещения нам денег на Урал дает и даже не 3500, а 5000 р." [Вернадский, 1981. С. 245]. Изыскивая средства, это министерство экстренно вошло в Государственную думу с просьбой об ассигновании средств для поисков радиоактивных руд, но даже не ожидая решения думы, министерство выдало экспедиции 1000 руб.

В начале 1912 г. в Государственной думе рассматривался законопроект об ассигновании 10 тыс. руб. "на разведку радия" [Там же. С. 253]. В 1913 г. был подготовлен проект, а 27 июня 1914 г. после обсуждения утвержден Государственной думой закон об отпуске Академии наук огромной по тем временам сумм в 169 500 руб. для исследований радиоактивных минералов России в 1914—1916 гг. [Погодин, Либман, 1977]. Не ожидая соответствующих переводов в кассу Академии наук, В.И. Вернадскому в начале июня было передано 8000 руб. [Вернадский, 1981].

На те незначительные средства, которые удалось получить В.И. Вернадскому, он уже с 1911 г. организовал систематические поиски радиоактивных минералов и руд на территории России. В 1911 г. экспедиция с участием В.И. Вернадского направилась на Кавказ. Вместе с Я.В. Самойловым и К.А. Ненадкевичем они посетили Батуми, Тифлис, Баку. В смысле находок радиевых месторождений, пишет В.И. Вернадский жене 4 мая 1911 г., "этот год для Кавказа будет отрицательным" [Вернадский, 1981. С. 245]. Не найдя там радиоактивных минералов, он решил продолжить общие разведочные работы, в результате которых там была найдена неизвестная ранее область гранитов.

Переехав на пароходе из Баку в Красноводск, экспедиция В.И. Вернадского, остановившись на два дня в Самарканде, детально исследовала рудник Тюямуюн в предгорьях Алая. Рудник поразил Вернадского. Ничего подобного он ранее не видел. Все первоначальные предположения "разлетелись, — пишет он 18 мая 1911 г., — при взгляде на природное явление" [Там же. С. 246]. В Тюямуюне экспедиция собрала большой материал — образцы руд и минералов. Там же Вернадский начал планировать необходимые исследования пещер, их

радиоактивности, сбор и исследования минералов. Он обследовал попутно месторождения самородной серы в Камашлы-Баше и самородной меди на р. Сырдарья. Главная тяжесть уральских изысканий легла на В.И. Крыжановского и Е.Д. Ревуцкую. В Ильменских горах экспедиция В.И. Вернадского провела намеченную министерством картографическую съемку, нашла редкоземельные и радиоактивные минералы. В письме Я.В. Самойлову от 18 июня 1911 г., В.И. Вернадский пишет, что он надеется добыть в Ильменских горах 1 пуд самарскита и пуд эшенита, а если дадут денег, то в следующем году поставить разведку на самарскит [Там же. С. 248]. Он предполагал, что надо искать актиний — самый любопытный член радиоактивных минералов. В экспедиции на Кавказ, в Среднюю Азию и Урал в 1911 г. приняли участие Я.В. Самойлов, К.А. Ненадкевич, Г.И. Касперович, Е.Д. Ревуцкая, В.И. Крыжановский, Н.М. Федоровский и В.В. Критский [Вернадский, 1954].

1912 г. оказался до некоторой степени переломным годом в отношении возможностей постановки систематических изучений радиоактивных минералов и руд в России. По инициативе В.И. Вернадского в 1912 г. при Академии наук была организована постоянно действующая Радиевая экспедиция, которой он руководил [Мочалов, 1982]. В Радиевой экспедиции были сосредоточены работы Академии наук по поискам радиоактивных минералов и руд. Летом 1912 г. Радиевая экспедиция работала на Урале. В ее состав входили: В.И. Вернадский, А.Е. Ферсман, В.И. Крыжановский, Е.Д. Ревуцкая, Д.С. Белянкин, Л.А. Кулик, М.Е. Лезедова. Экспедиция обследовала окрестности станций Верхотурье, Хребет Уральский, гору Благодать, район Алапаевска, бассейны рек Мурзинка, Адуй, окрестности Екатеринбурга, Кыштым, Ильменские горы и др. [Отчет о деятельности Академии наук, 1912]. Экспедиция, несмотря на короткий срок работы, смогла собрать богатые коллекции, переданные в лабораторию для последующих исследований. В 1912 г. В.И. Вернадский был избран действительным членом Академии наук. Его также избрали членом Общества изучения Сибири и улучшения ее быта, в последующие годы он был избран почетным членом Московского общества любителей естествознания, почетным членом Минералогического общества и членом других научных обществ России.

В 1913 г. Радиевая экспедиция продолжала работы на Урале. Помимо нее, была организована Московская радиевая экспедиция в Туркестан и Забайкалье. Помимо специальных радиологических экспедиций, многие экспедиции Геологического комитета и Академии наук, работавшие, например, в Фергане и Забайкалье, проводили также попутные определения радиоактивности водных источников. Более подробно об этих работах будет сказано в гл. 2.

В 1914 г. к работам в Радиевой экспедиции В.И. Вернадскому удалось привлечь ряд научных и учебных заведений. В экспедиции приняло участие 30 человек в том числе представители Геологического комитета. Среди них известный геолог-геофизик, в дальнейшем организатор и первый директор Института прикладной геофизики ВСНХ РСФСР Д.И. Мушкетов, а также А.П. Герасимов,

В.К. Котульский, В.Н. Зверев. Представители университетов: Московского — Н.М. Федоровский, Петербургского — В.А. Зильберминц, Ф.Я. Аносов и К.К. Матвеев, Киевского — В.И. Лучицкий; Петербургского горного института — В.Н. Лодочников, Д.В. Наливкин, И.М. Москвин, Е.В. Иванов. В экспедиции принимали участие представитель Главного управления Нерчинского округа С.Д. Кузнецов, Новотроицких приисков в Забайкалье — В.Н. Беляев и др. [Отчет о деятельности Академии наук., 1914]. Кроме того, в экспедиции работали А.Е. Ферсман, В.И. Крыжановский, Е.Д. Ревуцкая, Л.А. Кулик, М.Е. Владимирова, Д.В. Соколов, К.А. Ненадкевич, Б.А. Линденер, Л.С. Коловрат-Червинский, работавший долгое время в лаборатории М. Кюри в Париже.

Радиевая экспедиция в 1914 г. провела обследование некоторых районов Сибири, Средней Азии, Урала, Кавказа. В рамках деятельности экспедиции В.И. Вернадский изучал районы Ильменских гор, Оренбургской губернии, был в Забайкалье. Богатейшие материалы, собранные участниками экспедиции, прерванной в связи с разразившейся первой мировой войной, были перевезены в Геологический комитет и минералогическую лабораторию для последующих тщательных исследований. Под непосредственным руководством В.И. Вернадского в минералогической лаборатории проводились спектрометрические, химические и минералогические исследования образцов, в том числе урановых и других радиоактивных и редких минералов.

Помимо упорной самоотверженной борьбы за организацию систематических поисков радиоактивных минералов и руд, участия в экспедициях, В.И. Вернадский организовал издание "Трудов Радиевой комиссии". Первые выпуски Трудов вышли в 1914—1918 гг. В них помещались отчеты о работе экспедиций, освещались их достижения и встреченные трудности.

С началом первой мировой войны работа по поискам радиоактивных минералов сильно замедлилась. Некоторые участники Радиевой экспедиции были призваны в армию. Но несмотря на это, в 1915—1916 гг. под руководством В.И. Вернадского проводились поиски радиоактивных минералов и руд в Средней Азии, на Урале и в Сибири. В 1917 г. экспедиционные работы в этих районах были продолжены под руководством К.К. Матвеева и В.И. Крыжановского.

С самого начала первой мировой войны в России резко сказалась нехватка многих видов стратегического сырья и невозможность в связи с этим организовать расширенное производство военной техники и боеприпасов. Необходимо было найти сырье на территории страны. В январе 1915 г. В.И. Вернадский внес от своего имени и от имени академиков А.П. Карпинского, Б.Б. Голицына, Н.С. Курнакова и Н.И. Андрусова предложение об организации при Академии наук постоянной Комиссии по изучению природных ресурсов страны. Решением физико-математического отделения Академии наук в феврале 1915 г. была создана Комиссия по изучению естественных производительных сил России (КЕПС) в составе Н.И. Андрусова, И.П. Бородина, П.И. Вальдена, В.И. Вернадского, Б.Б. Голицына, В.В. Заленского, А.П. Карпинского, Н.С. Курнакова, Н.В. На-

сонова, И.П. Павлова, В.И. Палладина, М.А. Рыкачева, А.С. Фаминцына. Позднее КЕПС оказала существенное влияние на организацию систематических поисков радиоактивных минералов и руд.

Председателем КЕПС был избран В.И. Вернадский, который уже в том же 1915 г. привлек к работе в КЕПС многих известных русских ученых. В нее вошли ученики В.И. Вернадского — А.Е. Ферсман, В.Г. Хлопин, Я.В. Самойлов, К.А. Ненадкевич и др. КЕПС и ее председатель В.И. Вернадский установили непосредственные связи с научными обществами, а также с важнейшими государственными организациями России, такими, как военное, морское и другие министерства, Центральный военно-промышленный комитет, Химический комитет при Главном артиллерийском управлении, военно-промышленные комитеты отдельных губерний и др. [Отчет о деятельности Академии наук..., 1916. С. 345—348, 360—362].

В 1916 г. КЕПС организовала 14 специальных экспедиций на Урал, Кавказ и в Крым с целью изучения глин, огнеупорных материалов, сапропеля и майкопской нефти, соляных озер и других важных видов стратегического сырья. В.И. Вернадский наметил программу первоочередных работ по выявлению и учету природных ресурсов страны, предлагал организовать не только поисковые и разведочные экспедиции, но и специализированные научно-исследовательские организации. Строгий научный подход и обеспечение практического выхода работы КЕПС, однако, не встретили понимания со стороны царских чиновников. Запланированные экспедиции не финансировались, в организации специальных научных институтов было отказано.

Только после Великой Октябрьской социалистической революции КЕПС смогла развернуть большую экспедиционную и научно-исследовательскую работу по изучению полезных ископаемых страны, географическому описанию, составлению почвенной карты и, конечно, по поискам месторождений радиоактивных минералов и руд и организации Радиевого института [Организация науки..., 1968].

1.2. ПЕРВЫЕ РАБОТЫ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ РАДИОАКТИВНОСТИ МИНЕРАЛЬНЫХ ИСТОЧНИКОВ

В начале XX в. во многих странах начались интенсивные поиски радиоактивных минералов и руд, первые исследования радиоактивности минеральных источников как с целью изучения радиоактивности природных объектов и земной коры, так и с целью возможного практического использования радиоактивных вод и грязей для лечения. Дальнейшее развитие исследований радиоактивности минеральных вод и грязей послужило основой для формирования самостоятельной научной и практической дисциплины — радиобальнеологии.

К первым работам в области радиобальнеологии можно отнести изучение содержания радиоактивных эманаций в минеральных источниках Италии. К тому времени радиоактивные эманации были выделены в физических лабораториях: Э. Резерфордом из препаратов тория [Rutherford, 1900], Е. Дорном из препаратов радия [Dorn, 1900],

Ф. Гизелем из препаратов актиния [Giesel, 1902]. В дальнейшем эти радиоактивные эманации, растворенные в воде, получили название торон, радон, актинон в зависимости от излучающего препарата или радиоактивного элемента. Впервые в природных условиях радиоактивные эманации в горячих источниках открыли в 1902 г. заведующий кафедрой Римского университета А. Селла (1865—1907) и А. Похеттино [Sella, Pochettino, 1902].

Почти одновременно с А. Селла и независимо от него в минеральных источниках других курортов радиоактивную эманацию обнаружили Дж.Дж. Томсон, затем Л. Адамс и Ф. Химстедт. В 1903 г. Дж. Эльстер и Г. Гейтель нашли в природных водах и почвах не только радиоактивные эманации, но и радий [Elster, Geitel, 1903]. В 1905 г. Дж. Эльстеру и Г. Гейтелю удалось выявить эманацию радия не только в водах, но и в отложениях некоторых минеральных источников и илистых отложениях "фанго" теплых серных источников курорта Баттаглия в Северной Италии [Elster, Geitel, 1905].

Содержание эманаций и солей радия в водах известных курортов могло на первый взгляд, свидетельствовать о благотворном влиянии радиоактивности на здоровье человека и в какой-то степени объяснить лечебный эффект курортного лечения. Однако почти одновременно с этим было отмечено чрезвычайно вредное воздействие более активных природных радиоактивных минералов и газов на человека. Это действие первыми обнаружили физики.

Первая статья о сильном действии радиоактивного излучения на кожу человека была опубликована в 1900 г. Физики В. Валков и Ф. Гизель сравнивали действие радиоактивных излучений с действием рентгеновских лучей [Walkoff, 1900; Giesel, 1900]. В следующем 1901 г. в "Comptes Rendues" П. Кюри и А. Беккерель опубликовали совместную статью "О физиологическом действии лучей радия" (Т. 132. С. 1289). В статье были приведены результаты повторения опытов Ф. Гизеля и наблюдения А. Беккереля. Описывалось, как П. Кюри два часа держал на руке препарат бромистого бария с радием относительно слабой активности. Как через несколько дней появилась краснота, похожая на ожог, но без болевых ощущений. Затем краснота усилилась, образовалась корочка и глубокая язва, которая только после двухмесячного интенсивного лечения постепенно зажила. В статье описано аналогичное действие на кожу препарата активного хлористого бария и радия. Препарат находился в трубке, завернутой в бумагу и помещенной в картонную коробку. А. Беккерель с коробкой в жилетном кармане несколько раз переходил из лаборатории на лекцию и в другие места. Причем общая продолжительность пребывания трубки с препаратом в кармане ученого не превышала шести часов. Вскоре на коже появилось красное пятно, затем кожа отпала, рана сильно углубилась, началось гноение. Для проверки А. Беккерель поместил трубку в свинцовый кожух, после чего никаких побочных вредных последствий не отмечалось. Авторы статьи П. Кюри и А. Беккерель, приведя описание опытов, показали, что поражение кожи радиоактивными препаратами, по их наблюдениям, может вызываться непосредственным контактом человека с препаратом

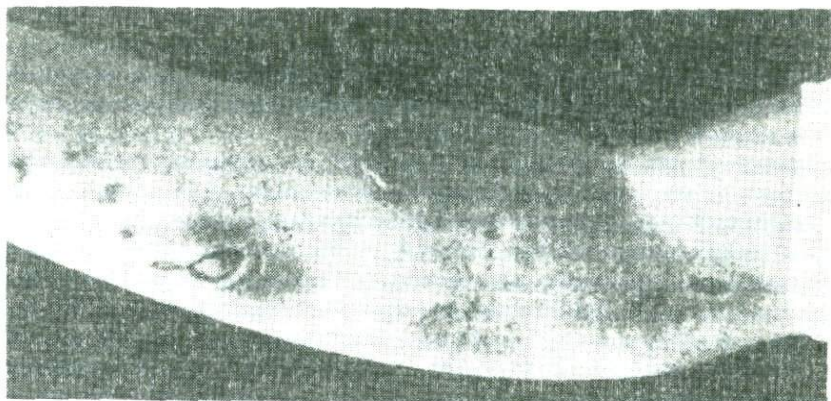
(или эманацией) или при достаточно близком расстоянии от него, что степень поражения зависит от интенсивности излучения препарата и продолжительности облучения.

Во Франции, России, Германии и других странах в последующие три-четыре года физики и биологи начали активно исследовать физиологическое действие эманации радия, а затем и других радиоактивных препаратов. П. Кюри совместно с известными в то время французскими врачами президентом Французского биологического общества Ш. Бушаром и В. Бальтазаром проверили действие эманации радия на живую ткань мышей и морских свинок [Curie P., et al. 1904]. Они обнаружили, что при вдыхании радиоактивной эманации прежде всего и больше всего у животных поражаются волосы и легкие, уничтожаются лейкоциты. Кроме того, оказалось, что ткани животных, находившихся в зоне действия эманации радия или других радиоактивных препаратов, сами становятся радиоактивными, что степень радиоактивности живых тканей зависит от наведенной активности и усугубляется присутствием эманации, растворенной во влаге живого организма.

В России исследования физиологического действия радиоактивных излучений начали проводиться в Петербургском институте экспериментальной медицины в 1903 г. Известные патофизиологи и биохимики Е.С. Лондон и С.В. Гольдберг попытались провести опыты по изучению действия лучей радия на человека и животных. В статье, опубликованной в немецком журнале, они привели примеры сильного действия излучений на человеческий организм [Goldberg, London, 1903]. Они доказали, что модное увлечение лечением препаратами радия необоснованно, что применять препараты надо с большой осторожностью, как правило, это возможно лишь в крайне малых дозах и в весьма ограниченное время. В противном случае больному может быть нанесен непоправимый вред. Работами русских врачей и ученых Е.С. Лондона, М. Жуковского, В.М. Бехтерева и др. в 1903—1905 гг. было показано также вредное влияние радиоактивных излучений на функции головного и спинного мозга, центральную нервную систему.

В результате трехлетнего изучения действия на человека радиоактивных излучений было установлено сильное проникающее влияние излучений радиоактивных препаратов и эманации радия на клетки живого организма, которое при необходимости контакта должно быть резко ограничено. В большинстве случаев было замечено также благотворное влияние на организм слабоактивных минеральных вод многих курортов.

Во Франции исследования действия радиоактивности минеральных источников проводил физик П. Кюри. В 1903—1904 гг. он совместно с А. Лабордом исследовал радиоактивность некоторых минеральных источников Франции [Curie P., Laborde, 1904, 1906]. Одновременно он совместно с П. Бушаром и В. Бальтазаром провел наблюдения за действием на человека радиоактивных вод и эманации радия. По инициативе П. Кюри во Франции были намечены



Рука сотрудника Санкт-Петербургского института экспериментальной медицины С.В. Гольдберга на четвертый день после облучения бромистым радием, 1903 г.

и в последующие годы проведены систематические обследования на радиоактивность французских горячих минеральных источников.

Кроме того, П. Кюри организовал во Франции систематическое изучение возможностей использования в медицине радиоактивных излучений вод и минералов. Сотрудники первых французских физических и химических или радиологических лабораторий принимали участие в измерениях радиоактивности свободно выделяющихся или растворенных в воде газов. В аналогичных образцах определяли содержание редких газов. Эти исследования показали, что "основным терапевтическим фактором" при лечении на бальнеологических курортах в то время мог считаться радон — продукт распада радия, который в малых количествах был обнаружен во всех горячих минеральных источниках французских курортов. Радиоактивность вошла в моду, ее считала "последним достижением науки", весьма полезной, способной излечивать от многих болезней.

В Германии и Австро-Венгрии минеральные источники обследовали Г. Махе и Л. Мейер. Они установили степень радиоактивности природных вод Гаштейна, Карлсбада (ныне Карлови-Вари), Мариенбада (ныне Марианске-Лазне), Теплица, Иохимовстали (ныне Яхимов) и других курортов. Подробная сводка о радиоактивности минеральных вод европейских курортов была опубликована в 1909 г. в журнале "Урания" ("Urania"). На русском языке сведения о радиоактивности европейских и русских минеральных вод были приведены в книге Л.Б. Бертенсона, вышедшей в 1914 г. [Бертенсон, 1914].

Во многих странах одновременно с изучением радиоактивности минеральных вод курортов стали изучать действие вод, эманации радия и радона на организм человека. Вскоре было установлено, что лечение радиоактивными водами, действительно, во многих случаях оказывается полезным, поскольку слабое альфа- и бета-излучение радоновых вод, например, может разрушать отложения солей за счет

перевода нерастворимых солей в растворимые с последующим выводом их из организма [Бертенсон, 1914].

Радиоактивные воды и грязи, помимо лечения, стали использоваться в химических и физических лабораториях в качестве источников слабых радиоактивных излучений.

Однако уже в первые годы XX в. изучение радиоактивности природных вод и минеральных источников шло не так быстро и результативно, как изучение радиоактивных свойств элементов в физических лабораториях. Дальнейшее накопление данных о радиоактивности минеральных источников и природных вод тормозилось из-за отсутствия общей единицы измерения радиоактивности вод. В 1904 г. Г. Махе определял растворимость эманации радия в водах во времени падения потенциала электроскопа, соответствующего степени ионизации воздуха в приборе под воздействием радиоактивных излучений радона, эманации радия или других веществ. Тогда же он совместно с Э. Швейдлером и Ст. Мейером разработал метод определения содержания эманации радия в источниках, обеспечивающий получение сравнимых результатов [Mache, 1904].

Следует напомнить, что после открытия явления радиоактивности результаты работы в этой области, в том числе в области биологического действия излучений, обсуждались в широком масштабе на международных конгрессах. Первый конгресс по изучению радиоактивности был созван в Льеже в сентябре 1905 г. В нем приняли участие представители не только основных европейских государств, но и стран Северной, Центральной и Южной Америки, Австралии, а также Китай [Старосельская-Никитина, 1963]. На конгрессе присутствовали А. Беккерель и П. Кюри. В рамках конгресса работали только две секции: физическая и биологическая. На первой обсуждались теоретические и экспериментальные работы в области радиоактивности, на второй — первые результаты изучения влияния излучений на человека.

На Международном конгрессе по радиоактивности и электричеству в сентябре 1911 г. в Брюсселе обсуждался широкий круг вопросов по теории и результатам экспериментальных работ в области радиоактивности, теории распада, радиоактивных постоянных, методов измерений излучений, установления единиц излучений и способов защиты человека от радиоактивных излучений.

По предложению Э. Резерфорда конгресс рекомендовал методы определения содержания солей радия в жидкостях и твердых телах [Бертенсон, 1914]. Радиоактивность грязей рекомендовалось определять только на высушенных образцах. По предложению Г. Махе была принята международная единица содержания эманации радия в природных водах. Эта единица — Махе (ME) соответствовала количеству эманации, содержащемуся в 1 л жидкости или воздуха, которое при полном использовании альфа-излучения может поддерживать ток насыщения электрометра 10^{-3} электростатических единиц.

Конгресс наметил дальнейшие пути в области исследований радиоактивных природных объектов. Очень важные последствия имело установление конгрессом единицы радиоактивности вод и воздуха,

а также поручение конгресса М. Кюри изготовить международный эталон радия. М. Кюри считала, что решения конгресса об установлении международных единиц и создании эталона радия свидетельствуют о международном характере развития науки о радиоактивности [Curie M., 1912].

Следующим важным шагом в установлении единообразия измерений радиоактивности вод было решение международного совещания радиологов, созданного в 1921 г. в Фрайберге. На этом совещании был введен эталон радиоактивности жидкости или газовой смеси, которым рекомендовалось пользоваться при практических измерениях радиоактивности природных вод. Эталонный (нормальный) раствор должен приготавливаться в специализированных радиологических физико-технических лабораториях. В дальнейшем для измерения концентрации радионуклидов в жидкостях или газах за эталонную единицу стали принимать 1 эман — Е (от латинского слова *emano* — вытекаю, растворяюсь). 1 Е равен концентрации радионуклида, имеющего активность 10^{-10} Ки на 1 л раствора или газовой смеси.

К началу 20-х было накоплено много данных о радиоактивности тех или иных минеральных вод и грязей во всех странах. Было разработано много различных полевых и лабораторных способов определения радиоактивности минеральных источников. Основным критерием радиоактивности того или иного источника стали считать содержание в нем радия, определенное в одних случаях по эманации радия, отчасти эманации тория, в других случаях — по содержанию в них радона.

1.3. ИЗУЧЕНИЕ РАДИОАКТИВНОСТИ МИНЕРАЛЬНЫХ ИСТОЧНИКОВ И ГРЯЗЕЙ В РОССИИ

В первое десятилетие XX в., когда во Франции, Австрии, Италии и других странах Европы широко развернулись исследования радиоактивности минеральных источников известных курортов, аналогичные исследования начали проводиться и в России. Предметом изучения стала прежде всего радиоактивность и ионизация воздуха вблизи целебных минеральных источников, радиоактивность минеральных вод, лечебных грязей, почв на территории нашей страны. Вначале такого рода исследования проводили попутно с другими физическими или химическими исследованиями сотрудники лабораторий или кафедр университетов, затем — специализированных лабораторий, созданных при научных обществах различных городов.

К организациям, начавшим проводить изучение радиоактивности природных объектов в России, относились физические лаборатории Петербургского и Московского университетов, химические лаборатории Томского университета и Томского технологического института, Рижского политехнического института, химическая лаборатория Управления Кавказских Минеральных Вод. Исследования проводили геологи по заданиям Геологического комитета и его отделений, энтузиасты Московского физико-медицинского общества и других

научных обществ. На юге страны большой объем работ выполнила Одесская лаборатория, созданная в 1910 г. при химическом отделении Русского технического общества.

Остановимся лишь на некоторых работах, связанных с формированием новых направлений в науках о Земле. В данной работе подчеркивается именно этот аспект, малоосвещенный или недостаточно выделенный в публикациях, посвященных истории изучения радиоактивности природных вод в России.

В Петербургском университете изучением радиоактивности одним из первых начал заниматься известный русский физик профессор Иван Иванович Боргман (1849—1914). После окончания университета в 1870 г. он остался работать при университете, преподавал физику, а с 1901 г. был директором Физического института при университете, где проводил научно-исследовательскую работу в области теории электромагнитного поля и других областях физики. Он исследовал электризацию воздуха под влиянием ультрафиолетовых лучей, свечение газов и вскоре после открытия радиоактивности начал изучать "явление с лучами Беккереля, испускаемыми урановой охрой" [Боргман, 1900].

В 1904 г. И.И. Боргман один из первых в России обнаружил радиоактивность русских целебных грязей [Боргман, 1904]. В 1904—1909 гг. вместе со своим учеником А.П. Афанасьевым он детально исследовал радиоактивность минеральных грязей Кавказских, Крымских и других курортов. В лаборатории под руководством И.И. Боргмана были поставлены исследования вод Кавказских минеральных источников, Друскеников (ныне Друскининкая) и других курортов того времени, результаты которых были опубликованы в 1908 и 1911 гг. [Мезерницкий, 1908, 1911].

Изучение радиоактивности минеральных вод, грязей и атмосферного воздуха имело в то время не только бальнеологическое, но и большое научное значение для изучения залегания в земной коре радиоактивных руд, процесса извлечения эманации радия природными водами из горных пород и других важных геологических процессов. Это очень хорошо понимал В.И. Вернадский, работавший сначала в Московском, а с 1911 г. в Петербургском университете.

В Московском университете в начале 1900-х годов исследованием радиоактивности природных объектов начал проводить ученик А.Г. Столетова известный физик Алексей Петрович Соколов (1854—1928). Он в 1903 г. исследовал на радиоактивность источники Пятигорска и Кисловодска, обнаружил радиоактивность углекислого газа Нарзана и первым в мире отметил влияние ионизации и радиоактивности воздуха на организм человека [Соколов, 1903; Зайцева, Фигуровский, 1961]. Под его руководством в 1904 г. Л.И. Лисицын исследовал радиоактивность грязей Бердянского лимана, Булганканских сопок (близ Керчи), некоторых сопок Таманского полуострова, почв из окрестностей Читы, Тульской и Московской губерний. Исследованные им грязи оказались радиоактивными, в них содержалась эманация радия, а в некоторых и радиоактивные вещества [Соколов, 1905].

А.П. Соколов организовал в 1904 г. первый в России общий физический практикум в Физическом институте Московского университета. В 1912 г. по инициативе А.П. Соколова радиологические исследования были выделены из общих физических работ и сосредоточены в организованной при Физическом институте Московского университета первой специализированной радиологической университетской лаборатории. К тому времени в ряде европейских странах был накоплен некоторый опыт исследований в области радиоактивности. Многие русские физики начали в таких лабораториях, в частности в лаборатории М. Кюри в Париже, Э. Резерфорда в Англии, О. Гана в Германии. А.П. Соколов добился командирования своих сотрудников А.П. Снесарева и К.П. Яковлева в Англию и Германию для ознакомления с постановкой работ в лабораториях и использования их опыта. По возвращении К.П. Яковлев написал руководство "Специальный практикум по радиоактивности" [Яковлев, 1913].

Следует упомянуть еще об одном организационном мероприятии радиологической лаборатории Московского университета, касающемся сбора образцов радиоактивных минералов. А.П. Соколов, как и И.И. Боргман, установил непосредственную связь лаборатории с краеведческими организациями и группами в разных городах России. Лаборатория обратилась к этим организациям с просьбой присылать образцы минералов, которые могли бы быть радиоактивными. При этом прилагалась инструкция с описанием возможных отличительных признаков. Полученные минералы и образцы вод исследовались в лаборатории, а результаты сообщались всем приславшим данные образцы. В результате в лаборатории была собрана довольно внушительная коллекция самых разнообразных минералов и вод.

Помимо сбора минералов и определения радиоактивности природных объектов, в лаборатории Московского университета под руководством А.П. Соколова были предприняты первые попытки определения возраста Земли радиоактивными методами [Соколов, 1910]. А.П. Соколов изучал также возможную связь внутреннего теплового режима Земли с ее радиоактивностью и выдвинул в 1910 г. идею о продолжающемся разогреве земных недр внутренними источниками тепла.

В радиологической лаборатории Московского университета специализировались и первые кадры русских радиологов. Там начинали работать такие известные в дальнейшем радиологи, как В.И. Баранов, В.А. Соколов, Е.С. Щепотьева и др., внесшие существенный вклад в изучение радиоактивности природных объектов и формирования ядерно-физического направления в науках о Земле.

К выпускникам Московского университета того времени относятся и химик-радиолог Владимир Иванович Спицын (1893—1923). Он еще в 1914—1916 гг. исследовал радиоактивность минеральных вод, лечебных грязей и горных пород на Кубани и в Крыму. В.И. Спицын изучал в 1920—1921 гг. радиоактивность источников и ее связь с режимом обогащения вод, установил ряд закономерностей процесса перехода эманации радия из радиоактивных минералов в жидкие среды в зависимости от степени измельчения

минерала, температуры минерала и жидкой среды, строения поверхностного слоя минерала и других параметров [Спицын, Баранов, 1952]. В.И. Спицын в 1917 г. впервые в России и одним из первых в мировой науке применил метод изотопных индикаторов (меченых атомов) для определения растворимости ряда соединений тория [Волков и др., 1984. С. 475—476]. Меченые атомы в дальнейшем широко использовались при наблюдениях за некоторыми геологическими процессами.

В Рижском политехническом институте латышский физико-химик Р.И. Свинне (1885—1939) изучал радиоактивность источников рижских курортов Кемери и Бальдон, некоторых источников в Псковской и Новгородской губерниях [Свинне, 1913]. Р.И. Свинне отметил сравнительно малую активность исследованных им вод, за исключением сернистых источников, получивших, как он считал, повышенную активность за счет окружающих горных пород. В дальнейшем Р.И. Свинне основное внимание уделял изучению химии радиоактивных элементов.

В химической лаборатории Управления Кавказских Минеральных Вод, помимо наблюдения за изменением химического состава лечебных вод, занимались и изучением радиоактивности кавказских минеральных источников. Инженер-технолог лаборатории Э.Э. Карстенс в 1907 г. начал исследования радиоактивности вод, определив в первый год радиоактивность более двух десятков источников [Карстенс, 1910]. Он исследовал на радиоактивность также осадки и грязи ключей, пресные и минеральные природные воды района от р. Кумы до Эльбруса. Многие определения радиоактивности он производил непосредственно у источников. Данные о радиоактивности 86 источников Э.Э. Карстенс в обобщенном виде представил в книге "Химический состав кавказских минеральных вод по новейшим исследованиям" [Карстенс, 1910].

Э.Э. Карстенс одним из первых попытался выявить зависимость радиоактивности минеральных источников и других природных вод от активности горных пород, из которых эти воды вытекают. Его усилия в то время, однако, не увенчались успехом. Четверть века спустя аналогичные предположения высказал В.И. Баранов в отношении высокой радиоактивности нефтяных пластовых вод утинской нефтяной скважины [Ильина, 1978]. Но и предположения В.И. Баранова также не подтвердились. Только в результате тщательного изучения радиоактивности природных вод и горных пород Ухтинского района, проведенного в конце 20-х — начале 30-х годов, стало возможным выяснить происхождение радиоактивности этих вод. Было доказано, что радиоактивность глубинных вод, непосредственно не связанных с рассолами радиоактивных месторождений, зависит главным образом от степени выщелачиваемости радиоактивных элементов водами особого состава из обычных (а не только радиоактивных) горных пород, через которые в течение некоторого геологического времени мигрирует подземная вода.

Начиная с 1910 г. радиоактивность кавказских минеральных вод стали изучать сотрудники организованной в то время специальной



П.П. Орлов (1859—1937) проводит измерения радиоактивности воздуха на руднике, 1907 г.

радиологической лаборатории под руководством Е.С. Бурксера (см. след. разд.).

Большой объем работ по изучению радиоактивности природных вод и других объектов провели сотрудники Томского университета и Томского технологического института. Они исследовали Алтай, Забайкалье и некоторые районы Сибири.

Профессор Томского университета Петр Павлович Орлов (1859—1937) начал исследования на Алтае и в Сибири в 1904 г. Его исследованиями во время учебы и первых лет преподавания в Московском университете руководил В.И. Вернадский. Получив назначение на должность профессора и заведующего кафедрой химии в Томский университет, П.П. Орлов предполагал провести планомерное изучение радиоактивности Сибири и Алтая, но у него не оказалось ни квалифицированных кадров, ни необходимых средств на проведение экспедиций.

Первоначально П.П. Орлов поставил цель найти урановые и ториевые минералы для использования их в медицине, затем начал изучать радиоактивность природных вод, пытаясь найти лечебные воды. Со своими студентами он обследовал на радиоактивность в Енисейской губернии озера Иткуль, Широ, Шунет, Доможаково и др., а также воды колодцев, ключей и рек. О результатах своих исследований П.П. Орлов докладывал Обществу естествоиспытателей и врачей при Томском университете [Орлов, 1912]. П.П. Орлов в 1915—1916 гг. обследовал Забайкалье и определил радиоактивность

многих водных источников в этом крае. Кроме того, П. П. Орлов, как и Е. С. Бруксер, А. П. Соколов и другие ведущие радиологи того времени, организовал на кафедре химии лабораторные исследования на радиоактивность образцов минералов, присылаемых из разных районов страны на анализ. Он исследовал образцы алтайских минералов, присланных ему Геологическим музеем Уральского общества любителей естествознания, исследовал также минералы, найденные сотрудниками кафедры во время летних экскурсий или экспедиций, а также все минералы, попадавшие в лабораторию любым другим путем.

Химическая лаборатория Томского университета за короткий срок исследовала также многие образцы вод и минералов из Забайкалья и других районов Восточной Сибири. К началу первой мировой войны химическая лаборатория Томского университета под руководством П. П. Орлова завоевала признание научных и общественных кругов Сибири и, по существу, стала центром изучения радиоактивных веществ Сибири [Зайцева, Фигуровский, 1961. С. 177].

Под влиянием П. П. Орлова и с его помощью исследованиями радиоактивности природных объектов Сибири и Алтая активно занимались и в Томском технологическом институте. В 1907—1908 гг. лаборант института В. С. Титов обследовал природные воды Алтая. Он обнаружил высокую радиоактивность горячих источников в районе Белокурихи. Активность белокурихинских вод во много раз превышала активность вод и газов Нарзана [Титов, 1910]. При повторных исследованиях этих вод В. С. Титов отметил растворенную эманацию радия и отсутствие эманации тория.

Высокая радиоактивность белокурихинских источников оставалась неизменной многие годы. Во время первой мировой и гражданской войн в Белокурихе было организовано лечение водами раненых. В 1920 г. радиолог Л. Н. Богоявленский, оказавшийся в Сибири, исследовал радиоактивность вод по заданию Томского отделения Геологического комитета. Л. Н. Богоявленский попытался определить источники радиоактивной воды с целью увеличения ее отбора для лечебных нужд (рис. 2). Тогда же он высказал предположение о существовании прямой связи между повышенной активностью источника, горными породами и геологическим строением района. Он считал, что важную роль могли играть тектонические нарушения, поскольку глубинная радиоактивная вода могла поступать на поверхность через "систему сбросов и трещин" [Богоявленский, 1922]. В дальнейшем это его предположение частично было подтверждено.

Упомянем еще о нескольких исследователях радиоактивности природных объектов в России. Так, большой объем специальных радиологических исследований минеральных источников провел В. А. Багашев в Забайкалье по заданию Московского физико-медицинского общества. О результатах своих работ в 1910 г. сделал подробный доклад обществу. В том же году его данные были опубликованы сначала в "Вестнике бальнеологии, климатотерапии и физиотерапии", а затем в "Трудах физико-медицинского общества" [Багашев, 1910]. По его определениям многие источники Забайкалья

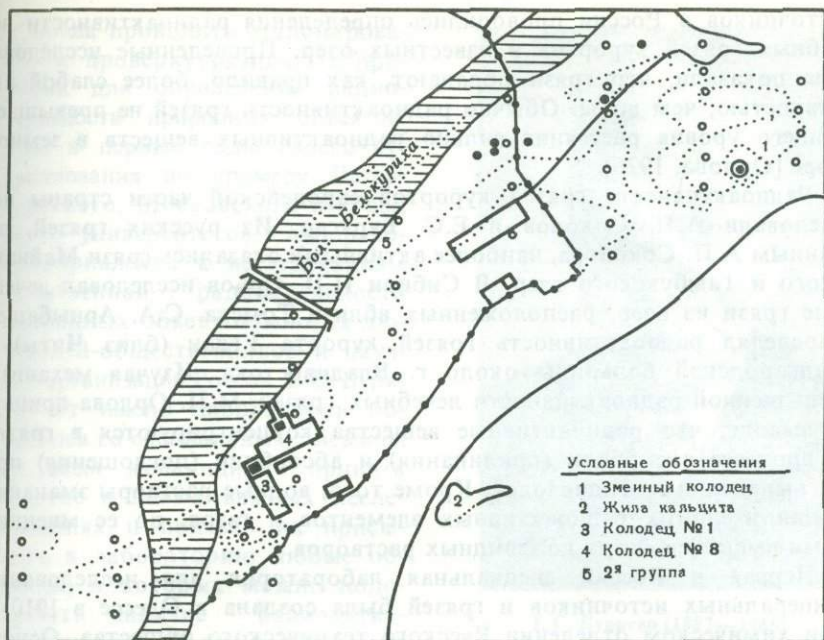


Рис. 2. Карта-схема радиометрической съемки курорта Белокуриха, проведенной Л.Н. Богоявленским, 1922 г.

могли считаться высокорadioактивными. Однако полученные И.А. Багашевым данные о количествах растворенной в водах эманации радия оказались весьма приближенными и могли дать лишь общее представление о распределении радиоактивных минеральных источников на территории региона.

Интерес к исследованиям радиоактивности природных объектов проявил и Геологический комитет, по заданию которого в Забайкалье работал геолог-минералог В.К. Котульский (1879—1951). Занимаясь вопросами рудообразования месторождений золота, он попутно обследовал на радиоактивность горячие серные источники в Баргузинском округе [Котульский, 1912]. Однако сведения В.К. Котульского о якобы высокой радиоактивности обследованных им источников вызвали сомнение и не подтвердились [Бурксер, 1915в].

Профессор Петербургского горного института П.П. Веймарн также попытался исследовать радиоактивность минеральных источников. Он взял пробы воды из известного в России источника Кувак в Пензенской губернии, но вода в нем оказалась не радиоактивной. Малоактивными оказались и воды Ижевского минерального источника, которые исследовал в 1915 г. В.И. Баранов под руководством А.П. Соколова [Баранов, 1926б]. Через восемь лет В.И. Баранов вновь определил активность этих вод, но она стала еще ниже, ненамного отличаясь от нормальных неактивных вод.

Почти одновременно с изучением радиоактивности минеральных

источников в России проводились определения радиоактивности лечебных грязей курортов и известных озер. Проведенные исследования показали, что грязи обладают, как правило, более слабой активностью, чем воды. Обычно радиоактивность грязей не превышает общего уровня рассеяния сильно радиоактивных веществ в земной коре [Орлова, 1926].

Радиоактивность грязей курортов европейской части страны исследовали А.П. Соколов и Е.С. Бурксер. Из русских грязей, по данным А.П. Соколова, наиболее активными оказались грязи Майнакского и Тамбукского озер. В Сибири П.П. Орлов исследовал лечебные грязи из озер, расположенных вблизи Томска. С.А. Арцыбашев определял радиоактивность грязей курорта Угдан (близ Читы) и Садгородской больницы около г. Владивостока. Изучая механизм повышенной радиоактивности лечебных грязей, М.П. Орлова пришла к выводу, что радиоактивные вещества концентрируются в грязях в процессе адсорбции (прилипания) и абсорбции (поглощения) при их выпадении из гидрозолей. Кроме того, водные растворы эманации радия и других радиоактивных элементов и газов, по ее мнению, сами имеют свойства коллоидных растворов.

Первая в России специальная лаборатория для исследований минеральных источников и грязей была создана в Одессе в 1910 г. при химическом отделении Русского технического общества. Основными задачами лаборатории, кратко сформулированными в первом выпуске ее трудов, были "исследования радиоактивности вод, грязей и почв, а равно и изучение вопроса о практическом применении радия" [От редакции, 1911. С. 1].

Организатором и руководителем лаборатории был Евгений Самуилович Бурксер (1887—1965), молодой химик-неорганик, а впоследствии и геохимик, окончивший в 1909 г. Новороссийский университет в Одессе. Под его руководством лаборатория успешно проводила изучение минеральных источников и грязей кавказских курортов, почв, горных пород и других природных объектов, а также химического и биологического действия радиоактивных излучений и веществ на живые организмы и другие исследования, связанные с применением радия и радиоактивных веществ [Бурксер, 1911].

Три года спустя после организации лаборатории, в 1913 г. на XIII съезде русских естествоиспытателей и врачей Е.С. Бурксер сообщил о значительном расширении задач, решаемых лабораторией. Предполагалось, что лаборатория будет проводить также "изучение явлений радиоактивности в научном и практическом отношении, конструирование, эталонирование и проверку различных приборов, применяемых при изучении радиоактивности; изготовление и проверку активности различных растворов и препаратов, а также ознакомление физиков, врачей и других специалистов с методами исследования радиоактивности; чтение лекций и демонстрация опытов, издание периодической литературы в целях широкой популяризации основ радиоактивности в нашей стране" [Бурксер, 1913. С. 423].

Лаборатория благодаря стараниям Е.С. Бурксера располагала необходимой (новейшей в то время) радиометрической аппаратурой

и могла проводить эталонирование и проверку различных приборов для определения радиоактивности природных объектов. Уже в первые годы своего существования по примеру Петербургского, Московского и Томского университетов лаборатория привлекла к исследованиям естественной радиоактивности природных объектов многих любителей-общественников и научные организации России. Е. С. Бурксер от имени лаборатории обратился со специальным письмом ко всем желающим принять участие в новых важных исследованиях и призвал их присылать в лабораторию любые образцы, в которых можно подозревать наличие радиоактивных включений, для дальнейшего бесплатного их анализа [Бурксер, 1911]. К письму были приложены описания и таблицы руд урана и тория.



Е. С. Бурксер (1887—1965)

Экспедиционные исследования Е. С. Бурксер начал в январе 1911 г. с исследований радиоактивности грязей Хаджибеевского и Куяльницкого лиманов, ранее обследовавшихся И. И. Боргманом и А. П. Соколовым. По новым данным Е. С. Бурксера оказалось, что в рапе лиманов содержатся зманыции от солей радия и тория. В лаборатории производились анализы на радиоактивность воды и ила лиманов, а также привезенных экспедицией образцов окружающих лиманы горных пород.

В последующие годы на Кавказе экспедиция лаборатории провела на месте исследования радиоактивности вод и окружающих источники горных пород. Определение радиоактивности на месте проб давало более точные данные, поскольку со временем радиоактивность образцов могла быстро меняться. Экспедиция Одесской лаборатории обнаружила в Тифлисской губернии источники с высокой радиоактивностью. В таких водах, по мнению Е. С. Бурксера, радий, выпадая в осадок, способствовал повышению общей радиоактивности источника [Бурксер, 1911]. В отчетах экспедиции, опубликованных в Трудах лаборатории, указывалось, что воды одного происхождения, как правило, обладают одинаковой активностью и, вероятно, не связаны с возможной близостью радиоактивных пород.

Публикацию результатов исследований радиоактивности природных объектов, проводимых лабораторией, Е. С. Бурксер организовал в специальном печатном органе — "Труды химической и радиологической лаборатории". Эти Труды Одесское отделение Русского технического общества начало выпускать в 1911 г., т. е. через

год после организации лаборатории. Следует подчеркнуть, что "Труды лаборатории" были первым в России печатным систематическим изданием по исследованиям радиоактивности.

В Трудах Одесской лаборатории публиковались сообщения о всех проводимых исследованиях в "области радия", новых методах определения радиоактивности природных объектов и другие статьи, связанные с развитием учения о радиоактивности. Предваряя первый номер первого тома Трудов, редакция указала на необходимость предлагаемых ею публикаций с тем, чтобы лаборатория (и следовательно, русские ученые) "могли быть в курсе всех вопросов, касающихся радия", чтобы "...рука об руку работать с институтами Запада над изучением этого элемента и дать родине возможность своевременно ознакомиться с особенностями радия и использовать его качества" [От редакции, 1911. С. 1]. Можно сказать, что в Трудах лаборатории публиковались все новые результаты в области исследований и развития учения о радиоактивности независимо от страны, где эти исследования проводились.

Е.С. Бурксер всеми способами проводил популяризацию исследований радиоактивности, привлекал внимание общественности к проведению исследований, сбору образцов и т.д. Химическое отделение Русского технического общества в Одессе организовало публичные лекции о радиоактивности, систематический цикл специальных лекций (также публичных) для всех желающих получить знания в этой области.

Лекции были платными, средства от них шли на содержание лаборатории и проведение экспедиционных работ [Зайцева, Фигуровский, 1961]. Первый курс лекций был начат Е.С. Бурксером в феврале 1912 г. Слушателями лекций были врачи, студенты, учащаяся молодежь в основном из технических учебных заведений Одессы — всего около 100 человек [Там же. С. 154]. Лекции сопровождались опытами, демонстрацией препаратов и диапозитивов.

Публичные лекции Е.С. Бурксера оказали большое влияние на врачей и способствовали появлению у них интереса к практическому применению радиоактивных вод для лечения злокачественных новообразований и других тяжелых болезней, которые уже пытались лечить в то время врачи западноевропейских клиник. В 1914 г. в Одессе по инициативе Е.С. Бурксера была создана "Лига борьбы против раковых заболеваний" и организован сбор средств на покупку препарата радия [Бурксер, 1915а].

Основная деятельность Одесской радиологической лаборатории в 1912—1914 гг. под руководством Е.С. Бурксера была направлена на изучение радиоактивности минеральных источников и грязей южных районов страны. В 1913—1914 гг. экспедиции лаборатории обследовали Черноморское побережье Кавказа. В 1914—1915 гг. намечалось проведение исследований в Бессарабской, Подольской и Таврической губерниях, а затем — в Херсонской, Волынской, Екатеринославской и других губерниях [Бурксер, 1915б]. Однако эти работы в то время выполнить не удалось, поскольку намеченные районы попали в зону боевых действий первой мировой войны.

В Одесской радиологической лаборатории выполнялся также большой объем работ по химическому анализу образцов минералов и вод, поступавших от любителей и организаций из самых разных районов страны. Е.С. Бурксер попытался проводить и физико-химические опыты по выделению полония и радия из остатков ферганской руды. Эти опыты окончились неудачей. Только в 1921—1922 гг. В.Г. Хлопину в Государственном радиевом институте удалось преодолеть трудности выделения радия, находившегося в руде. Был, как известно, разработан метод отделения радия от бария "на холоду" путем дробного осаждения радия соляной кислотой и получены первые в СССР пробы чистого радия. Разносторонняя деятельность лаборатории под руководством Е.С. Бурксера, несмотря на малочисленный состав сотрудников лаборатории в те годы, недостаточность оборудования и средств, свидетельствует о большом творческом и научном потенциале этой маленькой ячейки по изучению естественной радиоактивности.

Научный потенциал лаборатории в период 1917—1920 гг. оказался настолько существенным, что после установления советской власти на Украине Одесская лаборатория в 1921 г. была преобразована в Институт прикладной химии и радиологии, в 1926 г. — в Химико-радиологический институт, в 1932 г. — в Украинский филиал Института редких металлов. Руководитель лаборатории Е.С. Бурксер в 1925 г. был избран членом-корреспондентом Академии наук Украинской ССР.

1.4. ЗАРОЖДЕНИЕ РАДИОБАЛЬНЕОЛОГИИ

Зарождению радиобальнеологии, одной из узких прикладных наук, способствовало открытие в 1902 г. А. Селла эманации радия в минеральных источниках и установление П. Кюри в 1901—1904 гг. сильного физиологического воздействия радиоактивных излучений на организм человека.

Исследования радиоактивности минеральных источников и грязей в последующие годы проводились по инициативе П. Кюри, Э. Резерфорда и других выдающихся физиков. По инициативе П. Кюри были проведены и первые эксперименты на животных. Уже в 1903 г., как вспоминает М. Кюри, были выявлены наиболее чувствительные к радиоактивным излучениям клетки, а затем показано, что некоторые раковые клетки можно разрушать радиоактивным излучением [Curie M., 1925]. Это направление в практической медицине успешно развивается и в наши дни. Успехи физиологических опытов действия излучений на человека, видимо, стимулировали ускорение исследований в изучении радиоактивности минеральных источников и развитие радиобальнеологии. Уже на первом съезде по радиоактивности в 1905 г. ядерно-физические исследования в области бальнеологии начали выделяться в самостоятельное научное и практическое направление.

К началу первой мировой войны во многих странах были накоплены многочисленные данные о радиоактивности минеральных источ-

ников и грязей. В России были обследованы на радиоактивность минеральные источники и грязи курортов юга, природные воды и источники Сибири, Алтая, Забайкалья. В Петербургском, Московском, Томском и Новороссийском (в Одессе) университетах и других учебных заведениях за короткий срок были подготовлены первые кадры русских радиологов. Это дало возможность в начале 20-х годов организовать на некоторых курортах самостоятельные наблюдения за радиоактивностью источников и грязей.

В 20-х годах в СССР началось планомерное изучение общих радиогидрогеохимических процессов обогащения минеральных источников радиоактивными газами и элементами. Оказалось, что в природных водах, в том числе и в минеральных источниках, наиболее часто встречаются растворенные газы — радон и эманация радия с малым периодом полураспада. А первые члены рядов радиоактивного распада урана (U), иония (Io), радия (Ra), мезотория (MsTh), радиотория (RaTh), протактиния (Pa), актиния (Ac) с большим периодом полураспада встречаются редко [Баранов, 1926а].

Результаты изучения радиоактивности минеральных источников в 20-х годах послужили окончательному обособлению радиобальнеологии, использующей методы гидрологии, бальнеологии, радиологии, радиационной терапии. Формирование радиобальнеологии носило международный характер. Ученые разных стран внесли существенный вклад в ее развитие, так же как и в развитие учения о радиоактивности и в дальнейшем — ядерной физики.

Основной задачей радиобальнеологии и в настоящее время является выявление радиоактивных (в основном радоновых) минеральных источников и грязей для лечебных целей, наблюдение за изменением состава лечебных вод, а также изучение влияния вод на человека.

Радиобальнеология, с одной стороны, тесно соприкасается с радиогидрогеологией, являясь ее частью и отличаясь тем, что радиогидрогеология, изучая радиоактивность природных вод суши, стремится выявить радиоеносные воды с целью использования их в радиевой промышленности в качестве сырья (о формировании радиогидрогеологии как научно-практической дисциплины более подробно см. в гл. 5). С другой стороны, радиобальнеология является также частью бальнеологии и курортологии.

1.5. ОБОБЩЕНИЯ ДЖ. ДЖОЛИ РЕЗУЛЬТАТОВ ПЕРВЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ РАДИОАКТИВНОСТИ ЗЕМНОЙ КОРЫ

Английский ученый Дж. Джоли (1857—1933) одним из первых геологов понял значение особых свойств радиоактивных излучений в геологических процессах [Вернадский, 1939]. Он опубликовал первую работу о радиоактивной теплоте Земли, вскоре Д.У. Стретт (1906 г.) провел определения содержания радия в породах и вычислил возможное количество тепла, выделяемое радием, содержащимся в горных породах. Дж. Джоли первым определил концентрацию другого радиоактивного элемента — тория в минералах и рассчитал количество тепла, выделяемое торием в процессе распада.

Дж. Джели еще в 1907 г. исследовал и объяснил загадочные для петрографов плеохронические "дворики" — ореолы, наблюдаемые во многих древних породах [Вернадский, 1939]. Такие ореолы были обнаружены давно, но нашли объяснение только после открытия радиоактивности, как и многие другие геологические загадки. Объяснение Дж. Джели было простым: центральное включение — это кристаллик минерала, содержащего радиоактивные элементы. Под влиянием альфа-излучения этого включения вокруг него образуется набор нескольких колец с разными, но строго определенными диаметрами. Причем энергия альфа-частиц каждого природного излучателя строго определена, под влиянием альфа-излучения окружающая включение слюда меняет не только свои свойства, но и цвет. За миллионы лет вокруг радиоактивных включений образуются окрашенные кольца, каждое из которых, как впоследствии оказалось, зависит от действия определенных альфа-излучателей. Интересно, что уже в 20-х годах Дж. Джели обнаружил еще два кольца с радиусами в 5,2 и 8,6 мкм, соответствующих энергиям альфа-частиц 2,2 и 3,4 МэВ, неизвестных в то время излучателей [Чердынцев, 1973]. Дж. Джели не только объяснил происхождение плеохронических колец, но совместно с Э. Резерфордом опытным путем воспроизвел это природное явление.

Дж. Джели опубликовал ряд первых, ставших классическими работ о радиоактивности многих природных объектов. В 1906 г. вышла его работа о содержании радия в морской воде [Joly, 1908]. Затем в те же годы он провел определения концентрации радия в морских отложениях. В 1909 г. появились его исследования о содержании радия и тория в вулканических породах [Joly, 1909]. Позднее он первым исследовал радиоактивность отдельных минералов, пород, вод и других объектов.

В.И. Вернадский познакомился с Дж. Джели в сентябре 1908 г. в Дублине на съезде Британской ассоциации наук. На этом съезде выступали виднейшие британские физики и химики с сообщениями о новых исследованиях в области радиоактивности. С докладом о самопроизвольных превращениях радиоактивных веществ с образованием в конечном счете гелия выступил У. Рамзай. Интереснейший доклад, посвященный радию, сделал М.Д. Дьюар. Д.У. Стретт привел данные о повсеместном рассеянии атомов радиоактивных элементов в земном веществе и биосфере [Вернадский, 1981].

Самым интересным для В.И. Вернадского, как он вспоминал позднее, оказался доклад Дж. Джели о геологическом значении урана и демонстрация первой сводки по радиогеологии [Там же. С. 225]. На основе измерений радиоактивности горных пород Дж. Джели привел расчет возможного количества энергии, непрерывно выделяемой радиоактивными элементами пород земной коры в процессе их распада [Вернадский, 1939].

В те же годы Дж. Джели попытался использовать данные о радиоактивности горных пород для объяснения некоторых геологических явлений. Вначале он попытался объяснить периодичность движений земной коры за счет накопления в ней радиоактивного тепла и в соответствии с законами изостазии. Надо отметить, что, несмотря на несостоятельность первых попыток Дж. Джели увязать динамику

земной коры с явлениями радиоактивности и очень большими трудностями, встретившимся даже в подходе к разрешению сложной проблемы тепловой истории Земли, позднее важная роль радиоактивного распада в физической жизни Земли была признана многими геологами, геофизиками и геохимиками [Войткевич, 1956].

В.И. Вернадский, много беседовавший с Дж. Джоли на съезде, сразу оценил значение его работ [Вернадский, 1981]. Они близко сошлись и сохранили дружеские отношения до самой смерти. Более того, выступая на XVII сессии Международного геологического конгресса в Москве в 1937 г., В.И. Вернадский, вспоминая о своих встречах с Дж. Джоли в Дублине, заявил, что тогда Дж. Джоли "открыл ему глаза" [Вернадский, 1939].

Основные положения своей концепции о роли радиоактивности в развитии Земли Дж. Джоли изложил в книге "Радиоактивность и геология", вышедшей в Лондоне в 1909 г. и переведенной на многие языки [Joly, 1909]. В последующее десятилетие Дж. Джоли разрабатывал свою концепцию, привлекая новые данные о радиоактивности природных объектов. В вышедшей в 1925 г. книге "Поверхность Земли" он более подробно и доказательно показал роль радиоактивного тепла в тектонических движениях земной коры [Joly, 1925]. В русском переводе книга вышла в 1929 г. (см.: [Джоли, 1929]). В ней он показал, что радиоактивность всех горных пород — установленный факт, и привел среднее содержание радия и тория в разных породах, дал расчеты поступления тепла от гранитных пород континентов и других крупных регионов. По его расчетам, "базальтовая постель" не тратит и не получает тепла, а, обладая некоторым содержанием радия и тория, постоянно накапливает тепло.

На дне океанов, считал Дж. Джоли, верхние слои "базальтовой постели" отдают свое тепло, но на некоторой глубине температура базальта благодаря радиоактивным элементам поднимается до температуры плавления. Через некоторый промежуток времени (по Дж. Джоли, через 33—50 млн лет) начинается расплавление "базальтовой постели" сначала сверху, а затем оно захватывает самые глубокие компенсационные слои. Эти слои уже не смогут поддерживать континенты, и они начинают опускаться, увеличиваются объем, радиус и поверхность Земли, и площадь поверхности, испытывающей общее поднятие, оказывается слишком малой. Разрывы в земной коре как на континентах, так и на дне океанов, возникшие в результате растягивания земной поверхности, дадут выход массам лав, образующим вулканические острова и мощные базальтовые плато. Одновременно океан зальет наиболее низкие части суши, и наступит режим трансгрессии.

В книге Дж. Джоли достаточно подробно рассматривал образование горных цепей, периоды горообразования, положение континентов, но его доводы оказались недостаточно убедительными, и суть предлагаемого им механизма процессов, происходящих в земной коре, не всегда была достаточно обоснована.

Попытка Дж. Джоли установить зависимость тектонических движений от тепла, выделяемого рассеянными радиоактивными элемен-

тами, признавалась многими учеными смелой, почти такой же смелой, как и попытка Вегенера. Но, по мнению советского геолога А.П. Герасимова, Дж. Джели опирается на большее количество фактов и геологических доказательств [Герасимов, 1922]. К неоспоримым фактам, которыми оперирует Дж. Джели, относят радиоактивность всех пород; вертикальные колебания суши, то заливавшейся морем, то высоко вздымавшейся горные цепи; явление изостазии или гравитационное уравнивание отдельных частей суши и даже временное расплавление "базальтовой постели" и роль приливных волн. Слабым местом концепции Дж. Джели было определение продолжительности отдельных циклов в физической жизни Земли.

Геологи того времени признавали, что концепция Дж. Джели объясняла многие "проклятые вопросы" геологии, но даже если она ничего не решала, она была смелой, не лишенной логики, глубоко продуманной попыткой подойти еще одним путем к решению важнейших вопросов развития Земли [Герасимов, 1922]. Работы Дж. Джели вызывали интерес и активно обсуждались геологами многих стран, идея же о возможности радиоактивного разогрева Земли долгое время рассматривалась как одна из вероятных гипотез. Достижения в области изучения радиоактивности земной коры и идеи Дж. Джели, однако, долгое время оставались в стороне от основной работы геологов [Вернадский, 1939]. Причиной тому, по мнению В.И. Вернадского, была несовместимость новых радиологических явлений с тем пониманием высокой температуры глубоких частей нашей планеты и длительности геологических процессов, которые господствовали в геологии времен открытия явления радиоактивности. Это были попытки компромисса нового со старым без анализа старого по существу, поскольку в XIX в. физика и химия достигли поразительных успехов, минералогия же еще проходила долгий и трудный путь окончательного становления.

1.6. ВКЛАД В.И. ВЕРНАДСКОГО В ФОРМИРОВАНИЕ РАДИОГЕОЛОГИИ КАК ОБОБЩАЮЩЕЙ НАУКИ О РАДИОАКТИВНОСТИ ЗЕМНОЙ КОРЫ

Зарождение радиогеологии как единой науки о радиоактивности земной коры относится к первым годам XX в. Однако до настоящего времени такая единая наука еще не сформировалась, хотя по мере познания радиоактивности природных объектов и на определенных этапах развития ядерной физики термин "радиогеология" использовался в научной литературе. И не только использовался термин — определялись задачи, направления исследований. За прошедшие почти 80 лет под влиянием идей и задач радиогеологии в ее недрах зародились отдельные направления ядерно-физических исследований земной коры, развивавшиеся затем независимо и ставшие в конце концов самостоятельными научными и техническими дисциплинами, входящими в комплекс наук о Земле.

Основоположниками радиогеологии считаются В.И. Вернадский и английский геолог Дж. Джели.

В.И. Вернадский один из первых предложил объединить физические, химические и геологические исследования радиоактивности земной коры (и отдельных природных объектов) в одну науку — радиогеофизику.

Под влиянием новых идей Дж. Джили В.И. Вернадский еще в 1910 г. в речи на годовом собрании Академии наук попытался обратить внимание русских ученых на изучение явлений радиоактивности, проявляющихся на нашей планете, в ее минералах и в горных породах, пытался направить внимание на изучение явлений радиоактивности самой по себе, а радиоактивности Земли, прежде всего истории радиоактивных минералов и их нахождения в земной коре [Вернадский, 1911].

После выступления в Академии наук В.И. Вернадский на несколько дней отправился в Париж, чтобы посоветоваться с М. Кюри о возможности и путях составления мировой радиоактивной карты [Вернадский, 1981. С. 308]. Он подробно ознакомился с постановкой работ в лаборатории М. Кюри, а затем посетил известного радиохимика П. Грота в Мюнхене. Вместе с А.Е. Ферсманом осмотрел только что открывшийся в то время Радиевый институт в Вене.

Осмотр передовых радиологических лабораторий Европы показал В.И. Вернадскому грандиозность задач в области исследований атомного ядра и множество непредсказуемых трудностей, которые могут встретиться на этом пути. В.И. Вернадский убедился в необходимости объединения усилий всех стран в проводимых исследованиях, а также в изучении радиоактивности земной коры.

Пути объединения усилий в новейших направлениях исследований, в том числе радиоактивных, обсуждались на международных конгрессах и научных съездах в России. Так, на состоявшемся в декабре 1911 г. Менделеевском съезде по общей и прикладной химии и физике, в котором принял участие В.И. Вернадский, обсуждался вопрос о создании в России новой организации в области радиоактивности. Выступивший при закрытии съезда профессор Н.А. Умов поддержал идею объединения научных сил. Он сказал, что наилучшие результаты в современных научных исследованиях могут быть достигнуты коллективной работой и что явно недостаточно только "литературное дебатирование" [Макареня, Поздышева, 1973. С.144]. В наше время, как известно, успехов в научных и особенно ядерно-физических исследованиях добиваются крупные научные коллективы, располагающие совершенным дорогостоящим оборудованием.

В.И. Вернадский много лет боролся за объединение усилий ученых и создание специальных научно-исследовательских институтов в России. В октябре 1916 г. на заседании КЕПС он вновь предложил обсудить вопрос об организации исследовательских институтов [Вернадский, 1981. С. 283]. В декабре того же года он представил КЕПС обоснование необходимости создания в России сети государственных научно-исследовательских институтов, образованных по единому плану [Мочалов, 1982. С. 208]. Добиться же организации такого типа институтов он смог только после Великой Октябрьской социалистической революции.

Вопрос об организации в стране исследований в области радиоактивности и об объединении усилий ученых в этой области науки и практики обсуждался уже 26—28 октября 1918 г. на совещании физиков в Москве. Совещание признало желательным объединение усилий в области радиоактивности, а также необходимым организовать подготовку радиологов на специально созданных кафедрах в университетах Москвы и Петрограда [Организация науки..., 1968]. Обоснованные доводы в пользу объединения научных сил и средств для проведения исследований и изыскания новых источников добычи радия, высказанные на совещании, были достаточно убедительными. Предложения совещания поддержали Академия наук и Всероссийский совет народного хозяйства РСФСР (ВСНХ).

Через месяц — в ноябре 1918 г. была создана первая в СССР научно-исследовательская объединенная организация в области радиоактивности. Эта организация называлась Радиевой ассоциацией. По межведомственному соглашению, утвержденному общим собранием Отделения физико-математических наук Академии наук, Радиевая ассоциация состояла из трех отделений: физического, химического и геолого-минералогического. Статус ассоциации, разработанный В.Г. Хлопиным, был близок к положению научно-исследовательского института. Ассоциация, как и институт, имела научные подразделения, ученый совет, а также располагала соответствующими юридическими правами.

Создание Радиевой ассоциации помогло в тяжелое время гражданской войны сосредоточить в одной организации специалистов в области радиоактивности и сохранить научные силы. Однако очень скоро стало очевидно, что Радиевая ассоциация не в состоянии выполнить все поставленные перед ней задачи по организации научных исследований и поискам месторождений радиоактивных руд. В ВСНХ и Академии наук пришли к выводу, что организующим центром должен быть институт в системе Академии наук, поскольку большинство специалистов работало в академических организациях¹. В апреле 1921 г. при Академии наук была организована специальная лаборатория для разрешения всех научно-технических вопросов извлечения радиоактивных элементов из отечественного сырья. В январе 1922 г. по решению Отделения физико-математических наук был учрежден Государственный радиевый институт [Организация науки..., 1968. С. 171].

В Радиевом институте было три отделения: химическое, минералогическо-геохимическое и физическое. Они соответствовали трем независимым научным учреждениям, вошедшим в институт, — Радиевой лаборатории Академии наук (ранее ответственной за организацию Радиевого завода Академии наук), радиевым отделам КЕПС и Рентгенологического и радиологического института. В.И. Вернадский был утвержден директором Радиевого института и заведующим минералогическо-геохимическим отделением. Помощником директора и заве-

¹ Архив Академии наук СССР, ф. 1, оп. 2—1922, д. 14, л. 47.

дующим химическим отделением был утвержден В.Г. Хлопин, ученым секретарем и заведующим физическим отделением — Л.В. Мысовский.

В конце первого года работы В.Г. Хлопин сообщал в Наркомпрос, что с организацией Радиевого института появились "... все условия для широкого и успешного развития научно-исследовательской работы в области радиоактивности, еще так недавно нам совершенно недоступной, и Советская власть не может не гордиться, что на ее долю выпало приобщить русскую науку к этой столь обещающей отрасли знания" [Организация науки..., 1968. С. 173].

В начале 20-х годов в СССР с еще большей остротой встала проблема поисков месторождений радиоактивных руд для промышленного производства радия и обеспечения радиевыми препаратами научных исследований. Однако Геологический комитет по-прежнему не был подготовлен к организации планомерных поисков радиоактивных минералов и руд. На запрос Бюро общих вопросов Главного управления горной промышленности от 13 июля 1922 г. о сроках возможной добычи радиоактивных руд на территории страны Геологический комитет не дал конкретного ответа, ограничившись краткими ориентировочными сведениями об общих условиях нахождения радиоактивных соединений в природных условиях [Отчет Геологического комитета за 1922 г., 1926]. В отставании геологии и геохимии радиоактивных элементов от физики и химии в области радиоактивности В.И. Вернадский видел разгадку того противоречия, какое наблюдалось между совершающимся переворотом в научном мышлении и малом отражении его в конкретных представлениях о природе [Вернадский, 1935а].

Чтобы восполнить образовавшийся пробел, Радиевый институт под руководством В.И. Вернадского широким фронтом развернул работы с целью получения точных экспериментальных данных о радиоактивности природных объектов, геохимии радиоактивных элементов, формах нахождения радия и продуктов его распада в земной коре.

В первые годы организации Радиевого института необходимо было прежде всего начать изучение возможностей и организацию сырьевой базы в районе Тюямуюна для обеспечения бесперебойной работы радиевого завода. В Тюямууне был исследован "загадочный рудный процесс" образования урана, и там удалось вновь организовать промышленную добычу урановой руды [Александров, 1926]. Крупнейшие ученые того времени В.Г. Хлопин, А.Е. Ферсман и Д.И. Щербаков занимались изучением генезиса руд в Тюямууне и поисками его аналогов. В результате их работ был выяснен процесс миграции радия и урана в пределах главной жилы Тюямуюна [Хлопин, Пасвик, 1928], определена схема образования рудного тела в процессе заполнения старой системы карста термальными рудными растворами, идущими снизу [Ферсман, 1928]. При этом химическим путем были уточнены формула и возраст минерала тюямунита [Хлопин, 1925], установлено широкое распространение своеобразных ванадатов никеля, меди и урана в предгорьях Алайского хребта [Ферсман, Щербаков, 1925], новые виды урановых и ванадиевых минералов, среди

которых туюмунит и предварительно названные авторами тангент, таранит, узбекит, алаит, коловратит [Ненадкевич, Волков, 1926].

В Радиевом институте были разработаны также необходимые полевые и лабораторные методы и приборы для определения радия, урана и тория в горных породах [Ратнер, 1933; Баранов, Кречмер, 1935]. Институт провел радиологические обследования крупнейших массивов, таких, как Хибинские тундры [Комлев, 1933], Центральные Кызылкумы, Центральный Тянь-Шань и др. [Соседко и др., 1933]. На основе собранных фактических данных были выяснены некоторые вопросы геохимии урана и тория в гранитных магмах [Комлев, 1936] и геохимии урана и радия [Старик, 1936].

В конце 20-х — начале 30-х годов в Радиевом институте проводились исследования гелиеносности некоторых районов нашей страны. Изучалась геохимия инертных газов, в том числе гелия [Хлопин, 1931]. Исследовались выделения гелия из радиоактивных термальных источников Памира [Толмачев, 1933]. Проводились опыты по анализу и изучению выделений газов из минералов [Черепенников, 1933]. Важность исследования гелия — продукта распада радиоактивных элементов — привела к необходимости организации в 1933 г. специальной газовой лаборатории, в задачи которой входило изучение геохимии гелия. Были изучены природные газы в Средней Азии и предложены пути их практического использования [Хлопин, 1935]. Новые данные широко обсуждались на семинарах института.

После опытов А.А. Черепенникова по изучению выделений газов из минералов в 1934 г. были начаты исследования путей выделения гелия из минералов. Оказалось, что выделение гелия могло быть связано с десорбцией гелия с поверхностей внутренних пустот твердого тела и диффузией гелия через кристаллическую решетку [Хлопин и др., 1934].

К середине 30-х годов было накоплено достаточно данных для составления сводки о распространенности гелия в недрах Земли и сделаны первые обобщения о "гелиевом дыхании" нашей планеты [Герлинг, 1935].

В Газовой лаборатории Радиевского института В.И. Вернадским были поставлены исследования газового обмена между наружной атмосферой и подземными выделениями газов. Изучалась концентрация аргона, криптона, ксенона и других благородных газов в природных объектах, а также геохимия гелия и аргона. Один из молодых сотрудников лаборатории В.П. Савченко попытался выяснить законы, управляющие системой жидкость—газы в природных условиях [Савченко, 1936].

В середине 30-х годов проведены работы по изучению геохимии радиоактивных элементов, начатые геологами Л.В. Комлевым, А.П. Герасимовым, С.П. Соловьевым, Н.М. Прокопенко и др. К тому времени относятся исследования радиоактивности нефтяных пластовых вод, которые помогли выявить новую неизвестную форму существования радия и урана на Земле и свидетельствовали о широкой распространенности радиеносных вод.

В Радиевом институте с 1926 г., несколько позднее чем в других странах, были предприняты первые попытки определения абсолютного

возраста геологических образований. Были исследованы пегматиты Северной Карелии [Хлопин, 1926]. В начале 30-х годов к проблеме возраста были привлечены также сотрудники Радиохимической лаборатории ЦНИГРИ. Об этих исследованиях подробно рассказывается в отдельной главе.

За десять лет существования Радиевого института были активно развернуты работы в физическом, радиохимическом и радиологическом направлениях. О результатах работы института во всех трех направлениях, объединенных понятием "радиогеология", В.И. Вернадский сделал доклад на заседании Отделения математических и естественных наук АН СССР [Вернадский, 1935а]. Он повторил свой доклад в мае того же года в Мюнстере на заседании Бунзеневского общества [Vernadski, 1932].

В этом докладе, названном им "Радиоактивность и новые проблемы геологии", В.И. Вернадский привел результаты исследований в трех основных направлениях: геохимия конечного продукта распада радиоактивных элементов свинца, радиоактивное определение геологического времени и составление радиоактивной геологической карты.

Он указал на чрезвычайную важность для развития знаний о земной коре точного определения геологического времени для многих других областей знаний, в том числе для изучения эволюции жизненных форм и всех других биологических проблем. Касаясь составления радиоактивной карты, он подчеркнул необходимость международной систематической работы по сбору материалов. Мировая радиоактивная карта должна будет дать возможность, по его мнению, определить запасы радиоактивной атомной энергии Земли, определяющей энергию биосферы, или, точнее, основной составляющей энергии биосферы [Вернадский, 1954. С. 567].

Несколько лет спустя, на XVII сессии Международного геологического конгресса в Москве в 1937 г., В.И. Вернадский в докладе "О значении радиогеологии для современной геологии" вновь подчеркнул необходимость международного соглашения в области изучения радиологических явлений [Вернадский, 1939]. Он напомнил делегатам конгресса, что открытие явления радиоактивности, по его мнению, является открытием не только физическим, но геологическим и астрономическим, что следует организовать систематические исследования всех без исключения естественных тел биосферы — минералов и живых организмов Земли [Там же. С. 218].

Радиоактивный распад, говорил В.И. Вернадский, давший человеку эталон времени, сопровождается тепловым лучеиспусканием, являющимся источником некоторых геологических процессов. Это новое геологическое явление сразу увидел Пьер Кюри — кристаллограф и физик, понявший, что материя земной коры с ее рассеянными радиоактивными элементами может быть самонагреваемым источником ее нагревания. Рассеяние радиоактивных и химических элементов в строении Космоса не учитывали Дж. Джолли, А. Холмс и др. в первых расчетах тепловой радиогенной энергии земной коры. Новые вычисления В.Г. Хлопина, по мнению В.И. Вернадского, подтвердили вывод о том, что теплота рассеянных радиоактивных элементов объясняет не только



На очередном семинаре в Радиовом институте (Ленинград, 1934 г.)

В первом ряду (слева направо): М.С. Меркулова, Л.Э. Кауфман, В.И. Гребенщикова, М.А. Пасвик-Хлопина; во втором ряду: В.Г. Хлопин, Б.А. Никитин, В.И. Вернадский, П.И. Толмачев, Ф.А. Панет (Анлия), Странский (Польша), Я. Гейровский (Чехословакия), А.Е. Полесицкий

все известные нам видимые геоморфологические изменения планеты, но и все излучения тепла в Космос [Вернадский, 1954. С. 688].

Особое внимание В.И. Вернадский обратил на возможности исследования радиоактивного распада при определении геологического времени образования тех или иных природных объектов. Работы в этом направлении начали первыми ученые США, проводились они и в СССР и других странах.

По предложению В.И. Вернадского на XVII сессии Международного геологического конгресса была создана Международная комиссия по определению абсолютного возраста горных пород и минералов. В задачи комиссии входило: установление единой методики определения абсолютного возраста на основе изучения продуктов радиоактивного распада; определение времени существования различных геологических образований и нанесение их на карту; определение наиболее древних участков Земли, например архейских пород, и т.д. Комиссия по определению абсолютного возраста горных пород и минералов, избранная на конгрессе в 1937 г., стала одной из первых международных организаций, координирующих работы и результаты в этой новой в то время области приложения ядерно-физических исследований для решения геологических задач.

В послевоенный период в 50—60-х годах внимание международной

общественности привлекли ядерно-физические исследования морей и океанов, осуществление контроля за радиоактивным загрязнением Мирового океана. Во многих странах были организованы комплексные научно-исследовательские экспедиции и в результате их работы получены фактические данные о радиоактивности гидросферы и литосферы.

Одновременно с происходившим в эти годы обособлением некоторых направлений в изучении радиоактивности земной коры вновь обострилась потребность в обобщающей науке о радиоактивных свойствах планеты.

На этом этапе наших знаний мы вернулись к понятию радиогеологии, которая должна была бы комплексно изучать радиофизические, радиохимические и геологические процессы на Земле [Войткевич, 1956]. В фундаментальных трудах по радиогеологии, или по ядерной геологии, как было принято называть эту область знаний в иностранной литературе, освещается и обсуждается весь комплекс исследований радиоактивности Земли. В рамках ядерной геологии рассматривают вопросы происхождения планеты, роли радиоактивного распада в ее тепловом балансе, радиоактивность и динамику земной коры, геохимию радиоактивных элементов и минералов. В радиогеологию по-прежнему включают вопросы радиогеохронологии, ядерно-физических исследований гидросферы и литосферы и т.д. [Nuclear Geology, 1954].

Таким образом, если в начале XX в. в задачи радиогеологии входили исследования радиоактивности природных объектов, составления радиоактивной карты земной коры, выяснения роли радиогенного тепла в жизни планеты, то во второй половине века положение несколько изменилось. В комплексе наук о Земле уже сформировались радиогидрогеология, ядерная геофизика и другие ядерно-физические направления исследований, поэтому на первое место вышли задачи обобщения данных о радиоактивности земной коры и Земли в целом, установления связи радиоактивности земного вещества с Космосом и т.д.

В следующих главах рассматриваются некоторые этапы формирования новых ядерно-физических направлений в изучении радиоактивности Земли, которые были намечены В.И. Вернадским в начале XX в. в рамках новой обобщающей науки — радиогеологии.

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ В ГЕОХРОНОЛОГИИ

2.1. ПЕРВЫЕ ПОПЫТКИ ВЫДЕЛЕНИЯ ОТДЕЛЬНЫХ ПЕРИОДОВ В РАЗВИТИИ ЗЕМЛИ

Проблема происхождения и развития Земли и особенно определения продолжительности ее основных периодов издавна привлекала внимание человека. Еще в древности были замечены многие, иногда противоречивые, особенности строения поверхности Земли. В горах, например, встречались породы с вкрапленными морскими раковинами, которые явно образовались в морских глубинах или отложились на мелководье, а затем через какое-то длительное время поднялись на большую высоту. Человек не был в состоянии сразу охватить те сложные процессы, которые пережила наша планета, и определить их продолжительность.

В сказаниях и мифах различных религий можно встретить описания последовательности "сотворения" и развития мира, появления огнедышащих гор и всемирных потопов. По древнеиндийским сказаниям, например, мир периодически разрушается и затем вновь восстанавливается. Земля вместе с главным божеством Брамой переживает поочередно то время активного божественного творчества и развития природных сил, то время сна божества, когда темные силы, воспользовавшись этим, разрушают все живущее до тех пор, пока божество вновь не проснется и не приступит к созданию нового мира. Свидетельством таких многократных периодов противоборства мировых сил и являются складки гор, вновь образовавшиеся пропасти и, наконец, морские раковины, найденные в породах высоко в горах.

Изучению развития и строения Земли много внимания уделяли ученые и философы. Так, древнегреческий философ Демокрит (ок. 450—370 г. до н.э.) считал Землю одним из множества бесчисленных миров Вселенной, которые имеют свою историю возникновения и развития. По Демокриту, вначале Земля, как и звезды, была совсем иной, а затем со временем менялась, увеличивалась в объеме, стала плотнее и неподвижнее. В работах другого древнегреческого философа Аристотеля (384—322 до н.э.) встречается много правильных суждений об изменении поверхности Земли, о землетрясениях и других явлениях природы. В первой "Метеорологии" Аристотель пишет: "Одни и те же об-

ласти земли не остаются постоянно либо влажными, либо сухими, но меняют свои свойства в зависимости от появления и иссякания рек. Поэтому и суша и моря меняются местами, и земля не остается на все времена землей, а море морем, но там, где была суша, возникает море, а где ныне море, там снова будет земля. Однако эти перемены следует представлять себе происходящими в определенном порядке через определенные промежутки времени” [Аристотель, 1983. С. 63—64].

В сочинениях известного античного географа и историка Страбона (63 г. до н.э. — 23 г. н.э.), помимо замечательных географических описаний многих стран, в которых он бывал, имеются сведения и о нахождении в горных породах вдали от моря морских раковин. Страбон объясняет этот факт тем, что земля, особенно находящаяся над морем, проявляет известную подвижность: она то поднимается, то опускается, потому и может то прибавляться, то убавляться, и благодаря этому могут возникнуть не только малые острова, но и материки [Павлов, 1921].

О циклах изменения поверхности Земли очень образно рассказывается в поэмах “Метаморфозы” древнеримского поэта Овидия (43 до н.э. — 18 н.э.), который обработал древнегреческие и римские мифы. “Не сохраняет ничто неизменным свой вид ... — говорит поэт, — ... Зрел я: что было землей крепчайшей некогда, стало морем, — и зрел я из вод океана возникшие земли. От берегов далеко залегают ракушки морские, и на вершукше горы обнаружен был якорь древнейший...” [Овидий, 1977. С. 369—370].

Перенесение окаменелых раковин на большое расстояние от моря, как считали ученые древности, служит неоспоримым доказательством прошедших важных циклов развития нашей планеты. В более позднее время ученые продолжали изучать это непонятное явление и стремились найти исчерпывающее объяснение.

В XV—XVI вв. великий итальянский художник, ученый и инженер Леонардо да Винчи (1452—1519), наблюдая за земляными работами во время прорытия каналов, также изучал морские раковины, находившиеся в породах на разных глубинах. Внимательно осматривая находки, он пришел к выводу, что раковины ранее находились на дне моря, вблизи берегов, затем постепенно наполнились илом и окаменели. Эти процессы проходили очень медленно. Леонардо да Винчи, хотя и не смог объяснить, куда могли исчезнуть воды моря, если они когда-то покрывали всю землю и горы, был твердо уверен, что ископаемые раковины, листья, морские водоросли, морские рачки и другие окаменелости могли быть предшественниками живущих ныне в море. Но он не смог определить время, прошедшее с момента поднятия дна морского до современного ему уровня.

В XVII в. датский естествоиспытатель Н. Стено (1638—1686), исследуя окрестности Тосканы, высказал предположение о происхождении слоистого строения за счет осаждения морской взвеси в течение длительного времени. В книге “О твердом, естественно содержащемся в твердом”, вышедшей во Флоренции в 1669 г., он показал, что слои первоначально образовывались горизонтальными, затем в результате

частичного размывания и обрушения (естественного или вследствие подземных толчков) осадочные слои могли принять наклонное и даже вертикальное положение [Стенон, 1957]. Н. Стено сформулировал ряд аксиом об образовании окаменелостей в соответствии с законами природы и вывел важные следствия возможности выяснения последовательности геологической истории данного района, "восходя от новейших к наиболее древним" [Там же. С. 58].

Эпохи в развитии Земли были более подробно рассмотрены известным французским натуралистом Ж. Бюффеном (1707—1788), директором Ботанического сада в Париже. Он занимался изучением природы, описанием поведения и развития животных в естественной обстановке, показал, что изменение отдельных видов животных происходит под влиянием окружающей среды — земной поверхности. Бюффон предполагал, что Земля — есть часть Солнца, отколовшаяся от него при ударе кометы, и что в процессе ее развития и остывания большое значение имели воды Мирового океана [Бюффон, 1789]. Возраст Земли Бюффон определил в 75 тыс. лет, а в развитии Земли выделил семь периодов [Бюффон, 1789]. И хотя общее время существования Земли Бюффеном оказалось явно занижено, выделение семи длительных периодов в ее развитии было правильным. Особенно важным для последующего изучения Земли было утверждение Бюффона о последовательности образования горных пород на протяжении всей истории планеты, о вымирании одних видов животных и растений, появлении других и т.п.

Английскому геодезисту и инженеру В. Смит (1769—1839), развившему идеи Бюффона, удалось доказать связь определенных видов растений и животных с соответствующими периодами развития Земли. В. Смит еще в детстве любил собирать простые и причудливые окаменелые ракушки, которые он находил в большом количестве около дома и на ближайших полях. Позднее, когда В. Смит работал по проектированию и проведению каналов в Англии, он продолжал собирать окаменелости, встречающиеся в прорытых каналах. Систематизируя свою коллекцию, он расположил образцы по глубинам и местам их нахождения. Некоторые окаменелости оказались весьма распространенными — они встречались во многих слоях угольных и меловых отложений, другие — только в одном-двух. Он установил, что некоторые окаменелые организмы, жившие в определенное геологическое время, не встречались ни до, ни после него, т.е. принадлежали к одновозрастным ископаемым организмам.

В. Смит доказал возможность сопоставления различных слоев осадочных пород, расположенных в Англии, Уэльсе и других районах, не связанных между собою. Первая обобщающая работа В. Смита по классификации ископаемых механизмов появилась в 1790 г., но прошла незамеченной. Однако спустя девять лет — в 1799 г. его рукописная "Шкала осадочных образований Англии" уже широко использовалась [Высоцкий, 1977], поскольку на ее основе впервые стало возможным выявить хронологическую последовательность осадочных толщ Земли. С этого времени начались усиленные поиски критериев определения возраста геологических периодов в развитии Земли.

В начале XIX в. французские ученые А. Броньяр и Ж. Кювье разработали схему стратиграфического расчленения третичных отложений Парижского бассейна. Два года спустя А. Броньяр предложил минералогическую классификацию горных пород, ввел наименования — диабаз, малафир и др., а в 1829 г. опубликовал хронологическую шкалу всех известных в то время свит на основе палеонтологических характеристик [Brougniat, 1829].

Позднее к одному возрасту стали относить отложения, содержащие сходную флору и фауну. По степени изменения ископаемых организмов геологи могут судить о протекшем относительном времени. Оказалось, что чем древнее осадки, тем более их фауна и флора отличаются от современных тем они ближе к древнейшим. В соответствии с порядком напластований и учетом данных палеонтологии осадочные породы были отнесены к определенным периодам развития Земли. Хронологическая последовательность периодов с характерными остатками флоры и фауны в различных слоях Земли отражала также логическую последовательность эволюции животного и растительного мира планеты. В хронологической таблице истории Земли выделялись эры, периоды, эпохи, века.

Наиболее древние пласты относятся к нижнелаврентьевской эпохе архейской эры и представляют массивные породы без каких-либо признаков остатков органической жизни. В следующей, верхнелаврентьевской, эпохе той же эры также отсутствуют ископаемые организмы. Начиная с гуронской эпохи появляются первые следы органической жизни на Земле. В слоях, расположенных под кембрийскими отложениями, совершенно четко установлено присутствие первых радиолярий, плеченогих, кораллов, ракушек и трилобитов. В последующих кембрийских отложениях новой палеозойской эры встречаются более разнообразные, хотя все еще скудные, остатки живых существ — корненожек, губок, медуз, граптолитов, червей, трилобитов, моллюсков и др. Остатки этих низших животных оказались недолговечными и в большинстве своем были разрушены последующими геологическими процессами.

Первые наиболее хорошо сохранившиеся остатки живых организмов относятся к силурийской эпохе. В отложениях силура найдены остатки более развитых организмов. По представлениям геологов в силурийскую эпоху на планете господствовало море, населенное беспозвоночными животными и заросшее подводными лесами водорослей. В девонскую эпоху (названа по Девонширу в Англии) появляются первые рыбы, в слоях отложился красный песчаник. Затем появились первые амфибии (каменноугольная эпоха), а далее вновь — красный песчаник. Причем мощность пластов этих эпох несколько превышает отложения предыдущей эпохи и почти вдвое больше мощности пластов, отложившихся позднее [Штерне, 1909]. В этот период — одну из наиболее длительных в истории Земли — эволюция царства позвоночных достигла эпохи пресмыкающихся, растений — древовидных папоротников, оказавшихся могучими и чрезвычайно распространенными растениями.

Мощность отложений мезозойской эры достигает 15 тыс. футов (4500 м). В древнейшей триасовой формации этой эры наиболее

ранними были отложения пестрого песчаника и так называемого кейпера. В юрской формации различают черную, бурую и белую юру. В меловой — находят пурбекские слои (от английской местности Пурбек) и вельдские отложения. Собственно меловую эру в начале XX в. разделяли на неком, гольт, ценоман, турон и сенон. В меловом периоде появились первые птицы, древнейшие млекопитающие, а также древнейшие растения, опыляемые ветром и насекомыми.

Мощность кайнозойской эры составляет не более 5 тыс. футов (1500 м) и разделяется на третичный и четвертичный периоды. Эта эра может считаться эрой расцвета млекопитающих животных, лиственных лесов. Четвертичная система кайнозойской эры связана с появлением человека, мощные отложений этой системы оцениваются примерно в 500 футов (150 м), что составляет около 0,5% мощности всех отложений. В плейстоцене, одном из двух слоев четвертичной системы, как показалось сначала ученым, были найдены "следы потопа", которые оказались следами ледниковой эпохи. В аллювии (или наносе) новообразования произведены реками или другими водоемами в современном их распределении. Часть этих новообразований постепенно переходит в последнюю фазу развития Земли — культурный слой (табл. 1).

На прилагаемой таблице, составленной О. Лукашевичем в начале XX в., выделены четыре упомянутые эры, 28 эпох и 12 периодов. Таблица дает лишь приближенную картину подразделения наслоений главнейших пластов. Самые позднейшие слои занимают в таблице значительно большее пространство, чем это могло быть во времени по сравнению с древнейшими наслоениями.

В последующие годы в таблицу геологических формаций вносились и вносятся изменения и уточнения. Так, в книге Р. Лотце "Древность Земли в свете современной науки" [Лотце, 1924] введены новые подразделения в зависимости от периодов оледенения, введены и многие другие уточнения.

Позднее таблица стала более подробной. Изучение наслоений земной коры в восходящем порядке давало возможность установить относительную хронологию развития земной коры. Установление принадлежности той или иной окаменелости к определенной геологической формации долгое время считалось идентичным установлению "геологического возраста" образца.

"Геологический возраст", как и таблица, был чисто относительным, фиксирующим очередность того или иного события (раньше или позже), иногда и относительную длительность некоторых периодов в развитии Земли.

Установление геологического возраста (и то не всегда точное и надежное) с развитием естествознания оказалось совершенно недостаточным. Геологию интересовали не только относительные промежутки времени между тем или иным периодом, но требовалось знание (или установление) каких-либо абсолютных единиц исчисления во времени: тысячелетия или миллионы лет. Определение периодов во времени чрезвычайно важно было для геологии и смежных наук, в частности для биологии, поскольку необходимо устанавливать скорости протекания естественных процессов развития того или иного вида (или рода)

Таблица 1

Геохронологическая таблица начала XX в. [Лукашевич, 1908]

Эра (группа)	Период (система)	N	Эпоха (отдел)	Флора и фауна	
Кайнозойская	Четвертичный	1	Современная (аллювий)	Современная флора и фауна	
		2	Делювиальная (ледниковый)	Появление человека	
	Третичный	3	Плиоцен	Сильное развитие плацентарных млекопитающих	
		4	Миоцен		
		5	Олигоцен		
		6	Эоцен		
Мезозойская	Меловой (мел)	7	Верхнемеловая	Вымирание исполинских пресмыкающихся. Первые плацентарные млекопитающие	
		8	Нижнемеловая	Первые двудольные растения	
	Юрский (юра)	9	Мальм	Первые однодольные растения	
		10	Доггер	Первые птицы	
		11	Лиаз	Эпоха расцвета пресмыкающихся	
	Триасовый (триас)	12	Кейпер	Первые костистые рыбы (вымирание лабиринтодонтов)	
		13	Нижнетриасовая		
	Палеозойская	Пермский	14	Цехштейн	Амфибии, пресмыкающиеся
			15	Красный лежень	Голосемянные, сосудистые, тайнобрачные
		Каменноугольный	16	Пермокарбон	Первые пресмыкающиеся
			17	Верхнекаменноугольная	Первые амфибии
		Девонский	18	Нижнекаменноугольная	Время расцвета сосудистых, тайнобрачных
19			Верхний девон	Первые голосеменные растения	
20			Средний девон	Много рыб (гоноидные, сельахии)	
Силурийский		21	Нижний девон	Трилобиты, уменьшающиеся в числе, первые рыбы	
		22	Верхний силур	Первые сосудистые, тайнобрачные	
Кембрийский		23	Нижний силур	Расцвет трилобитов и плеченогих	
	24	Кембрийская	Водоросли, корнеожки, губки, медузы, граптолиты, черви, цистидеи, плеченогие, трилобиты, моллюски		
Архейская	Гуронский	25	Верхнегуронская	Первые организмы в ископаемом состоянии, водоросли, корнеожки, гидроиды, кольчатые черви, плеченогие, трилобиты	
		26	Нижнегуронская	— " —	
	Лаврентьевский	27	Верхнелаврентьевская	Отсутствие ископаемых организмов	
		28	Нижнелаврентьевская	Массивные породы	

растений и животных. Например, установление даже порядка значений времени обособления типов животных могло иметь для животноводства практическое значение при выведении новых пород и т.д. Помимо этого, особенно важно было знать, когда (сколько лет тому назад) и в какой период развития планеты появилось человечество, и проследить его влияние на развитие земной коры.

Одним словом, были необходимы измерители так называемого абсолютного возраста геологического развития.

Задача восстановления истории земной коры по геологическим документам — окаменелостям и определения абсолютного возраста геологических периодов и формаций очень долго оставалась нерешенной. Сведения о возрасте Земли и уточнении истории ее развития постепенно начали складываться в научную дисциплину после того, как возникли и достигли определенного развития другие науки, с которыми геология была вынуждена соприкасаться [Павлов, 1921]. Рождение геологии как точной науки, вышедшей из рамок описательной, известный русский геолог академик А. П. Павлов связывал с развитием других естественных наук.

В XIX и начале XX в. в геологии разрабатывались свои методы определения абсолютного возраста, но уже с начала XX в. развивались ядерно-физические методы.

2.2. ПОИСКИ ПУТЕЙ ОПРЕДЕЛЕНИЯ АБСОЛЮТНОГО ВОЗРАСТА ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ФОРМАЦИЙ И ПЕРИОДОВ В ИСТОРИИ ЗЕМЛИ

Попытки найти геологические измерители времени в развитии Земли предпринимались многими естествоиспытателями и философами на протяжении ряда веков. Эти попытки сначала были связаны с изобретением в древности и средние века солнечных и водяных часов, а позднее — с созданием греками и арабами первых механических часов. Предпринимались попытки рассчитать возраст Земли по геологическим данным, например по соотношению содержания солей в океанической воде и по количеству солей, ежегодно выносимых в океан речными водами, по скорости образования морских отложений и по общей мощности осадочных пород, образовавшихся за время существования Земли как самостоятельного космического тела. Можно напомнить и о попытках определить возраст Земли по количеству карбонатных пород исходя из количества углекислоты, образующейся на Земле в вулканах, при дыхании животных и растений, горении угля и нефти и т.д.

Все геологические способы расчета возраста Земли имеют общий недостаток — они основаны на предположении постоянства скорости протекания геологических процессов.

Наиболее ранние попытки установления абсолютного возраста отдельных геологических формаций относятся к XVII в. Одним из первых был способ подсчета работы текущих (или перемещающихся) вод. Была вычислена скорость отложения осадков (Галлей, Гики, Лаппоран, Гаутон, Дэвисон, Солласон, Рид и др.) и размывания (денудации) (Муррей, Кларк, Ромер, Джолли и др.).

В XVIII и особенно в XIX в. во многих районах земного шара были определены общие мощности осадочных отложений, а также ряда следующих друг за другом свит и пластов. По полученным данным были разработаны геохронологические системы, приняты термины, означающие определенное относительное геологическое время.

Наиболее ранняя геохронологическая систематизация осадочных отложений была проведена в Англии к середине XIX в. Принятое в то время название периода "карбон" связано с отложениями, включающими в себя пласты угля, известные английским горнякам под названием "угленосная продуктивная толща". Залегающий ниже крупнозернистый песчаник получил название жерновой, а горные известняки были объединены в одну свиту под названием каменноугольная система. Слои красного песчаника, входящие в эту систему, сначала назывались древним и новым красными песчаниками, а после 1841 г., когда Р. Мурчисон открыл такие же отложения в Пермской губернии, к востоку от р. Волги, они вошли в пермскую систему. Найденные в Германии слои красного песчаника вошли в триасовую систему и т.д.

Можно привести еще несколько примеров. Так, юрская система получила название от слоев, открытых французским геологом А. Бронь ром в районе Юрских гор, меловая система — от такого же рода отложений, изученных В. Смитом на территории Англии. Силурийские отложения названы Р. Мурчисоном в честь отважного кельтского племени силуритов, живших в пограничных с Уэльсом районах в начале нашей эры и боровшихся за независимость с римскими войсками. Девонская система первоначально была открыта и исследована в северном и южном Девоне в Англии, а затем такие отложения обнаружены в других районах Англии и России.

В истории Земли были выявлены крупнейшие периоды, продолжительность которых исчислялась в "метрах отложившихся слоев". Однако самый древний период в истории Земли не отмечен в отложениях и остается до сего времени неизвестным по продолжительности по сравнению с другими периодами.

Попытки определить общее уменьшение всей земной поверхности по годичной работе рек предприняли в конце XIX—начале XX в. английский геолог Дж. Меррей (1841—1914) и американский геохимик Ф. Кларк (1847—1931). Дж. Меррей участвовал в кругосветной океанографической экспедиции на судне "Челленджер". По материалам экспедиции он составил классификацию морских грунтов и представил их географическое распределение в зависимости от глубины океана и удаления от берегов [Murray, Renard, 1891]. Ф. Кларк провел многочисленные подсчеты среднего состава земной коры с учетом того, что растворенные осадки, переносимые всеми реками, в среднем составляют 2500 млн т, взвешенные осадки — 6000 млн т, а также того, что осадки распределены по земной поверхности равномерно в слое толщиной от 1/28 до 1/30 мм [Андрусов, 1912]. Эти допущения дали возможность в первом приближении оценить среднее время снижения уровня воды в бассейнах на 1 м за время от 28000 до 30000 лет.

В дальнейшем эти данные уточнялись, поскольку более детальные исследования выявили необходимость учета, как оказалось, весьма ощутимой разницы в работе рек. Одной из самых разрушительных и активных считалась р. Ирвади в Индокитае, которая почти в 20 раз быстрее выносит осадки. Для формирования осадка мощностью в 1 м этой реке требуется только 1300 лет. Несколько отстают от Ирвади

реки По, Ройсс и реки бассейна Гудзонова залива, которым для наноса 1 м требуется 2800—3000 лет. Наиболее медленно "работают" европейские реки. Так, р. Неккар, ежегодно выносящей 1584 млн твердых частиц в Рейн, для образования осадков в 1 м требуется уже 20000 лет [Лотце, 1924].

По подсчетам Дж. Меррея, 19 хорошо изученных рек переносили в год 1385 м^3 осадков, что соответствует концентрации $0,00043 \text{ м}^3$ твердых веществ в 1 м^3 воды. Приняв количество воды, сливающейся с суши в море, равным 23000 м^3 в год с учетом выпадающего дождя (его испарений и поглощения почвой), он установил, что в море в среднем ежегодно доставляется около $10,5 \text{ м}^3$ твердых веществ. Французский геолог А. Лаппоран (1839—1908) увеличил эту цифру до 16 м^3 за счет чисто морских осадков. По его расчетам, ежегодный снос твердой земли составлял 0,11 мм, что давало общее понижение земной поверхности на 1 мм за 9 лет.

Были рассчитаны не только скорости осадконакопления, но скорости и время выравнивания суши за счет работы рек. По данным Дж. Меррея, для выравнивания, например, Европы должно потребоваться не менее 7 млн лет, а по данным А. Уоллеса — 28 млн лет. Порядок приведенных величин подтверждается и геологическими данными; в Европе с начала кембрия исчезли каледонская и герцинская горные цепи, остатки которых еще сохранились благодаря позднему горообразованию в некоторых ее пунктах [Андрусов, 1912]. У А. Лаппорана, по данным Андрусова, время, необходимое для выравнивания всей суши (по данным работы рек), составило только 4,5 млн лет.

Определение абсолютного времени формирования осадков по работе рек, как видно из приведенных примеров, оказалось противоречивым. Видимо, эти данные нельзя считать соответствующими реальным фактам, имевшим место в прошлом. Во-первых, из-за ошибочного предположения постоянства скорости денудации в течение геологического времени. В прошлые периоды, считает А. Холмс (1890—1965), материки были менее приподняты и суша имела обычно меньшее протяжение, чем в настоящее время, поскольку теперь земная кора близка к концу великого периода горообразования и поднятия материков [Гольмс, 1930]. Во-вторых, за счет увеличения механической энергии рек. Увеличилась и химическая денудация, поскольку моря в прошлом заливали низменности на долгие периоды, а реки и грунтовые воды текли крайне медленно и вяло. Со времени кембрийского периода обширные площади суши скорее получали осадки, а не давали материал для них. Кроме того, в прошлом земной шар подвергался исключительно обширному оледенению, когда скорость денудации была ничтожно мала. Современные ледниковые области являются частью прошлого оледенения с легко смываемыми отложениями.

А. Холмс считает, что дополнительное ускорение денудации происходит также за счет деятельности человека, когда многие из величайших и геологически активных рек протекают по густо населенным и интенсивно обрабатываемым землям, где ранее росли густые леса, сохранявшие почву. Вырубка лесов, возделывание и разрыхление почв, а также проводимые человеком горные и строительные

работы, выброс газов от предприятий и транспорта и т.д. способствовали значительному ускорению переноса и формирования осадков.

Попытки определения возраста океанов по скорости аккумуляции солей предпринимались еще в самом начале XVIII в. Английский астроном и геофизик Э. Галлей (1656—1742) еще в 1715 г. обратил внимание на заметное увеличение солености морей и океанов, связанное, по его мнению, с растворимостью минеральных осадков, приносимых реками. Однако в то время еще не было накоплено достаточно статистических данных и предположение Э. Галлея о возможности определения абсолютного возраста океанов не имело практического выхода.

Почти через 200 лет геолог и геофизик Дж. Джели вновь попытался провести соответствующие этой гипотезе расчеты. В 1899 г. Дж. Джели систематизировал имевшиеся в то время данные о составе океанических вод — многочисленные съемки и анализы вод, произведенные во многих частях света, и главным образом во время плавания "Челленджера". По обобщенным данным Дж. Джели, масса океанических вод равнялась $1178 \cdot 10^9$ млн т, общее количество натрия, растворенного в океане, составляло $12000 \cdot 10^6$ млн т (из расчета среднего его содержания 1,08%), а среднее количество натрия, выносимого реками в океан, равно 156 млн т [Джели, 1929]. Дж. Джели считал ежегодное приращение натрия в океане постоянным и равным привносу его реками на всем протяжении геологического времени. При таких допущениях возраст океанов, по Дж. Джели, оказался равным 81 млн лет.

Расчеты Дж. Джели и принятые им допущения и в то время казались достаточно грубыми и неправильными, поскольку такого количества натрия не содержалось в горных породах и, следовательно, не могло поступить в океан. На этом основании в самом начале XX в. идея и расчеты Дж. Джели были отвергнуты как бесполезные [Андрусов, 1912]. Но уже в 20-х — начале 30-х годов ученые вновь попытались определить абсолютный возраст океана по ежегодному увеличению его солености за счет разных поступлений. Так, А. Холмс показал, что если в океан переносится в виде осадка 5700 млн т горных пород в год и в растворенном виде еще 2440 млн т, а ежегодные поступления натрия составляют 156 млн т (в том числе в осадке — 70% натрия, в растворе — 30%), то доля натрия в общем количестве приносимых в океан осадков не будет превышать 2% [Гольмс, 1930]. При этом (с учетом среднего содержания натрия в горных породах 1,3%) должна наблюдаться полная потеря натрия породами суши, что, конечно, не соответствует действительности. Поэтому А. Холмс предложил учитывать также натрий, содержащийся в минералах осадков и в растворенной воде. В то время считалось, что в уносимом ежегодно растворе содержится 35 млн т натрия, а в океане — $12600 \cdot 10^6$ млн т. С учетом дополнительных условий ориентировочный возраст океана, по А. Холмсу, равен 330 млн лет.

А. Холмс считал, что при определении возраста океана следует учитывать содержание натрия в грунтовых водах, бессточных озерах

и соленосных отложениях; уносимый ветром с суши в виде соли, содержащейся в брызгах волн; находящийся в соли, добываемой промышленностью и возвращаемой в океан сточными водами и химическими отбросами; поступающий в воду при размыве берегов, вулканических извержениях и т.д. Кроме того, следует учитывать первоначальную соленость океана.

Однако даже при учете этих и других факторов поправки, вносимые за их счет при определении возраста океана, могут оказаться настолько малыми по сравнению с поправкой на непостоянство скорости денудации в течение всех прошедших геологических периодов, что их введение не окажет заметного влияния на окончательный результат. А. Холмс считал, что методы определения абсолютного возраста океана по скорости аккумуляции натрия, вносимого водой и осадками в океан, в принципе не могут обеспечить приемлемых значений возраста, поскольку темп внесения в океан натрия в растворенном виде или в виде осадков менялся в течение геологического времени. Если ввести поправку на неравномерность поступления натрия и считать, что современный темп осадконакопления значительно выше, чем в древнейшие времена, то можно установить, как считал А. Холмс, более или менее приемлемый абсолютный возраст океана. Он считает, что современный темп осадконакопления по крайней мере в 5 раз выше среднего темпа за все прошедшее геологическое время [Там же. С. 66]. При таком условии, по данным А. Холмса, возраст океана составляет примерно 1 млрд 500 млн лет.

Остановимся подробнее еще на одном, более точном, "геологическом методе" определения абсолютного времени протекания ледникового периода, и в первую очередь времени отступления ледников. Основой для определения времени ученым служили "геологические летописи", в том числе, например, ясно выраженная слоистость глин, покрывающих всю область недавнего оледенения Скандинавского полуострова. В конце XIX в. шведский геолог К. Де Геер (1858—1943) выявил, что ленточные (слоистые) глины отложились в море в связи с отступлением ледникового покрова, а когда ледники стаяли, под ними земная поверхность оказалась ниже уровня моря [Лотце, 1924]. Наслоения ленточных глин, как установил К. Де Геер, соответствуют годичным периодам аналогично кольцевым прослойкам в древесине. В 1905—1906 гг. К. Де Геер с добровольцами обследовал разрезы глин в копальнях, на кирпичных заводах, железнодорожных выемках, определил мощность отдельных слоев. Затем, перенеся профили на карту и выбрав из них последовательный ряд, он показал путь отступления глетчера и вычислил время отступления. Он составил карту окрестностей Стокгольма с нанесенными границами глетчера за 20 лет. Выяснилось, что ледники двигались неравномерно: на юге Швеции они отступали со скоростью 50 м в год, на севере — до 100 м в год. Выявились и "отдыхающие" ледники, когда во время остановок могли сформироваться морены, происхождение которых до того времени не было установлено. Отступление льда продолжалось (по подсчетам слоев глин) 300 лет. Но позднее, в "финногляциальный" период, ледники двигались быстрее, достигая скорости 100—300 м/год. Общее

время движения ледников, по подсчетам К. Де Геера, составило только 2000 лет, а весь путь от юга Швеции ледник прошел за 5000 лет.

По числу полосатых ленточных глин на дне оз. Рагунда, осушенного в 1796 г., К. Де Геер определил период, прошедший от полного исчезновения льда до осушения озера, в 7000 лет.

По вычислениям и исследованиям К. Де Геера, льды достигали южной оконечности Швеции еще 12000 лет тому назад. Причем 5000 лет из них могут считаться окончательно и бесспорно установленными, а 7000 лет необходимо было подтвердить другими дополнительными данными. Во всяком случае, как считал К. Де Геер, с достаточной вероятностью можно считать, что время, прошедшее от полного исчезновения льда до нашего времени, должно превышать 7000 лет. Эти цифры подтвердил немецкий естествоиспытатель Кейльхан, который изучил район Свинемюнде по старинным шведским картам 1700 г. Определив время сброса и образования дюн в 7000 лет и приняв продолжительность предшествующего периода в 4000 лет, он показал, что общее время, прошедшее с момента таяния льдов, должно быть примерно равно 11000 лет. Большинство исследователей 20-х годов XX в. считали 11000 лет более вероятной цифрой чем 7000 К. Де Геера.

Были предприняты также попытки установить точное время движения льдов от великой прибалтийской моренной гряды с учетом меньшей скорости движения ледняков на этом участке. После принятия различных допущений Р. Лотце считал его не менее чем 15000 лет [Лотце, 1924].

Определение времени альпийского оледенения было проведено швейцарским геологом А. Геймом (1849—1937). По его данным, время образования насыпных дельт Фирвальдштетского озера колеблется в пределах от 10000 до 50000 лет, но наиболее вероятным он считает время 16000 лет при учете состояния ила и гальки, выносимых реками в озеро. Для других озер того же региона потребовалось 20000 и 15000 лет. Общее время отступления альпийского ледяного покрова было определено в 20000 лет, что не противоречит времени образования прибалтийских концевых морен и соответствует возрасту Бюльского выступа.

В Северной Америке геологи попытались проследить путь отступления льдов в области Великих озер (к океану) и рождения Ниагарского водопада за счет образовавшейся реки и ее падения с высоты уровня оз. Эри в равнину оз. Онтарио. С течением времени разрушительное действие падающей воды, вымывающей мягкие породы у подножия водопада, способствовало продвижению водопада в каменные породы своего русла по направлению к оз. Эри. По срезам образовавшегося ущелья длиной более 11 км была установлена скорость отступления водопада, она равнялась 12 см/год, а в некоторых его частях достигала 1 м 37 см в год [Лотце, 1924]. В 20-е годы нашего века американские геологи установили, что время прорытия русла для стока четырех озер колеблется в пределах от 20000 до 40000 лет, а время освобождения этой территории от ледникового покрова приблизительно равно 30000 лет. Это время согласуется со временем таяния глетчеров европейского оледенения.

Немецкий геоморфолог А. Пенк (1858—1945) предложил использовать совокупность созидательной и разрушительной работы рек в позднейший ледниковый и послеледниковый периоды для определения продолжительности их отдельных фаз. Приняв за единицу время послеледникового периода, он показал, что длительность рисс-бюرمىской, миндель-рисской и гюнц-миндельской эпох относятся, как 1:3, 1:12, 1:3 соответственно [Penck, 1909]. При каждом новом наступлении ледники, согласно гипотезе А. Пенка, достигали максимальной границы оледенения и на некоторое время задерживались, причем продолжительность ледниковых передвижений, вероятно, в 6—8 раз превышала послеледниковую эпоху, а весь ледниковый период был в 26 раз продолжительнее послеледникового [Лотце, 1924]. В абсолютных цифрах длительность времени, протекшего после Бюльского передвижения, могла быть принята равной 20 000 лет, а весь ледниковый период продолжался 500 тыс. лет.

Некоторые геологи, разделявшие концепцию А. Пенка, например американский геолог А. Грабау (1870—1946), считали, однако, более правильным расширить время оледенения от 500 тыс. до 1 млн лет [Grabau, 1926]. Позднее шведский ученый-геолог и петрограф Х.Г. Баклунд (1878—1958) указал, что в расчетах А. Пенка имеются ошибки из-за неравномерных и неравнозначных во времени и пространстве циклов [Высоцкий, 1977]. Но, по мнению Б.П. Высоцкого, замечание Х.Г. Баклунда справедливо только в том смысле, что следует (по возможности) учитывать очередность данного процесса в общем цикле развития Земли, поскольку самое возмозможность наличия цикличности он не отвергает [Там же. С. 170]. При критическом пересмотре всех полученных до 1920-х годов данных о продолжительности ледникового периода с учетом введения поправок ($\pm 25\%$) на разные случаи образования прибалтийских морен ледниковая эпоха, по мнению Р. Лотце, продолжалась от 200 тыс. до 1 млн лет [Лотце, 1924].

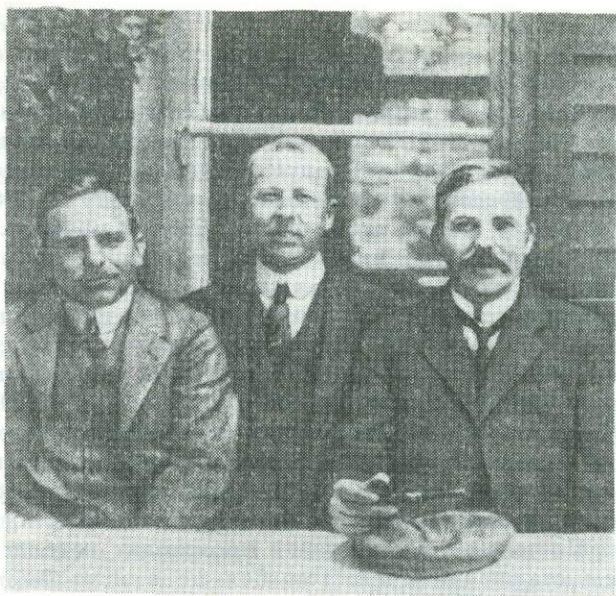
В геологии, кроме методов, основанных на "каменной летописи Земли", разрабатывались различные так называемые физические методы, базирующиеся на той или иной гипотезе происхождения и развития планеты с твердой корой. Так, еще в XVII в. Бюффон предложил рассчитать возраст Земли по времени ее остывания, исходя из того, что Земля есть осколок Солнца, отделившийся от него при столкновении с каким-то космическим телом. По данным Бюффона, возраст Земли составлял 82 000 лет. Гипотеза об огненно-жидком происхождении Земли господствовала до XX в., и подсчеты возраста Земли по времени ее охлаждения в XIX в. производили физики. По данным английского физика лорда Кельвина, возраст Земли, должен был бы быть уже 20 млн лет, но это означало бы близкую "смерть Вселенной". Общий возраст Земли, определенный в разное время по степени охлаждения массы материи, находился в пределах 16—160 млн лет. Однако возраст, рассчитанный по физическим данным (степени охлаждения Земли), оказался значительно меньше возраста, рассчитанного по солёности океана, и противоречил геологическим данным, установленным к началу XX в.

2.3. ПЕРВЫЕ МЕТОДЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПОСТОЯННОЙ ВРЕМЕНИ РАСПАДА РАДИОАКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ АБСОЛЮТНОГО ВОЗРАСТА МИНЕРАЛОВ

Принципиально новый подход к определению возраста геологических формаций и Земли в целом стал возможен со времени открытия явления радиоактивности и последующих достижений ядерной физики. Установление постоянства скорости радиоактивного распада некоторых элементов независимо от внешних условий и выявление продуктов их распада впервые дали объективные основания для определения времени образования этих минералов и некоторых геологических формаций. Еще в начале 1902 г. П. и М. Кюри, подводя итоги исследований радиоактивности, указали, что радиоактивность есть явление атомарное [Curie P., Curie M., 1902]. Причем свойства каждого атома радиоактивного минерала или другого радиоактивного объекта они считали такими же, как и самого объекта, поскольку каждый атом представляет такой же источник радиоактивных излучений, как и весь минерал и другой объект. К тому времени были определены постоянные радиоактивного распада многих элементов и уточнено понятие об этих постоянных. Предположение о возможности измерения времени по константам радиоактивного распада впервые высказал П. Кюри в заметке "Новейшие исследования радиоактивности", опубликованной в 1903 г. в первом томе "Journal de chemie Physique" [Curie P., 1903].

Идея П. Кюри сразу же была принята многими физиками, работавшими в области радиоактивности. Уже в 1904 г. Э. Резерфорд в лекции, посвященной выделяемой при распаде радия энергии, сказал, что прошлое и будущее Земли не может быть ограничено несколькими миллионами лет, как предполагал лорд Кельвин, рассчитавший возраст Земли по степени предполагаемого ее охлаждения от первоначального огненно-жидкого состояния и ошибочно предсказавший "тепловую смерть Вселенной". Время существования минерала Резерфорд рассчитал по годовому выходу альфа-частиц и количеству урана и радия в нем содержащихся. В многочисленных легендах о великом физике неизменно приводится случай его первого определения возраста минерала. Как вспоминает его ученик Р. Фаулер, во время прогулки Э. Резерфорд спросил идущего рядом геолога Ф. Адамса о возрасте камешка, поднятого им на дороге. Когда тот ответил, что различные геологические методы дают оценку возраста примерно в 100 млн лет, Э. Резерфорд сказал: "А я знаю, что этому камню 700 млн лет!" [Фаулер, 1968]. Резерфорд был первым оценившим столь высоко возраст земных пород по измерениям продуктов радиоактивного распада с учетом постоянной радиоактивного распада.

Новейшие наблюдения того времени и выводы, связанные с радиоактивностью, привели к неожиданным следствиям для геологии, как показал П. Кюри в 1905 г. в речи на заседании Шведской академии наук, произнесенной в связи с получением Нобелевской премии. Расширяя теорию о происхождении радия из урана, он полагал, что можно попытаться тем же способом объяснить и другие ассоциации в различных рудах, что это может пролить свет на периоды геологических образований [Старосельская-Никитина, 1963].



О. Ган, Б. Болтвуд и Э. Резерфорд, 1910 г.

В подтверждение предположений П. Кюри в том же 1905 г. Б. Болтвуд показал, что скопления свинца в неизменившейся урановой руде дают основание определить время образования или абсолютный возраст этой руды, поскольку известен период полураспада урана. И хотя в то время еще не были открыты изотопы урановых минералов, метод определения возраста по отношению уран/свинец оказался приемлемым. Отмечалась разница в атомных весах: свинца радиогенного происхождения (206,5) и обычного (207,2), что давало возможность надежно их различать. Кроме того, в то время было обнаружено, что в более древних породах концентрация свинца составляет 0,2%, а в более молодых рудах она значительно ниже.

Впоследствии оказалось возможным определять возраст геологических формаций и минералов по содержанию в них тория или урана и тория, поскольку были известны радиоактивные превращения урана и тория в свинец и гелий, по количеству которых в том или другом минерале стало возможным определять абсолютный возраст образования этого минерала. Для этого прежде всего необходимо было разработать достаточно точную и чувствительную аппаратуру для измерений ничтожных количеств выделившихся определенных изотопов свинца и гелия. Кроме того, для определения возраста радиоактивными методами необходимо выбирать такой образец минерала, который в течение геологического времени не подвергался каким-либо изменениям, приведшим к образованию элементов, по которым производится определение возраста [Старик, 1954].

Первые радиоактивные методы определения возраста минералов были основаны на измерениях гелия и свинца при распаде урана,

актиноурана и тория $^{238}\text{U} \rightarrow 8\ ^4\text{He} + ^{206}\text{Pb}$; $^{235}\text{U} \rightarrow 7\ ^4\text{He} + ^{207}\text{Pb}$; $^{232}\text{Th} \rightarrow 6\ ^4\text{He} + ^{208}\text{Pb}$.

Впервые гелий был получен из радиевого препарата, первоначально лишённого этого газа, в 1903 г. Ф. Содди и В. Рамзаем, доказавшим тем самым, что гелий является продуктом распада радия [Ramsay, Soddy, 1903]. В том же году П. Кюри и А. Лабурд во Франции обнаружили, что препараты радия выделяют теплоту за счет каких-то сложных изменений самого атома радия [Curie P., Laborde A., 1903]. Тщательные исследования эманации радия показали, что она также распадается, образуя новый элемент — радий А. Был выявлен ряд таких превращений, каждое из которых сопровождалось взрывоподобным выделением энергии и во многих случаях извержением гелия.

Было установлено, что 1 г урана со всеми продуктами распада выделяет в секунду 90000 атомов гелия, а в год — $2,8 \cdot 10^{12}$ атомов [Ган, 1933]. Длина пробега альфа-частиц, представлявших ядра гелия ^4He , не превышает 8,8 см в воздухе, а в минералах составляет сотые доли мм (в стекле — 0,004 см); теряя скорость, альфа-частицы остаются в плотной массе минерала в виде отдельных частиц инертного газа гелия. Постепенно в минералах происходит накопление гелия, причем, чем старше минерал, тем больше в нем накопилось гелия. Накопление гелия в минерале начинается с момента образования данного минерала и проходит с постоянной скоростью независимо от внешних условий.

Скорость образования гелия из урана была определена экспериментально: 1 см³ гелия образуется за 9 млн лет; из тория 1 см³ He образуется за 27 млн лет. Очевидно, что при определении возраста минерала по количеству накопившегося в нем радиогенного гелия необходимо быть уверенным в сохранности всего гелия. При утечках гелия из минерала его возраст будет занижен, и чем больше потеряно гелия, тем "моложе" окажется минерал.

Изучение гелия началось еще в конце прошлого века, когда в 1895 г. В. Рамзай обнаружил его в урановых и ториевых минералах. В дальнейшем изучение накопления гелия в земной коре проводилось во многих странах, были разработаны соответствующие методы определения ничтожно малых количеств гелия, из которых наиболее распространенным оказался метод изучения отношения гелия к урану и торию в породах, который использовался и при определении возраста минералов и пород.

Одно из первых определений возраста минералов по гелиевому отношению опубликовал в 1908 г. Р. Дж. Стретт [Strutt, 1908a, b]. Он исследовал урановую смолку из Иохимова, различные фосфатные конкреции, относящиеся к плиоцену и меловому периоду, юре и ордовика, зубы акулы, относящиеся к плиоцену и кости ящера юрского периода. Он изучал скорость выделения гелия и его диффузию в торияните и монаците. Оказалось, что гелий выделяется неравномерно: часть выделяется сразу же после измельчения минерала, но затем следует медленное улетучивание гелия с вновь образованных поверхностей [Strutt, 1909]. Выделение гелия из ториянита исследовал также Дж. А. Грэй. По его данным, при измельчении минерала тем больше

выделяется гелия, чем меньше частицы. Так, при размерах частиц в 1—2 мкм выделяется около 28% гелия, накопившегося в минерале, около 70% гелия удерживается в минерале более крепкими связями [Gray, 1909].

На выделение гелия из минералов влияет и тепловой режим окружающей среды. Д.О. Вуд показал, что в монаците и торинаните при температурах ниже 300—400°С выделяется мало гелия, в интервале же от 400 до 900° — оно постепенно возрастает [Wood, 1911]. Исследования торинанита особенно важны, поскольку в этом минерале гелия содержится во много раз больше, чем в обычных породах или минералах. В торинаните давление гелия при нагревании может достигать больших значений, под воздействием этого давления образуются трещины. В кристаллических породах уран, как правило, концентрируется вдоль трещин и границ минеральных зерен, часто в виде точечных образований. Выделившийся из урана гелий благодаря диффузии способен проникать в зерна окружающих минералов и прочно удерживаться там. Экспериментально было доказано, что большие потери гелия происходят до 30% из измельченного минерала в лаборатории. В природных условиях в погребенных пластах потери гелия возрастают под воздействием высоких температур и давлений при наличии близко расположенных трещин, пустот и раковин. Поэтому при определении возраста гелиевым способом, особенно древних минералов, необходимо вводить поправку на возможную утечку гелия и его диффузию из тела минерала. В 20-х годах было принято удваивать полученный результат и затем еще раз определять возраст данного минерала другим радиоактивным методом, обычно свинцовым.

К началу 20-х годов немецкий физик О. Ган свел многочисленные определения возраста горных пород и минералов гелиевым способом в таблицу возраста соответствующих геологических эпох (табл. 2).

Из таблицы видно, что с увеличением возраста минералов содержание в них гелия непрерывно повышается. Возраст наиболее древних пород, выявленный гелиевым способом в начале 20-х годов, оказался близким к 600 млн лет.

В 50-х годах была предложена расчетная формула для определения абсолютного возраста минерала гелиевым способом (коэффициенты записаны от продолжительности жизни урана и тория):

$$T = \frac{\text{He}}{U + 0,27 \text{ Th}} \cdot 4,9 \cdot 10^{10} \text{ лет.}$$

В приведенной формуле использован несколько меньший коэффициент для тория (0,27 вместо 0,3), поскольку для большинства минералов торий играет второстепенную роль [Войткевич, 1956]. Введенные поправки несколько увеличивают возраст, что в какой-то мере поможет скомпенсировать возможные утечки гелия.

При разработке первых свинцовых методов определения абсолютного возраста минералов и пород, так же как и при разработке гелиевого метода, исходили из того, что в процессе радиоактивного распада урана после ряда превращений образуется нерадиоактивный элемент — в данном методе свинец, который далее не распадается.

Таблица 2

Абсолютный возраст некоторых геологических эпох, определенный по содержанию гелия в урановых минералах [Ган, 1933. С. 15]

Эпоха	Минерал	Содержание гелия, 10^{-6} см ³ /г	Абсолютный возраст, млн лет
Плиоцен	Циркон	0,146	1,5
Миоцен	"	0,57	5,7
Олигоцен	Сидерит	0,70	7,0
Пермь	Циркон	3,80	38,0
Верхний карбон	Лимонит	12,8	128,0
Девон	Рематит	11,2	112,0
Силур	Терпанит	22,6	226,0
"	"	21,2	212,0
Верхний докембрий	Циркон	25,0	250,0
Средний докембрий	Сфен	32,9	330,0
То же	"	38,2	385,0
Нижний докембрий	Циркон	54,3	550,0
То же	Сфен	56,1	570,0

ется, а постепенно накапливается в минерале или породе. При этом предполагается, что материнские элементы распадаются с постоянной и уже известной ученым скоростью, образуя через дочерние элементы конечные продукты распада — гелий и свинец. Для процесса распада и последующего превращения дочерних элементов в свинец, как оказалось, совершенно не существенно, в какой форме и в каком химическом соединении представлен уран в данном минерале.

Согласно известной формуле атомного распада, при образовании 1 атома свинца из 1 атома урана происходит последовательное выделение 8 атомов гелия. Простой расчет показывает, что если атомный вес урана равен 238, а гелия 4, то при выделении 8 атомов гелия атомный вес урана должен уменьшиться на $8 \cdot 4 = 32$, и атомный вес вновь полученного свинца должен быть равен 206 а.е.м.

Разработка первых свинцовых методов определения абсолютного возраста минералов и пород до первой четверти XX в. базировалась на следующих основных предпосылках. Скорость радиоактивного распада принималась равной $1,4 \cdot 10^{-10}$ расп./год, считалось, что из 1 г урана-238 должно выделяться свинца-206 в течение года

$$1,4 \cdot 10^{-10} \frac{{}^{206}\text{Pb}}{{}^{238}\text{U}} = 1,21 \cdot 10^{-10} \text{ г.}$$

Были выделены соответствующие формулы для определения возраста. Для более молодых образований возраст минерала будет

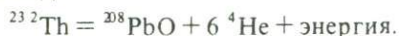
$$T = \frac{\text{Pb}}{\text{U}} \cdot 8200 \text{ млн лет.}$$

В формулу определения возраста более древних образований вводилась поправка на изменение по сравнению с первоначальным количеством

распадающегося урана, иными словами, учитывалось изменение количества атомов урана [Гольмс, 1930].

$$T = \frac{\text{Pb } k}{\text{U}} \cdot 7400 \text{ млн лет}$$

Если же в урановом минерале присутствует также торий, то при определении его возраста свинцовым методом следует учитывать свинец, образовавшийся в результате радиоактивного распада тория. В таких случаях атомный вес свинца будет 208, а не 206, как при распаде урана, а формула радиоактивных превращений тория принимала вид



Для минералов, содержащих и уран и торий, А. Холмс предлагал использовать следующее соотношение:

$$T = \frac{\text{Pb}}{\text{U} + 0,3 \text{ Th}} \cdot h \cdot 10^{10} \text{ лет.}$$

В 50-х годах в формулу были введены новые уточненные коэффициенты и расчет возраста минералов, содержащих уран и торий, производился по формуле

$$T = \frac{\text{Pb}}{\text{U} + 0,38 \text{ Th}} \cdot 7600 \text{ млн лет.}$$

Отношение, входящее в расчетные формулы определения абсолютного возраста $\text{Pb}/(\text{U}+0,38\text{Th})$, А. Холмс назвал "свинцовым отношением". Это отношение дает некоторое представление о времени образования урана и тория. Если свинцовое отношение равно для нескольких минералов, то это означает, что минералы сформировались в один и тот же геологический период.

Хорошо сохранившиеся неизменные первичные минералы древнего происхождения, как правило, имеют высокие свинцовые отношения, значительно превышающие отношения более молодых образований. Исследование свинцовых отношений, согласно А. Холмсу, также может служить некоторым относительным показателем возраста минерала [Гольмс, 1930], тем более что в каждом ряду урановых элементов эффект изменения самого минерала непосредственно отражается на повышении его свинцового отношения, что соответствовало бы условному процессу, когда урана удалялось больше чем свинца [Там же. С. 90]. Это правило не может считаться справедливым при исследованиях свежих минералов. Поэтому А. Холмс совместно с Р. Лоусоном в 1914 г. высказал предположение, что свинец не является конечным продуктом распада ториевого ряда [Holmes, Lawson, 1926].

Большое значение в правильном подходе к разработке методов определения абсолютного возраста минералов и пород имело введение Ф. Содди понятия изотопии и его вывод о том, что химический элемент может состоять из атомов различных атомных весов, что атом-

Таблица 3

Возраст урановых минералов, определенный свинцовым методом [Ган, 1933].

Минерал	Месторождение	Отношение уран/свинец	Средний абсолютный возраст, млн лет	Геологический период
Уранинит	США	0,041	350	Карбон
Уранинит	Африка	0,093	780	
Уранинит и др.	Норвегия	0,13	1050	Средний докембрий
Циркон	Мозамбик	0,15	1150	
Фергюсснит	Швеция	0,16	1159	Средний докембрий
Уранинит	США	0,17	1250	То же
Клевеит, уранинит и др.	Норвегия	0,18	1350	"
Циркон	Мозамбик	0,21	1690	Докембрий

ный вес в понимании ученых того времени есть среднее арифметическое число [Soddy, 1914]. По данным М. Кюри, атомный вес свинца из различных образцов урановой смолки составлял 206,36 — 206,65, а из монацита — 207,8 [Curie, 1914]. Свинец из цейлонского торита, поскольку его было очень мало, был отнесен Ф. Содди к радиогенному, его атомный вес равнялся 206 [Soddy, Human, 1914].

Впервые свинцовый метод для определения возраста минералов применил в 1907 г. американский физикохимик Б.Б. Болтвуд (1870—1927). Его исследования 1903—1905 гг. подтвердили предположение Э. Резерфорда и Ф. Содди об образовании радиоактивных элементов из материнских пород и показали, что радий является продуктом распада урана. В 1907 г. Б. Болтвуд показал, что в урансодержащих минералах свинец встречается в постоянном количественном отношении к урану, что позволяет считать свинец конечным продуктом распада урана [Boltwood, 1907]. Исследуя свинец в образцах урановой руды, он впервые получил огромные для того времени значения возраста пород. По его данным, исследованные им образцы были образованы от 246 млн до 1 млрд 320 млн лет тому назад.

Данные Б. Болтвуда о возрасте урановых минералов оказались слишком завышенными по сравнению с возрастом древнейших геологических формаций, определенным по чисто геологическим соображениям.

В табл. 3 представлены данные о возрасте минералов из различных месторождений Америки, Африки и Европы, определенном свинцовым методом, и соответствующем периоде в относительной геохронологической шкале.

Многочисленные исследования свинцовых отношений в минералах различного происхождения и развитие ядерной физики способствовали тому, что в начале 20-х годов свинцовые методы оказывались в ряде случаев предпочтительнее гелиевых методов определения возраста, но они не могли в то время давать достаточно достоверных результатов, согласуемых с геологическими представлениями. Поэтому первые определения абсолютного возраста минералов и по-

Таблица 4

Возраст и состав канадских докембрийских уранинитов, определенный свинцовым методом Г.В. Элсвортом

Месторождение	Содержание			Отношение уран/свинец*	Возраст, млн лет**
	урана	тория	свинца		
Квебек	64,74	6,41	10,46	0,156	1189
Онтарио	69,19	2,83	10,83	0,154	1179
"	66,12	2,94	9,76	0,145	1115
Бат	66,02	1,08	9,82	0,148	1130
"	64,24	0,71	9,62	0,149	1143
Кардиф	55,26	11,92	10,25	0,171	1299

* Отношение уран/свинец вычислено по формуле $Pb/(U + 0,38 Th)$.

** Возраст образцов вычислен с поправкой на уран.

род радиоактивными (гелиевым или свинцовым) методами были встречены геологами Европы и Америки весьма скептически [Войткевич, 1956]. Даже английский ученый Дж. Джоли, энтузиаст и сторонник радиогеологии как новой отрасли геологии, считал, что возраст минералов, определенный радиоактивными методами, никак не может быть согласован с геологическими данными.

Причину неудач первых шагов радиогеохронологии многие физики и геологи в то время видели в использовании сильно поврежденных образцов и отсутствии данных о содержании первичных и вторичных радиоактивных элементов в минералах. Еще не ясен был вопрос о возможности точного и раздельного измерения свинца-206 и свинца-208, не было уточнено их происхождение и место в процессе радиоактивного распада материнского вещества. Не была окончательно установлена и скорость распада тория и не определено, какая часть первичного тория вовлекается в процесс распада, и т.д.

В начале 20-х годов Г.В. Элсворт определил свинцовым методом возраст большого количества минералов, относящихся к одним и тем же геологическим формациям, в том числе уранинитов докембрийского возраста, взятых из разных месторождений Канады [Ellsworth, 1925]. В исследуемых Г.В. Элсвортом образцах минералов были предварительно определены содержания урана, тория, свинца, затем из числа образцов были отобраны образцы, относящиеся к докембрию.

Как видно из табл. 4, абсолютный возраст уранинитов колеблется от 1115 до 1299 млн лет, что вполне согласуется с геологическими данными, поскольку геологам известен возраст докембрия порядка 1000 млн лет [Ган, 1933].

Были проведены определения возраста уранинитов и других минералов разной сохранности и принадлежности к разным геологическим периодам. В результате выяснилась необходимость введения различных поправок на сохранность минерала и радиогенного свинца и др.

Большой интерес вызвало определение возраста циркона, который обычно находится в изверженных породах. Считается, что он образовался вследствие интрузии в докембрийских отложениях океанического

происхождения. Абсолютный возраст циркона в 1600 млн лет, определенный свинцовым методом, мог считаться справедливым для нижней границы отложений [Ган, 1933], тем более что эти отложения должны быть древнее заключенных в них изверженных пород. Отсюда был сделан вывод, что океан должен быть еще древнее образовавшихся на его дне осадочных пород. Определение возраста циркона представляет особый интерес и потому, что с ним может быть связано определение возраста Мирового океана, и дальнейшее определение возраста Земли со времени появления на ней океанических вод.

Следует упомянуть еще об одном направлении первых методов определения возраста, связанных с радиоактивными излучениями. Речь пойдет об определении возраста некоторых древних минералов по плеохроическим ореолам — следам альфа-частиц, излучаемым в геологическое время радиоактивными, в частности урановыми, включениями. Изучение плеохроических ореолов, начатое в начале XX в., связано также с некоторыми гипотезами об изменчивости скорости радиоактивного распада в различные периоды развития Земли.

Дж. Джоли одним из первых, как было показано (см. гл. 1), правильно объяснил происхождение ореолов вокруг включений зерен урана в слюде [Joly, 1909]. От уранового включения альфа-лучи распространяются во всех направлениях, и их следы в минерале образуют сферу с центром в урановом включении. Одновременно происходит излучение и дочернего радия, которое образует большую сферу. При распаде ториевых элементов ореолы пробега альфа-частиц получаются еще больше. Длина пробега альфа-частиц, по данным Дж. Джоли, зависит от степени радиоактивности источника излучений и плотности вещества минерала: для уранового минерала она равна $1/30$ мм, для ториевого — $1/25$ мм.

Максимальные диаметры ореолов были тщательно измерены Э. Резерфордом в стекле и листочках биотита. Он установил, что не только длина, но и цвет ореола зависит от степени радиоактивности минерала и его возраста, т.е. времени накопления альфа-частиц. Чем старше минерал, тем гуще окраска ореола.

Дж. Джоли и Э. Резерфорд в 1913 г. провели определения возраста биотитов, относящихся к девону, из графства Карлоу по измерениям плеохроических ореолов [Joly, 1923]. Для сравнения они создали эталон — искусственный ореол путем воздействия сильного радиоактивного излучения в течение короткого времени, имитирующего действие слабой радиоактивности в длительное геологическое время. В результате сравнения ореолов исследуемых образцов с искусственными при действии определенного излучения и по степени окраски ореола они установили абсолютный возраст для серии образцов в пределах от 50 до 470 млн лет.

При сравнении плеохроических ореолов образцов различного возраста Дж. Джоли установил некоторое уменьшение длины пробега альфа-частиц и сделал вывод о том, что в геологическое время в более древних породах урана содержалось значительно больше, чем в молодых образованиях. Для обоснования своей гипотезы

Дж. Джоли использовал указание Г. Гейгера и Дж. Нэттола о возможном различии констант, связанных с уравнением распада [Geiger, Nuttall, 1912]. Интерпретируя результаты своих определений, Дж. Джоли пришел к заключению о возможности непостоянства скорости распада урана.

По мнению Дж. Джоли, в минувшие геологические эпохи процесс радиоактивного распада происходил с большей скоростью, чем в последующие, что существовал ныне вымерший изотоп урана, также затем переходивший в свинец [Joly, 1923]. В плеохроических ореолах древних минералов и сохранилось вызванное этим изотопом действие, а самого уранового изотопа в наше время уже нет. Эти предположения привели к тому, что, по мнению Дж. Джоли, в прежнее время накопление свинца проходило быстрее за счет дополнительного поступления свинца в процессе распада этого неизвестного радионуклида. Поэтому, как считал Дж. Джоли, возраст минералов, определяемый свинцовым методом, оказывается завышенным.

Дж. Джоли приводит также результаты исследований прекрасно выраженных плеохроических ореолов в вельвендорфском плавиковом шпате, в котором длина пробега альфа-частиц урана равнялась 2,53 см (в то время как в чистом воздухе длина пробега не превышала 2,68 см). Используя формулу Гейгера—Нэттала для расчета времени распада радиоактивных элементов, Дж. Джоли определил, что в древнее геологическое время распад в вельвендорфском шпате происходил примерно в 50 раз быстрее, чем в наше время.

Взгляды Дж. Джоли о непостоянстве скорости радиоактивного распада оказали большое влияние на последующее отношение физиков и геологов к определениям и развитию радиоактивных методов абсолютной геохронологии.

Немецкий физик О. Ган, критикуя гипотезы Дж. Джоли, приводит следующие обоснования. Точное определение диаметра плеохроического ореола, считает О. Ган, могло быть сделано Дж. Джоли только для самой внешней зоны ореола [Ган, 1933]. По мнению, О. Гана, Дж. Джоли не установил никаких изменений длины пробега альфа-лучей. Измерения внутренних венчиков чрезвычайно затруднительны из-за их более интенсивной окраски и большого количества плотно прилегающих друг к другу колец. Наиболее древние венчики, как правило, имеют более развитую внешнюю область, которая могла подвергаться более длительному воздействию альфа-излучения, испускаемого поверхностью радиоактивного включения. В более молодых минералах эта область выражена значительно слабее. Для более проникающего альфа-излучения радия эти колебания должны быть несравненно меньше заметны.

По мнению О. Гана, следует принять, что произошло не уменьшение, как думал Дж. Джоли, скорости распада, а, наоборот, увеличение ее до уточненной в то время величины. Поэтому экстраполяция формулы Гейгера—Нэттала для больших периодов полураспада, в том числе для урана, недопустима. Она также недопустима и для малых периодов полураспада. В результате тщательного анализа возможностей использования достижений ядерной физики О. Ган при-

ходит к выводу, что взгляды Дж. Джели о возрасте Земли явно необоснованны.

Определение возраста минералов по плеохроическим ореолам, по мнению О. Гана, в принципе не может обеспечить большую точность, поскольку измерения содержания микроскопических радиоактивных включений в образцах в то время не проводились с достаточной точностью.

Существование плеохроических ореолов, по мнению О. Гана, дает основания сделать несколько иные весьма достоверные выводы. Минерал с ярко выраженными плеохроическими венчиками, появившимися благодаря включениям радиоактивных веществ, видимо, считал О. Ган, в продолжении сотен лет своего пребывания в земной коре не мог подвергаться воздействию сколько-нибудь высоких температур, сильно отличавшихся от современных. Даже при кратковременном нагревании до 200°C венчики быстро бледнеют и исчезают, а для нового их появления потребуется длительное геологическое время. Таким образом, сохранение плеохроических венчиков в исследуемых минералах, обнаруживаемых под сильными микроскопами, является свидетельством процесса радиоактивного распада в минерале, продолжавшегося многие миллионы лет.

Не разделяя концепцию Дж. Джели об изменении скорости распада урана со временем и существовании неизвестного изотопа урана, который полностью бы распался и превратился в свинец, и известный физикохимик, геохимик А. Холмс. Если бы такой изотоп существовал, считал А. Холмс, то дочерний свинец-206 в настоящее время был бы широко представлен в различных минералах. Кроме того, менялись бы и свинцовые отношения в минералах [Гольмс, 1930]. Однако излишков свинца-206 не замечено, что касается свинцовых отношений, то они остаются постоянными: некоторые ториевые минералы имеют свинцовые отношения такие же, как и урановые. А. Холмс, признавая заслуги Дж. Джели в установлении происхождения плеохроических ореолов, в слюдах, также соглашался с возможностью различия в скоростях альфа-лучей, испускаемых радиоактивными элементами. Исследования отчетливых венчиков вельвендорфского плавикового шпата, по мнению А. Холмса, дает основание сделать совершенно другие, чем сделал Дж. Джели, выводы. Эти венчики особенно хорошо подтверждают постепенное изменение величины пробега альфа-частиц урана по сравнению с альфа-частицами радия.

По мнению О. Гана, маловероятно, чтобы альфа-лучи этого изотопа обладали бы той же длиной пробега, что и излучение известного в то время урана [Ган, 1933]. Если бы такой изотоп существовал и его альфа-лучи обладали другой величиной пробега, то под их влиянием должна была бы наблюдаться другая картина: колебания во внутренних кольцах урановых венчиков и расплывчатость всех колец.

Вопрос о скорости радиоактивного распада волновал многих физиков. В начале XX в. в физических лабораториях многих стран проводились тщательные физико-химические исследования радиоактивных элементов и минералов. Было установлено, что никакие физические или химические условия не оказывали влияния на скорость распада радиоактивных элементов.

При обсуждении этого вопроса на заседании Британской ассоциации наук в 1921 г. известный физик лорд Дж.У. Рэлей, президент Кэмбриджского университета, сказал: "С достоверностью установлено, что никакие изменения температуры или давления, достижимые в лабораторных условиях, не могут вызвать ощутимых изменений скорости распада..." Распад урана есть, по-видимому, такой процесс, относительно которого мы смело можем сказать, что скорость его была в прошлом такую же, какой мы ее ныне наблюдаем" [Гольмс, 1930. С. 104].

К началу 30-х годов хотя и считалось установленным постоянство радиоактивного распада, но из этого еще не следовало, что действие альфа-излучения на минерал оставалось постоянным. В то время метод определения возраста геологических образований по плеохроическим ореолам вновь привлек внимание ученых. Проведенные исследования показали, что интенсивность окраски ореола, по которой определяется возраст, зависит также от размера ядра и многих других факторов, а также от возможного изменения внешних условий минерала в геологическое время [Старик, 1938]. При определении возраста по ореолам необходимо было знать содержание радиоэлементов ядра ореола, размеры которого обычно настолько малы, что определить их радиоактивность в те годы не представлялось возможным, тем более что для образования ореола достаточно испускания всего нескольких десятков альфа-частиц.

Было разработано две разновидности метода плеохроических ореолов определения возраста геологических образований: по сравнению интенсивности окраски ореола с эталонной окраской того же минерала и по различной интенсивности излучения актиниевого ряда. В интенсивности окраски при образовании плеохроических ореолов могли быть по аналогии с действием рентгеновских лучей и "недодержки" и "передержки". Г.Н. Гендерсон и Л.Г. Турнболл показали, что в начале облучения биотита почернение ореолов пропорционально ионизации, а со временем скорость почернения падает [Henderson, Turnball, 1934]. Оказалось, что изготовленные эталоны, в которых в результате смешения измельченного минерала было значительно больше естественных вкраплений, не соответствуют ореолам, образующимся в течение длительного геологического времени. Кратковременное воздействие сильного излучения также не соответствует действию малых количеств радиоактивных элементов в длительное геологическое время и не может быть эталоном при сравнении с ореолами, создавшимися за длительное время.

Г.Н. Гендерсон и Л.Г. Турнболл предложили для определения возраста пользоваться отношением количества какого-либо члена актиниевого ряда к количеству члена уранового ряда. Например, по их мнению, возраст можно определять по отношению $As\ C/Ra\ C$ или $As\ D/Ra\ C$ по формуле

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{\lambda_1 B (e^{\lambda_2 t} - 1)}{\lambda_2 (e^{\lambda_1 t} - 1)}, \quad B = \frac{\lambda_2 N_2}{\lambda_1 N_1},$$

где N_1 и N_2 — количество атомов урана-1 и актиноурана, существующие

в настоящий момент; n_1 и n_2 — количество атомов, образовавшихся в течение времени; λ_1 и λ_2 — константы распада актиноурана и урана-1; B — постоянная.

По этому уравнению А. Гроссе построил графики, из которых следует, что данный метод применим к минералам старше 400 млн лет, поскольку для более молодых образований это отношение асимптотически приближается к величине B [Grosse, 1932].

Для определения возраста по методу Г.Н. Гендерсона не требуется определения активного начала в ядре, что значительно уменьшает возможные ошибки. Но остается необходимость сравнивать интенсивности окраски ореолов, образованных в одном и том же минерале различными альфа-излучателями. В результате в 30-х годах ошибки в определении возраста методом плехроических ореолов при повторных определениях могли достигать 100%, но в некоторых случаях находились в согласии с определениями возраста свинцовым методом.

2.4. ОРГАНИЗАЦИЯ СИСТЕМАТИЧЕСКИХ РАБОТ ПО ЯДЕРНОЙ ГЕОХРОНОЛОГИИ В 20—30-х ГОДАХ

Систематические исследования по радиогеохронологии в СССР и США были начаты в 1922—1923 гг. К тому времени во многих странах физики, химики и геологи продолжали интенсивно изучать радиоактивные минералы и определять их возраст. Координирующим центром, направляющим исследования и обобщающим полученные результаты в этой области, в СССР был Государственный радиевый институт, а в США — Комиссия по измерению геологического возраста. Комиссия была создана в 1923 г. по предложению Э. Лаусона при Национальном исследовательском совете США. Председателем комиссии с самого начала ее организации и до 1946 г. был известный американский ученый А.С. Лэйн [Лэйн, 1940]. Под его руководством в комиссии проводились работы по применению различных радиометрических и химических методов для решения геологических задач. Что самое главное, комиссия поощряла научное сотрудничество геологов, физиков и химиков в изучении истории развития Земли. В публикуемых отчетах комиссии обобщался опыт работы и результаты исследований за каждый год. В контакте с комиссией по измерению геологического возраста при Национальном исследовательском центре США работала почти одновременно организованная Объединенная комиссия по физике Земли.

Национальный исследовательский центр США в 1931 г. издал важную коллективную работу "Возраст Земли", в которой показано состояние исследований по определению возраста геологических формаций и всей Земли. Авторами этого основополагающего труда были А. Нопф, Ч. Шухерт, А.Ф. Коварик, А. Холмс, Е.В. Браун. В дальнейшем эта работа в научной литературе упоминалась, как "Отчет Нопфа о возрасте Земли". Эта работа отражает важный этап в развитии абсолютной геохронологии. В работе утверждается, во-первых, что на основании сообщений А. Холмса и Ч. Шухерта

к 1931 г. каких-либо существенных разногласий или противоречий в выводах о возрасте Земли между геологами и физиками уже нет [Knopf et al., 1931], и во-вторых, что многие геологи за последнее десятилетие изменили свое отношение к новым методам определения абсолютного возраста геологических образований, хотя разница между заключениями геологов и физиков-радиологов в определении длительности времени, прошедшего с археозоя, в 1924 г. превышала 1 млрд лет.

Так, один из авторов, ведущий геолог того времени профессор Ч. Шухерт еще в 1924 г. считал невозможным для геологов на основании своих данных объяснить длительность геологических периодов, определенных радиоактивными методами, но уже в 1931 г. он пересмотрел свои взгляды, например об условиях образования осадочных пород, и признал ошибочность своих прежних утверждений. В 1924 г. Ч. Шухерт во многих статьях указывал, что Земля с начала археозоя существует по крайней мере 500 млн лет, а в 1931 г. был удивлен тем, что легко нашел достаточно морских отложений с начала палеозойского времени для возраста 500 млн лет, и признал, что 500 млн лет — это время, прошедшее только до начала палеозоя. Ч. Шухерт показал, что если со вниманием отнестись к полученным физиками слишком длительным периодам в истории Земли и сразу не отвергать нового, то можно по-новому взглянуть на геологические данные и увидеть то, что раньше просто не замечали. Он признал, что вероятная длительность геологического времени Земли могла быть равной примерно 1 млрд 600 млн лет. Но в том же 1931 г. были получены новые данные, согласно которым время существования Земли определено в 2 млрд лет. Наиболее древним участком из известных в то время считались прионежские граниты, абсолютный возраст которых был определен К.А. Ненадкевичем. Затем эта цифра все время увеличивалась, в наше время возраст Земли оценивается в 4,5—5,5 млрд лет.

В конце 30-х годов возраст Земли попытался установить А. Холмс по среднему составу горных пород [Гольмс, 1930]. По его данным, в $1 \cdot 10^6$ г породы земной коры должно содержаться: свинца до 7,5 г, урана до 6,0 г, тория до 15,0 г и т.д. Урановый эквивалент он принял равным 11,7 г (рассчитал по формуле $U + 0,38 Th$). По расчетам А. Холмса, время, необходимое для получения принятых им средних значений состава горных пород из первоначального количества урана, определялось по крайней мере 3 млрд лет. Но в случае, если в горных породах находится не только радиогенный, но и обыкновенный свинец, который мог возникнуть на Солнце или в протооблаке, возраст Земли должен быть ближе к 1 млрд 600 млн лет, чем к 3 млрд лет.

Если же исходить из продолжительности отдельных периодов в развитии Земли, установленных различными радиоактивными и геологическими методами и уже принятыми за основу многими геологами, то, по его мнению, картина будет несколько иной (рис. 3). Поскольку в то время было принято, что третичный период начался приблизительно 60 млн лет назад, а верхний палеозой от девона до перми

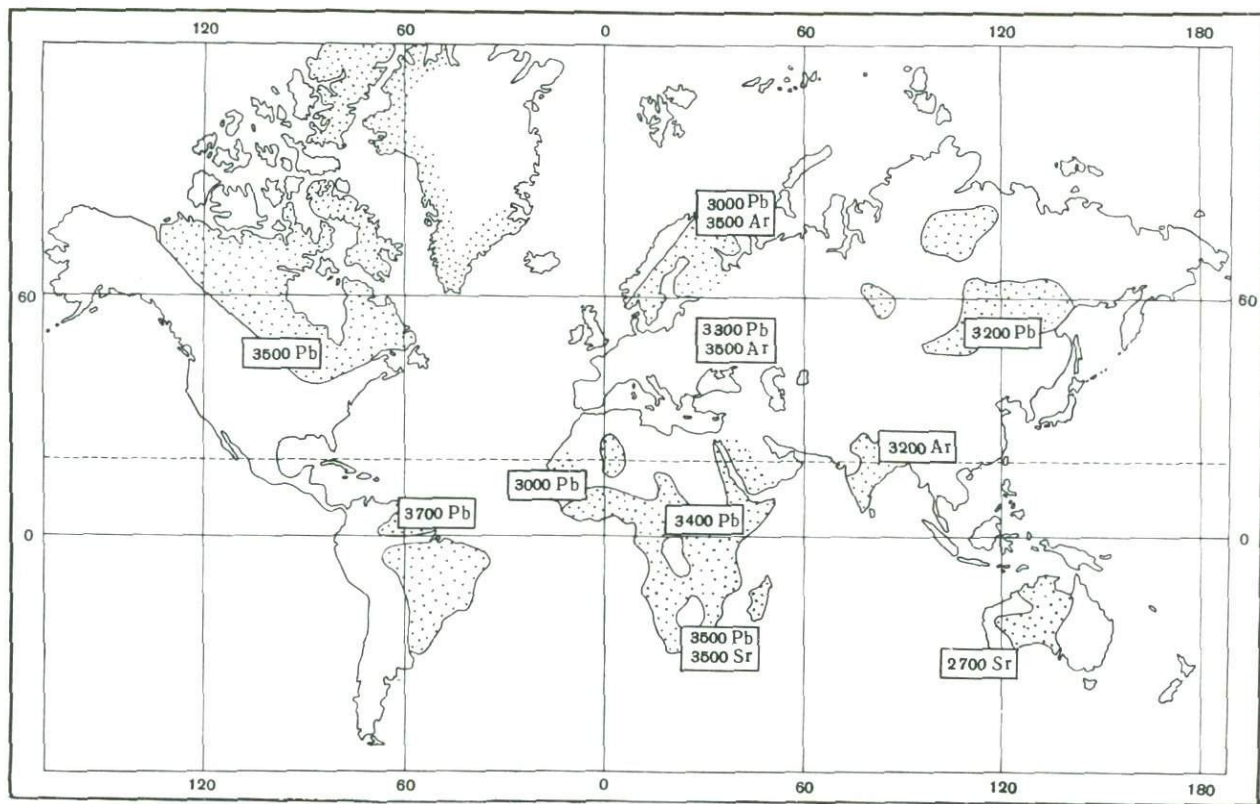


Рис. 3. Карта-схема древнейших участков суши по данным свинцового, стронциевого и аргонного методов определения геологического возраста (по Г.В. Войткевичу)

Показаны области развития докембрийских отложений

продолжался в пределах от 205 до 375 млн лет, то только для докембрия вычислены несколько значений — 600 млн лет, 900 млн лет, 1 млрд 50 млн лет и даже 1 млрд 260 млн лет.

Как видно, уже в конце 20-х — начале 30-х годов были проведены прикидочные определения возраста Земли на основе данных возраста отдельных геологических формаций и минералов, измеренных разными методами. Но оказалось, что каждый из применявшихся в то время радиоактивных методов определения возраста мог давать ошибки в 200—300% из-за несовершенства техники измерений малых количеств гелия, радия, урана и тория и т.д.

Необходимо было также выявить возможные физико-химические и геологические процессы, в которых мог принимать участие тот или иной образец, чтобы оценить влияние внешних факторов на сохранность или потерю продуктов распада в образцах и его пригодность для определения возраста. Изучение диффузии гелия в радиоактивных минералах и его потери особенно важны были для развития гелиевого метода определения возраста. Потери гелия не могли быть учтены, поскольку не ясны были условия исчезновения гелия из минерала. Г.А. Вильямс и Дж. Фергюсон показали проходимость гелия через силикатное стекло при повышенных температурах [Williams, Ferguson, 1922]. А. Ло Сурдо показал, что через каждый квадратный сантиметр трубки из твердого стекла толщиной 1,5 мм при температуре 500°С в час проходит около 10^{-9} см³ гелия [Lo Surdo, 1921]. Несколько позднее Ф. Панет и К. Петерс обнаружили диффузию гелия через стекло при обычной температуре [Paneth, Peters, 1928]. Точность гелиевого метода была низкой, возраст минералов оказался сильно заниженным, и поэтому до конца 20-х годов преимущество отдавалось свинцовому методу.

Возврат к гелиевому методу, происшедший в конце 20-х — начале 30-х годов, связан с работами А. Холмса. В 1929 г. он высказал предположение, что гелиевый метод целесообразно применять для определения возраста обычных изверженных пород [Holmes, 1928]. В таких породах, радиоактивность которых эквивалентна 10^{-12} г радия на 1 г породы, содержится мало гелия и, по мнению А. Холмса, большая часть его сохраняется. По его предложению в берлинской лаборатории Ф. Панета были выполнены анализы образцов деканских трапов и долеритов из Индии и английских даек [Holmes, Horwood, 1928; Holmes, 1935]. По результатам анализа А. Холмс вывел заключение, что кислые породы хуже удерживают гелий, чем основные.

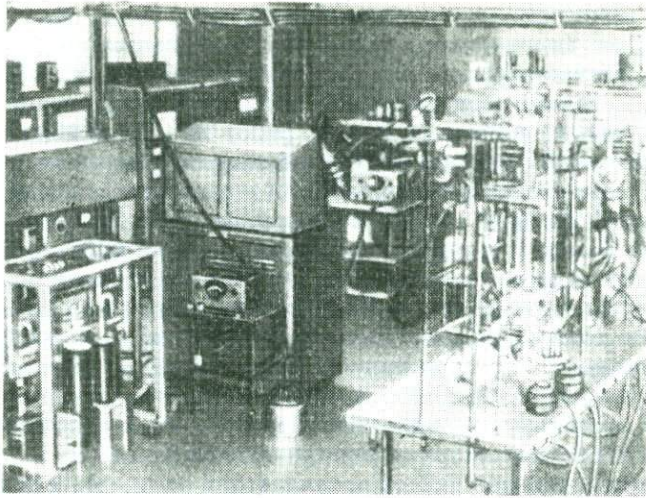
В работах В.Д. Урри по изучению проницаемости разных стекол для гелия было выявлено, что гелий и водород сначала адсорбируются на поверхности стекла [Urry, 1932]. Позднее он показал, что выделение гелия происходит по межкристаллическим капиллярам. По данным определения возраста гелиевым методом В.Д. Урри разработал возрастную шкалу для послепротерозойского времени [Urry, 1936]. Возрастная шкала В.Д. Урри по гелиевому методу хорошо согласуется с данными свинцового метода и полностью отвечает возрастной последовательности анализируемых образцов [Hurley, 1954]. Однако в дальнейшем от шкалы Урри отказались после того, как были

обнаружены ошибки в калибровке приборов при измерениях В.Д. Урри альфа-излучения. Результаты отличались от истинных почти на 100%, что признал сам В.Д. Урри, подписавший совместную статью о результатах проверки его исследований [Evans et al., 1939].

В исследованиях Р.Д. Иванса, Н.В. Кивиля и др., проведенных в лабораториях Массачусетского технологического института в конце 30-х годов, было показано, что гелиевое отношение в гранитных породах ниже, чем в обычных, на 20—30%. Различия, отмеченные в некоторых минералах, были объяснены неодинаковой сохранностью минералов и разной скоростью потерь гелия. Было выявлено, что гелий более прочно удерживает ферромагнезиальные минералы, чем полевой шпат и кварц; кислые и стекловидные породы содержат мало гелия; основные породы содержат больше гелия: возможно, что сохранность гелия в минералах и породах падает с увеличением возраста [Keevil, 1938]. В 20—30-е годы было проведено огромное количество определений возраста пород и минералов свинцовыми методами. Большинство было выполнено физиками и химиками. По этим исследованиям была составлена правильная последовательность возрастов пород примерно до 2 млрд лет в различных частях земного шара, которая согласуется с последовательностью тех же пород, определенных геологическими методами. Исследования радиоактивных элементов подтвердили правильность некоторых геологических определений возраста тех или иных горных систем и поясов. Однако все еще оставались многочисленными разногласия между радиоактивными и геологическими значениями возраста, которые были вызваны, видимо, отсутствием независимых друг от друга методов определения абсолютного возраста минералов и пород, и потому результаты этих определений не могли быть использованы для взаимной проверки.

В конце 30-х годов начали использоваться более эффективные методы исследования изотопов, были разработаны методы масс-спектрометрии, позволяющие определять массы заряженных частиц и относительные количества изотопов. В Гарвардском университете и затем в других лабораториях были разработаны методы определения возраста с внесением поправок на наличие дочерних элементов, например в кристалле во время его кристаллизации. Эти методы давали возможность обнаружить привнос или потерю элементов по схожести возраста по изотопным отношениям данного образца [Nier, 1939a, b].

В Советском Союзе систематические исследования как в области радиоактивности, так и по определению абсолютного возраста природных образований возглавил Государственный радиевый институт, организованный в январе 1922 г. [Организация науки..., 1968. С. 171]. Уже в первые три года работы Радиевого института было успешно начато изучение месторождений радиоактивных руд и минералов, изучение гелиеносности земной коры, миграции радиоактивных элементов и другие важные работы. Одновременно начались теоретические и экспериментальные исследования в области физики и химии ядерных процессов, результаты которых оказались весьма важными



Геохронологическая лаборатория Массачусетского технологического института

и необходимыми для разработки методов определения возраста природных образований радиоактивными методами.

В Радиевом институте постепенно накапливался опыт проведения тонких экспериментов и были созданы благоприятные условия для создания методов радиогеохронологии. К числу важных специфических теоретических и экспериментальных исследований, проводимых в институте Л.В. Мысовским, И.В. Курчатовым, Н.И. Добротиным, В.В. Чердынцевым и др., относится изучение расщепления ядра под действием нейтронов, составление систематики ядер и открытия новых ядерных превращений под действием космических лучей, которые в той или иной степени отражаются на изотопном составе многих природных объектов.

Интересно напомнить, что при изучении распространения изотопов в природе В.И. Вернадский высказал гипотезу о возможности существования в природе, помимо радиоактивного распада, еще и других физико-химических процессов, связанных с биосферой и ведущих к разделению изотопов или по крайней мере к нарушению постоянства в их равновесии, что должно (может быть, только при определенных условиях) отразиться на точности определения возраста по радиоактивным данным [Хлопин, 1932]. Определения атомных весов калия, кальция, железа и других элементов, выделенных из растительных организмов, проведенные сотрудниками института В.Г. Хлопиным, М.А. Пасвик и К.А. Ненадкевичем, не дали оснований для подтверждения гипотезы В.И. Вернадского. Некоторым подтверждением гипотезы В.И. Вернадского можно считать обнаружение Бэкстером и Блисс в 1930 г. одного уранового свинца, по-видимому почти актиниевого, в руде органического происхождения.

Определения возраста минералов и пород у нас в стране начались в 20-х годах под руководством В.И. Вернадского и В.Г. Хлопина. Они критически пересмотрели основы радиоактивных геохронологических методов, известных в то время, и наметили пути исследований. Одна из первых советских работ по определению возраста принадлежит В.Г. Хлопину, определившему возраст тюямунита [Хлопин, 1925]. В навеске минерала в 0,1801 г он определил содержание радия, урана (в виде U_3O_8) и свинца (в виде $PbSO_4$). Вычислив отношение радия к урану, оказавшееся равным $2,4 \cdot 10^{-7}$, В.Г. Хлопин пришел к выводу, что тюямунит является вторичным минералом, низший предел для возраста которого на основании вычисленного отношения равен примерно 170 тыс. лет. В той же статье В.Г. Хлопин впервые указал, что для получения правильных результатов при определении возраста необходимо использовать отношение иония к урану, поскольку радиоактивное равновесие в отношении радия может быть смещено вторичными процессами.

Следующей работой В.Г. Хлопина было определение гелия в беломорской смоляной руде. Он также подтвердил, что несколько заниженный возраст минералов, определенный гелиевым методом, по сравнению с возрастом, определенным свинцовым методом, является результатом легкости потери кристаллами накопившегося гелия [Хлопин, 1926]. Ураниниты из Шарозера, Синей Палы и Панфиловой Вараки, исследованные В.Г. Хлопиным, на вид прекрасно образованные и хорошо сохранившиеся кристаллы, не содержавшие тория, по существу, представляли минералы различной степени окисленности. Образец из Шарозера оказался весьма древнего происхождения, и его возраст, определенный К.А. Ненадкевичем по отношению массы свинца к массе урана, мог быть свыше 1 млрд 200 млн лет.

В.Г. Хлопин, сопоставив анализы уранинитов на уран и свинец с данными на гелий, выявил, что количество гелия не соответствует его возрасту, вычисленному по свинцовому методу. На этом основании он сделал вывод, что возраст такого типа минералов не следует определять по отношению гелий/уран. В исследованных В.Г. Хлопиным уранинитах содержание гелия оказалось значительно ниже теоретически ожидаемого, если принять их возраст, определенный свинцовым методом. Работы В.Г. Хлопина выявили необходимость изучения миграции радиоактивных, особенно короткоживущих, элементов; определения радиоактивного равновесия в рудах; составления сводки гелиеносности отдельных регионов страны.

В 1926 г. В.Г. Хлопин показал, что для определения возраста минералов и геологических формаций могут быть использованы не только известные свинцовый и гелиевые методы, основанные на измерениях соотношений продуктов радиоактивного распада, но и всевозможные методы, основанные на изучении миграции радиоэлементов, приводящей к нарушению равновесия между членами одного ряда распада [Хлопин, 1936], что нарушения равновесия между членами одного ряда и определенного соотношения между радиоактивными изотопами вызваны различным темпом их радиоактивного распада.

Поиски наиболее древних геологических образований выдвинули

на первый план более строгий отбор образцов, пригодных для последующего определения их возраста. В Радиевом институте Л.В. Комлевым и Н.М. Прокопенко была разработана специальная инструкция для геологов по сбору образцов изверженных пород [Комлев, Прокопенко, 1933. С. 245—248]. В инструкции предусматривались следующие основные правила: 1) образец породы должен быть свежим и хорошей сохранности; породы, подвергшиеся выветриванию для определения возраста непригодны; 2) для сбора рекомендуются любые изверженные породы (кислые, основные и средние), но особое внимание следует уделять сбору редкоземельных минералов в пегматитовых жилах; 3) проба изверженной породы должна быть весом не менее 30 кг в одном или нескольких кусках, причем желательнее, чтобы образцы были как можно большего размера; 4) рекомендуется брать из одного и того же массива изверженной породы несколько проб (например, по 10 кг каждая), это должно обеспечить выборку материала необходимой свежести и возможность определения возраста по нескольким образцам. При отборе образцов должны исследоваться окружающие породы и природная среда, что дает возможность изучать минералы во взаимодействии с окружающей средой и реконструировать процесс развития самого минерала. Это обеспечивало возможность объективной оценки развития минерала и точности определения его реального возраста.

В конце 20-х—начале 30-х годов в Радиевом институте были определены основные положения, при соблюдении которых можно добиться правильных результатов при определении возраста геологических образцов:

1) считать постоянной скоростью радиоактивного распада в геологическое время, определяемую в пределах точности измерения констант;

2) установить точный изотопический состав радиоэлементов, являющихся родоначальниками радиоактивных рядов;

3) убедиться в стабильности конечных продуктов распада;

4) убедиться в отсутствии неизвестных ядерных процессов, которые могли бы привести к образованию элементов, по которым производится вычисление возраста;

5) использовать точные значения констант распада материнских веществ;

6) убедиться в отсутствии процессов, которые могли бы в геологическое время нарушить радиоактивное равновесие в изучаемом образце;

7) располагать точными приборами и аппаратурой определения малых количеств радиоэлементов, на основании которых производится определение абсолютного возраста минерала.

К началу 30-х годов изотопический состав радиоактивных рядов был несколько уточнен и сводился к известным ранее трем основным рядам:

1) $U-8\alpha$ (He) \rightarrow RaG (урановый свинец-206);

2) $Th-6\alpha$ (He) \rightarrow ThD (ториевый свинец-208);

3) $AcU-7\alpha$ (He) \rightarrow AcD (актиниевый свинец-207).

Было выяснено, что конечные продукты распада свинец и гелий — практически стабильные элементы (их период полураспада около 10^{14} — 10^{15} лет, поэтому на определение возраста не может оказать влияния). Не было обнаружено также и неизвестных ядерных реакций, возникавших в геологическое время, которые могли бы привести к образованию новых элементов. Многочисленные исследования показали, что существуют и постепенно становятся известными все новые и новые радиоактивные элементы, как короткоживущие, так и долгоживущие, но образованные не за счет неизвестных, а за счет известных или предполагаемых ранее ядерных реакций. Периоды полураспада некоторых вновь открытых радиоактивных элементов столь велики, что, по мнению И.Е. Старика, они не могли влиять на результаты определения геологического возраста радиоактивными методами [Старик, 1954].

К началу 30-х годов в СССР вопросами определения абсолютного возраста радиоактивными методами, помимо Радиевого института, занимались многие учреждения и ведомства в важнейших городах страны. Наибольший объем работ выполнялся в Радиевом институте в Ленинграде, где работали В.Г. Хлопин, Э.К. Герлинг, М.Е. Владимирова, Л.В. Комлев, В.М. Пермяков, Н.В. Барановская, Г.И. Ермолин, В.В. Верещагин и др. Затем большой объем работ проводился в ЦНИГРИ, находившемся в то время также в Ленинграде. Исследования по определению абсолютного возраста горных пород и минералов проводились под руководством И.Е. Старика, в дальнейшем возглавившем это направление по всей стране. В его группе работали А.С. Смагина, О.С. Меликова, Н.М. Сегель и др. В Москве работы в области создания новых методов радиогеохронологии и изучения многих процессов, связанных с миграцией радиоактивных элементов, проводила группа под руководством профессора В.И. Баранова, ученика и последователя В.И. Вернадского. В других организациях также начинали заниматься вопросами радиогеохронологии, их число неуклонно увеличивалось, требовалась общая координирующая организация.

По инициативе В.И. Вернадского в 1931 г. у нас в стране была создана Межведомственная комиссия по определению абсолютного возраста пород [Старик, Сегель, 1937]. В состав комиссии вошли представители Академии наук СССР, Государственного радиевого института, Центрального научно-исследовательского геологоразведочного института (ЦНИГРИ) и других организаций. Председателем комиссии был назначен В.И. Вернадский, членами комиссии были А.П. Герасимов, А.А. Черепеников, И.Е. Старик. В ноябре 1931 г. на первом же заседании комиссии были заслушаны доклады и сообщения о проводимых работах по определению абсолютного возраста минералов.

На заседании комиссии были обсуждены предложенные И.Е. Стариком и Н.М. Сегель новые методики анализа радиоактивных минералов, определения малых количеств свинца и применение этих методик к определению возраста хлопинита [Старик, Сегель, 1937]. Эта методика представляла особый интерес при определении возраста

бедных ураном и торием минералов и руд, не имеющих значительных радиоактивных включений. Ранее определения урана и тория производились косвенными методами по содержанию радия с учетом радиоактивного равновесия. Применялись также методы определения радия и тория по выделяемой ими эманации и др. Следует отметить, что используемые в то время методы определения малых количеств свинца при взятии больших навесок не обеспечивали полного его извлечения из породы. В отличие от прежних методик И.Е. Старик и Н.М. Сегель ввели обязательный контроль полноты извлечения свинца из породы. Они предложили добавлять радиоактивный изотоп свинца в количестве 10^{10} г, смешивать его со свинцом, выделенным из образца. По начальной и конечной активности вследствие неделимости изотопов стало возможным судить о полноте извлечения свинца из образца. Ничтожное добавление свинца не может сказаться на точности определения количества выделенного свинца, т.е. суть разработанной методики можно свести к: 1) изучению условий соосаждения солей свинца с изоморфной солью, 2) отделению свинца от применявшейся для осаждения изоморфной соли и 3) определению количества свинца (или его процентного содержания).

Предложенный метод был опробован на образцах минералов хлопинита и ловчоррита. Возраст хлопинита, оказавшегося в хорошей сохранности, равен 172 млн лет. По определению гелиевым методом, произведенным А.А. Черепениковым, возраст хлопинита равен 127 млн лет. После пробных определений метод рекомендован для установления возраста большинства минералов, но с условием дополнительного определения атомного веса выделенного свинца.

В Радиевом институте много внимания уделялось исследованиям гелия в природных условиях, сбору данных для установления "гелиевого дыхания Земли". Этой проблемой занимались во многих, в том числе американских и английских, лабораториях. Определение распространенности гелиевого потока, поступающего из недр к поверхности, наилучшим образом может быть достигнуто совместно с исследованиями отношения гелия к урану и торию, которые проводились при определениях возраста минералов гелиевым методом. Особенно важно было найти древнейшие породы, сохранившие накопившийся гелий. Были проведены совместные фундаментальные исследования Радиевого института и Центральной геохимической лаборатории по выявлению взаимодействия между инертными газами, заключенными в минералах [Черепеников, 1933].

К другого рода фундаментальным работам, на которых базировалось совершенствование и развитие методов радиогеохронологии, относятся исследования по уточнению постоянной радиоактивного распада тория, окончательно не установленной вплоть до 1933 г. Следует указать на работы молодого в то время сотрудника Радиевого института К.А. Петржака, который разработал новую методику измерений излучений ториевого образца. Он исходил из принципа неодинакового числа пар ионов, образуемых испускаемыми альфа-частицами, на пути их пробега, достигающих максимума в конце пробега [Петржак, 1938]. В изготовленной специальной сферической

Таблица 5
Время полураспада тория

Год определения	Время полураспада тория, лет	Исследователь
1910		Х. Гейгер
	$1,281 \cdot 10^{10}$	Э. Резерфорд
1911	$1,0 \cdot 10^8$	Х. Гейгер
		Дж. Нэттол
1913	$1,18 \cdot 10^{10}$	Г.Н. Мак-Кой
1914	$1,50 \cdot 10^{10}$	Б. Гейманн
1918	$2,16 \cdot 10^{10}$	Л. Мейтнер
1928	$1,65 \cdot 10^{10}$	Г. Кириш
1933	$1,30 \cdot 10^{10}$	Г. Фезенфелд
1933	$1,34 \cdot 10^{10}$	К.А. Петржак

камере, позволяющей регистрировать пробег альфа-частиц на фиксированном расстоянии 2,8 см, он смог выделить составляющую альфа-частиц, испускаемого только торием, и построил ряд кривых пробега альфа-частиц для Th, RaTh, ThX, Tn, ThA, ThC и ThC', максимумы которых сдвинуты друг относительно друга. В результате проведенных точных измерений и сложных расчетов К.А. Петржак вычислил постоянную полураспада тория в $1,34 \cdot 10^{10}$ лет, близкую к современным данным ($1,389 \cdot 10^{10}$ лет). Его вычисления имели большое значение, поскольку к тому времени постоянная полураспада тория еще не была окончательно установлена. Время полураспада тория, определенное разными учеными на основе самых разнообразных принципов, как видно из табл. 5, варьировалось в самых широких пределах.

В 1934 г. в Радиовом институте было организовано широкое обсуждение состояния исследований в области радиоактивности. По приглашению В.И. Вернадского в работе семинара приняли участие некоторые ведущие иностранные ученые, в том числе известный немецкий химик Ф. Панет (1887—1958), переехавший в 1933 г. в Англию и ставший в 1943—1945 гг. главой химического отдела Британско-Канадской комиссии по атомной энергии в Монреале, президент Объединенной комиссии по радиоактивности международного совета. В работе семинара и обсуждении результатов исследований принял участие и чехословацкий химик Я. Гейровский (1890—1967), создатель полярографического метода исследований определения всех элементов, лауреат Нобелевской премии 1959 г. (см. с. 47).

В те годы особенно интенсивно развивались международные научные связи. Советская комиссия по определению возраста минералов и геологических образований и американская комиссия пришли к соглашению о координации работ по уточнению методов анализа свинца и гелия в минералах, постепенном переходе от определений возраста отдельных минералов и образований к определению возраста горных пород и геологических формаций [Хлопин, 1932]. Предполагался обмен информацией о намечаемых и выполняемых работах по определению абсолютного возраста минералов и т.д. В.И. Вернад-

ский и В.Г. Хлопин, намечая первоочередные направления исследований в области определения абсолютного возраста минералов и пород, обращали внимание как американской, так и советской комиссии на важность определения возраста радиоактивными методами осадочных отложений и ряда так называемых немых пород, т.е. пород, не содержащих в себе ископаемых, по которым можно было бы определить возраст геологическими методами.

2.5. ДИСКУССИЯ

О МЕТОДАХ ОПРЕДЕЛЕНИЯ АБСОЛЮТНОГО ВОЗРАСТА ПОРОД НА XVII СЕССИИ МЕЖДУНАРОДНОГО ГЕОЛОГИЧЕСКОГО КОНГРЕССА И ОРГАНИЗАЦИЯ МЕЖДУНАРОДНОЙ КОМИССИИ

Одним из важнейших этапов развития радиогеохронологии было подведение итогов определения абсолютного возраста геологических объектов и обсуждение предстоящих задач на XVII сессии Международного геологического конгресса, состоявшейся в 1937 г. в Москве. Вопросы радиогеохронологии обсуждались как на пленарном заседании конгресса, так и на заседаниях секции "Геофизика и геотермика" и совета конгресса. На пленарном заседании выступил В.И. Вернадский с докладом на тему "О значении радиогеологии для современной геологии", на заседаниях секции — В.Г. Хлопин, И.Е. Старик, Э.К. Герлинг, В.М. Пермяков, Л.М. Курбатов и два виднейших американских специалиста — А.Ч. Лэйн и Дж.П. Марбл. В совете конгресса были решены в основном организационные вопросы о создании комиссии.

Доклад В.Г. Хлопина "Радиоактивный метод определения геологического возраста в применении к некоторым геологическим образованиям в СССР" посвящен работам, проведенным в 1935—1936 гг. в Радиевом институте и Радиохимической лаборатории ЦНИГРИ [Хлопин, 1940]. В.Г. Хлопин подтвердил, что постоянство процесса радиоактивного распада, протекающего в термодинамических условиях нашей планеты, поддается количественному учету и может быть эталонным временем. При разработке методов определения абсолютного возраста на этой основе, однако, встречается ряд труднопреодолимых препятствий. К ним относятся прежде всего затруднения определения пригодности (или непригодности) каждого данного образца для определения его возраста. Кроме того, в то время для определения возраста использовалась аппаратура недостаточной или неодинаковой точности и чувствительности при определении радиоактивных элементов, на основании которых производится вычисление возраста. В СССР в связи с этим были разработаны условия испытания пригодности образцов минералов для определения их возраста.

По предложению И.Е. Старика при определении возраста наряду с проверкой наличия радиоактивного равновесия радий—уран начали определять эманлирующую способность образца, выщелачиваемость из него радия, урана и свинца, проводить микрорадиографию шлифов, т.е. предварительный радиохимический анализ [Там же. С. 486]. В случае возможного использования гелиевого метода в пред-



В.Г. Хлопин (1890—1950)

варительный комплекс испытаний вводились определения гелия, выделяемого из образца в вакууме при различных температурах. Проведение таких предварительных физико-химических испытаний позволяло сделать заключение о пригодности образца.

В дальнейшем в комплекс предварительного анализа вошли определения изотопного состава свинца на масс-спектрографических установках. Содержание урана и тория обычно определялось радиоактивными или химическими способами с точностью $\pm 6\%$ для тория (при содержании до 10^{-6} г), $\pm 2\%$ для урана (при содержании до 10^{-3} г); при расчетах вводились поправки на распад актиноурана по номограммам.

Возраст древних пород образцов из различных районов СССР был определен с помощью свинцового, гелиевого и кислородного методов, данные о которых приведены в табл. 6.

Более подробные данные об определениях абсолютного возраста древних минералов и горных пород Хибин и Северной Карелии были приведены в докладе В.М. Пермякова [Пермяков, 1940]. Исследуемые минералы, взятые из десяти месторождений, подверглись комплексу предварительных исследований.

По данным В.М. Пермякова, геологический возраст хибинских ловгорритов ориентировочно определен в $(350 \pm 30) \cdot 10^6$ лет, а геологический возраст хибинских лопаритов свинцовым методом определить невозможно без предварительного изучения изотопного состава, поскольку галенит, включенный в решетку кристалла полевого шпата, содержит много свинца, резко искажающего (увеличивающего) возраст кристалла. Возраст карельских монацитов ("Черная Салма" и жила "Северная Карелия"), возможно, несколько завышен, хотя эти породы, видимо, можно считать весьма древними. Для уточнения возраста этих образцов прежде всего необходимо было определить степень выщелачиваемости тория и урана, а затем изотопный состав свинца.

При определении абсолютного возраста по свинцовому методу обязательно проведение анализа изотопного состава, а для ряда минералов — степени выщелачиваемости основных слагаемых компонентов — урана, тория, свинца, выявление эманулирующей способности минералов. Определять возраст образцов аплит-гранита и микроклина месторождения "Северная Карелия" возможно также после определений изотопного состава свинца и степени выщелачиваемости урана и тория.

Таблица 6

Средние значения абсолютного возраста минералов и горных пород СССР, определенные различными радиологическими методами [Хлопин, 1940. С. 494]

Месторождение	Абсолютный возраст, лет			Принятый средний возраст
	по свинцовому методу	по кислородному методу	по гелиевому методу	
Пегматиты (Северная Карелия)	$(1,6-1,9) \cdot 10^9$	$1,65 \cdot 10^9$	$1,6 \cdot 10^8$	$1,6 \cdot 10^9$
Уранинит (Хибинский щелочной массив)	$3,8 \cdot 10^8$	Нет данных	$2,8 \cdot 10^8$	$3,4 \cdot 10^8$
Пегматиты (Хилокский массив Забайкалья)	$1,7 \cdot 10^8$	То же	$1,5 \cdot 10^8$	$1,7 \cdot 10^8$

Э.К. Герлинг в докладе "Гелиевый метод определения возраста и его применение для определения возраста минералов и пород Северной Карелии" привел данные о возрасте и его определении для наиболее древних горных пород в нашей стране [Герлинг, 1940]. В докладе, вызвавшем интерес, были показаны возможности гелиевого метода при определении древних пород, сохранивших гелий.

В докладе И.Е. Старика "Возраст Земли по радиоактивным данным" были подведены итоги накопившихся к тому времени данных определений абсолютного возраста Земли, который рассматривался как предел возраста земных пород [Труды..., 1940]. И.Е. Старик сравнил различные подходы к выбору начального момента летоисчисления как одного из наиболее сложных вопросов определения возраста нашей планеты. Если геологи рассматривают Землю со времени ее развития, доступного геологическому изучению, то астрофизики пытаются определить время с начала образования планеты. При сравнении различных астрофизических теорий о начальной температуре Земли И.Е. Старик приходит к выводу, что в ранние периоды ее существования, температура Земли была значительно выше, чем в XX в. Данные о радиоактивном нагреве недр планеты должны были бы подтвердить это представление.

Сравнивая геологические и астрофизические определения возраста Земли, он показал, что и те и другие основаны на предположении постоянства процессов в течение всего геологического времени. Но несмотря на это, как оказалось, вычисленные значения возраста сильно различались между собой. Так, максимальный возраст Земли, определенный по отложению солей в океанах, равнялся 150 млн лет, а по образованию морских отложений — 500 млн лет. Такое расхождение могло получиться, как считал известный геолог Бубнов, потому, что оба метода основаны на неправильной предпосылке постоянства скорости геологических процессов [Бубнов, 1960]. Бубнов считал, что скорость отложений осадков неуклонно увеличивается, в кайнозой она в 5 раз больше, чем в палеозой, поэтому 500 млн лет не может считаться высшим пределом возраста Земли. Это, видимо, только его нижний предел.



И.Е. Старик (1902—1964)

Радиоактивными методами возраст Земли определяется также неодинаково. Так, по методу плеохронических ореолов возраст Земли, вычисленный Г.Х. Гендерсоном в 1934 г., составлял 800 млн лет, по гелиевому методу, по данным В. Урри, 1936 г., — 900 млн лет и по монациту [Герлинг, 1935] — около 850 млн лет.

Наибольшие значения возраста пород, а следовательно и Земли, были получены свинцовым методом, но и они вызывали разногласия и некоторые сомнения. По данным советских исследователей А.К. Ненадкевича, В.Г. Хлопина и М.Е. Владимировой, максимальный возраст уранинита Северной Карелии был определен в 1850 млн лет, а с учетом поправок на распад актиниевого ряда — 1600 млн лет. Ураниниты Северной Карелии считались самыми древними породами

на Земле, и их возраст был внесен в сводку Американского комитета по определению возраста горных пород. Но уже в 1936 г. наиболее древними оказались монацит и уранинит из Манитобы, возраст которых, по определениям Г.В. Ельсворта и Дж.С. Де Лури, равнялся 1745 и 1725 млн лет соответственно, но и эти образцы оказались более молодыми, поскольку с введением поправок на распад актиниевого ряда их возраст не превышал 1460 млн лет. К 1937 г., таким образом, наиболее древней породой на Земле оказались ураниниты Северной Карелии, возраст которых с поправками определен в 1600 млн лет (табл. 7).

И.Е. Старик рассмотрел определения астрофизического возраста Земли, проведенные Ф. Панетом, А. Холмсом, Э. Резерфордом, советскими исследователями. Ф. Панет сначала определил астрофизический возраст метеоритов, исходя из постоянства эквивалентных весов железа, никеля, кремния и хлора. Максимальный возраст метеоритов оказался равным 2900 млн лет, и, поскольку метеориты образовались одновременно с планетами, считал Ф. Панет, то возраст Земли составлял около 3000 млн лет. При вычислениях он не учитывал распад актиниевого ряда, поскольку в метеоритах торий отсутствует. А. Холмс не соглашался с Ф. Панетом в том, что метеориты могли быть планетного происхождения, но, по его мнению, солнечная система и звездные миры могли иметь возраст одного порядка — около 2000—3000 млн лет. Упомянув об определениях астрофизического возраста Земли Э. Резерфордом, исходившим из предположения о равных количествах изотопов U^{235} и Ac^{231} , и с учетом современного

Таблица 7
Геологический возраст Земли, определенный разными методами [Старик, 1938]

Автор	Метод	Возраст Земли, млн лет	Примечания
Дж. Джоли	Натриевый	100	—
Ч. Шухерт	По мощности морских отложений	500	—
Г. Н. Гендерсон	По плеохроическим ореолам	800	—
В. Д. Урри	Гелиевый	900	По породам
Э. К. Герлинг	"	850	По минералам
В. Г. Хлопин и М. Е. Вла- димирова	Свинцовый	1600	По ураниниту, мона- циту и ортиту Северной Карелии

Таблица 8
Астрофизический возраст Земли, определенный радиологическими методами [Старик, 1938]

Автор (год определения)	Метод	Возраст Земли, млн лет	Примечания
Г. В. Рессел (1921)	Свинцовый	11000	По среднему содержа- нию урана, тория и свин- ца в земной коре
А. Холмс (1930)	"	3000	То же
Г. Хевеши (1931)	"	24000	"
И. Е. Старик (1936)	"	3000—4000	То же, но с учетом рас- пада актиноурана
И. Е. Старик (1936)	"	3000	По отношению в обык- новенном свинце
Ф. Панет (1931)	Гелиевый	2900	По метеоритам
Э. Резерфорд (1931)	Актинуранный	3400	По актиноурану
Принятый в 1937 г. астрофизический возраст Земли		3000	

отношения $AsU/UI = 0,28$ время отделения Земли от Солнца могло быть равно $3,4 \cdot 10^9$ лет. Наиболее вероятным астрофизическим возрастом Земли, по имевшимся в то время данным, И. Е. Старик считал 3000—3500 млн лет.

Сравнение различных определений астрофизического возраста Земли, проведенных в 20—30-х годах, приводится в табл. 8.

По докладу И. Е. Старика выступил вице-президент Американского комитета по определению абсолютного возраста геологических формаций профессор Дж. П. Марбл. Он согласился с доводами И. Е. Старика, что низкие значения возраста Земли, полученные В. Д. Урри, могут быть объяснены потерями гелия и что гелиевый метод определения возраста, видимо, целесообразно применять для пород не старше среднего докембрия.

Советский ученый Л.М. Курбатов в докладе "О радиоактивности железо-марганцевых пород и определения скорости их образования радиоактивными методами" показал возможность использования результатов проведенных им исследований при изучении миграции радиоактивных элементов в земной коре и накоплений их в осадочных породах [Курбатов, 1940]. Он продемонстрировал таблицы определения радия в железо-марганцевых конкрециях, взятых из ряда морей и озер. Особенно много образцов было взято из Карского моря. О происхождении радия в железо-марганцевых конкрециях можно судить по содержанию радия, урана и тория в донных отложениях и, конечно, в морской воде. Надо отметить, что в 50—60-х годах такого рода исследования начали широко проводиться Институтом океанологии АН СССР во время рейсов научно-исследовательских судов (НИС) (об этом подробнее в гл. 5).

Л.М. Курбатов обратил внимание ученых на важность изучения химического и минералогического состава воды и взвеси, закономерностей колебаний (суточных, сезонных, годовых) и измерений (качественных и количественных) других факторов, с которыми могут быть связаны процессы образования осадков. Он показал, что проведенное в начале 30-х годов изучение радиоактивности железо-марганцевых образований составляло лишь часть исследований донных отложений морей и озер нашей страны, проводимых в то время Всесоюзным арктическим институтом.

Л.М. Курбатов обратил внимание на важность систематического изучения радиоактивности донных отложений, морской воды и атмосферного воздуха над морем для выяснения геохимии радиоактивных элементов и некоторых вопросов «донной» геологии (Там же).

Профессор Дж.П. Марбл, выступивший также по докладу Л.М. Курбатова, выразил удовлетворение тем, что Л.М. Курбатов определил возраст молодых формаций по падению радиоактивности [Труды XVII сессии..., 1940. С. 522]. Он напомнил, что подобным методом профессор Шлундт в 1931 г. определил возраст туфов из Йеллстоунского национального парка США. Для американцев использование Л.М. Курбатовым этого метода имело большое значение.

На конгрессе всестороннему обсуждению подверглась концепция В.И. Вернадского об исходном пункте и единице измерения геологического времени. По этим вопросам выступил председатель Американской комиссии по определению геологического времени профессор А.С. Лэйн.

В докладе "Исходный пункт в измерении геологического времени" А.С. Лэйн показал, что для геологии, видимо, следует избрать единицу времени, несколько большую, чем принятый ныне год [Лэйн, 1940а]. К такого же рода единицам он относит и предложенные В.И. Вернадским "декамирады" (100 тыс. лет), основанные на понятии того же рода. А.С. Лэйн предложил рассмотреть возможность использования в геологии единиц измерения времени, основанных на природных земных или планетарных процессах. Подобно образованию годовых колец деревьев, в разрезах земной коры, говорил профессор А.С. Лэйн, также наблюдаются правильно повторяющиеся

слои кремниевых отложений в толще мела, отражающие определенную периодичность в развитии Земли. Эта периодичность не может соответствовать столь короткому промежутку времени, как год. Он предлагал, например, рассмотреть предложение С.Г. Аббота о принятии за единицу времени двойной период солнечных пятен (23 года) или период прецессии (около 25 тыс. лет), определенный ранее В. Кроллем, и др.

А.С. Лэйн отметил существование многих факторов, которые ускоряют или замедляют геологические процессы, подобно, например, явлениям, контролирующим момент разрешения напряжений, вызывающих землетрясения. По его мнению, в геологических процессах большие или малые циклы, возможно, могут иметь значение для хронологии, и если они еще не используются в качестве единицы времени, то придется, видимо, возвратиться к установившейся единице времени — году.

Что же касается исходного момента отсчета геологического времени, то, по мнению А.С. Лэйна, любой момент между зарождением Земли и современностью может быть выбран в качестве начального при соблюдении следующих двух условий [Труды XVII сессии..., 1940. С. 525]. Прежде всего следует помнить, что удобно иметь дело только с положительными числами и точка начала отсчета должна быть определена во времени достаточно точно. Кроме того, несмотря на точное определение во времени современного периода, она все время меняется и поэтому следует определить начальную точку его отсчета, лучше такую, какая была бы отмечена не только в литературе, но и в отложениях. Так, например, слой, соответствующий десятилетию 1910—1920 гг., когда в отложения попало огромное количество изношенных двигателей внутреннего сгорания и других механизмов и металла, можно было бы назвать "фордским горизонтом", а 1920 г. принять за начало измерений геологического времени и т.д. [Там же. С. 526]. Для геолога, по мнению А.С. Лэйна, ключом к прошлому является современность и все измерения производятся исходя из современности, в связи с этим и ошибки измерений, определяемых в годах, растут в абсолютной своей величине по мере удаления от современности.

А.С. Лэйн выступил и с другим докладом на тему "Измерение геологического времени", в котором показал применение общепринятых гелиевого и свинцового методов определения возраста пород в работах американских ученых [Лэйн, 1940б]. Американская комиссия во главе с А.С. Лэйном считала перспективным в уточнении возраста пород учитывать эффект нейтронов, образующихся при соединении радия и бериллия. А.С. Лэйн напомнил, что Комиссия проводит не только определения возраста тех или иных образцов, но и обобщения полученных результатов по определению возраста границ отложений. В частности, возраст нижней части юрских отложений принят комиссией на основе данных В.Д. Урри в 150 млн лет (по В.Д. Урри, $146,6 \pm 12,8$ млн лет). Возраст верхней части ордовика принят комиссией, по данным А.С. Лэйна, в $372,7 \pm 6,9$ млн лет, в нижней части — 430 ± 12 млн лет (по данным В.Д. Урри для интрузий габбро

в Керок-Феле). Полученные комиссией новые данные определяют конец девона и начало карбона в 260 млн лет. В.Д. Урри и А.С. Лэйн проводили определения возраста кембрия и докембрия. А. Холмс и Ф. Панет изучали алмазодержащие включения, относящиеся к допалеозойской эре. Одновременно проводилось изучение ленточных ледниковых глин.

А.С. Лэйн обратил внимание ученых на выявленные ими колебания в определении урана и тория свинцовым методом и в возрастном коэффициенте, в особенности во внешних зонах [Там же. С. 629]. Он считал важным выяснение зависимости этих колебаний от первичных колебаний кристаллизации, ее продолжительности или, возможно, более поздних добавлений: диффузии (радона и т.д.) и вторичных изменений. Получение четких ответов на поставленные вопросы важно не только с точки зрения определения процента ошибок в датировке свинцовым методом, но при датировке относительных стадий отложений и разложения минералов.

А.С. Лэйн сообщил о работах, проводимых в рамках комиссии по определению возраста пород и минералов по проценту равновесия (иония или радия с ураном). Комиссия поручила нескольким исследователям проводить работы в этом направлении, поскольку минералы с небольшим содержанием радиоактивных веществ больше распространены в природе, чем сильнорадиоактивные. В декабре 1936 г. комиссия обсудила результаты работ В.Г. Гросса, Дж.П. Марбла и А.С. Лэйна. В заключение А.С. Лэйн сказал, что Американская комиссия по определению абсолютного возраста природных образований стремится найти возможность для проведения новых работ и стимулирует сбор и систематизацию фактов по определению абсолютного возраста [Там же. С. 531].

С интересным докладом о результатах исследований алланита (ортита) как указателя геологического возраста выступил Дж.П. Марбл [Марбл, 1940]. Недостаточность соответствующего материала для определения возраста свинцовым методом вызвала поиски новых видов минералов, дополнительные их исследования. По предложению А.С. Лэйна были просмотрены анализы химического состава ортитов, произведенные задолго до "возникновения понятия радиоактивного распада". Поиски увенчались успехом. Во многих образцах зафиксировано присутствие тория (от следов до 2% ThO_2) и урана (немногие доли % U_3O_4). Дж.П. Марбл считал возможным использовать ортиты для определений их абсолютного возраста, тем более что ортиты найдены во многих районах земного шара в изверженных породах разного возраста.

Во время дискуссии обсуждались некоторые методы определения возраста. По поводу кислородного метода определения возраста, предложенного А.С. Лэйном, В.Г. Хлопин сказал, что метод может быть использован при определении возраста урановых минералов, которые содержали в момент их образования весь уран только в форме UO_2 [Труды XVII сессии..., 1940. С. 549]. К преимуществам кислородного метода относится то, что при его использовании не требуется знание количества образовавшихся устойчивых

продуктов распада — гелия и свинца, а только установление в момент определения возраста соединений UO_3 и UO_2 . Кислородный метод неприменим к минералам, вторично измененным или содержащим влагу. Кислородный метод может использоваться при контроле присутствия примеси обыкновенного свинца, для оценки сохранности образца (если обе его модификации дают сходящиеся результаты с данными по свинцовому методу, то образец можно считать хорошо сохранившимся и в нем отсутствуют примеси свинца нерадиоактивного происхождения). Этот метод был применен советскими исследователями при определении возраста уранинитов Карелии [Там же].

Выступивший Л.М. Курбатов сообщил о результатах измерений интенсивности гамма- и бета-излучения в местах выхода сланцев, свидетельствующих о значительной радиоактивности всей толщи сланцев за счет элементов урано-радиевого ряда [Труды XVII сессии..., 1940. С. 549—550]. Л.М. Курбатов провел определения радиоактивности сланцев гелиевым методом.

Завершая дискуссию, И.Е. Старик разделил радиоактивные методы определения возраста на два типа: первичные методы, основанные на вычислении времени по собственно процессу радиоактивного распада, и вторичные методы, основанные на изучении явлений, происходящих под воздействием радиоактивных излучений, когда вычисление времени происходит по оценке интенсивности воздействия излучений.

И.Е. Старик, не касаясь принципиальных возражений против каждого из этих методов, показал возможные источники ошибок за счет недостаточной точности установления констант распада тория, недостаточной точности определения содержания тория и урана, незнания процессов, нарушивших в образце радиоактивное равновесие. Он показал, что для успешного применения свинцового метода необходимо точное измерение содержания свинца в образце и отсутствие в нем нерадиоактивного свинца или по крайней мере его точный учет. Для успешного применения гелиевого метода необходимо точное определение содержания гелия в образце, уверенность в том, что в минерале или породе не было гелия в момент их образования, а весь наличный гелий сохраняется во все время существования данной породы или минерала [Труды XVII сессии..., 1940. С. 550]. Но главным критерием успешного применения гелиевого и свинцового методов для определения возраста пород и минералов остается, по мнению И.Е. Старика, хорошая сохранность исследуемых образцов.

Что касается широкого использования вторичных методов определения абсолютного возраста пород и минералов, то, по мнению И.Е. Старика, ни метод плеохроических ореолов, ни кислородный метод еще не могли быть рекомендованы для широкого применения, поскольку в то время еще не было достаточно данных о постоянстве протекавших процессов, на которых основаны эти методы. Для более успешной разработки новых вариантов методов, их широкого внедрения в практику геологических работ И.Е. Старик считал необходимым ускорение исследований в смежных областях. В частности,

он обращал внимание на изучение миграции радиоэлементов в земной коре и состава молодых образований. Он предполагал, что в дальнейшем могут применяться методы, использующие в качестве индикаторов "одиночно стоящие радиоэлементы, такие, как калий, рубидий, самарий" [Там же. С. 550].

Выступивший на пленарном заседании XVII сессии Международного геологического конгресса академик В.И. Вернадский обратил внимание геологов на необходимость "международного соглашения в научной работе геологов в области радиологических исследований" [Вернадский, 1939, с. 235]. "Работа геологов, — говорил В.И. Вернадский, — подошла к проблемам, разрешение которых, и в некоторых случаях даже их постановка, требует прежде всего точного числового определения в них геологической длительности" [Там же. С. 215]. Полевая работа геологов и геологическая карта должны быть связаны с численным определением геологического возраста и длительности геологических процессов, поскольку радиоактивный распад атома, причина которого не была известна, геологически постоянен. "Радиологическое время", по мнению В.И. Вернадского, дает возможность проникать глубже и стать на более прочную научную основу изучения геологических процессов. Особенно важными должны быть исследования радиоактивности планеты. Он подчеркнул, что связанные с открытием явления радиоактивности новые исследовательские возможности изучения динамических процессов Земли позволяют охватить явления биосферы и Космоса.

В.И. Вернадский предложил придать работе по определению абсолютного возраста "международный характер" и создать нужную для этого особую организацию [Там же. С. 238]. Он предложил образовать при Международном геологическом конгрессе комиссию, которая занялась бы установлением единой методики геологического определения времени и обсуждением проблем возраста, получением точных численных данных [Там же. С. 239]. Он считал, что на первом этапе инициативу могла бы взять комиссия в Вашингтоне, которая к следующему конгрессу подготовила бы все данные для обсуждения и отражения их на мировой геологической карте.

Предложение В.И. Вернадского об образовании комиссии по определению геологического времени радиологическими методами обсуждалось на заседании совета Геологического конгресса 28 июля 1937 г. [Труды XVII сессии..., 1940. С. 81]. При обсуждении конкретных задач комиссии В.И. Вернадский предложил, чтобы в ее задачи входили установление методов и разработка методик определения возраста пород и, главное, координация работ в области определения абсолютного возраста горных пород и минералов.

Предложение В.И. Вернадского поддержал известный бельгийский ученый П. Фурманье, сообщивший о заинтересованности в этих исследованиях геологических учреждений Африки. Значительная часть отложений на этом континенте не содержит фаунистических остатков, и определения возраста чрезвычайно затруднены. П. Фурманье зачитал послание комиссии по проведению африканской съемки в совет XVII сессии Международного геологического конгресса, обра-

щавшее внимание совета на необходимость определения возраста пород этого континента, важность применения радиоактивных методов определения возраста различных изверженных пород для решения трудных вопросов стратиграфической корреляции различных горных пород континента. В послании указывалось на возможность предоставления геологическим организациям Африки достаточных материальных средств правительственными и геологическими научными учреждениями, заинтересованными в осуществлении широко понимаемого международного сотрудничества в геологическом изучении земного шара, особенно в изучении африканского континента.

От имени советской делегации академик В.А. Обручев поддержал предложение об организации комиссии и предложил избрать президентом Комиссии по определению геологического возраста американского ученого А.С. Лэйна, а вице-президентом — советского академика В.И. Вернадского.

Совет XVII сессии Международного геологического конгресса единогласно принял эти предложения, и с этого времени в рамках Международного геологического конгресса была учреждена Комиссия по определению геологического возраста радиологическими методами во главе с А.С. Лэйном — президентом и В.И. Вернадским — вице-президентом.

Совет постановил обратиться к геологическим службам всех стран, заинтересованным в работе комиссии, с просьбой выделить своих представителей в комиссию и в ближайшие три месяца сообщить их имена А.С. Лэйну и В.И. Вернадскому.

Обсуждение результатов определений абсолютного возраста геологических образований и позднее — шкалы абсолютного геологического возраста во всевозрастающих масштабах проводилось на всех последующих сессиях Международного геологического конгресса. На XXI сессии Международного геологического конгресса, проходившей в 1960 г. и собравшей более 2600 делегатов, вопросы радиогеохронологии занимали уже почетное место в ряду обсуждаемых проблем. Современная стратиграфия, по словам одного из участников конгресса, все более и более начинает базироваться на данных определений абсолютного возраста [Гордеев, 1972. С. 259].

2.6. СТАНОВЛЕНИЕ МЕТОДОВ ЯДЕРНОЙ ГЕОХРОНОЛОГИИ В 40—50-х ГОДАХ

К началу 40-х годов результаты определений абсолютного возраста геологических формаций и методы радиогеохронологии перестали встречать сочувствие со стороны геологов, несмотря на интенсивное развитие первых свинцовых и гелиевых методов и организацию национальных и международной комиссий по определению абсолютного возраста. Причиной "охлаждения" послужили неоправдавшиеся надежды на новый физический подход к определению абсолютного возраста геологических формаций. Дело в том, что определенный радиометрическими методами возраст различных природных образований и длительность разных геологических периодов в развитии Земли все еще не совпадали с уже установившимися представлениями

ми и принятой относительной геохронологической шкалой, которой широко пользовались геологи. Некоторые данные абсолютного возраста горных пород противоречили основным представлениям о продолжительности известных геологических процессов и не могли быть приняты геологами.

В связи с этим физики, физикохимии и радиологи вынуждены были особенно тщательно изучать условия формирования минералов, влияния окружающей среды на сохранность продуктов радиоактивного распада в образцах, применять более точные методы определения ничтожно малых количеств радиоактивных элементов в минералах. Особенно важным было изучение изотопного состава минералов, его постоянства во времени и т.д.

Еще в середине 30-х годов А. Демпстер с помощью масс-спектрометрии получил уран-235 из урана, выделенного из природных образований [Dempster, 1936]. Оказалось, что принимаемое ранее постоянным отношение изотопов свинца-206 и свинца-207 в минералах менялось в течение геологического времени. Несколько позднее А.О. Нир показал, что отношение урана-238 к урану-235 также изменилось, оно было иным, например, миллиард лет тому назад по сравнению с отношением в настоящее время [Nier, 1939a]. Эти данные могли свидетельствовать о том, как считал И.Е. Старик, что уран-235 находился в веществе Земли, видимо, с момента ее образования [Старик, 1961]. В дальнейшем подтвердилось, однако, постоянство соотношения изотопов урана в различных минералах земного и космического происхождения, что послужило основой для гипотезы о независимости происхождения этих изотопов урана. Современное отношение этих изотопов урана свидетельствует о возможности их выделения за счет неизвестных, но, вероятно, происходящих ядерных реакций, например за счет образования урана-235 в процессе облучения урана-238. Поэтому при определении абсолютного возраста могли быть получены искаженные значения из-за незначительных отклонений в изотопном составе различных руд [Там же. С. 29].

В 1950-х годах было подтверждено существование такого рода реакций образования изотопа урана-235 в природных условиях за счет присутствия в урановых минералах включений или следов плутония-239 [Levine, Seaborg, 1951]. Предполагалось существование изотопа урана-233 в ториевых месторождениях за счет распада тория-232 и тория-233 по схеме $^{233}\text{Th} \xrightarrow{\alpha} ^{233}\text{U}$.

К концу 50-х годов было установлено, что изотопы урана-239 и урана-233 являются естественными изотопами, но чрезвычайно малой распространенности и с чрезвычайно малым периодом полураспада [Там же]. Изотоп урана-234 обычно находится в равновесном состоянии с изотопом урана-238, их отношение в природных образованиях может меняться под влиянием внешних факторов [Старик, 1961]. На основе изучения распространенности урана, тория и свинца в конце 50-х годов была выдвинута гипотеза о нахождении радиоактивных элементов на значительных глубинах, а не только в верхней 40-километровой толще земной коры [Там же. С. 31]. Еще ранее было известно, что родоначальником ториевого ряда является торий-

232 с периодом полураспада $1,39 \cdot 10^{10}$ лет, а конечным продуктом распада — изотоп свинца-208 [Kovárik, Adams, 1938].

Для разработки методов радиогеохронологии имело значение и обнаружение в природных условиях изотопа тория-230 (иония) с периодом полураспада $8 \cdot 10^4$ лет, который образуется при альфа-распаде урана-II, а также накопление тория-234, тория-231, тория-228, тория-227 и других естественных изотопов [Старик, 1961].

Оказалось, что строение и состав радиоактивных минералов определяется временем их существования и связан с изменением химического состава за счет распада урана и тория и под воздействием излучений радиоактивных элементов минералов и продуктов их распада.

Для определения длительности геологических периодов и усреднения и распространения полученных значений абсолютного возраста отдельных минералов на большие регионы важное значение имело изучение распространенности изотопов свинца в земной коре, которое интенсивно проводилось в 40—50-х годах. Значение изучения изотопного состава для измерений геологического времени было показано в основополагающей работе А.О. Нира [Nier et al., 1941]. Наиболее близким к среднему содержанию изотопов свинца в земной коре, по данным советских исследований, должно быть содержание их в донных илах Тихого океана, поскольку источником их образования и накопления являются породы окружающих берегов [Старик, 1961]. Накопление изотопов свинца в илах происходит с разной скоростью, соответствующей разным периодам полураспада материнских элементов.

Изучение стабильных изотопов радиогенного свинца (свинца-206, свинца-207 и свинца-208) и радиоактивных изотопов свинца (свинца-214, свинца-212 и свинца-211), являющихся членами радиоактивных семейств урана, актиноурана и тория, показало, что общее количество свинца в земной коре за последние $3 \cdot 10^9$ лет увеличилось на 20%, а за время существования Земли (если считать ее возраст равным $4,5 \cdot 10^9$ лет) увеличилось в 2 раза [Старик, 1961. С. 37].

Изотопный состав свинца особенно тщательно изучался в 40—50-х годах А. Холмсом и И.Е. Стариком. По их данным, изотопный состав свинца обусловлен различными факторами, в том числе возможной миграцией радиоактивных элементов за счет выветривания, диффузии, изотопного обмена, выщелачивания, эманирования, и другими вторичными процессами, протекавшими в период существования данной породы. Изучение таких процессов и геохимии радиоактивных элементов дало возможность вводить обоснованные в той или иной степени поправки к вычисленному значению возраста минерала.

Таким образом, на искажение вычисленного свинцовым методом возраста геологических образований существенное влияние могут оказать естественные потери продуктов распада радиоактивных элементов. Нарушение соотношений радиоактивных изотопов в минералах также может быть связано с естественными процессами, и не только с потерей, но и с накоплением в трещинах и капиллярах

минерала изотопов за счет разрушения кристаллической решетки минерала, радиоактивной отдачи ядер или диффузии радиоактивных изотопов по кристаллической решетке. К искажению вычисляемого возраста минерала может также привести потеря не только основного, но и любого элемента в ряду от урана или тория до свинца во время жизни минерала в данной обстановке за счет избирательного выщелачивания и эманирования [Старик, 1961].

Поэтому одним из главных условий соответствия значений абсолютного возраста минералов их геологическим эквивалентам должно быть всестороннее изучение возможных геохимических процессов, отражающихся на изотопном и химическом составе данного образца. Определить, происходили ли процессы, нарушавшие равновесие, по мнению И.Е. Старика, можно главным образом путем сравнения значений возраста, полученных разными методами. В этом отношении особенно пригодными для определения существования в прошлом такого рода процессов и корректировки полученных значений возраста И.Е. Старик считал определения возраста минерала по трем независимым отношениям: свинец-206 /уран-238, свинец-207/уран-235 и свинец-208/торий-232. Использование различных отношений изотопов свинца и урана дает объективные данные для внесения поправок в вычисленное значение абсолютного возраста минералов и геологических образований.

Радиоактивные методы определения абсолютного возраста геологических образований, как указывалось выше, основывались на способности радиоактивных изотопов самопроизвольно распадаться с постоянной скоростью, присущей данному изотопу, и оказывать влияние на окружающее их вещество. Соответственно методы определения возраста могут разделяться на два типа: первичные, основанные на вычислении времени по продуктам и процессам радиоактивного распада, и вторичные, основанные на изучении явлений, происходящих благодаря действию радиоактивных излучений, и результатов их воздействия.

Первичные методы учитывают распад трех основных радиоактивных рядов урана, тория и актиноурана, каждый из которых приводит при наличии радиоактивного равновесия к образованию стабильного изотопа свинца и гелия. Соответствующие методы определения возраста получили название свинцовых и гелиевых. Эти методы особенно бурно развивались в 20-х и 30-х годах. В конце 30-х годов, когда стало ясно, что абсолютный возраст геологических образований не всегда соответствует их геологическим эквивалентам, начали развиваться разновидности свинцового и гелиевого методов. В них учитывалось влияние среды, окружающей минерал, геологическое время на его сохранность или привнесение продуктов радиоактивного распада, не имеющих отношения к данному минералу и искажающих содержание тех или иных изотопов, по которым производится определение возраста.

В 40-х и особенно в 50-х годах получили наибольшее распространение методы определения возраста геологических образований по распаду одиночных изотопов, также образующих стабильные

изотопы. С этого времени усиленно начали развиваться первичные методы определения абсолютного возраста.

Что касается вторичных методов, то они связаны с учетом химического действия радиоактивного излучения, например альфа-излучения, и степени окисленности минерала. На результаты определения возраста вторичными методами большое влияние оказывают внешние факторы, которые весьма трудно учесть, и поэтому достоверность вторичных методов оказалась значительно ниже, чем при определениях возраста первичными методами. К началу 60-х годов определения абсолютного возраста минералов вторичными методами из-за указанных особенностей потеряли практическое значение.

В начале 60-х годов стабильными продуктами распада основных материнских радиоактивных элементов считались свинец, гелий, аргон-40, стронций-87 и другие изотопы. Соответственно методы, основанные на определениях указанных стабильных продуктов распада, получили название свинцовый, гелиевый, аргонный и стронциевый. Надо заметить, что указанные продукты распада считаются стабильными еще и потому, что даже если они и могут быть радиоактивными, то период их полураспада должен превышать 10^{15} — 10^{17} лет и их распад поэтому не может сказаться на определении возраста земных минералов, обычно не превышающего $5 \cdot 10^9$ лет.

К свинцовым, как и к другим, методам определения возраста геологических образований относятся различные методы, отличающиеся друг от друга как способом анализа и определения стабильного продукта распада, так и способом вычисления возраста с использованием различных констант распада, присущих данному изотопу и периодам их полураспада.

К свинцовым методам относятся следующие: свинцово-урановый (определение возраста производится по отношению содержания свинца к урану или торию или к тому и другому в материнских элементах исследуемого образца), рентгеноспектральный (по линиям свинца, урана и тория), альфа-свинцовый (разновидность рентгеноспектрального метода, особенно пригодная для минералов, не содержащих обыкновенного свинца), изотопный свинцово-урановый метод (основан на масс-спектрометрическом анализе образцов), изотопный свинцовый метод (основан на различии в скоростях распада изотопов урана), метод удельной активности свинца и др.

Рассмотрим несколько подробнее каждую разновидность свинцового метода, их преимущества и недостатки.

Свинцово-урановый метод был применен в 20—30-х годах к определению возраста сравнительно молодых образований, при этом не учитывался распад материнских веществ, в результате ошибка возрастала. При определении возраста более древних образований, как выяснилось, необходимо учитывать свинец, образующийся в результате распада активного ряда и материнского вещества, а также различие в скорости распада урана и тория.

В конце 40-х — начале 50-х годов для определения возраста минералов начали использовать различные спектральные методы, каждый из которых мог решать лишь ограниченные задачи. Так,

предложенный в те годы рентгеноспектральный метод, хотя и позволял определять возраст даже в отдельных частях минерала, но не давал возможности по спектральным линиям выделять из общего содержания свинца в минерале его отдельные изотопы.

Для вычисления возраста минералов, не содержащих (или практически не содержащих) обычный свинец, наиболее пригодным оказался альфа-свинцовый метод рентгеноспектрального анализа. Этот метод был предложен в 1950—1952 гг. группой американских ученых Е.С. Ларсеном, Н.В. Кивилом, Г.Ц. Гаррисоном [Larsen et al., 1952].

Альфа-свинцовый метод широко применялся в США. С помощью этого метода можно было вычислять приближенные значения возраста минералов.

В 1957 г. альфа-свинцовый метод был усовершенствован А.И. Тугариновым с сотрудниками. Они предложили для некоторых минералов не вводить поправку на обыкновенный свинец, даже если он присутствует в минерале, поскольку в некоторых минералах, например в пегматитах, происходит изотопный обмен между радиогенным и обычным свинцом, приводящий в конце концов к замене радиогенного свинца [Тугаринов и др., 1957]. Однако, по мнению И.Е. Старика, такого рода определения нельзя считать достоверными, поскольку уточнение базируется на совпадении абсолютного возраста и геологических данных [Старик, 1961].

Наиболее точным из группы свинцовых методов можно считать изотопный свинцово-урановый метод, предложенный К.С. Пигготом еще в 1928 г. [Piggot, 1928]. Метод теоретически обосновал А.О. Нир в 1939 г. [Nier, 1939]. Но широкое распространение и признание метод получил в 40-х годах в связи с прогрессом масс-спектрометрического анализа образцов. С помощью этого метода можно учитывать не только количество обычного свинца, загрязняющего радиоактивный минерал, но и соотношение изотопов радиогенного свинца. При определении возраста пород, содержащих много урана и свинца, метод оказался менее чувствительным к экспериментальным ошибкам [Старик, 1961].

Разновидностью изотопного свинцово-уранового метода является изотопный свинцово-свинцовый метод, основанный на различии в скорости распада урана-235 и урана-238.

Метод удельной активности свинца был предложен в 1951 г. Ф.Г. Гаутермасом [Houtermaus, 1951]. Почти одновременно метод значительно усовершенствовали Ф. Бегеманн, Дж. Гейсс и др. [Begemann et al., 1957]. При определении возраста предусматривались измерения удельной активности свинца и дальнейшие вычисления по формуле радиоактивного равновесия. Полученные результаты хорошо совпадают с результатами свинцово-уранового метода. Однако, по данным В.В. Чердынцева, проведенные этим методом определения возраста не могут быть сопоставимы с данными других методов. А по мнению И.Е. Старика, сочетание этого метода с масс-спектроскопическим анализом даст возможность определять присутствие свинца, урана и тория, учиты-

вать возможность загрязнения минерала обыкновенным свинцом-204 и определять возраст данного минерала.

Гелиевый метод определения возраста геологических образований основан на учете образования гелия в процессе распада радиоактивных рядов урана (8 альфа-излучателей), тория (6 альфа-излучателей) и актиноурана (7 альфа-излучателей). Существуют и другие излучатели гелия, например самарий-152, но их значение в общем накоплении гелия незначительно из-за большого периода полураспада этого элемента. При расчете возраста минерала по гелиевому методу учитывается первоначально существовавшее количество урана, равное сумме количества найденного урана и найденного количества атомов гелия для общего числа излучателей гелия.

Из-за легкой улетучиваемости гелия и сложности измерений ничтожно малых количеств газа при определении возраста гелиевым методом допускались большие ошибки в сторону уменьшения возраста. Но ошибки не были принципиальными, а связаны, по существу, с уровнем техники и знаний того или иного времени. Первые определения возраста провел Р. Стретт в 1908—1911 гг. для урановой смолки из Иоахимова, ториянита из Цейлонских и цирконов из разных месторождений. В 20-х годах гелиевым методом был определен возраст уранинитов из Катанги и Южной Дакоты К.В. Дэвисом, а для европейской части СССР — В.Г. Хлопиным. В 30-х годах В.Д. Урри сделал большое количество определений возраста гелиевым методом, результаты которых включил в геохронологическую шкалу. В конце 30-х годов советский ученый Э.К. Герлинг провел необходимые дополнительные исследования диффузии гелия из минералов и показал связь между плотностью упаковки кристалла и сохранностью в нем гелия. Экспериментальные данные Э.К. Герлинга находились в согласии с представлениями о меньшей потере гелия в кристаллах с более плотной упаковкой.

Для определения количества гелия, сохранившегося в минерале, Н.В. Кивил предложил в 1941 г. термин "фактор сохранности" [Keevil, 1941]. Применение так называемого фактора сохранности давало основание для введения поправок. Дальнейшие исследования Н. Кивила и Е. Ларсена, а также П. Харлея и К. Гудмена доказали качественную зависимость возраста от фактора сохранности [Hurley, Goodman, 1941; Keevil et al., 1942].

В 1941—1942 гг. Э.К. Герлингом и И.Е. Стариком были выполнены первые определения возраста гранатов — минералов с большой плотностью упаковки кристаллической решетки [Старик, 1954]. Результаты хорошо согласовывались с изменениями разновозрастных соединений, взятых из разных месторождений, и не противоречили геологическим соображениям. Однако, как оказалось в дальнейшем, такие истинные определения возраста гранатов получаются чрезвычайно редко. Поэтому необходимы были специальные исследования прочности связи радиоактивных изотопов с кристаллической структурой разновидности гранатов для определения потерь гелия при эманировании и выщелачиваемости урана и радия [Старик и др., 1957].

Определение возраста магнетитов гелиевым методом, проведенные П. Харлеем и К. Гудменом, дали значения возраста, хорошо согласуемые с другими методами определения абсолютного возраста и геологическими представлениями [Hurley, Goodman, 1943]. Получившиеся расхождения П. Харлей отнес за счет загрязнения поверхности минерала. Несмотря на устранения загрязнения, повторные определения гелиевым методом также оказались неточными.

К концу 50-х годов были выработаны критерии пригодности минерала для определения его возраста гелиевым методом.

Наиболее важным критерием является сохранность образца минерала, состояние плотности упаковки кристаллической решетки, форма нахождения радиоактивных изотопов, чистота поверхности, а также указание на присутствие избыточного гелия и т.д. [Старик, 1961]. Несмотря на неточности определения возраста, данные гелиевого метода во многих случаях могут оказаться полезными, позволяющими установить минимальное значение возраста и тем самым дополнять определения другими методами.

К началу 40-х годов относится разработка аргонового метода определения возраста геологических образований. Еще к 30-м годам было известно о радиоактивном распаде калия-40. Впервые слабая бета-активность солей калия была установлена Дж.Дж. Томсоном в 1905 г., а в 1906 г. существование активности калия было подтверждено экспериментально. Изотопы калия калий-39 и калий-41 были обнаружены в начале 20-х годов Ф. Астоном и Ф.Г. Томпсоном. Позднее было предсказано существование еще одного изотопа калия с большой массой.

Сначала, по предложению А. Холмса, попытались использовать бета-распад калия с образованием кальция-41, но оказалось, что процесс протекает не совсем так. В 1935 г. А. Ниру и А. Брюеру удалось на масс-спектрографе обнаружить изотоп калий-40 и оценить возможности его распространения [Nier, 1935; Brewster, 1935]. Затем было доказано, что калий-40 превращается путем *K*-захвата в аргон-40 и бета-захвата — в кальций-40.

В 1940 г. учитывать аргон-40 при распаде калия-40 для определения возраста калиевых минералов предложили независимо друг от друга Р. Эванс [Evans, 1940] и Ф. Томпсон с С. Роуландом [Thompson, Rowlands, 1943]. В 1947 г. В.Г. Хлопин и Э.К. Герлинг подтвердили возможность накопления в древних калиевых минералах аргона-40 в количествах, соответствующих возрасту минерала. В последующие годы было установлено, что отношение аргон-40/калий-40 увеличивается с увеличением возраста минерала, и поэтому учет накопившегося аргона-40 можно применять для определения возраста минерала.

Были установлены константы распада калия-40, причем оказалось, что по абсолютной величине константа бета-распада в 10 раз больше константы *K*-захвата. Были установлены также относительная распространенность изотопов калия и изотопный состав аргона. В атмосферном воздухе, как оказалось, содержится смесь трех стабильных изотопов аргона ^{36}Ar , ^{38}Ar и ^{40}Ar , причем наиболее распростра-

нен (99,6%) ^{40}Ar , содержание которого в атмосфере непрерывно увеличивается за счет разрушения горных пород, вулканических и других процессов.

При определении возраста минерала аргоновым методом для его выделения из минерала требуется разрушить кристаллическую решетку и обеспечить техническими и химическими средствами полное выделение накопившегося в кристаллической решетке минерала аргона. По данным Комиссии по определению абсолютного возраста геологических формаций АН СССР, вычисления возраста минералов по измерениям аргона и калия оказались надежными, расхождения с возрастом, определенным другими методами, были незначительными. Отмеченные аномальные значения возраста пород, определенные аргоновым методом, по мнению И.Е. Старика, могли быть связаны с неудовлетворительным подбором образцов или воздействием на минерал позднейших геологических и геохимических процессов.

Кроме того, при определении возраста аргоновым методом необходимо было измерять малые количества аргона, выделившегося из минерала, а не из атмосферы, в которой аргон содержится в больших количествах и может проникнуть в измерительные установки и "загрязнить" выделенный аргон. Поэтому в 50-х годах при определениях возраста аргоновым методом широко использовались масс-спектрометрические анализы и были введены методы контроля загрязнения проб аргоном воздуха.

Контрольные методы, по предложению Нира, должны основываться на оценке $^{36}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ либо $^{38}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ [Nier, 1950].

В 50-х годах были предложены разновидности аргонового метода определения возраста. Так, определение возраста по отношению $^{40}\text{Ar}/^{40}\text{K}$ почти одновременно предложили С. Смитс, В. Гентер в 1950 г. и Э.К. Герлинг и Т.Г. Павлова в 1951 г. [Smith, Genter, 1950; Герлинг, Павлова, 1951]. Этому методу посвящены работы Э.К. Герлинга с сотрудниками и в 1952 г.; В. Гентер с сотрудниками в 1953 и 1954 г. определили аргоновым методом возраст нижнеолигоценых отложений солей. Они установили, что содержание аргона в силвине является функцией размера зерна, и сделали вывод, что потеря аргона в образце связана с диффузией его из минерала [Genter et al., 1953; Genter et al., 1954]. Они использовали масс-спектрометр для определения загрязнения образца атмосферным воздухом.

В 50—60-х годах в геохимических лабораториях разрабатывался аргоновый метод определения возраста с использованием техники изотопного разбавления, позволяющей с большой точностью определять содержание аргона при стандартных температуре и давлении.

Большое преимущество аргонового метода определения абсолютного возраста геологических образований заключается в широкой распространенности калия, входящего в состав большинства горных пород. В связи с этим аргоновый метод применим для определения возраста всех основных групп горных пород: магматических, метаморфических и осадочных [Старик, 1961]. Аргоновый метод определения возраста по сравнению с другими прост и может быть ре-

комендован для использования на практике с соблюдением, конечно, требований, предъявляемых к исследуемому образцу.

Кальциевый метод определения возраста вначале был предложен исходя из ошибочного представления о распаде калия-40. Когда в начале 40-х годов интенсивно проводились исследования, связанные с распадом калия-40 и выделением аргона, были предприняты попытки определения количества кальция-40 (а не кальция-41, как вначале предлагал А. Холмс). Выделение и измерения ничтожно малых количеств кальция-40 оказалось чрезвычайно трудным, и поэтому работы по созданию кальциевого метода в то время несколько задержались. В 1950 г. американским ученым удалось установить нижний предел отношения бета-распада и K -захвата и определить соотношение между двумя конечными продуктами распада изотопами аргоном-40 и кальцием-40 [Inghram et al., 1950].

В СССР кальциевый метод был применен для определения возраста минералов в 1957 г. [Старик и др., 1957]. Возраст, вычисленный кальциевым методом для неперекристаллизованного образца сильвина, совпал с возрастом, определенным аргоновым методом. Данные аргонового метода, по мнению исследователей, снижают несколько возраст образца в связи с полной потерей ранее образованного радиогенного аргона в процессе перекристаллизации. Сопоставляя данные того и другого метода, значение возраста, полученное аргоновым методом, авторы связывают со временем последней перекристаллизации, а кальциевым — со временем образования сильвинов.

В 50-х годах закончилась разработка стронциевого метода определения возраста минералов. Радиоактивность рубидия, конечным продуктом распада которого является изотоп стронций-87, была обнаружена Дж.Дж. Томсоном в 1905 г. одновременно с радиоактивностью калия-40. Спустя почти 30 лет — в 1937—38 гг. было установлено, что излучателем рубидия является изотоп ^{87}Rb [Smithe, Hemmendinger, 1937; Hahn et al., 1937]. Тогда же В.М. Гольдшмидт и независимо О. Ган с Е. Валлингом предложили использовать распад этого изотопа рубидия и по конечному продукту его распада стронцию-87 определять возраст геологических образований [Goldschmidt, 1937; Hahn, Walling, 1938].

Период полураспада рубидия, как оказалось, превышал миллиард лет, его величина, определенная разными авторами в период с 1919 по 1958 г., колебалась от $7,5 \cdot 10^{10}$ в 1919 г. до $(5,0—4,85) \cdot 10^{10}$ лет в 1956—1958 гг. В конце 50-х годов было принято время полураспада рубидия, равное $5,0 \cdot 10^{10}$ лет, определенное американскими учеными Г. Везериллом и др. [Wetherill et al., 1956].

Стронциевый метод дает возможность определять возраст более древних пород благодаря большому периоду полураспада. Накопление радиогенного стронция в минералах пропорционально возрасту, и поэтому отношение стронция к рубидию тоже пропорционально возрасту. Стронций-87 принадлежит к нелетучим элементам и постепенно накапливается в земной коре независимо от времени образования минерала, и его количество определяется только величиной относительной его распространенности [Kulp, 1959].

В 1941 г. был предложен иониевый метод определения возраста морских осадков, разработанный К.С. Пигготом и В.Д. Урри [Piggot, Urry, 1941]. Метод основан на предположении Г. Петтерсона о различии в отношении тория к урану в континентальных образованиях и морской воде за счет соосаждения изотопов тория с гидроокисями железа и марганца, выпадающими в осадок [Pettersson, 1937]. Прямые определения тория в морской воде и осадках, проведенные в 40-х и 50-х годах, подтвердили гипотезу Г. Петтерсона. Выяснилось, что недостаток радия в морской воде и его избыток в морских осадках являются результатом осаждения на морское дно в неравновесных количествах материнского элемента радия — иония и урана [Holland, Kulp, 1954]. Причиной неравновесного соотношения в осадках и морской воде этих элементов могла быть, как предполагали авторы, неодинаковая способность к ионному обмену урана, иония и радия.

Содержание радия в кернах, по данным К.С. Пиггота и В.Д. Урри, по мере удаления осадка от поверхности сначала повышалось, достигало определенного максимума и затем снижалось до практически постоянной величины, соответствующей радиоактивному равновесию с содержащимся в осадке ураном. В дальнейшем количество иония и радия в глубоководных морских осадках определяется по содержанию в них урана. Таким образом, было установлено, что изменение содержания радия по длине керна глубоководного морского осадка является функцией времени и зависит от начального содержания урана, иония и радия в поверхностных частях керна.

Применение иониевого метода для определения возраста геологических образований возможно, как это выяснилось из работ многих исследователей, только при соблюдении следующих условий: содержание иония и урана в океане считается постоянным в течение времени, определяемого иониевым методом, т.е. $4 \cdot 10^5$ лет; в морских осадках отсутствует миграция иония, т.е. в одинаковой форме находятся изотопы тория и иония; соответствие размещения осадочного материала в корне ненарушенному процессу вертикальной седиментации; постоянство скорости осаждения иония на океаническое дно. В дальнейшем было выяснено также значение форм нахождения урана в осадках. Кроме того, большинство исследователей согласились с тем, что содержание урана в океанических водах есть функция солёности, относительные изменения в содержании урана в океане невелики и содержание урана мало изменяется с глубиной [Старик, 1961].

В дальнейшем, когда в 50-х годах начались в широком масштабе определения скорости седиментации морских осадков с помощью иониевого метода, для более уверенного установления момента радиоактивного равновесия между ионием, радием и ураном потребовались определения радия по ионию, урану и торию [Старик, 1961]. Эти исследования и изучение процесса выделения урана, тория и иония из морской воды на морское дно дали возможность выяснить особенности миграции радиоактивных элементов в морских осадках и более однозначно определять изменения содержания радия в толще осадков.

Практическое использование иониевого метода определения возраста морских осадков и определения средней скорости седиментации в различных частях Мирового океана дает основания для определения возраста морей и океанов, установления одновременности оледенения Северного и Южного полушарий и т.д.

В середине 50-х годов был предложен так называемый бериллиевый метод определения абсолютного возраста океанических осадков. Метод основан на определении долгоживущего изотопа бериллия ^{10}Be с периодом полураспада $T = 2,5 \cdot 10^6$ лет. Исследования показали, что изотоп бериллий-10 образуется в верхних слоях атмосферы при расщеплении ядер азота под воздействием космического излучения с образованием двух изотопов ^7Be и ^{10}Be . Атомы ^{10}Be , попадая в атмосферу, адсорбируются на частицах пыли и с дождевой водой выпадают на земную поверхность, часть из них попадает непосредственно в воды океанов и морей и осаждается, попадая в донные отложения [Старик, 1961].

По мере распада ^{10}Be его содержание в осадках уменьшается, и, следовательно, при определенных допущениях постоянства скорости осадконакопления и поступления ^{10}Be на дно океана можно рассчитать уменьшение количества ^{10}Be за счет распада и определить скорость образования осадка и его возраст. Бериллиевый метод определения возраста океанических осадков еще в конце 50-х—начале 60-х годов не был окончательно разработан и поэтому в те годы применялся в весьма ограниченных случаях, например для датировки осадков, скорость образования которых наименьшая, а концентрация ^{10}Be — наивысшая [Arnold, 1954].

Сравнивая иониевый и бериллиевый методы определения возраста океанических осадков, следует сказать, что иониевый метод позволял определять осадки, возраст которых исчисляется несколькими сотнями тысяч лет, а бериллиевый — лучше пригоден для определения возраста осадков в несколько миллионов лет. Это связано с тем, что, по данным Дж. Арнольда, при допущении постоянства интенсивности космического излучения в течение последних миллионов лет должно установиться равновесие между скоростью образования и скоростью распада атомов ^{10}Be .

В конце 40-х годов советскими исследователями был предложен ксеноновый метод, один из интереснейших и перспективных радиоактивных методов определения возраста геологических образований. Создание метода связано с исследованиями К.А. Петржака и Г.Н. Флерова в Радиовом институте, открывшими новый природный процесс — самопроизвольное деление атомов урана с образованием химических элементов, располагавшихся в середине таблицы периодической системы элементов [Флеров, Петржак, 1940]. Этот процесс, являющийся своего рода новым типом радиоактивного распада, протекает значительно медленнее, чем обычный распад урана. Период полураспада, по оценке авторов, равнялся $4 \cdot 10^{16}$ лет, а по более поздней оценке Н.А. Перфильева (1947 г.) — $1,3 \cdot 10^{16}$ лет [Хлопин и др., 1947].

В 1947 г. В.Г. Хлопин высказал предложение о возможной идентичности химической природы продуктов деления урана под действием

тепловых нейтронов и процесса самопроизвольного деления урана и образования устойчивых продуктов деления, а именно тяжелых изотопов ксенона [Там же]. Измеряя выделенный из минерала ксенон и считая, что он возник в результате спонтанного деления урана и что больших потерь ксенона не произошло, авторы предложили вычислять абсолютный возраст минерала по ксеноновому методу по следующей приближенной формуле:

$$T = (2,3/\lambda_a) \lg(Xe/U^{238}\lambda_3 Y) + 1,$$

где T — возраст минерала; λ_a — константа скорости α -распада; λ_3 — константа скорости спонтанного деления; Xe — содержание ксенона (в атомах на 1 г минерала); U — содержание урана (в атомах на 1 г минерала); Y — выход ксенона при спонтанном делении урана (т.е. доля распадов урана, образующих ксенон).

Возраст уранинита из пегматитовых жил Черной Салмы Северной Карелии, определенный ксеноновым методом, равнялся $1,68 \cdot 10^9$ лет, а по данным свинцового и кислородного методов — $1,86 \cdot 10^9$ лет [Хлопин, Герлинг, Барановская, 1947]. Несколько позднее с учетом данных В.Е. Гриммита и Г. Вилкинсона о выходе стабильного ксенона при делении урана под действием медленных нейтронов возраст уранинита из Черной Салмы был определен в $1,26 \cdot 10^9$ лет. Эти вычисления и достаточно хорошая согласованность ксенонового метода с данными других методов показали пригодность ксенонового метода для определения возраста геологических образований. Исследования ксенона показали также, что потери ксенона минералом за геологическое время значительно меньше потерь гелия. Произведенные измерения ксенона и аргона на специальных установках, проведенные В.Г. Хлопиным и Э.К. Герлингом, показали некоторую потерю ксенона по сравнению с теоретически предсказанным. Выявилась при этом связь между потерями ксенона и гелия, некоторые образцы урановых смолков, потерявшие весь гелий, еще полностью сохраняли радиогенный ксенон.

В дальнейших исследованиях было выяснено, что ксенон в минералах мог образовываться не только в результате спонтанного деления урана-238, но и под действием вторичных нейтронов на уран-235 и уран-238 [Старик, 1961].

Э.К. Герлинг, Ю.А. Шуклюков и др. провели определения возраста ксеноновым методом образцов уранинита, менделеевита, смолков и других урановых минералов [Герлинг, Шуклюков, 1957]. По их данным, потеря ксенона в древних минералах оказалась больше, чем в молодых. Применение ксенонового метода для определения возраста образцов, потерявших ксенон, не рекомендовалось. Ограничения, предъявляемые к качеству образцов минералов, пригодных для определения возраста ксеноновым методом, и сложности выделения и определения ксенона резко уменьшили практическую ценность метода.

Следует напомнить и об осмиевом методе определения возраста геологических образований. В основу метода положены исследования радиоактивного распада изотопа рения-187 с выделением ^{187}Re .

Этот метод стал разрабатываться в конце 40-х годов, когда была

доказана радиоактивность рения и выделение из него радиогенного осмия, стабильного в отношении K -захвата. Рений, как и некоторые другие радиоактивные элементы, находится в земной коре в чрезвычайно рассеянном состоянии и не образует самостоятельных минералов, а входит в качестве изоморфных примесей в кристаллическую решетку других минералов. Его период полураспада равен $6,2 \cdot 10^{10}$ лет [Старик, 1961].

Наиболее богаты рением молибдениты, образцы которых и применяются для определения абсолютного возраста. При определении возраста этим методом необходимо преодолеть большие трудности отделения радиогенного осмия от нерадиогенного, присутствующего в минералах, а также определения его количества и изотопного состава. Чувствительность осмиевого метода определения возраста определяется чувствительностью определения осмия в минерале.

К концу 50-х годов было проведено лишь небольшое число определений абсолютного возраста геологических образований осмиевым методом. Был определен возраст молибденитов из месторождений Норвегии, Чили, Канады, Африки и гадолинита из Норвегии [Негг, Mezg, 1958]. Возраст образцов оказался в пределах в среднем от $2,35 \cdot 10^8$ до $2,29 \cdot 10^9$ лет.

В 40—50-х годах продолжалось совершенствование метода определения возраста по плеохроическим ореолам. Для более четкого выявления ореолов стали широко применять микрорадиографирование, позволившее по-новому подойти к применению этого метода и подбору пригодных минералов [Нее, 1948]. Использование толстослойных эмульсий позволило определять возраст образцов по ореолам неправильной формы с точечным ядром и с большой длиной пробега альфа-частиц. Были изучены японские граниты, определена величина активности ядер, проведено сравнение окраски ореолов с интенсивностью стандартных образцов и определен возраст гранитов [Найаса, 1954].

Ввиду несоответствия интенсивности окраски и числа альфа-частиц правомерность использования эталонов была опровергнута работами С. Дейча, П. Киппера и др. [Deutsch et al., 1957]. Тогда же С. Дейч и др. предложили новый метод определения возраста по плеохроическим ореолам по сравнению интенсивности окраски двух ореолов различных биотитов, когда возраст одного из них был определен другими методами. Авторы нового метода предлагали вводить поправки, учитывающие неодинаковую оптическую плотность, разную чувствительность и т. д. [Там же].

Внесение предложенных поправок и устранение некоторых затруднений при определении возраста геологических образований методом плеохроических ореолов не обеспечивали, однако, надежных результатов. Искажения в определение возраста могли быть внесены за счет искажений ореолов из-за неоднородности исследуемых минералов, влияния процессов эманирования, выщелачиваемости и других нарушений структуры минерала.

Наиболее широкое применение метода плеохроических ореолов относится к 30—40-м годам. В дальнейшем он не нашел применения, несмотря на отдельные попытки его усовершенствовать.

К началу 50-х годов были разработаны и практически испытаны многие радиоактивные методы определения возраста геологических образований. При соблюдении некоторых условий отбора образцов и их сохранности хорошие результаты были получены при определении возраста по свинцовому и гелиевому методам.

На первой сессии Комиссии по определению абсолютного возраста геологических формаций АН СССР в 1952 г. была дана оценка известным в то время методам [Решение первой сессии Комиссии..., 1954]. Считалось, что помимо свинцового и гелиевого методов, после доработки придет широкое применение аргоновый метод. Менее точными, но пригодными в ряде случаев могут оказаться стронциевый, кислородный и ксеноновый методы определения возраста минералов и пород.

К тому времени был накоплен экспериментальный материал по проверке методов и условий их применения, а также по определениям возраста отдельных геологических образований [Там же. С. 227]. Комиссия по определению абсолютного возраста геологических образований считала, что практическая применимость радиоактивных методов определения возраста на том уровне развития не вызывала сомнений.

Что касается возраста земной коры, то анализ, проведенный А.П. Виноградовым, показал, что кора образовалась не ранее $2 \cdot 10^9$ лет и не более чем $5 \cdot 10^9$ лет [Виноградов и др., 1954]. Такой широкий диапазон в определении возраста земной коры объясняется тем, что определения возраста проходили на основании соотношения радиоактивных элементов и продуктов их распада при предложении о практически полном отсутствии в "начальный" момент элементов, возникающих в процессе распада. Подтверждение правомерности этого предположения требует дальнейшего изучения развития земного вещества и всех сложных процессов физико-химической и механической дифференциации, которые в нем происходили и, возможно, происходят.

В те годы определение возраста элементов было возможно лишь путем сопоставления современного изотопного состава радиоактивных элементов с их начальным изотопным составом, который нужно было выяснить на основе теории их образования. Предварительная оценка возраста земной коры по урану дала цифру в 5—7 млрд лет и несколько более высокие значения по другим элементам. Эти оценки в дальнейшем уточнялись.

2.7. ФОРМИРОВАНИЕ МЕЖДУНАРОДНОЙ ШКАЛЫ АБСОЛЮТНОГО ВОЗРАСТА ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ФОРМАЦИЙ

Попытка создать геохронологическую шкалу абсолютного возраста основных геологических формаций была предпринята еще в 1911 г. американским ученым А. Холмсом. Создание шкалы оказалось чрезвычайно трудным делом, поскольку в то время еще не было достаточного числа опорных точек и их стратиграфическое положение не могло быть однозначно истолковано. В то время, как указывалось выше, исследователи располагали только первыми мо-

дификациями гелиевого и свинцового методов, дававших сильно различающиеся значения.

В 1931 г. Американский комитет по измерению геологического времени принял шкалу абсолютного возраста геологических периодов, вычисленного свинцовым методом для 64 образцов минералов, относящихся к разным геологическим периодам. Эта шкала была опубликована в известном, упоминавшемся ранее, докладе — отчете профессора А. Нопфа (А. Кнопфа) в специальном выпуске бюллетеня Национального исследовательского комитета (N 80. 1931).

При вычислении возраста были приняты следующие постоянные полураспада для урана — $4,56 \cdot 10^9$ лет, для тория — $1,28 \cdot 10^{10}$ (вариант А) и $1,65 \cdot 10^{10}$ лет (вариант Б). Приведена таблица шкалы, принятая американским комитетом (табл. 9). Была опубликована также шкала геологического времени, составленная В. Урри по данным других исследователей абсолютного возраста с помощью гелиевого метода.

Эти данные были включены Американским комитетом по определению абсолютного возраста в общую шкалу. На очередном заседании комитета 28 апреля 1935 г. президент комитета профессор А.С. Лэйн отметил значительные успехи в области определения абсолютного возраста минералов и постепенного формирования подробной геохронологической шкалы. При обсуждении тех или иных значений возраста, полученных разными радиологическими методами, по словам А.С. Лэйна, необходимо было также различать происхождение радиоактивных элементов. Тем самым А.С. Лэйн признал правильность основной линии советской школы ученых, возглавляемой В.И. Вернадским и В.Г. Хлопиным. Советские ученые при определении возраста изучали минералы во взаимодействии с окружающей их средой, влияющей на развитие этого минерала и формирование его изотопного состава [Старик, 1954]. Именно такой комплексный подход позволил правильно оценить преимущества и недостатки радиоактивных методов определения абсолютного возраста геологических образований, выявить возможные ошибки того или иного метода и найти пути их устранения.

В шкале, принятой комитетом в 1935 г. по предложению А.С. Лэйна, возраст триасовых и кьюниуэских пород, например, определенный гелиевым методом, оказался достаточно высоким и может считаться правильным. Комитет обсудил также новые методы определения возраста пород, предложенные Р.Д. Ивансом для радиевых минералов и В.Д. Урри для ториевых.

В 1935 г. предложил свой вариант геохронологической шкалы А. Холмс, а в 1947 г. он представил свой основной вариант (табл. 10).

Затем геохронологическая шкала А. Холмса дополнялась новыми данными, полученными разными авторами, но эти дополнения и некоторые изменения не затрагивали ее основы, а касались сравнительно небольших изменений.

Данные абсолютного возраста не являлись окончательными, и по мере совершенствования самих методов определения возраста мине-

Таблица 9

Шкала абсолютного возраста геологических формаций, вычисленного свинцовым методом [Knopf et al., 1931]

Период	Минерал	Месторождение	Возраст, млн лет	
			А	Б
Девон или каменноугольный	Торит	Норвегия	224	310
Поздний кембрий	Кольм	Швеция	450	—
Докембрий	Брёггерит	Норвегия	915	910
"	Клевеит	"	967	964
"	"	"	986	965
"	Уранинит	Южная Дакота	1465	1462
"	"	Карелия	1852	1852

Таблица 10

Геохронологическая шкала А. Холмса [Holmes, 1947]

Период	Абсолютный возраст, млн лет			
	Вариант А		Вариант Б	
	Длительность периода	Время с начала периода	Длительность периода	Время с начала периода
Плейстоцен	1	1	1	1
Плиоцен	14	15	11	12
Миоцен	17	32	14	26
Олигоцен	15	47	12	38
Эоцен	21	68	20	58
Мел	72	140	69	127
Юра	27	167	25	152
Триас	29	196	30	182
Пермь	24	220	21	203
Карбон	55	275	52	255
Девон	43	318	58	313
Силур	32	350	37	350
Ордовик	80	430	80	430
Кембрий	80	510	80	510

ралов и установления их принадлежности к тому или иному геологическому периоду менялось значение его абсолютного возраста. В связи с неоднозначностью определения возраста радиоактивными методами Международная комиссия, созданная в 1937 г. при Международном геологическом конгрессе, требовала достаточно обоснованных подтверждений возраста того или иного минерала, прежде чем включить его значение в международную шкалу.

А. Холмс в 1957 г. представил новый уточненный вариант геохронологической шкалы, основанный на определении возраста пяти опорных точек свинцовым методом. Но и среди них стратиграфическое положение трех точек могло быть истолковано по-раз-

ному. Предложенные А. Холмсом опорные точки как достоверные границы некоторых геологических периодов являлись основой для интерполяции возраста для других геологических периодов. При этом А. Холмс пользовался не только радиологическими методами определения возраста, но использовал и геологические данные, в том числе усреднение мощности осадков, что дало некоторые расхождения в окончательных значениях возраста.

В результате определения возраста урановой смолки, например, получены значения 58 и 214 млн лет, что свидетельствовало о принадлежности данных образцов в одном варианте к концу палеогена и ранней перми, а в другом — к концу мела и позднему карбону соответственно. Образец самарскита, возраст которого определен в 255 млн лет, мог после окончательных вычислений принадлежать или к концу нижнего карбона или к позднему карбону. Только циртолит (350 млн лет) и кольм (440 млн лет) датировались концом ордовика и верхним кембрием.

В конце 50-х годов появилось в печати много работ, в которых доказывалась необходимость пересмотра основных положений шкалы А. Холмса. Эти требования базировались на материалах определения возраста с использованием новых методов, в частности аргонового, давших возможность по-иному подобрать опорные точки и их надежное датирование.

Так, по данным американских исследователей К.И. Мэйна, Р.С. Ламберта и Д. Йорка, начало девона, например, должно оцениваться в 520—530 млн лет (а не 430 млн лет, как у А. Холмса), конец девона — около 400 млн лет (а не 313 млн лет), конец карбона — около 300 млн лет (а не 255 млн лет, как у А. Холмса) [Mayne, Lambert, York, 1959]. Однако цифры, приведенные в статье Мэйна и др. оказались неточными из-за неправильной интерпретации данных других исследователей, на которые они опирались, например Д.Л. Калпа, а также из-за ошибок в определении возраста некоторых каледонских и герцинских гранитов Британии и Ирландии.

Почти одновременно Дж.Л. Калп предложил свой вариант геохронологической шкалы [Kulp, 1959]. Основные положения своего варианта геохронологической шкалы Дж.Л. Калп представил на обсуждение XIII сессии Комиссии по определению абсолютного возраста геологических формаций при Отделении геофизики и геологии АН СССР.

Одновременно с Дж. Л. Калпом новый уточненный вариант представил на обсуждение и А. Холмс. Шкала А. Холмса мало отличалась от шкалы Дж.П. Калпа, поскольку и тот и другой использовали примерно одни и те же данные определения абсолютного возраста, но главное, что они пользовались одними и теми же опорными точками. А. Холмс в новом варианте 1959 г. по сравнению с вариантом 1947 г. принял в качестве опорной точки плиоцена возраст урановой смолки, что согласовывалось с выводами комиссии Нопфа. В соответствии с новой опорной точкой А. Холмс соответственно увеличил данные других геологических периодов.

К началу 60-х годов благодаря интенсивной работе многих научно-исследовательских и геологических организаций в СССР накопилось множество данных об абсолютном возрасте пород. Помимо институтов Академии наук СССР и академий наук союзных республик, в работе по радиогеохронологии приняли участие и организации Министерства геологии СССР и других ведомств. Полученные советскими учеными данные оказались надежными и могли быть приняты за опорные точки.

Следует отметить вклад советских ученых в исследования геохронологии докембрия. При определении границ докембрия большое значение имели работы сотрудников института ГЕОХИ АН СССР, проведенные под руководством А.П. Виноградова и А.И. Тугаринова [Виноградов, Тугаринов, 1961]. Большой вклад в становление и дальнейшее развитие радиогеохронологии внесли сотрудники Радиового института под руководством А.А. Полканова и Э.К. Герлинга [Полканов, Герлинг, 1960].

Советскими учеными были проведены определения возраста геологических образований докембрийских пород Балтийского Щита, Кольского полуострова, Украинского щита, Алданского щита, Енисейского кряжа и других регионов. Оказалось, что в наиболее древних породах Украинского щита, возраст которых определялся в 2 млрд 200 млн лет, развиты органические осадки и известно, что "архей" одной из областей докембрия был одновозрастным и даже более молодым, чем "протерозой" [Старик, 1961]. Анализ многочисленных определений возраста докембрийских образований, по данным И.Е. Старика, показал, что необходимо было пересмотреть установившиеся к тому времени возрастные взаимоотношения протерозойских и архейских пород [Там же. С. 563].

В докембрии Балтийского щита по советским данным можно выделить по крайней мере четыре больших цикла седиментации—метаморфизма в период от 3480 до 1500 млн лет. В пределах Русской платформы были обнаружены осадочные образования, возраст которых исчисляется в 1300 млн лет [Там же]. По данным А.А. Полканова и Э.К. Герлинга, в Швеции и Норвегии отмечены молодые магматические образования с возрастом порядка 865—1090 млн лет [Полканов, Герлинг, 1960].

К началу 60-х годов были подведены итоги расчленения докембрия Украинского и Алданского щитов, а также Канадского и Африканского щитов. А.П. Виноградов и А.И. Тугаринов обоснованно показали новые верхнюю и нижнюю границы докембрия, которые исчислялись ими в 570 и 3500 млн лет соответственно. Эти уточнения увеличили интервал изученного докембрия почти до 3000 млн лет [Виноградов, Тугаринов, 1961].

Комиссия по определению абсолютного возраста геологических формаций на XI сессии в 1960 г. обсудила новые данные для включения их в геохронологическую шкалу. После широкого обсуждения обоснованности определений того или иного возраста комиссия приняла новый вариант геохронологической шкалы, приняты затем и на XXI сессии Международного геологического конгресса (табл. 11).

Таблица 11

Геохронологическая шкала Комиссии по определению абсолютного возраста геологических формаций АН СССР, принятая на XXI сессии Международного геологического конгресса в 1960 г.

Эра	Период, эпоха		Время границ периодов, эпох, млн лет	
Кайнозой	Третичный	Неоген		
		Плиоцен	10	
		Миоцен	25	
		Палеоген		
		Олигоцен	40	
		Эоцен		
Мезозой	Мел	Палеоцен	70	
		Верхний	100	
		Нижний	140	
		Юра	185	
Палеозой	Юра	Триас	225	
		Пермь	270	
		Карбон	320	
		Девон	400	
		Силур	420	
		Ордовик	480	
		Кембрий	570	
		Венд	650	
		Докембрий IV	Рифей, поздний докембрий, протерозой II	1100—1200
		Докембрий III	Протерозой, протерозой I	1800—1900
Докембрий II	Архей	2600—2700		
Докембрий I	Катархей	3400—3500		

Расхождения между советской шкалой и принятой ранее американской касались в основном границ между пермью и карбоном: по советским данным — 300 млн лет, по принятой ранее шкале — 270 млн лет; различие между карбоном и девоном — 380 (советские данные) и 320 (американские), между девоном и силуром — 430 и 400 млн лет. При этом возраст пород по советским данным оказался несколько больше, чем это считалось ранее.

Большое количество опорных точек, принятых советскими исследователями, дало возможность сопоставить считавшиеся ранее разновозрастными породы различных регионов. При сопоставлении палеозойские интрузивные образования Казахстана оказались значительно старше, чем это было указано в принятой шкале.

Было обращено внимание на частую повторяемость пород возраста 2700—2800 млн лет на всех континентах [Виноградов и др., 1960, а, б].

Сопоставляя геохронологические шкалы Дж.П. Калпа и А. Холмса с принятой в СССР шкалой, можно сказать, что значительных расхождений между ними нет. Это обстоятельство тем более важно, что при составлении советской геохронологической шкалы были использованы совершенно другие опорные точки, чем при составлении шкал Дж.П. Калпом и А. Холмсом. Факт получения близких данных при использовании разных опорных точек свидетельствует,

по мнению И.Е. Старика, об уже сложившейся к тому времени научной и практической основе геохронологических определений [Старик, 1961. С. 561].

К концу 50-х годов удалось выявить некоторые закономерности в распределении изотопного состава свинца в породах различного возраста. В результате проведенных под руководством А.П. Виноградова исследований оказалось, что с уменьшением возраста относительное количество свинца-204, свинца-207 и свинца-208 уменьшается, а свинца-206 возрастает. Этот факт И.Е. Старик считал подтверждением происхождения свинца из урана-235, урана-238 и тория-232, у которых разные скорости распада [Старик, 1961]. Поскольку период полураспада урана-235 меньше, чем урана-238, значительная часть первоначального изотопа урана-235 уже исчезла, и урановый свинец, образующийся в настоящее время, состоит почти исключительно из свинца-206.

На этом основании И.Е. Старик делает важный вывод, что, видимо, 2—3 млрд лет назад свинца-207 образовывалось больше, чем свинца-206. Аналогичный процесс, видимо, происходил и в случае распада тория-232 и урана-238: поскольку период полураспада тория больше, чем урана, относительное содержание свинца-208 будет также снижаться со временем, но в будущем, когда уран-238 исчезнет, относительное содержание свинца-208 снова увеличится.

Изучение изотопного состава свинца имело важное значение не только при определении абсолютного возраста образцов пород, но и для практических разведочных целей. Знание изотопного состава свинца и его распределения во внешней оболочке Земли должны помочь в выяснении происхождения свинцовых и полиметаллических месторождений, выделении этапов магматической деятельности, к которым приурочены те или иные рудопроявления, а также в установлении факта и времени переотложения и в других вопросах рудной геологии [Старик, 1961. С. 219]. В связи с практической значимостью исследований по определению возраста возросло значение изучения каждого свинцового месторождения, а также древних минералов и определения их возраста.

Широкое обсуждение геохронологии малоизученных докембрийских провинций было проведено на XXI сессии Международного геологического конгресса в августе 1960 г. в Копенгагене. На сессии конгресса были обсуждены новые данные об абсолютном возрасте дочетвертичных отложений, стратиграфии и корелляции докембрия, ордовика, силура, позднего докембрия, кембрия и т.д. Большой интерес был проявлен к новым данным советских исследователей.

Подводя итоги изучению абсолютного возраста, А.П. Виноградов и А.И. Тугаринов показали, что новые данные позволили сделать вывод о направлении геологической истории земной коры в сторону проявления и разрастания платформ и заметного угасания магматизма, возобновляющегося через определенные интервалы времени [Виноградов, Тугаринов, 1961]. Последняя, наиболее выдающаяся эпоха магматизма, датируемая 2000—1700 млн лет, по мнению

А.П. Виноградова и А.И. Тугаринова, сопровождалась всеобщим метаморфизмом и явилась наиболее важным рубежом в геологической истории планеты, ознаменовав начало интенсивного развития биосферы [Там же.С. 731].

О значении радиогеохронологии при решении важнейших теоретических и практических задач наук о Земле и ее признании свидетельствуют широкие обсуждения радиогеохронологических данных совместно с результатами других геологических наук на Международных геологических конгрессах.

Однако в развитии радиогеохронологии до последнего времени встречаются значительные трудности, связанные, например, с моментом определения начального периода "возраста" минерала или с неизбежностью основных принципов. Так, методы радиогеохронологии, как известно, базировались на постоянстве радиоактивного распада. Начиная с первых работ физиков и химиков, в первую очередь Марии Кюри с сотрудниками, определивших очень точно скорости распада многих радиоактивных элементов, считалось, что в земных условиях скорость распада постоянна. Все попытки найти возможные условия изменения скорости распада потерпели крах.

В конце 40-х — начале 50-х годов, однако, стали известны работы о возможном изменении скорости распада в связи с влиянием химического окружения, изменения внешних условий электронной оболочки атома, особенно сильной его ионизации [Макарюнас, 1981]. Исследования в этом направлении продолжаются и, возможно, дадут количественные данные для введения соответствующих поправок.

Со стороны геологов в середине нашего века также продолжались поиски путей определения абсолютного возраста чисто геологическими методами. Было предложено много разных вариантов геохронологической шкалы. Интерес, на мой взгляд, может представить разработанный П.П. Зотовым новый седиментационный метод исчисления времени и создание им Седиментационной шкалы абсолютного времени с охватом геологических веков [Зотов, 1972]. Не настаивая на принятии его шкалы, П.П. Зотов считает, что какую бы шкалу не использовал геолог—радиогеохронологическую или седиментационную, важно, чтобы и та и другая были представлены "до детализации века". И если детальная надежная шкала абсолютной радиогеохронологии, как говорил А. Холмс, является "ключом к дальнейшим успехам геологии", то в настоящее время такой ключ есть, и он открывает перед геологами большие возможности [Зотов, 1972. С. 208]. Современная геология находится, по мнению П.П. Зотова, на грани большого перелома, когда число и мера властно требуют вторжения в ее пределы, и можно ожидать, что будущие достижения в той или иной мере будут связаны с проблемой времени.

РАЗРАБОТКА ПЕРВЫХ ЯДЕРНО-ФИЗИЧЕСКИХ МЕТОДОВ РАЗВЕДКИ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

3.1. ЗАРОЖДЕНИЕ РАДИОМЕТРИЧЕСКОЙ СЪЕМКИ

В первые десятилетия XX в., как указывалось выше, во многих странах весьма интенсивно проводились исследования радиоактивности природных объектов. При этом преследовались как практические, так и чисто научные цели: поиск радиоактивных минералов и руд, целебных радиоактивных источников, а также установление общей картины радиоактивности земной коры. Обычно определение радиоактивности производилось выборочно для данного пункта и только позднее, в 20-х годах, был найден путь общей радиометрической съемки и составления радиоактивных карт.

Впервые радиометрическая съемка у нас в стране была проведена в начале 1920 г. известным в то время химиком-радиологом Л.Н. Богоявленским (1881—1943). Съемка была проведена с целью поисков радиоактивных вод на курорте Белокуриха на Алтае для лечения раненых. Остановимся несколько подробнее на том, как это было сделано. Л.Н. Богоявленский в Сибири оказался в то время случайно. Он окончил Тулузский университет, работал на предприятиях по производству радия в Париже. В 1917 г. возвратился на родину и работал в Комитете военно-технической помощи по производству светящихся составов. Он был одним из инициаторов и организаторов в СССР производства радия из остатков ферганской руды и начал работу по извлечению радия на Березниковском заводе [Казаков, Ильина, 1981]. Там он оказался во власти колчаковцев, был ими мобилизован в армию, но заболел тифом и был оставлен для лечения в Томске, где вскоре после ухода колчаковцев Геологический комитет привлек его к обследованию на радиоактивность озер Западного Алтая и Кулундинской степи.

Л.Н. Богоявленский, согласившись помочь курорту, изготовил простейший электоскоп и измерил радиоактивность воздуха непосредственно у выходов лечебной воды и в нескольких местах на территории курорта. Повышенные значения активности он нанес на план местности, имевшийся в его распоряжении (карта этого района в то время еще не была составлена). Затем соединил точки с оди-



Л.Н. Богоявленский (1881—1943)

наковыми значениями и провел изорады, по их конфигурациям он попытался представить строение района и определить "систему сбросов и трещин", из которых могла бы вытекать радиоактивная вода. Эта карта, составленная Л.Н. Богоявленским, была, видимо, первой картой радиоактивности, или первой радиоактивной картой.

По карте он наметил места для бурения скважин на воду, из которых были получены притоки новой радиоактивной воды. Отчет о проведенных работах он направил в Геологический комитет. Исследования радиоактивности на Алтае, по мнению геолога А.П. Герасимова, представляли интерес для широкого круга геологов, и поэтому Геологический комитет решил опубликовать отчет

в трудах комитета [Журнал присутствия Геолкома, 1924]. В отчете Л.Н. Богоявленский назвал свои исследования на Алтае "радиометрической съемкой", этот термин сразу же был принят геологами. Радиометрическая съемка была признана новым и совершенно оригинальным методом в геологии.

В отчете Геологического комитета за 1921 г., в новом специальном разделе "Радиометрические исследования", Л.Н. Богоявленский подробно описал проведенные им измерения и на их основе сделал выводы о пульсирующем изменении как радиоактивности, так и температуры воды в одном из колодцев. Он объяснял это явление тем, что колодец находился непосредственно над "трещиной, образовавшейся в сбросе". Вода из трещины, по его мнению, вытекала неравномерно, подчиняясь глубинному режиму давления радиоактивного газа: если давление повышалось — в воде растворялось большее количество эманации радия и вода вытекала более радиоактивной; если же давление уменьшалось, вода вытекала медленнее, эманации радия поступало меньше и вода успевала охладиться, т.е. вытекала менее радиоактивной и более холодной [Там же. С. 288]. Возможность практического использования радиоактивных измерений припочвенного воздуха с разведочными целями увлекла Л.Н. Богоявленского.

В следующем 1921 г. он там же провел более детальные измерения с целью найти новые притоки воды и попытаться отработать принципы радиометрической съемки для разведочных целей. Как и раньше, он нанес на план значения радиоактивности, измеренные у выходов воды и в других местах, затем путем интерполяции

получил дополнительные точки и соединил их изорадами. На этот раз оказалось возможным определить линии повышенной активности в местах, закрытых наносами. По повышенным изорадам ему удалось определить недоступные прямому наблюдению трещины и наметить выходы теплой радиоактивной воды и газа [Отчет Геологического комитета, 1926].

На заседании Геологического комитета 22 марта 1922 г. Л.Н. Богоявленский сделал доклад "О принципах радиометрической съемки" и продемонстрировал свой прибор (сделанный им простейший электроскоп). И доклад и прибор произвели на присутствующих сильное впечатление, поскольку в геологической съемке того времени приборы почти не применялись. Присутствовавшие на заседании В.И. Вернадский, В.И. Бауман, В.В. Никитин, В.Н. Вебер, Д.И. Мушкетов, А.В. Фаас, А.Н. Чураков, В.Н. Лодочников высказали свое положительное мнение о новом способе геологической съемки — радиометрической съемке [Журнал присутствия Геолкома, 1926].

Появление метода "радиометрической съемки" и приборов Л.Н. Богоявленского, как казалось членам Геологического комитета и присутствовавшим на заседании ученым, должно было обеспечить возможность систематических исследований радиоактивности на территории страны. После заключительной речи вице-директора Геолкома В.К. Катульского по предложению В.И. Вернадского Геологический комитет постановил: "...предложить хозяйственному комитету изыскать средства для изготовления трех приборов" радиометрической съемки [Там же. С. 65].

На том же заседании Геологического комитета В.И. Вернадский предложил начать радиометрическую съемку известного в то время Тюямуюнского месторождения ванадиево-радиевых руд в Ферганской области. Осенью 1922 г. при Академии наук была создана Комиссия по организации геофизических работ метеослужбы РСФСР. Предполагалось, что комиссия в числе других геофизических работ проведет и радиометрическую съемку и полевые радиометрические исследования по определению радиоактивного поля в районах месторождений полезных ископаемых.

В 1923 г. Л.Н. Богоявленский провел радиометрическую съемку в Пятигорске с целью поисков лечебной радиоактивной воды. С помощью усовершенствованного им электроскопа с тончайшими металлическими лепестками, установленного на треножнике, он определил радиоактивность в 150 пунктах. В результатах съемки большую заинтересованность проявило Кавказское отделение Геологического комитета, выделившее в распоряжение Л.Н. Богоявленского специальную буровую бригаду. Работы закончились успешно: пробуренные по указанию Л.Н. Богоявленского скважины дали мощные притоки радиоактивной воды из неизвестного ранее водоносного пласта.

В процессе бурения скважин Л.Н. Богоявленский отбирал образцы пород и тщательно определял их радиоактивность, с тем чтобы выяснить закономерности распределения радиоактивности на земной поверхности и ее связь с глубинным строением пластов. Если в



Поиски радиоактивной воды в Пятигорске, 1922 г.

начале бурения верхних слоев казалось, что повышенная радиоактивность на поверхности соответствует расположению найденного пласта с радиоактивной водой, то по мере углубления и получения новых данных эта связь терялась, и никакой закономерности нельзя было установить, поскольку исследованные образцы, взятые с больших глубин, не были радиоактивными. Если их радиоактивность не соответствует повышенной активности, зафиксированной на поверхности, то с чем же она могла быть связана, чем она могла быть вызвана? Л.Н. Богоявленский решил, что повышенная активность отмеченная прибором на поверхности Земли, видимо, отражает влияние какого-то мощного источника гамма-излучения планетарного порядка [Богоявленский, 1925]. Идею существования мощного источника планетарного порядка поддерживали и другие ученые.

Оценивая первые работы по исследованию радиоактивности на земной поверхности и ее связи с глубинным строением, проведенные Б.Н. Богоявленским на Алтае и в Пятигорске, можно сказать, что в то время он смог решить практические задачи разведки новых притоков радиоактивной воды. Таким образом, он одним из первых наглядно показал возможность регистрации радиоактивных излучений при разведке радиоактивных минеральных источников.

Радиометрическая съемка почти в те же годы начала применяться для поисков радиоактивных руд. В районе Туюмуна в 1923—1927 гг. радиометрическую съемку провел профессор Г.О. Ерчиковский. Он много времени потратил на разработку и изготовление своего варианта электроскопа по последнему слову техники того времени. Прибор Ерчиковского принципиально мало отличался от прибора Богоявленского и мог давать такого же рода результаты. В Туюмуне Г.О. Ерчиковский тщательно промерил актив-

ность воздуха над отвалами радиоактивной руды, а затем провел радиометрическую съемку коренного залегания руд сначала на территории рудника, а затем во всем районе Тюямуяна [Ерчиковский, 1928].

Г.О. Ерчиковский попытался определить степень точности и стабильность своих измерений. Он заметил, что на время разрядки электроскопа, по которому он вычислял радиоактивность в каждой точке, оказывают влияние самые различные причины, в частности метеорологические условия. Влажность воздуха, дождь, солнце, ветер или отсутствие ветра могли существенно изменить время разрядки, и поэтому он предлагал обязательно их учитывать при измерениях. По результатам проведенной им в Тюямуяне радиометрической съемки он не торопился с выводами до полного выяснения физической сущности замеченных им явлений. Научные интересы Г.О. Ерчиковского были связаны с несколько иными, чем у Л.Н. Богоявленского, областями исследований радиоактивности, и поэтому он не мог уделять много времени отработке и внедрению методов радиометрической съемки. Его исследования проводились гораздо медленнее и рекомендации о возможности применения радиометрической съемки были весьма осторожными. Они сводились к тому, что полевые измерения радиоактивности гамма-электроскопом можно успешно проводить только для обнаружения радиоактивных руд, да и то "при условии содержания в них достаточного количества радиоэлементов" [Там же. С. 159].

За радиометрической съемкой Л.Н. Богоявленского и Г.О. Ерчиковского внимательно следили специалисты. Результаты съемок неоднократно обсуждались на заседаниях Геологического комитета и публиковались в Известиях комитета. Большинство ученых положительно оценивало возможности съемки. Радиометрическая разведка оказывается весьма полезной при поисках радиоактивных руд, писал геолог Д.И. Щербаков (академик с 1953 г.), приборы же как Л.Н. Богоявленского, так и Г.О. Ерчиковского, основанные на одном принципе, мало отличаются друг от друга и способны улавливать гамма-излучение горных пород [Щербаков, 1926].

В 1923—1924 гг. Л.Н. Богоявленский попытался применить радиометрическую съемку к поискам нефтяных месторождений. После предварительных исследований радиоактивности разных сортов нефти, газа и сопровождающих их образований на всех месторождениях Советского Союза он считал возможным начать радиометрическую разведку на нефть. Полученные в результате радиометрической съемки данные, по его мнению, должны быть вполне достаточными для закладки буровых скважин на вновь открытых таким методом нефтяных и газовых месторождениях [Богоявленский, 1923].

Постановка исследований такого масштаба была в то время новой. Статья Л.Н. Богоявленского "О применении радиометрической съемки к разведке нефтяных месторождений" была помещена в журнале "Нефтяное хозяйство" с комментариями известного геолога-нефтяника К.П. Калицкого [Калицкий, 1923]. Поддержав предложение об исследованиях на радиоактивность нефти, газа и горных

пород, К.П. Калицкий, однако, высказал сомнение в принципиальной возможности разведки глубоко погребенных нефтяных месторождений по данным измерений на поверхности Земли. Нефтяные месторождения, как правило, являются хорошо закрытыми ловушками и поэтому в течение длительного времени сохраняют газовый состав и высокое давление, писал К.П. Калицкий. Если даже нефть и радиоактивна, то эта радиоактивность должна всецело поглощаться толщей вышележащих пород. Кроме того, наклон нефтяных пластов, обычный для большинства месторождений, еще больше может увеличить толщу горных пород в сторону падения пластов. Следовательно, если на поверхности измеряются излучения, действительно исходящие из нефтяного пласта, то по результатам радиометрической съемки все равно невозможно точно определить контур нефтяного месторождения [Калицкий, 1923].

Летом 1924 г. на одном из нефтепромыслов Майкопа Л.Н. Богоявленский провел первую в СССР радиометрическую съемку с целью определения возможности использования метода для разведки на нефть. Понимая принципиальное различие между поисками нефтяных и рудных месторождений, в том числе радиоактивных, и не располагая достаточными сведениями об условиях залегания нефти и происходящих в залежах физико-химических процессах, он выбрал для проведения первого опыта хорошо изученный И.М. Губкиным район, провел измерения на давно выработанном участке с нефтяными пластами в виде отдельных линз в однородных породах. Полученные результаты измерений радиоактивности почвенного воздуха, нанесенные на геологический разрез, однако, не отражали какой-либо четкой закономерности в распределении радиоактивности по отношению к нефтяной залежи. Проведенные попутно определения радиоактивности образцов горных пород разреза и почв на земной поверхности показали, что их ничтожно малая радиоактивность не могла дать замеченные отклонения [Богоявленский, 1927].

По измерениям в Майкопе Л.Н. Богоявленский сделал вывод о существовании источника повышенного радиоактивного излучения, якобы замеченного им на земной поверхности над нефтяным месторождением. Таким источником могли быть также огромные массы погребенного вещества нефтеносных песков. Это утверждение вполне могло соответствовать существовавшим в то время представлениям об огромной абсорбирующей способности нефти к радиоактивным газам из подстилающих нефтяную залежь органических пород, которые должны были бы быть более богатыми радием, чем окружающие горные породы, благодаря большой абсорбционной способности к радию входящих в их состав коллоидов.

После проведения радиометрической съемки в Майкопе Л.Н. Богоявленский сформулировал принципы радиометрической разведки. При этом он учитывал и высказанные в начале 20-х годов весьма гипотетические взгляды французского физика Ж. Перрена о существовании особой планетной радиации Земли. Принципы радиометрической разведки Л.Н. Богоявленского сводились к следующему: всякое тело, физические свойства которого отличаются от физи-

ческих свойств вмещающей породы, может при некоторых условиях изменять интенсивность и характер "очень проникающей радиации" Земли. Измеряя эту радиацию и оценивая характер аномалий, можно приблизительно определить глубину залегания активного тела [Богоявленский, 1925]. По измерениям радиоактивности предполагалось определять не только глубины залегания, но и природу активного тела. Принципы радиометрической съемки могли, по мнению Л.Н. Богоявленского, успешно применяться при поисках не только нефти, но и многих других полезных ископаемых, особенно радиоактивных водных источников, радиоактивных (урановых и ториевых) руд, природных газов.

Идеи Л.Н. Богоявленского о новом радиометрическом методе разведки нефтяных месторождений были признаны иностранными, в частности немецкими, геофизиками. Его статьи были переведены и без промедления опубликованы в немецких журналах. Уже в 1926 г. стало известно о проведении подобных работ в Германии и Англии. Немецкие геофизические фирмы рекламировали "радиометрический метод разведки на нефть". Очень скоро, однако, стало ясно, что измерения радиоактивного излучения на земной поверхности для определения контуров погребенных нефтяных структур не могут иметь практического значения.

Неудачи попыток применения радиометрической съемки для разведки нефтяных месторождений не смогли остановить ее широкого внедрения при поисках радиоактивных руд и изучении радиоактивности земной коры.

Особенно настойчиво рекомендовал радиометрическую съемку к широкому внедрению для разведочных целей президент Главной палаты мер и весов академик Д.П. Коновалов. Радиометрический метод разведки, говорил он, должен "... иметь большое практическое значение, так как дает возможность обнаружить местонахождение всех веществ, влияющих на радиацию земли, подземных ключей, нефтяных месторождений и даже, может быть, рудных залежей" [Деятельность Главной палаты..., 1924. С. 10].

Рекомендованный Геологическим комитетом в марте 1922 г. метод радиометрической съемки через два года был также признан и рекомендован для широкого внедрения Главной палатой мер и весов, в которой Л.Н. Богоявленский после возвращения с Алтая в 1921 г. работал до конца жизни в должности заведующего радиологической лабораторией.

В последующие годы методами радиометрической съемки было обнаружено до сих пор непонятное явление сильного радиоактивного излучения неизвестного происхождения, которое Л.Н. Богоявленский назвал "проникающей радиацией Земли".

Новое явление было обнаружено впервые в 1924 г. при исследовании проб грунта Л.Н. Богоявленским в Пятигорске. В зоне высокой активности оказалось, что заполнявшее трещины вещество было настолько радиоактивным, что вполне могло являться причиной как высоких аномалийных значений радиоактивности на земной поверхности, так и повышенной активности лечебной воды ку-

порта. Химические анализы подтвердили настолько высокое содержание в нем тория и радия, что вещество, заполнявшее трещины, можно было признать пригодным для промышленной добычи радия [Богоявленский, 1925].

Для выяснения возможных запасов необходимо было определить, каким путем мог попасть радий в поверхностное вещество. Была исследована вода, но в ней была обнаружена только растворенная эманация радия и ничто не указывало на присутствие тория. Л.Н. Богоявленский предположил, что радиоактивность воды могла быть повышенной за счет растворенного урана, вынесенного в виде коллоида из глубин восходящими потоками. Другие предположения, высказанные по поводу повышенной активности слоя в трещинах, не могли объяснить замеченного Л.Н. Богоявленским явления, происхождение которого долгое время называли загадочным.

В Радиевом институте организовали специальные исследования повышенной радиоактивности, наблюдаемой на земной поверхности, и изучение природы проникающего излучения. Физический отдел института в 1923—1925 гг. провел на опытном участке специальные систематические наблюдения за радиоактивностью не только поверхности Земли, но и почвы на разных глубинах, а также воздуха на разных высотах от Земли [Мысовский, 1925].

В 1927 г. Л.Н. Богоявленский и А.А. Ломакин провели радиометрическую съемку на Ухтинском нефтяном месторождении на площади около 40 га по профилям через каждые 100—150 м. Построенные изоряды оказались замкнутыми и как бы отражали контур какого-то погребенного тела. Однако ими было отмечено и изменение в весьма широких пределах "проникающей радиации земли" [Богоявленский, Ломакин, 1928]. Причиной изменений, как они считали, могли быть или излучения рассеянных радиоактивных элементов в почве, или излучения неизвестных радиоактивных глубинных слоев. Поскольку радиоактивность отобранных образцов почвы была примерно везде одинаковой, то был сделан вывод, что они открыли "действие значительных масс радиоактивных веществ с более жестким излучением, чем радий" [Там же. С. 172]. Съемки на Ухтинском месторождении как бы подтвердили первое предположение Л.Н. Богоявленского о существовании особой проникающей земной радиации, высказанное им еще в 1920—1922 гг.

На сильное гамма-излучение неизвестного происхождения в Тюямуюнском районе обратил внимание в начале 30-х годов Г.О. Ерчиковский, проводивший там радиометрическую съемку. Решив, что излучение идет от сильнорадиоактивных руд, выходящих на поверхность, он измерил радиоактивность в специальных шурфах, но никаких признаков более радиоактивной руды или минералов не обнаружил ни на поверхности, ни в прилегающей зоне.

Было отмечено неизвестное сильное радиоактивное излучение в местах, где не было оснований предполагать залежи радиоактивных руд или скоплений радиоактивных элементов, растворенных в глубинных водах. Существование проникающей радиации Земли,



Радиометрическая разведка радиоактивных руд и минералов в районе Табошара, 1932 г.

однако, продолжало вызывать сомнение у ряда ученых, поскольку "...наличие лучей подобной жесткости ни для одного из всех известных радиоактивных веществ не было обнаружено" [Кириков, Тверской, Граммаков, 1932б]. Выяснение природы замеченного сильно проникающего излучения неизвестного происхождения продолжалось многие годы в Средней Азии и других районах.

Радиометрическая съемка получила широкое признание и начала систематически применяться при поисках радиоактивных руд и минералов во многих странах. С развитием техники измерений и регистрации радиоактивных излучений в физических лабораториях совершенствовались и методы радиометрической съемки, регистрирующие радиоактивные излучения на земной поверхности.

В 30-х годах в радиометрической съемке, как и при лабораторных исследованиях радиоактивности, широко применялись счетчики Гейгера—Мюллера, а в конце 40-х — сцинтилляционные счетчики. Тогда же вместо тяжелых переносных установок начали применяться передвижные радиометрические станции на автомобилях. Несколько лет спустя в США, Канаде, Англии и других странах разрабатывались аэрометрические методы поисков урана с самолетов и вертолетов. В 50-х годах аэрометрия была обычным рабочим поисковым методом как за границей, так и у нас в стране.

В начале 50-х годов при поисках урана и радиоактивных руд можно было применять площадную съемку, детально-локальную и точечные исследования. При этом использовались автомобильные ра-

диометры или самолетные, а иногда в зависимости от характера местности и переносные для пеших маршрутов. Автомобильная съемка менее дорогая, чем воздушная, она дает возможность быстро обследовать большие площади в районах с хорошими дорогами. Обычно она применялась в США, например, для быстрого исследования поверхностных отложений радиоактивных руд, обнаружения радиоактивных аномалий, более детальной разведки относительного распределения радиоактивности на больших площадях. При автомобильной съемке применялись сцинтилляционные детекторы с интегрирующим стрелочным прибором и регистрирующим прибором, связанным со спидометром [Nelson, 1953].

Аэрометрическая съемка производится с самолетов и вертолетов на высоте 20—40 м. Геологи, проводящие аэрометрическую съемку даже в случае необходимости не могут остановиться и более детально обследовать то или иное обнажение, как это можно делать при автомобильной съемке. Но преимуществом аэросъемки является возможность регистрировать излучения на большой площади. Геологическая служба США использовала для радиометрической съемки большие самолеты типа ДС-3 [Stead, 1950]. Такие же самолеты применялись в Канаде. На самолетах монтируются высокочувствительные сцинтилляционные счетчики с большим кристаллом. Несколько счетчиков включаются параллельно и соединяются регистрирующими приборами с автоматической записью.

Аэрометрическая съемка, несмотря на ее дороговизну, широко применяется во многих странах. О масштабах ее применения можно судить по опубликованным результатам за 1954 г. Только за один год в Техасе (США) аэрометодами была обследована на радиоактивность площадь около 240 тыс. кв. км [Kellog, 1957].

В северо-западных районах Канады также за 1954 г. было облетано по профилям 74 тыс. пог. км [Gregory, 1955]. При этом была проведена интересная работа по выявлению общих закономерностей распределения естественного гамма-излучения ("гамма-поля"). Сначала проводилась региональная съемка с высоты 150—200 м, а иногда даже 300 м. Затем по полученным данным выбирались районы с повышенным "гамма-полем", повторный облет которых проводился по сгущенной сетке и на высоте порядка 60—80 м, а на особенно перспективных участках даже на минимально возможной для вертолетов высоте.

Приведенные сведения свидетельствуют о возможности обнаружения повышенного "гамма-поля" на довольно больших высотах над месторождениями радиоактивных руд.

Быстро возрастающая доступность радиометрических приборов дала возможность уже в 50-х годах применять их для решения других геологических задач, не связанных с месторождениями радиоактивных руд [Johnson, 1954]. Карты изолиний, составленные по измерениям аэрометрической съемки, в некоторых случаях могут оказаться полезными при геологическом картировании, позволяя проследить крупные литологические единицы, даже когда они покрыты наносами.

В программу аэrorадиометрической съемки территории начиная с 50-х годов стали включать исследования магнитного и электрического полей Земли.

Комплексирование геофизических методов дало возможность попутно с поисками урана и радиоактивных соединений обнаружить при региональной съемке и месторождения других полезных ископаемых. Так, в США были обнаружены месторождения полиметаллических и железных руд [Cook, 1954].

Таким образом, зародившаяся в начале 20-х годов радиометрическая съемка за очень короткий срок превратилась в особо важное направление в геофизической разведке.

В настоящее время разведка месторождений радиоактивных минералов и руд проводится исключительно методами радиометрической съемки, основанными на регистрации радиоактивных излучений. При проведении разведочных работ с помощью специальных радиометров и счетчиков излучений регистрируется также общая радиоактивность земной коры, изучение которой дает представление о "гамма-поле" Земли.

3.2. РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАДИОАКТИВНОСТИ ОБРАЗЦОВ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ КОЛЛЕКЦИЙ

При разведке полезных ископаемых в начале XX в. радиоактивность образцов минералов, собранных геологами во время полевых работ, определялась химическими методами. Вскоре для этих целей стали использовать регистрацию или другие фиксирующие способы, отмечающие радиоактивное излучение самих образцов. Первоначально использовались фотопластинки и фотографические эмульсии. Затем были разработаны первые приборы, реагирующие на радиоактивные излучения.

Как известно, А. Беккерель первым в 1896 г. с помощью фотопластинок установил факт радиоактивного излучения уранового минерала. Позднее А. Беккерель и М. Кюри, экспериментируя с эмульсиями галогенов серебра, нашли, что соединения урана и тория дают затемнение фотопластинок, находящихся в темноте. С помощью фотопластинок в 1904 г. попытались установить не только контуры, но и распределение в минерале радиоактивных включений [Step, Becke, 1904]. Несколько позднее М. Рейнганум, изучая влияние радиоактивных излучений на фотоэмульсию, показал, что потемнение фотопластинок вокруг зерен радиоактивных включений вызвано действием альфа-частиц и представляет совокупность треков их пробега [Reinganum, 1911]. Обычные фотопластинки и фотоэмульсии оказались чувствительными к альфа-, бета- и гамма-излучениям.

В 1926 г. положения М. Рейнганума о пригодности фотоэмульсий к фиксации радиоактивных излучений подтвердил сотрудник Радиевого института С.П. Александров. В работе "Радиография тьямунских руд" он применил толстостенные эмульсии ядерного типа для выявления шлифов тьямунита в известняках [Александров, 1926].

Эти первые работы положили начало новым так называемым автордиографическим методам исследования радиоактивности образцов руд и минералов. В дальнейшем за рубежом и у нас в стране были разработаны различные виды эмульсий для определения альфа-, бета- и гамма-излучений.

Обнаружение и идентификация радиоактивных включений в минералах и породах по альфа-частицам производится быстро. При соприкосновении гладкой плоскости образца породы с пластинкой отчетливо выделяются следы альфа-излучения и альфа-треки, соответствующие включениям альфа-излучателей. Разрабатывались и применялись также способы нанесения на пластинку жидких эмульсий и использования отдельных эмульсий для автордиографии образцов с необработанной поверхностью. Впоследствии были разработаны автордиографические способы обнаружения радиоактивных включений или осколков минералов в песках, пульпе, илах.

Автордиография бета-частиц начала широко внедряться в лабораторные исследования при определении концентрации искусственных бета-излучателей в живых организмах и растениях. В предвоенный и военный периоды были получены четкие автордиографические пластинки бета-излучателей в обычных фотоэмульсиях [Groven et al., 1938]. Бета-чувствительные эмульсии в 1942—1945 гг. использовались американскими учеными в лабораторных исследованиях для автордиографии активированных нейтронами рудных шлифов.

Чувствительные к альфа-, бета- и гамма-излучениям фотографические и рентгеновские эмульсии использовались при выявлении минералов урана и тория. При исследованиях калиевых минералов, не излучающих альфа-частиц, а также для определения калиевых минералов от урановых и ториевых использование радиографии бета-излучения дает четкую линию треков калия, отличающихся от треков урана и тория [Нее, Jarkov, 1953].

Метод ядерных эмульсий наравне с химическими и рентгенографическими лабораторными исследованиями вошел в практику работы геологических организаций при разведке и эксплуатации месторождений радиоактивных минералов и руд. При этом измерения длины треков и счет радиоактивных включений дают количественные характеристики радиоактивности той или иной породы. Методы альфа-радиографии оказались удобными для определений концентрации урана и тория в зернах минералов, шлифах, пульпах и растворах. Результаты альфа- и бета-радиографии давали возможность получать данные о парагенезисе радиоактивных включений нерадиоактивных компонентов той или иной породы или руды. Оказалось, что большинство радиоактивных элементов при благоприятных условиях можно различать по характерной для них длине и форме треков. Так, торий, имеющий четыре короткоживущих дочерних элемента, образует характерные звезды, состоящие из пяти треков [Ларсен, Фейр, 1956].

В первой четверти XX в. потребность в массовых методах исследования на радиоактивность образцов геологических коллекций

способствовала развитию других направлений ядерно-физического анализа. В эти годы стали применяться первые, хотя и примитивные, приборы для определения радиоактивности минералов и руд. Это были разнообразные электроскопы, спинтарископы, ионизационные камеры.

Электроскопы давали лишь приблизительную оценку радиоактивности исследуемого природного объекта по степени ионизации воздуха вблизи него. Простейшие электроскопы изготовлялись в виде предварительно заряженных металлических стержней (нитей или двух лепестков). Потенциал электроскопа, помещенного вблизи радиоактивного минерала или источника, через некоторое время менялся под воздействием ионизации воздуха, вызванной радиоактивным излучением исследуемого объекта.

Спинтарископы, появившиеся несколько позднее, основаны на явлении фосфоресценции, вызываемой в некоторых веществах радиоактивным излучением. В 1909 г. Л.А. Чугаевым и В.П. Покровским были установлены две формы фосфоресценции: равного и прерывистого свечения. Бета- и гамма-лучи на фосфоресцирующем экране вызывают, как правило, непрерывное свечение, а альфа-излучение в некоторых веществах, например на экране из сульфида цинка, вызывает прерывистое свечение — сцинтилляции, наблюдаемые глазом [Чугаев, Покровский, 1909]. Мерцание в спинтарископе Э. Резерфорд объяснял обратным воссоединением ионов, образующихся под влиянием радиоактивного излучения [Rutherford, 1905]. Позднее, в 50-х годах, явление сцинтилляций под воздействием радиоактивного излучения было использовано при разработке сцинтилляционных счетчиков для регистрации альфа-излучений.

В нашей стране ускоренные методы определения радиоактивности образцов различных руд с целью выбора наиболее активных начали применяться в начале 20-х годов. Использовались при этом ионизационные камеры и электроскопы. Образец предполагаемой радиоактивной руды или породы, найденный геологом в поле, подвергался автордиографическим исследованиям. Образцы с повышенной активностью исследовались химическим путем для определения степени концентрации радиоактивных элементов.

Новые ускоренные методы исследования на радиоактивность геологических коллекций занимали значительно меньше времени, чем химические или даже автордиографические, часто проводившиеся только выборочно. Было разработано много разновидностей электроскопов и ионизационных камер для лабораторного экспресс-анализа образцов. Несмотря на некоторые совершенно незначительные различия в предложениях отдельных авторов, а их в то время было очень много, все они, по существу, предлагали способ измерения радиоактивности воздуха вблизи образца. В предложенных методах обычно образец помещался в ионизационную камеру с заряженным электроскопом и через некоторое время измерялась степень ионизации в ней воздуха за счет излучений образца. При этом листочки электроскопа постепенно опадают, по времени их спада и определяется степень радиоактивности образца.

Рассмотрим несколько подробнее методы ускоренного обследования геологических коллекций, предложенные в СССР в 20-х годах. Их условно можно разделить на три группы. К первой отнесем способы, при которых образец закладывается в специальную камеру с электроскопом из металлической проволоки, заранее заряженной до высокого потенциала. Через некоторое довольно продолжительное время под воздействием радиоактивных излучений образца на проволоке появлялся осадок, который свидетельствовал о наличии радиоактивных элементов в минерале. Результаты измерений радиоактивности таким способом оказались ненадежны, так как зависели от многочисленных непредвиденных факторов [Арцыбашев, Плешанова, 1928].

Ко второй группе ускоренных способов отнесем все статические методы исследований радиоактивности. Так же как и в способах первого типа, при определениях образец помещался в камеру. Величина радиоактивной эманации или только ее присутствие (или отсутствие) определялись по величине тока насыщения, возникавшего в результате ионизации воздуха в камере. Основным недостатком этих методов была нестабильность результатов определений. При повторном исследовании одного и того же образца получались большие расхождения в величине силы тока из-за неоднородности поля излучений по объему камеры.

К третьей группе отнесем аспирационные способы, сохранявшие принцип измерений и последовательность операций первых двух. Разница состояла в том, что ионизированный излучениями образец воздух из камеры продувался дальше, в коллектор, где и измерялась степень радиоактивности образца по ионизации воздуха.

Почти целое десятилетие радиоактивность образцов минералов у нас в стране определялась указанными способами. В схему лабораторной измерительной установки обязательно входили заряжаемый электроскоп и ионизационная камера. Надежность определения радиоактивных свойств минералов и точность измерений зависела в большей степени от искусства лаборанта, чем от той или иной конструкции или вида камеры и электроскопа; тем не менее эти определения давали представления об относительной степени радиоактивности образцов по отношению к эталонам.

Степень ионизации воздуха измерялась, как было показано, по скорости разрядки электроскопа, которая вначале определялась по времени спада его листков до определенного положения (время начала и конца спада лаборант отмечал по своим часам). Позднее в установку встраивали еще и микроскоп. С помощью обычного микроскопа удавалось заметить совсем незначительные изменения в положении листков электроскопа, а следовательно, заметить его реакцию на присутствие даже самых незначительных излучений образца. Чтобы поле излучения было равномерным во всем объеме камеры, образец помещали на специальную подставку или на металлический лист, встроенным вентилятором создавали замкнутую циркуляцию воздуха и вообще пытались применить самые разные приспособления для обеспечения стабильности исследований образ-

цов. Однако все эти усовершенствования не могли оказать решающего влияния на результаты определений. Нововведения не могли изменить сущности самого способа, а уровень техники того времени не давал возможности при этом способе получать более точные количественные данные о радиоактивности образцов пород и минералов.

Способы определения радиоактивности образцов геологических коллекций по степени ионизации воздуха, несмотря на их недостатки, позволяли выделять образцы с повышенной активностью. В короткие сроки были обследованы геологические коллекции и вновь поступавшие образцы. При обнаружении образцов с высокой или повышенной активностью в районы, из которых они были доставлены, вновь направлялись геологи для более детального обследования. Такая организация поисковых работ дала в то время возможность открыть многие месторождения радиоактивных руд и минералов.

Дальнейшим развитием методов, использующих ионизационные камеры и электроскопы для определения ионизации воздуха вблизи образца, было использование счетчиков радиоактивного излучения. В 30-х годах для анализов руд, пород и других природных объектов на радиоактивность за рубежом начали использоваться счетчики Гейгера—Мюллера. В 40-х годах были разработаны самые разнообразные конструкции счетчиков, которые, однако, сохраняли единый принцип. Счетная трубка (основа счетчика) представляла собой тонкостенный сосуд продолговатой формы с тонкой центральной проволокой, служащей анодом. Проволока окружена катодом. В объем счетчика закачивается под давлением газ (обычно аргон) в смеси с небольшим количеством многоатомных газов (пары спирта, амилацетата и др.), необходимых для гашения разряда. Счетчики изготавливаются металлическими или тонкостенными стеклянными с окном для измерений жесткого бета-излучения. Почти все заряженные частицы, попавшие в счетчик, дают импульсы. Гамма-излучение может давать вторичные электроны. С помощью счетчиков Гейгера—Мюллера возможно вести счет альфа-излучения образца, можно (в других режимах) считать одновременно альфа- и бета-излучение.

Следующим этапом в развитии методов определения ионизации воздуха вблизи образца является создание и применение сцинтилляционных счетчиков. Они, в свою очередь, как указывалось, представляют усовершенствование на новом уровне техники схемы измерений спинтарископа, который применялся в 1909—1914 гг. В сцинтилляционном счетчике регистрация излучений ведется с помощью фотоумножителя и электронной счетной схемы, как и при использовании счетчиков Гейгера—Мюллера. В качестве фотоумножителей в сцинтилляционных счетчиках используются самые разнообразные аморфные, кристаллические и жидкие вещества, чувствительные не только к альфа-излучению, но и к бета-лучам, гамма-квантам, нейтронам и космическому излучению [Дэвис, 1956].

Сцинтилляционные счетчики были не только более эффектив-

ными, чем счетчики Гейгера—Мюллера, при регистрации гамма-излучения и обеспечивали счет частиц, но и давали возможность по амплитуде импульса приблизительно определять энергию ионизирующих частиц. К преимуществам сцинтилляционных счетчиков следует отнести малое разрешающее время и малое время спада свечения фосфоресценции кристаллов, а также относительно меньший фон.

Как видно, почти за пятьдесят лет развитие методов определения ионизации воздуха прошло путь от качественной индикации присутствия ионизированного воздуха по электроскопу или в ионизационной камере до точного количественного определения радиоактивных излучений счетчиками Гейгера—Мюллера и затем сцинтилляционными счетчиками.

В послевоенный период в дополнение и развитие химических методов анализа радиоактивных минералов и руд получили практическое распространение ядерно-физические методы элементного анализа геологических объектов. Среди них рентгенорадиометрические методы, нейтронные сорбционные, нейтронные активационные и нейтрон-гамма методы, фотоядерные и др. Ядерно-физические методы дают возможность определять очень малые содержания редких и рассеянных радиоактивных и других элементов в пробах при геохимических анализах. Так, нейтронный активационный метод, например, может применяться в качестве экспресс-анализа при проведении массовых анализов микросодержаний элементов в рудах и породах. Различные модификации метода разрабатывались под руководством Д.И. Лейпунской во ВНИИ ядерной геофизики и геохимии. Достоинством метода является независимость поля облучения нейтронами от свойств образца [Лейпунская, 1969].

При нейтронном активационном анализе используются различные нейтронные источники излучений, как изотопные, так и генераторы нейтронов, нейтронные размножители, атомные реакторы. Эти методы многокомпонентны, т.е. дают возможность определять в пробах практически кларковые содержания многих элементов, таких, как ванадий, алюминий, марганец, мышьяк, индий, рений, золото и многие другие. Во многих странах и в СССР разработаны и активно работают во многих районах лаборатории активационного анализа для решения конкретных задач геологоразведочных организаций.

В 60-х годах интенсивно разрабатывались и внедрялись в практику геологоразведочных работ ядерно-физические методы, основанные на использовании управляемых источников излучения. Были разработаны методы, основанные в большинстве случаев на использовании стандартных радиоактивных изотопов, для определений железа, меди, хрома, бериллия, олова, фосфора и других элементов. Эти разработки у нас в стране проводились в институтах Министерства геологии СССР и в Академии наук, например в Институте геофизики в Свердловске под руководством Ю.П. Булашевича и в Новосибирске под руководством Е.М. Филиппова [Филиппов, 1965]. Большой объем разработок ядерно-геофизических методов излучения элементного состава горных пород проводится и в других

ведомственных научно-исследовательских организациях. Особенностью послевоенных разработок является постановка предварительных чисто физических специальных исследований, например изучение поведения нейтронов, гамма-квантов или других видов ядерных излучений в условиях реальной горной породы и реакции этой породы на излучение. Только после проведения ядерно-физических экспериментов, детального изучения пространственного и временного распределения излучений прибора в исследуемой породе может быть предложена конкретная методика для определения содержания того или иного элемента в породе.

Со временем ядерно-физические методы лабораторного исследования образцов горных пород для разведочных и поисковых целей вошли в ядерную геофизику, составляя одно из ее важнейших направлений. С другой стороны, эти методы являются составной частью геохимических методов, а также используются и считаются частью поисковых методов при разведке тех или иных полезных ископаемых.

3.3. ПЕРВЫЕ МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГЕОЛОГИЧЕСКОГО РАЗРЕЗА ПО РАДИОАКТИВНОСТИ ОТДЕЛЬНЫХ СЛОЕВ

Систематическим изучением радиоактивности горных пород, слагающих геологический разрез, одним из первых начал заниматься известный в 20-х годах немецкий геофизик Рихард Амбронн. Его интерес к изучению радиоактивности горных пород разреза нефтяных скважин был связан с попытками Л.Н. Богоявленского и затем немецких геофизических форм проводить радиометрическую разведку нефтяных месторождений.

Р. Амбронн, опубликовавший одно из первых специальных пособий по геофизическим методам разведки, рассматривал наравне с другими и "радиологический метод", который он связывал с измерениями физических характеристик геологических объектов [Ambronn, 1926]. Р. Амбронн много внимания уделил советским исследованиям радиоактивности нефти и районов нефтяных месторождений. Он подробно разобрал основные положения, высказанные Л.Н. Богоявленским, привел некоторые чисто справочные данные о свойствах радиоактивных веществ, способах измерения радиоактивности горных пород, почв, воздуха и попытался оценить получаемые при измерениях радиоактивности данные.

Понятие "ультражесткое излучение", или "земная радиация", введенное Л.Н. Богоявленским, он не считал достаточно убедительным для объяснения причин радиоактивных аномалий вблизи нефтяного месторождения. Р. Амбронн не связывал первоисточник этих аномалий с нефтяной залежью. Несмотря на это, он все-таки рекомендовал проведение радиометрической съемки, поскольку результаты съемки могли, по его мнению, оказаться полезными при решении общих геологических задач, особенно при изучении тектонических нарушений.

В лаборатории Р. Амбронн провел исследования радиоактивности воздуха вблизи образцов некоторых горных пород, харак-

терных для разреза нефтяных скважин. Затем он построил колонку условного разреза скважины с указанием соответствующей величины радиоактивности каждой породы. Это была, видимо, первая, как мы теперь называем, диаграмма радиоактивного каротажа условной скважины. С конца 50-х годов радиоактивный каротаж нефтяных скважин считается обязательным для всех бурящихся в СССР скважин. По диаграммам радиоактивного каротажа в последующий период стало возможным восстановить геологический разрез нефтяного месторождения в районах, пострадавших во время Великой Отечественной войны, документация которого утеряна.

В первых определениях радиоактивности горных пород нефтяных месторождений Р. Амбронн совершенно правильно определил, что наибольшей радиоактивностью обладают глины, а не нефтеносные пески, как предполагал Л.Н. Богоявленский. Из этого следовало, что прямой связи между радиоактивностью на земной поверхности и нефтеносными пластами не могло быть, но такой вывод в то время еще не был сделан.

Радиометрическую разведку на нефть Р. Амбронн предполагал проводить в соответствии с иными, чем у Л.Н. Богоявленского, принципами. Необходимо было измерять радиоактивность не на поверхности, а по разрезу скважин. Он предлагал измерять радиоактивность в пробах воздуха, взятых в скважине вблизи каждой породы, и затем по различию в их величинах определять тип породы. Он разработал специальную систему труб и воздухопроводов для отбора и транспортировки проб с разных глубин на поверхность. По величине радиоактивности проб Р. Амбронн считал возможным выявлять глинистые слои, песчаные нефтеносные и другие характерные горизонты и пласты. Но опытная установка оказалась слишком громоздкой, пробы воздуха сохранялись только при перекачке с небольших глубин (порядка десятков и двух-четырех сотен метров), ее создание почти никакого практического значения не имело.

Почти одновременно с книгой Р. Амбронна были опубликованы интересные предложения английского геофизика М. Мюльберга. Написанный им раздел о радиоактивной разведке был помещен в приложении к популярной книге известного геолога Я. Стиганда "Очерки природного проявления и геологии нефти", предназначенной для общего ознакомления с геологией нефти [Stigand, 1925]. Обсуждая возможности практического применения новых и ставших весьма популярными методов радиоактивной разведки, М. Мюльберг пришел к выводу, что исследования радиоактивности горных пород могут оказаться весьма полезными. Они дают дополнительные данные о породах при определении границ пород, сбросов, наличия нефтяных пластов. Он указывал на необходимость производить измерения вблизи пластов на расстоянии, не превышающем двух футов. При этом возможно, по его мнению, заметить разницу в величине радиоактивности каждой горной породы. Повышенная радиоактивность свойственна не только глинам и другим породам, но и сбросам и зонам выветривания.

М. Мюльберг не отвергал возможности в будущем выявления и использования факта способности нефти поглощать радиоактивные эманации. Можно сказать, что М. Мюльберг в популярной форме попытался рассмотреть многие аспекты использования регистрации радиоактивности горных пород в разведке и эксплуатации нефтяных месторождений.

М. Мюльберг, как и Р. Амбронн, пришел к выводу, что при исследованиях радиоактивности нефтяных месторождений следует отбирать образцы воздуха в буровых некрепленных трубами скважинах вблизи каждого пласта. Вместо сложной системы трубопроводов для перекачки проб воздуха он предложил использовать газовые пробоотборники. Измерения относительной радиоактивности этих проб, утверждал М. Мюльберг, поможет выявить нефтяные пласты и сбросы, не замеченные при бурении.

В последующие годы не нашли применения ни предлагаемый Р. Амбронном, ни М. Мюльбергом методы определения радиоактивности горных пород в естественном залегании, поскольку не было создано сколько-нибудь удовлетворительно работающей установки или системы для транспортировки проб воздуха из скважины на земную поверхность. Только в начале 30-х годов создавалась благоприятная ситуация для создания действенных методов изучения геологического разреза нефтяных скважин по радиоактивности отдельных пластов.

К тому времени были проведены фундаментальные исследования состава горных пород, геохимии нефтяных пластовых вод и радиоактивных элементов. Разработаны и широко применялись в физических лабораториях новые дистанционные приборы для измерения радиоактивности образцов. Исследования радиоактивности пластовых вод и горных пород проводились в Радиовом институте под руководством В.И. Вернадского и В.Г. Хлопина, которые также уделяли внимание возможностям практического применения полученных физико-химических результатов к разведке полезных ископаемых. Высокий научный уровень, творческое и критическое обсуждение проблем и результатов, внимание ко всем замеченным новым явлениям способствовали углублению исследований и расширению направлений их практического применения.

К началу 30-х годов в Радиовом институте был накоплен опыт использования радиоактивных излучений в разведке радиоактивных руд, установлены основные закономерности геохимии радиоактивных элементов с применением новейшего физического оборудования. В институте впервые для регистрации космического излучения в начале 30-х годов С.Н. Верновым и Л.В. Мысовским были использованы разрядные счетчики вместо широко применявшихся в то время ионизационных камер.

Тогда же, в годы первой пятилетки, особенно остро встала проблема обеспечения нефтью народного хозяйства страны и в связи с этим — прироста разведанных запасов и резкого расширения разведочных работ на нефть и газ. Поиски нефтяных месторождений в то время сводились в основном к геологическому карти-

рованию, непосредственному наблюдению и изучению геологических обнажений и выходов нефти с последующим разведочным бурением выявленных такими способами перспективных площадей. Представления о строении и составе лежащих ниже слоев и нефтеносных горизонтов базировались, по существу, на более или менее достоверных геологических гипотезах, для обоснования которых в разведочных скважинах отбирались образцы горных пород.

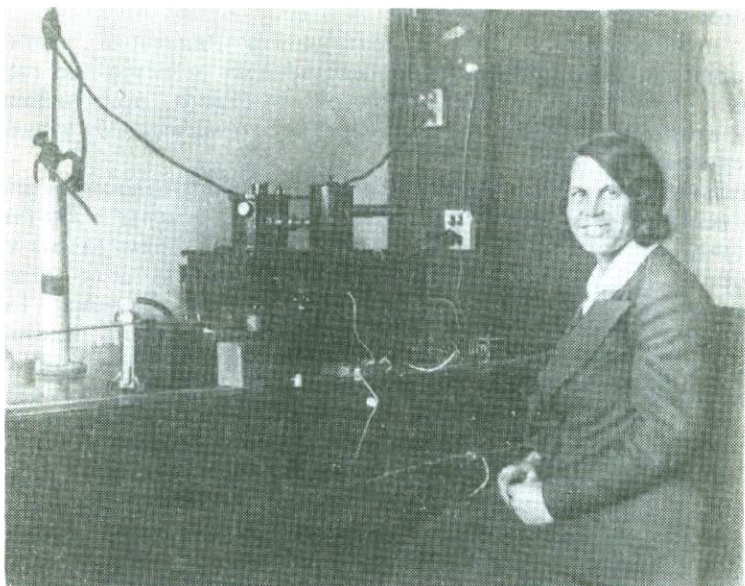
Принципиально новым направлением поисков структур, благоприятных для скопления нефти, и изучения геологического разреза месторождений было применение физики в разведке полезных ископаемых. С 1929 г. в СССР начал внедряться метод электрического каротажа, дававший возможность по электрическим характеристикам горных пород разреза скважины, записанным во время спуска специального скважинного каротажного прибора, проводить корреляцию горизонтов по площади и по глубине.

Каротаж начал применяться сначала на бакинских и грозненских нефтяных промыслах, а с 1933 г. комплекс методов промыслово-геофизических исследований скважин (каротаж скважин) стал обязательным для всех бурящихся скважин с сохранением документации об электрических и других характеристиках горных пород, пересекаемых скважиной, в геологических фондах.

Разработкой методов электрического каротажа, приспособленных для геологических условий нашей страны, в начале 30-х годов занимались в Нефтяном исследовательском геологоразведочном институте (НИГРИ). По договору с французской фирмой "Шлюмберже" НИГРИ имел право проводить в полном объеме (включая интерпретацию) все электроразведочные работы, использовать полученные материалы, а несколько позднее — заниматься совершенствованием французской скважинной аппаратуры.

В НИГРИ с конца 20-х годов занимались также исследованиями радиоактивности горных пород применительно к нуждам геологии. Были поставлены определения радиоактивности пород определенного литологического состава с целью определения связи между составом пород и их радиоактивностью. Оказалось, что во многих случаях, степень радиоактивности можно связать не столько с химико-петрографическими свойствами породы, сколько с условиями ее образования. Следовательно, радиоактивность некоторых пород, характерных для нефтяных месторождений, могла зависеть от положения их в разрезе.

Оказалось также, что радиоактивность одного и того же геологического образования сравнительно мало менялась в пределах одного месторождения. Более того, оказалось, что в сравнительно узких пределах менялась радиоактивность глин (или песков) соответствующих геологических формаций. Именно это могло помочь различать горные породы в разрезе скважины по их естественной радиоактивности. Но оставалось неясным влияние на радиоактивность горных пород продуктов распада радиоактивных элементов. Причем учет этого фактора затруднялся еще и тем, что эманация радия непрерывно создается в процессе распада радиоактивными



Лабораторная установка для исследований радиоактивности образцов горных пород, 1935 г.

Сидит Н.М. Лятковская

элементами пород всей толщи земной коры и может мигрировать, вступая в тот или иной геохимический или геологический процесс. Поэтому в Радиевом институте и НИГРИ (впоследствии ЦНИГРИ) были поставлены в начале 30-х годов дополнительные исследования эманулирующей способности радиоактивных руд и горных пород непосредственно на месторождениях [Кириков и др., 1932а]. Были поставлены и другие исследования радиоактивных свойств горных пород, а также была сделана попытка сравнить горные породы по скорости диффузии в них радиоактивных эманаций [Граммаков, 1935].

Проведенные в Радиевом институте и ЦНИГРИ исследования создали к середине 30-х годов основу для разработки надежного метода корреляции разрезов отдельных скважин нефтяных месторождений по естественной радиоактивности горных пород. Под руководством А.П. Кирикова физики Г.В. Горшков, А.Г. Граммаков, Л.И. Бочков, Н.М. Лятковская, А.И. Никонов, В.А. Шпак разработали макет разреза горных пород с нефтяной скважиной. По результатам модельных работ была оценена необходимая точность и чувствительность прибора для измерений радиоактивности воздуха вблизи каждой породы. Но оказалось, так же как за десять лет до того в опытах Р. Амбронна, что система трубопроводов не может обеспечить постоянство физических параметров пробы от места ее взятия до ионизационной камеры, где измерялась ее радиоактивность.

Интерес к новым разработкам мог совершенно погаснуть, если бы не предложение в 1934 г. сотрудника Радиового института Г.В. Горшкова использовать непосредственную регистрацию гамма-квантов с помощью счетчиков Гейгера—Мюллера, применявшихся в лабораторных условиях для измерения космического излучения С.Н. Верновым (1933 г.).

Модельные работы со счетчиками подтвердили целесообразность их применения. В отличие от ионизационной камеры в счетчиках электроны, выбитые из его стенок под воздействием гамма-квантов пород, ускоряются в сильном электрическом поле прибора и, в свою очередь, вызывают ионизацию поля счетчика. Таким образом, гамма-излучение горных пород в скважине непосредственно вызывает соответствующее импульсное излучение в устройстве счетчика, которое может быть передано на поверхность и подсчитано. Тогда же для измерения и счета импульсов была разработана достаточно совершенная для того времени, но сложная и громоздкая схема. Вскоре, однако, в процессе разработки макета от передачи слабых импульсов на поверхность отказались, в скважинном приборе разработали совмещенную счетную и измерительную схему.

Следует отметить прогрессивность предложения Г.В. Горшкова об использовании счетчиков вместо ионизационных камер. В последующие десятилетия счетчики применялись во всех приборах радиоактивного каротажа как в нашей стране, так и в США, где также, хотя и несколько позднее чем в СССР, стали применять радиоактивные методы исследования нефтяных месторождений.

К началу 1937 г. макет первого советского прибора был готов, а летом того же года был испытан на нефтяных промыслах Сызрани [Горшков, Курбатов, 1937]. По аномалиям гамма-излучения в процессе промышленных испытаний прибора удалось выделить на глубинах 185—140 м опорный горизонт, известный геологам по результатам анализа образцов пород, взятых во время бурения. Во время испытаний была впервые доказана возможность регистрации параметров горных пород через стальные трубы, закрепляющие стенки скважины. По аналогии с электрическими измерениями в скважинах (электрический каротаж) радиоактивные измерения получили название радиоактивного (гамма) каротажа. Испытания первого макета прибора радиоактивного каротажа нефтяных скважин как доказательство принципиальной возможности изучения геологического строения разреза нефтяных скважин по регистрации естественного гамма-излучения имело решающее значение в создании ядерно-физического направления в геофизике.

Сообщения о проведении гамма-каротажа (ГК) нефтяных скважин с соответствующими диаграммами по стволу скважин были опубликованы в "Журнале геофизики" и "Докладах Академии наук СССР" с аннотациями на английском языке [Горшков, Курбатов, 1937; Горшков, Лятковская, 1946]. Доклад о физических основах радиоактивных методов разведки обсуждался на XVII сессии Геологического конгресса в Москве в 1937 г. [Горшков и др., 1940].

Советский метод и аппаратура со счетчиками Гейгера—Мюллера



Авторы первого метода радиоактивного каротажа нефтяных скважин, 1937 г.

Стоят (слева направо): А.Г. Граммаков, Г.В. Горшков; сидят: В. Жадин, Н.М. Лятковская

вызвали большой интерес со стороны специализированных геофизических и нефтяных компаний Франции и США. Разработкой радиоактивных методов в применении к нефтяной промышленности в США начали заниматься почти одновременно с нами, однако методы и аппаратура, пригодные для работы в нефтяных скважинах, там еще не были созданы. Первый прибор радиоактивного каротажа в США был изготовлен в 1938 г., но в нем по-прежнему применялась ионизационная камера, правда, особой конструкции — наполненная водородом. К прибору полагались усилитель импульсов, улучшенная система записи. Но уже в конце 1938 г., почти через полтора года после испытаний советского прибора, в США изменили конструкцию — ионизационную камеру заменили счетчиками Гейгера—Мюллера. Новый прибор с двумя счетчиками мог осуществлять непрерывную регистрацию гамма-излучения горных пород по стволу скважины при движении прибора со скоростью до 25 футов (8 м) в минуту. Первая партия американских приборов была

изготовлена в 1939 г. и испытана на нефтяных промыслах Техаса. Начиная с 1940 г. гамма-каротаж стал обычным производственным геофизическим методом испытания скважин в нефтяной промышленности США, применявшимся многими геофизическими фирмами.

К достижениям американских геофизических фирм следует отнести создание в 1940—1941 гг. передвижного комплекса для промыслово-геофизических исследований нефтяных скважин на двух автомашинах. На одной из машин смонтирована измерительная и регистрирующая аппаратура, а на другой вспомогательное оборудование. В последующие два года фирма "ИЛАИ" ("Инжениринг лабораторис инкорпорейшн") разработала скважинный прибор радиоактивного каротажа диаметром 92 мм и длиной 3 м с питанием от батарей [Lane Wells, 1944]. В приборе были смонтированы усилительные схемы и модулирующие устройства. При проведении радиоактивного каротажа фирма использовала стандартное оборудование электрического каротажа. Обычная глубина исследований в то время составляла 1200—2000 м.

По измерениям естественной радиоактивности горных пород методами радиоактивного каротажа в США в 40-х годах в некоторых работающих и заброшенных скважинах были выявлены не замеченные ранее продуктивные горизонты, которые вводились в эксплуатацию и давали нефть. Проведение радиоактивного каротажа во время бурения скважин давало дополнительные данные о параметрах пластов, что помогало более четко и уверенно выявлять залежи нефти и глинистые их покрывки.

Методы и приборы радиоактивного каротажа нефтяных скважин непрерывно совершенствовались на основе быстро развивающейся техники. В качестве индикаторов излучения уже в 50-х годах в США стали широко применять сцинтилляционные счетчики, несколько позднее такие счетчики начали использоваться в советских приборах радиоактивного каротажа. Сцинтилляционные счетчики позволяли осуществить также спектроскопию гамма-излучения при более простой схеме без дополнительных устройств стабилизации.

В 1952—1954 гг. американская фирма "Мак-Кулоу", первой применившая сцинтилляционные счетчики в приборах, провела радиоактивный каротаж в основных нефтедобывающих районах и на разведочных площадях в США и Канаде [Шаллер, 1956]. Диаграммы записи естественного гамма-излучения давали некоторое представление о мощности пересеченных скважиной пластов и их литологическом составе. По минимальным значениям четко выделялись чистые известняки и песчаники, по максимальным — глины. На записях можно было заметить увеличение глинистости известняков и песчаников по отношению к чистым породам, т.е. гамма-каротаж давал дополнительные надежные материалы для корреляции горизонтов и пластов на данном месторождении.

Кроме того, гамма-каротаж давал возможность более уверенно определять глубины для перфорации стальной колонны, закрепляющей стенки скважины, а также выявлять места поврежденных стенок скважин и скопления в нишах глинистого раствора.

Экономический эффект от использования методов гамма-каротажа на американских нефтяных месторождениях был получен главным образом за счет добычи дополнительной нефти из пропущенных горизонтов или недостаточно обработанных старых, иногда заброшенных скважин. По результатам радиоактивного каротажа было вновь введено в эксплуатацию большое количество нефтяных скважин, пробуренных в основном до середины 20-х годов. В то время еще не применялся электрический каротаж, а документация составлялась на основе исследования кернов. Кроме того, были введены в строй скважины и даже отдельные горизонты, в которых хотя и проводился электрический каротаж во время бурения, но по тем или иным причинам данные оказались неполными.

По данным Комиссии по атомной энергии США, получаемая нефтяной промышленностью США ежегодная экономия от применения гамма-каротажа составляла по стране в 1957—1958 гг. от 16 до 24 млн долл. [Мотт, Этингер, 1961]. Комиссия отмечала также, что внедрение методов радиоактивного каротажа представляет наиболее важную отрасль мирного использования ядерной энергии.

Создание первого гамма-метода исследования нефтяных скважин в СССР и ускоренное развитие его в США явилось первым промышленным применением ядерной физики в нефтяной промышленности.

3.4. ПЕРВЫЕ НЕЙТРОННЫЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ НЕФТЯНЫХ И РУДНЫХ СКВАЖИН

Впервые изучение возможностей применения методов нейтронной физики при исследованиях горных пород в скважинах было выполнено и опубликовано известным физиком Б.М. Понтекорво [Pontecorvo, 1941]. Тот факт, что именно физик, весьма далекий по своим научным интересам от постановки подобных задач, оказался в состоянии разрешить важную практическую задачу изучения вещественного состава горных пород, не мог быть просто счастливой случайностью. Безусловно, решающее значение имел опыт научно-исследовательской работы в физической лаборатории и тот подъем, который царил в физических лабораториях в 30-х годах.

Исследованиями превращений вещества под воздействием радиоактивных излучений в то время занимались многие физики в Италии, Франции, Англии и других странах. В римской школе физиков Э. Ферми, где работал в то время Б. Понтекорво, занимались изучением нейтронов, поскольку, как считал Э. Ферми, "они не имеют заряда, должны особенно эффективно образовывать радиоактивные элементы" [Понтекорво, 1955]. Э. Ферми со своей ответственностью начал со своими учениками систематическую бомбардировку почти всех существующих элементов. Неожиданно он обнаружил вызванное нейтронами увеличение радиоактивности в водородсодержащих веществах, являющихся аномальными замедлителями нейтронов с большими энергиями.

Видимо, именно эти обстоятельства помогли Б. Понтекорво, переехавшему в США и начавшему работать в нефтедобывающей



Б. Понтекорво [слева] и Э. Ферми на экскурсии в Альпах во время работы международной конференции по физике в Комо, 1949 г.

компании, начать облучение нейтронами горных пород с целью выявления водородсодержащих (нефтеносных и водоносных) пластов и горизонтов в нефтяных скважинах.

Интересно отметить, что под влиянием успехов нейтронной физики примерно в те же годы, вернее, на год или два раньше в СССР также физиком была высказана идея о возможности практического использования измерений взаимодействия нейтронов и горных пород нефтяных месторождений. Речь идет о предложениях профессора Я.Г. Дорфмана, работавшего в 1938—1940 гг. в Азербайджанском филиале Академии наук СССР [Ильина, 1978]. Научные организации старейшего центра нефтедобывающей промышленности страны, находившиеся в Баку, всегда в той или иной степени обязаны были принимать участие в разрешении задач бурения и добычи нефти. Поэтому Я.Г. Дорфман занимался вопросами применения методов физики в геологии нефти. Он так же, как позднее Б.М. Понтекорво, пришел к заключению о возможности выявления нефтеносных и водоносных пластов по содержанию в них водорода при облучении пород нейтронами и последующем измерении вызванной нейтронами искусственной радиоактивности. Предложения Я.Г. Дорфмана были обсуждены и одобрены А.Ф. Иоффе и И.В. Курчатовым, но получить необходимые ассигнования на проведение модельных работ ему не удалось.

В более благоприятных условиях начинал работать Б.М. Понте-

корво. В фирме "Вел Сервейз" ранее проводились исследования естественной радиоактивности горных пород на моделях и в нефтяных скважинах, уже была разработана соответствующая аппаратура. После отработки прибора гамма-каротажа и передачи его для производственных коммерческих измерений, как это было показано в предыдущем параграфе, фирма продолжала работы по применению методов ядерной физики для исследований нефтяных скважин.

В короткий срок Б.М. Понтекорво провел в лаборатории "Вел Сервейз" серию облучений горных пород нейтронами с целью выявления водородсодержащих (нефтеносных и водоносных) пластов и горизонтов. Вскоре ему удалось разработать метод и создать соответствующую аппаратуру, измеряющую не естественную радиоактивность горных пород, а их реакцию на облучение нейтронного источника прибора. Новый метод был назван нейтронным каротажем. Прибор нейтронного каротажа по внешнему виду мало отличался от прибора гамма-каротажа. Это был стальной цилиндр с наружным диаметром 5,5 дюймов (14 см) и длиной 7 футов (213 см).

Описание нового метода и прибора было опубликовано в сентябре 1941 г. в журнале "Oil and Gas Journal". Б.М. Понтекорво дал краткое описание метода и полученные первые результаты его опробования в скважинах в районе Оклахома-Сити, причем по одной из скважин для сравнения дана еще и кривая сопротивлений [Pontecorvo, 1941]. В прибор нейтронного каротажа входили: источник излучения (радий плюс беррилий) с защитным экраном, ионизационная камера и усилитель. Защитный экран должен был предохранять измерительную часть от прямого воздействия источника излучений. Избежать полностью попадания излучений источника в приборе не удалось и поэтому рекомендовалось эту часть излучения рассматривать в качестве постоянной составляющей прибора и учитывать при интерпретации полученных данных.

Нейтронный каротаж проводился с помощью стандартного скважинного оборудования, применяемого в США. Записи нейтронного и электрического каротажа давали возможность для хорошей корреляции горизонтов по этим кривым. Кривые нейтронного каротажа по сравнению с электрическим оказались более дифференцированными, что позволяло различать и выявлять пласты, которые до того времени не могли быть обнаружены никакими другими способами.

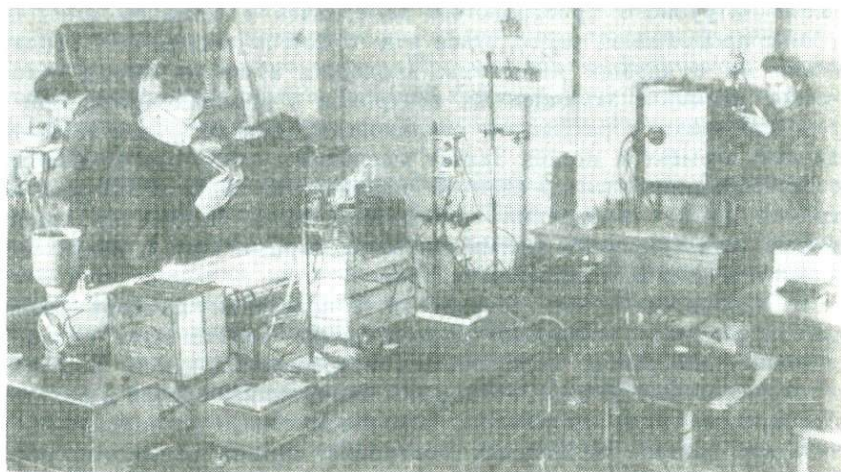
Автор метода нейтронного каротажа Б.М. Понтекорво на основе лабораторных исследований и скважинных испытаний предполагал, что новый метод должен давать возможность: отличать известняки от песчаников; легко выделять отдельные разности терригенных отложений; проводить на новой физической основе более точную корреляцию продуктивных горизонтов и использовать данные при определении содержания флюида в породах. Исходя из этого нейтронный каротаж рекомендовалось применять для исследований месторождений, продуктивные горизонты которых сложены известняками и доломитами, в месторождениях с соляными куполами, как,

например, в Западном Техасе, а также во всех случаях, когда методы электрического каротажа оказываются безрезультатными.

Метод нейтронного каротажа с использованием воздействия искусственного источника излучений на горные породы заинтересовал многих физиков. Так, Э. Ферми при встрече с Б. Понтекорво в Чикаго в 1942 г., ознакомившись с работами в области нейтронного каротажа, высказал ряд идей о возможных путях воздействия на горные породы с целью изучения их состава [Понтекорво, 1974]. Интерес к нейтронному каротажу как действенному приложению методов ядерной физики в практической разведке проявили и советские физики И.В. Курчатов, Г.Н. Флеров, Л.С. Лейбензон.

В Советском Союзе разработка первых методов нейтронного каротажа несколько задержалась. Во время Великой Отечественной войны в 1942—1943 гг. продолжались работы по доводке прибора гамма-каротажа для регистрации естественного гамма-излучения горных пород. Тогда же впервые приступили к освоению нейтронного гамма-каротажа. Работы, проводившиеся в Радиовом институте и ЦНИЛГеофизика в 1942—1947 гг., однако, не привели к созданию прибора для промышленного использования на нефтяных месторождениях СССР. Только после организации при Московском нефтяном институте специальной лаборатории по использованию достижений ядерной физики и объединения усилий удалось найти правильные пути к решению проблемы создания аппаратуры нейтронного каротажа. Прежде чем приступить к проектированию аппаратуры, требовалось провести ряд физических теоретических и экспериментальных исследований и получить ответы на следующие вопросы. Какой метод регистрации радиоактивных излучений более эффективен для выделения водородсодержащих пород? Каково должно быть допустимое соотношение между измеряемым эффектом облучения горных пород и общим фоном их естественной активности? Какими должны быть мощность источника излучений, размеры фильтра, расстояние между индикатором и источником излучений и другие технические параметры прибора, определяемые на основе теоретических расчетов распространения излучений в различных средах, и взаимодействия пород и излучений?

В спецлаборатории Московского нефтяного института, возглавляемой профессором кафедры подземной гидравлики Б.Б. Лапуком, научным консультантом по ядерной физике был Георгий Николаевич Флеров (академик с 1968 г.). Первые экспериментальные и теоретические исследования и разработка приборов проводились под руководством известного физика Л.С. Полака. На простейшей лабораторной установке Л.С. Полак получил первые экспериментальные зависимости интенсивности потока вторичных гамма-квантов пород от их пористости и записал фон естественной активности образца. Радиоактивность детекторной пластинки измерялась счетчиками Гейгера—Мюллера, для измерений бета-излучения было предусмотрено использование бета-спектрографа. По измеренной интенсивности излучения перед образцом можно было приблизительно судить о ко-



Спецлаборатория Московского нефтяного института, 1948 г.



Сотрудники спецлаборатории Московского нефтяного института, 1948 г.

Сидят (слева направо): А.А. Балясов, Л.С. Полах, А. Иванова, Е.А. Раевская, Г.Н. Дарвойд;
стоят: И.Н. Тареев, В.К. Сибуров, А. Крутиков

личестве замедляющих элементов (водорода, хлора и др.), входящих в состав исследуемого пласта.

В результате физических исследований в лаборатории процесс взаимодействия нейтронов с горными породами в общем виде представлялся следующим образом. Излучаемые источником (радий плюс

бериллий) быстрые нейтроны проникают в горную породу через стенку прибора, стальную обсадную колонну и цементное заполнение затрубного пространства. Замедляясь в ближней зоне, нейтроны продолжают замедляться и в горной породе за счет столкновений их с ядрами элементов, входящих в состав пород. Хаотическое движение замедленных нейтронов в породах происходит до тех пор, пока в результате столкновений они не будут захвачены ядрами элементов пород. Захват медленных нейтронов сопровождается испусканием гамма-квантов. Вероятность захвата быстрых нейтронов до их замедления чрезвычайно мала. Индикатор прибора может регистрировать гамма-излучение горных пород, испускаемое в момент захвата медленных нейтронов.

В лаборатории при разработке конструкции прибора сначала рассматривалась возможность регистрации только двух видов излучений: нейтронов, поступивших непосредственно от источника, т.е. тех, которые не были поглощены окружающей средой и фильтром прибора, а также вторичного гамма-излучения, возникшего в результате захвата медленных нейтронов ядрами элементов пород. В том и другом случае интенсивность приходящего к индикатору излучения при заранее выбранном расстоянии от источника до индикатора зависит от мощности источника (она известна) и свойств горных пород, в частности их водородсодержания, которые и требуется определить.

В зависимости от типа индикатора, чувствительного либо к нейтронам (борная камера, счетчик и т.п.), либо к гамма-излучению (разрядный счетчик), в то время были возможны два варианта нейтронных методов исследования нефтяных скважин.

С конца 40-х годов принято называть методы измерения, основанные на регистрации тепловых нейтронов, нейтронным каротажем (НК), а методы измерения гамма-квантов — нейтронным гамма-каротажем (НГК).

Метод НК давал возможность, как это было выяснено еще в спецлаборатории Нефтяного института, выявлять зависимость интенсивности излучения от содержания в горных породах хлора, натрия, бора и других поглощающих элементов. При исследованиях в нефтяных скважинах, обычно заполненных жидкостью (водой или нефтью), на результаты измерений НК более сильно влияло водородсодержание скважины, а не окружающей горной породы.

При использовании метода НГК наибольшее влияние на гамма-излучение должно оказывать водородсодержание порового пространства горных пород. Конечно, при этом сказывались и некоторые свойства самих пород, геометрические и технические параметры конструкции измерительного прибора и индикатора, мощность источника излучений, размеры и качество фильтров и т.д.

По данным НК и НГК предполагалось получить представление об общем характере зависимости плотности тепловых нейтронов: от расстояния между источником и индикатором; от диаметра фильтра парафинового блока, окружающего индикатор и источник; распределения интенсивности вторичных гамма-квантов в породах

с различной пористостью; вторичного гамма-излучения от интенсивности излучения и пористости горных пород. Однако количественная интерпретация полученных данных была сильно затруднена из-за неясности происходящего при измерениях процесса взаимодействия нейтронов и горных пород. При разработке физических основ процесса необходимо было с большой точностью учитывать не только многообразие горных пород, но и их неоднородность в естественном залегании.

Самые общие принципы теории нейтронного каротажа были изложены создателем этого метода Б.М. Понтекорво в 1941 г. Результаты его и последующих исследований в скважинах достаточно убедительно показали наличие связи между интенсивностью регистрируемого излучения (как нейтронов, так и гамма-квантов) и особыми "нейтронными" свойствами горных пород стенок скважин. Имеются в виду прежде всего замедляющие и диффузионные свойства пород, влияющие на изменение среднего пробега быстрых нейтронов от источника до их полного замедления и величину пути, пройденного медленными нейтронами до захвата их ядрами элементов пород.

Первая попытка у нас в стране дать расчетную формулу распределения плотности тепловых нейтронов была сделана Г.В. Горшковым и Н.М. Лятковской на основе упрощенной модели [Горшков, Лятковская, 1946]. Через два года была опубликована работа Ю.П. Булашевича, исследовавшего распределение нейтронов в бесконечной однородной среде от точечного источника [Булашевич, 1948]. Эти первые две статьи советских ученых представляли определенный вклад в теорию.

В иностранной печати до 1951 г. не было опубликовано систематического и полного изложения теории и сущности физического процесса, протекающего в горных породах при бомбардировке их нейтронами. Взаимодействие тепловых нейтронов с ядрами элементов окружающей среды, как считали тогда, могло сводиться к двум конкурирующим процессам: рассеянию и захвату нейтронов. При рассеянии нейтроны могли испытывать упругое соударение с ядрами элементов пород и оставаться свободными, при захвате нейтроны теряют самостоятельное существование. И в том и в другом случае можно записать реакцию горных пород на облучение тепловыми нейтронами и на этом основании судить о литологическом составе этих пород. Во многих работах теоретическая часть ограничивалась принципиальной схемой взаимодействия излучения с ядрами элементов пород, предполагаемой реакцией взаимодействия.

В середине 50-х годов некоторые вопросы интерпретации нейтронного каротажа разрабатывались Ф. Расселом, К. Гудменом и Г. Фионом. В СССР сложными вопросами моделирования физических процессов взаимодействия нейтронов с горными породами и решением сложных математических задач успешно занимались С.А. Денисик, И.Г. Дядькин, С.А. Кантор, Д.А. Кожевников, В.Е. Лебедев, А.Л. Поляченко, Р.А. Резванов, А.И. Холин, К.И. Якубсон и другие ученые геофизики.

Одновременно с разработкой теории к концу 40-х годов в СССР было создано три модификации станций радиоактивного каротажа с автоматической регистрацией данных непосредственно на нефтяных скважинах. После широкого их испытания с 1951 г. автоматические станции начали серийно выпускаться заводами Министерства нефтяной промышленности. В том же году партии радиоактивного каротажа были организованы во многих нефтедобывающих районах. К концу 1951 г. объем исследований, проведенных 11-ю партиями, составлял около 600 тыс. пог. м скважин, в том числе три четверти измерений проведено методом ГК, а одна четверть — методом НГК.

В Башкирии, Краснодаре, Куйбышеве, Саратове, Азербайджане специальные тематические партии радиоактивного каротажа проводили исследования особенностей строения нефтеносных площадей, уточнения методик измерений и интерпретации данных применительно к этим особенностям районов. Эти партии представляли собой научно-производственную единицу, осуществляющую как научный поиск, так и производственные работы.

Существенную помощь методы радиоактивного каротажа оказали при восстановлении геологической документации на нефтяных промыслах освобожденных районов Кубани, Грозного, Западной Украины. Методы радиоактивного каротажа широко применялись на нефтепромыслах Азербайджана для выявления пропущенных ранее по тем или иным причинам продуктивных пластов и горизонтов.

В начале 50-х годов началась разработка разновидностей методов гамма- и нейтронного каротажа.

Одной из разновидностей гамма-методов был метод рассеянного гамма-излучения или гамма-гамма-каротажа (ГГК), основанный на измерениях интенсивности рассеянного породой излучения гамма-квантов. Идея метода возникла как практическое приложение известного положения ядерной физики о пропорциональности плотности вещества количеству электронов, рассеивающих гамма-излучение в единице объема. Первые измерения методом ГГК в нефтяных скважинах были проведены в 1950—1951 гг. (в США Б. Бушем, Х. Фаулем, В. Титтлом; в СССР — А.А. Коржевым, Е.М. Филипповым и др.). Источником гамма-излучения служил кобальт-60. Во время измерений поток гамма-квантов источника прибора вступает во взаимодействие с элементами горных пород. Поскольку число электронов, находящихся в элементах горных пород, пропорционально плотности породы, количество взаимодействий гамма-квантов источника с элементами породы будет тем больше, чем плотнее порода. Поэтому на достаточно большом расстоянии от источника число поступивших на индикатор и зарегистрированных им гамма-квантов будет для плотных пород меньше, чем для рыхлых.

Методом ГГК могли решаться как общие, так и частные задачи исследования нефтяных скважин, в том числе, например, определение плотности горных пород разреза, а также пористости, если минералогическая плотность сохраняется неизменной. Особенно эффективным методом ГГК оказался для разрезов, сложенных слабо-

сцементированными породами, содержащими газ при невысоком давлении. ГГК успешно применялся для решения частных задач: определения высоты подъема цемента в затрубном пространстве, распределения цемента и установления степени его разрушения, положения обсадной колонны и степени ее износа, мест притока жидкости в скважину и других параметров технического состояния скважин. Первые образцы приборов для метода ГГК были изготовлены в 1953 г. в США фирмой "Мак-Кулоу", а в СССР — во ВНИИГеофизика и в тресте Башнефтегеофизика в 1955—1957 гг.

Существует много разновидностей метода ГГК для исследований как нефтяных, так и рудных скважин.

Так, в те же годы французской фирмой "Шлюмберже" был разработан метод ГГК скомпенсированной плотности, учитывающей наличие глинистой корки на стенках скважин, для чего в приборе предусмотрен специальный компенсационный зонд с двумя индикаторами. Разрабатывались методы ГГК, дающие возможность выделять те или иные элементы в составе горных пород. К ним относятся предложенные в 1957 г. в СССР Г.М. Воскобойниковым селективный гамма-гамма-каротаж (СГГК или ГГК-С) и спектрометрический селективный гамма-гамма-каротаж (ССГГК), предложенный Е.М. Филипповым. При СГГК применяется источник гамма-квантов малой энергии и специальные индикаторы, а регистрируется в основном мягкая компонента рассеянного гамма-излучения. При ССГГК измеряются и интенсивность и энергия рассеянного гамма-излучения в области низких энергий, т.е. изучается также спектр рассеянного гамма-излучения. В качестве источников гамма-квантов малой энергии применялись естественные изотопы ^{73}Sc , ^{137}Cs , ^{203}Hg и др. При измерениях с такими источниками излучений преобладающее значение во взаимодействии источника со средой будет иметь фотоэффект, резко возрастающий (почти в 4 раза) при взаимодействии с более тяжелыми ядрами. По спектрам ССГГК можно выделять минимумы, характерные для каждого элемента, присутствующего в породе.

Развитие нейтронных методов каротажа скважин шло по пути выделения из общего процесса взаимодействия нейтронов с породами какой-либо его части: 1) упругое столкновение, в результате которого нейтрон теряет часть первоначальной энергии; 2) неупругое рассеяние с испусканием гамма-квантов, при котором также теряется энергия нейтронов; 3) захват нейтронов ядрами элементов пород с образованием радиоактивного изотопа и др. При этом учитывалось, что процесс замедления нейтронов зависит от свойств ядер элементов, т.е. от химического состава пород; время диффузии нейтронов в породах зависит от наличия в породах элементов, ядра которых имеют большое сечение захвата нейтронов (хлор, бор, ртуть, редкие земли). Эти процессы достаточно четко разделены во времени, и, следовательно, при их регистрации можно выявить происходящие ядерные реакции.

Во время облучений пород нейтронами в результате ядерных реакций энергетическое, временное и пространственное распределе-

ния нейтронов и вторичного гамма-излучения зависят от свойств элементов, входящих в состав пород, а следовательно, от химического состава горных пород. Поэтому именно нейтронные методы, связанные с изучением элементного состава пород, стали основными методами в объединенной дисциплине — ядерной геофизике.

Среди разработанных впоследствии различных нейтронных методов можно выделить следующие: нейтронные методы по тепловым и надтепловым нейтронам, нейтронные гамма-методы, группу нейтрон-нейтронных методов по тепловым и надтепловым нейтронам, методы наведенной активности и нейтронно-спектрометрические методы и др.

Создание большого количества нейтронных и гамма-методов для исследований нефтяных месторождений было вызвано необходимостью с достаточной точностью решать очень сложные задачи дистанционного определения состава пород в разрезе скважин по косвенным данным. При создании ядерно-физических методов возникали трудности, можно сказать, тройного порядка. Во-первых, следовало определить физическую основу метода выявления того или иного параметра пород. Во-вторых, преодолеть затруднения в выборе необходимого источника излучений и создании прибора, который должен работать в условиях повышенных температур, давлений, агрессивной среды, а также быть малогабаритным. В-третьих, весьма трудоемкой и требующей глубоких знаний физики и геологии является разработка теории и интерпретации данных метода с учетом химически сложной, разнообразной и неоднородной среды горных пород.

Нейтронные и гамма-методы, помимо широкого применения в нефтяной промышленности, во время второй мировой войны начали применяться в горных работах при добыче урана. Еще в 1943 г. Б. Раевский предложил использовать гамма-каротаж для исследований алмазных буровых скважин [Rajewsky, 1943]. Малогабаритная аппаратура была создана в лаборатории при Чикагском университете и испытана в Колорадской ураноносной области [Фаулер, 1956]. В последующие несколько лет гамма-каротаж широко применялся на урановых рудниках в Южной Африке, Канаде, а позднее — во Франции и Великобритании. Для каротажа скважин рудных месторождений обычно применялись счетчики Гейгера—Мюллера, чувствительность которых оказалась вполне достаточной для обнаружения урана. Гамма-каротаж с успехом применялся при количественных исследованиях не только урана, но и ураноносных фосфатов и калиевых минералов. Сцинтилляционные счетчики использовались в скважинах большого диаметра, когда общая активность низкая и нет подозрений на присутствие пород, подобных ураноносным рудам. В таких случаях с помощью сцинтилляционного спектрометра в скважине можно различить и выделить уран, торий и калий.

Радиоактивный каротаж рудных скважин в некоторых случаях оказался полезным и для оконтуривания рудных тел. Так, по данным американской печати, при исследованиях карнититового рудного тела на Колорадском плато были отмечены радиоактивные аномалии на некотором расстоянии от рудных залежей. Эти аномалии могли быть связаны с переносом радона и радия грун-

товыми водами из зоны оруденения. Статистическое изучение такого типа аномалий, по данным Г. Фаулера, показало возможность использования гамма-каротажа буровых скважин, расположенных на больших расстояниях друг от друга, для оконтуривания площадей, в которых можно производить сплошное бурение неглубоких разведочных скважин [Faul, 1954].

Нейтронный и гамма-каротаж рудных скважин широко применяется при разведке солей калия, а также для оценки содержания влаги и плотности почвы [Lane et al., 1953]. Ядерные методы определения плотности почвы и содержания влаги оказались более точными и более простыми, чем ранее применявшиеся методы [Фаулер, 1956].

Разнообразие применяемых в 50-х годах гамма- и нейтронных методов можно считать показателем популярности и перспективности ядерно-физического направления исследований горных пород, с одной стороны, и показателем их некоторой слабости — с другой. По существу, разработка каждого нового метода была вызвана невозможностью однозначно решать поставленные геологические задачи техническими средствами того времени. Принимаемые за основу того или иного метода модели физического процесса и попытки теоретического описания отдельных его сторон последовательно приближали исследователей к познанию реальных процессов, происходящих в горных породах.

Ядерно-физические методы того времени, базирующиеся на различии в содержании поглотителей и замедлителей нейтронов, например хлора в нефти, в пластовой воде, не отличались высокой эффективностью, хотя каждый из них еще и еще раз подтверждал большие потенциальные возможности ядерно-физического направления исследований горных пород.

Анализ факторов, влияющих на эффективность ядерно-физических исследований в нефтяных и рудных скважинах, показал, что аппаратура с изотопными источниками излучений обладала недостаточной разрешающей способностью. Применяемые источники $\text{Po}+\text{Be}$ и $\text{Ra}+\text{Be}$ давали поток нейтронов с энергией, не превышающей 10—11 МэВ. Постепенное повышение интенсивности применяемых источников излучений требовало усиления специальных мер по технике безопасности при их использовании, хранении и транспортировке.

Можно сказать, что на этом этапе развития, когда стали ясны потенциальные возможности нового направления, а уровень техники задерживал развитие практических приложений, ядерно-физические методы находились в некоем кризисном положении. Начались поиски новых типов скважинных источников излучений достаточно большой мощности, которые обеспечивали бы решение поставленных геологических задач, не увеличивая опасности работы с ними. Эти поиски в конце концов привели к идее создания искусственных управляемых источников излучений — генераторов нейтронов.

Первые публикации об управляемых источниках излучений появились в зарубежной печати в середине 50-х годов. Тогда же приступили к созданию генераторов нейтронов и в Советском Союзе.

Разработка достаточно мощных генераторов нейтронов малых размеров оказалась сложной технической задачей. Дело в том, что ускоритель высоких энергий 10—14 МэВ должен помещаться в трубу диаметром не более 100 мм, длиной не более 2—4 м и работать в условиях агрессивной среды (нефть, соленая пластовая вода), высоких давлений (сотни атмосфер) и высоких температур (60—150°С).

Первые скважинные управляемые источники излучений — генераторы нейтронов были разработаны в середине 50-х годов в США и в СССР (под руководством Г.Н. Флерова). В генераторе нейтронов, находящемся в скважине, по команде с земной поверхности создавалось стационарное поле нейтронов и измерялась реакция горных пород на облучение. При измерениях обеспечивалась большая безопасность работы, поскольку источник нейтронов существовал только в момент измерений, находясь на большой глубине, вдали от оператора. Однако существенно повысить эффективность нейтронных методов с помощью генераторов нейтронов, создающих стационарное поле, не удавалось. Кроме того, несмотря на неуклонное повышение энергии излучений генератора, не удавалось избавиться от вредных влияний ближней зоны на измерения.

Более того, теоретические работы того времени, хотя и немногочисленные, доказали неоднозначность трактовки результатов измерений. Было показано, что поля тепловых нейтронов и вторичного гамма-излучения являются сложной функцией многих, не всегда известных нам процессов, протекающих в условиях реальных скважин при многообразии сочетаний в ней горных пород. Требовалось искать иные пути использования ядерно-физических методов, поскольку было ясно, что эти методы могут обеспечить возможность дистанционного определения элементного состава пород, а следовательно, и более надежное изучение литологии погребенных пород.

3.5. ЗАРОЖДЕНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫХ НЕЙТРОННЫХ МЕТОДОВ РАЗВЕДКИ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

Новое направление использования ядерно-физических методов в разведке полезных ископаемых связано с предложением советского физика Г.Н. Флерова об изучении распределения нейтронов не только в пространстве горных пород, но и во времени [Алексеев и др., 1960]. Предполагалось создать пульсирующей, импульсный тип управляемого источника нейтронов. При обсуждении схемы импульсного нейтронного метода с Б.Г. Ерозолиским выяснилось, что импульсный вариант метода может обеспечить возможность увеличивать (теоретически неограниченно) и глубинность исследований и различие показаний прибора против пластов разного элементного состава [Ильина, 1978].

Предварительно была проведена проверка физических основ нового метода с помощью специальных нейтронных генераторов Физического института. При этом выяснилось, что возможны два

вида регистрации: по интенсивности тепловых нейтронов (ИННК) и по интенсивности гамма-квантов, возникающих при захвате нейтронов ядрами элементов пород (ИНГК). Импульсный метод давал возможность выделять многие ядерные реакции при замедлении быстрых и диффузии медленных нейтронов, протекающих в разное время. Было показано, что неупругое рассеяние продолжается от 10^{-9} до 10^{-8} с после испускания источником быстрых нейтронов; резонансное поглощение медленных нейтронов протекает более медленно от 10^{-6} до 10^{-4} с; диффузия тепловых нейтронов — от 10^{-4} до 10^{-2} с, а распад активирующих ядер еще медленнее. Таким образом, вполне возможно осуществить раздельную регистрацию указанных ядерных взаимодействий и получить данные о различных свойствах вещества, облученного нейтронами.

Процесс распространения нейтронов в горной породе или другой среде носит диффузионный характер, причем скорость распространения нейтронов определяется коэффициентом диффузии тепловых нейтронов, связанным с наличием в среде ядер, сильно рассеивающих нейтроны, прежде всего ядер водорода [Ерозолимский и др., 1958].

Позднее были уточнены факторы, влияющие на процесс взаимодействия нейтронов с горными породами, и введены параметры, связанные с влиянием состава горных пород. Помимо коэффициента диффузии и среднего времени жизни нейтронов, были введены понятия длины и времени замедления быстрых нейтронов в пласте.

Было установлено, что величины измеряемых или вычисленных на основе измерений параметров зависят от химического состава окружающих пород, структурного размещения компонентов, коллекторских свойств, характера насыщающей жидкости (вода, нефть). Оказалось, что, начиная с некоего критического содержания водорода в пласте, длина замедления быстрых нейтронов и коэффициент диффузии пласта зависят от концентрации водорода в пласте. Время жизни тепловых нейтронов, как было установлено, зависит от объемного содержания хлора, бора, ртути.

Таким образом, при изучении пространственно-временного рас-



Академик Г.Н. Флеров на XIII Международном конгрессе по истории науки в Москве, 1971 г.

пределения нейтронов в горных породах методами ИННК удалось связать некоторые ядерные величины, полученные и измеренные в процессе взаимодействия нейтронов с породами, с составом горных пород. Эти величины в дальнейшем получили название нейтронных параметров горных пород. Понятие "нейтронные параметры пород" с конца 60-х — начала 70-х годов широко используется в научной и технической литературе.

Однако знания нейтронных параметров оказалось недостаточно при решении ряда практических задач. При исследованиях нефтяных месторождений важно знать не только общее водородсодержание (вода плюс нефть) пластов и горизонтов, но и, главное, получить ответ на вопрос — нефть или вода содержится в порах того или иного конкретного пласта. Поэтому в 50-х годах в СССР наибольшее внимание уделялось совершенствованию ядерно-физических методов, помогающих получить достоверные сведения о характере насыщающей исследуемый пласт жидкости, а также о количественных характеристиках пористости пластов.

Измерение нейтронных характеристик пород может дать основания для определений в первом приближении физических параметров пород. Так, соотношение алюминия, входящего в состав всех глинистых минералов, и кремния — основного породообразующего элемента осадочных пород — дает основания судить о глинистости пород [Кожевников, 1974]. Первые расчеты среднего времени жизни нейтронов с различным соотношением между алюминием и кремнием показали, что глинам соответствует меньшее их отношение, алевролитам и песчаным породам — значительно большее. При этом у пород, содержащих глинистый материал, время жизни нейтронов в минеральном скелете меньше, чем у чистых разностей. Особенно большое влияние на среднее время жизни нейтронов оказывает содержание в породах бора, калия, натрия, титана, марганца, серы, свинца, железа.

Повышенное содержание серы в карбонатных породах уменьшает время жизни нейтронов, а магния — увеличивает его. Самое минимальное время жизни нейтронов отмечено в породах, сложенных ангидритами, гипсами и глинистыми минералами. Химический состав породообразующих минералов оказывает непосредственное влияние на время жизни нейтронов и косвенное — на петрофизические свойства породы, в частности на пористость. Повышенное содержание серы в скелете породы, как правило, влечет за собой последующее увеличение отложений серы в пустотах (трещинах, кавернах, каналах) и тем самым уменьшает количество находящихся в них флюидов. От состава породообразующих элементов зависит энергетический спектр гамма-излучения. При измерениях на малых расстояниях от источника энергетическое распределение нейтронов в породе близко к распределению, образуемому от равномерно распределенных источников; на больших расстояниях происходит пространственное изменение спектра. При простой форме энергетического спектра нейтронов резонансная структура сечений элементов замедляющей среды проявляется достаточно ощутимо.

Была отмечена независимость спектра от начальной энергии нейтронов в энергетически-временном распределении нейтронов от импульсного источника излучений. На форму и энергию распределения нейтронов в основном оказывают влияние параметры взаимодействия нейтронов со средой при фиксированной конечной энергии излучений [Кожевников и др., 1971; Дядькин, Баталина, 1961].

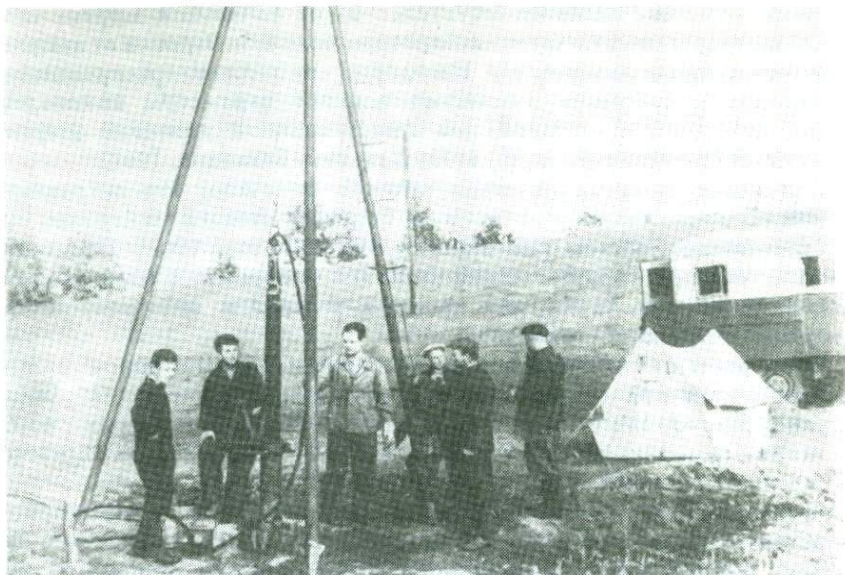
Сравнение макроскопических сечений показало, что в реакции неупругого рассеяния участвуют в большей степени нейтроны, испускаемые источником [Шимилевич, Школьников, 1962]. Предполагалось, что при упругом взаимодействии нейтронов с ядрами некоторых элементов, таких, как кремний, углерод и кислород, потеря энергии нейтронами невелика.

При расчетах нейтронных характеристик горных пород учитывались положения теории переноса нейтронов в веществе, геохимические, петрофизические и структурные особенности горных пород, а также термодинамические условия их залегания в нефтяных месторождениях и рудных телах.

В дальнейшем при разработке физических основ и совершенствовании импульсных нейтронных методов большое внимание уделялось выбору времени регистрации гамма-квантов неупругого рассеяния, поскольку в реакциях с быстрыми нейтронами проявляются индивидуальные свойства многих элементов. Почти одновременно были созданы соответствующие скважинные источники излучений.

Первые импульсные генераторы нейтронов были изготовлены в СССР в 1958—1959 гг. Прибор состоял из ускорительной трубки, индикатора нейтронов и гамма-квантов, схемы селекции излучений по энергиям, схемы записи, генератора управляющих импульсов, схемы управления работой генератора, мишени [Ерозолимский и др., 1958]. Наиболее важной частью генератора была ускорительная трубка, которая должна была обеспечить генерирование мощного потока нейтронов в сильных электрическом и магнитном полях. Разработка такой трубки, безусловно, представляла сложную техническую задачу. Например, в варианте ускорительной трубки, представлявшей запаянный стеклянный баллон диаметром 40 и длиной 300 мм, для создания необходимого поля подавалось напряжение в 100 кВ. Под действием электрического поля ионы дейтерия как бы "вытягиваются" из помещенной внутри цилиндра мишени из циркония или титана, насыщенного тритием. Происходит реакция, в результате которой освобождаются нейтроны с высокой энергией (до 14 Мэв). В первых трубках такого типа удавалось получать импульсы ионного тока длительностью 50—200 мкс при ускоряющем напряжении 120 кВ. Трудности представляло и обеспечение бесперебойной работы высоковольтного трансформатора и конденсатора, напряжение на котором было хотя и меньше, чем на трансформаторе, но все же составляло около 60 кВ.

Первый образец импульсного генератора нейтронов был испытан в 1959 г. в опытной скважине Московского нефтяного института, а затем на нефтяных промыслах Башкирии с целью опре-



Испытания советского импульсного генератора нейтронов на нефтяном месторождении Башкирии, 1959 г.

деления состава горных пород и положения водонефтяного контакта в скважинах [Алексеев и др., 1960].

Серийное производство импульсных генераторов нейтронов и ускорительных трубок для работы как в импульсном, так и в стационарном режиме было начато в СССР в 1963 г. Новые трубки постепенно заменили ампульные изотопные источники и при обязательных стационарных скважинных исследованиях. С 1961 г. начали разрабатывать ускорительные трубки разных типов как газонаполненные, так и вакуумные (искровые), которые работают только в короткоимпульсных режимах порядка 1—5 мкс. Надо отметить, что вакуумные отпаянные нейтронные трубки разрабатывались почти одновременно и в СССР и США, но в США они сначала применялись не при каротаже, а в физических экспериментах [Gow, Pollock, 1960]. Создание первых трубок и генераторов нейтронов в СССР проводилось под руководством Д.Ф. Беспалова, Б.Г. Ерозолимского, Л.Р. Войцика, Н.В. Попова и др.

Следующим важным шагом в развитии нейтронных методов была разработка в 1960—1963 гг. малогабаритного генератора нейтронов. Генератор нейтронов диаметром 42 мм с трубкой с искровым ионным источником предназначался для работы в насосно-компрессорных трубках нефтепромыслов Татарии и других районов при температуре 50—60°С.

Американские геофизические компании в начале 60-х годов также начали применять импульсные нейтронные методы [Jomans, Norkinson, 1964]. Разработанная фирмой "Велз Сервейз Инкорпорейшн"

аппаратура использовалась на нефтяных промыслах США другой фирмой — "Лэйн Велз Корпорейшн". Фирма и участники разработки получили патенты на конструкцию генератора в целом, источник высокого напряжения генератора и некоторые детали ускорительной трубки, а также на способ использования генераторов нейтронов в нефтяных скважинах.

Французская фирма "Шлюмберже" через год сообщила, что и у них создан свой генератор нейтронов с универсальной ускорительной трубкой. Несколько позднее генераторы нейтронов для исследования скважин применили и другие ведущие американские геофизические фирмы, такие, как "Мак-Кулоу", "Джерси Продакшн Резерч", "Дрессер Атлас" и др.

К началу 70-х годов были разработаны многие разновидности импульсных нейтронных методов. К ним относятся:

1) импульсный нейтрон-нейтронный каротаж (ИННК) с модификациями, основанными на измерениях тепловых нейтронов (ИННК-т), надтепловых (ИННК-нт), резонансных нейтронов (ИННК-р);

2) импульсный нейтронный гамма-каротаж радиационного захвата медленных нейтронов (ИНГК) в интегральном и спектротрическом вариантах;

3) импульсный нейтронный гамма-каротаж неупругого рассеяния быстрых нейтронов (ИНГК-ГИНР);

4) импульсный нейтронный активационный каротаж (ИНАК).

Как видно из названий, при измерениях каким-либо методом выделяется соответствующая составляющая общего ядерно-физического процесса взаимодействующая потока нейтронов с горными породами. Так, согласно Д.А. Кожевникову (1974), можно выделить неупругое рассеяние быстрых нейтронов на атомных ядрах, сопровождаемое испусканием характеристического гамма-излучения — "гамма-излучение неупругого рассеяния"; активацию атомных ядер быстрыми нейтронами; деление ядер надтепловыми нейтронами; активацию атомных ядер тепловыми нейтронами; поглощение тепловых нейтронов, сопровождаемое испусканием захватного гамма-излучения; деление тяжелых ядер тепловыми нейтронами и т.д. Эти реакции возникают в горных породах под действием нейтронного или гамма-излучения от источника, помещенного в измерительном приборе.

Изучение раздельных спектров распределения нейтронов, как указывалось выше, дает возможность определять наличие в горных породах многих элементов, таких, как углерод, кислород, кремний, железо, магний и др. Очень важно, что получаемые при импульсных нейтронных методах каротажа сведения о среднем времени жизни тепловых нейтронов, дополненные данными других геофизических методов, могут характеризовать состав пород. Целесообразно дополнять данные нейтронных методов сведениями о скоростях распространения упругих волн в породах (акустический каротаж), а в ряде случаев и об удельном электрическом сопротивлении пород (электрический каротаж) [Карус, 1972].

Разработка импульсных нейтронных методов исследования горных пород в СССР была сосредоточена в основном в лабораториях

Всесоюзного научно-исследовательского института ядерной геофизики и геохимии (ВНИИЯГГ), Московском институте нефтехимической и газовой промышленности (МИНХиГП), в филиалах Всесоюзного научно-исследовательского института геофизических методов разведки (ВНИИГеофизика), а также в ряде лабораторий других ведомств. Соответствующие работы проводились и в Уральском филиале АН СССР под руководством Ю.П. Булашевича и Е.М. Филлипова. Результаты работы этих лабораторий способствовали развитию ядерно-физического направления в разведке полезных ископаемых и выделению ядерной геофизики из общего комплекса разведочных научно-технических дисциплин.

3.6. ФОРМИРОВАНИЕ НЕФТЯНОЙ ЯДЕРНОЙ ГЕОФИЗИКИ В СССР

Одной из первых прикладных ядерно-физических дисциплин в СССР сформировалась нефтяная ядерная геофизика, ее зарождение относится к началу 20-х годов, когда впервые была проведена радиометрическая съемка сначала при поисках радиоактивной лечебной воды на Алтае, а вскоре — на Майкопском нефтяном месторождении. Открытие высокой радиоактивности нефтяных буровых вод на Ухте привлекло внимание исследователей к изучению радиоактивности именно нефтяных месторождений. По инициативе В.И. Вернадского в конце 20-х годов было начато обследование на радиоактивность нефтяных месторождений страны.

Напомним, что в середине 30-х годов на основе углубленных исследований радиоактивности горных пород в СССР В.А. Шпаком, Г.В. Горшковым, А.Г. Граммаковым и Н.М. Лятковской был создан первый производственный метод определения горных пород по их радиоактивности в разрезе нефтяных скважин, получивший, как известно, название гамма-каротажа.

Уже через два года после опубликования результатов опробования на Сызранском нефтяном месторождении метод гамма-каротажа начали активно разрабатывать и применять американские фирмы [Шаллер, 1956]. В последующие годы в США значительно усилились научные исследования в области изучения радиоактивности природных объектов и началась разработка различных модификаций гамма-каротажа и соответствующей аппаратуры. Ускорению работ способствовало участие физиков высокой квалификации, прибывших из Европы. В начале 40-х годов, помимо дальнейшего развития гамма-каротажа, в США был впервые осуществлен нейтронный гамма-каротаж [Pontecorvo, 1941], разработка которого основана на проведении достаточно тонких и сложных физических экспериментов.

В СССР в течение последующих нескольких лет из-за разразившейся Великой Отечественной войны и эвакуации научно-исследовательских институтов из Ленинграда, где проводились первые разработки, гамма-каротажем фактически не занимались. В 1942 г., несмотря на тяжелые условия военного времени, работа по созданию производственных радиоактивных методов исследования нефтя-

ных скважин возобновилась. Но в тот период усилия советских ученых оказались малоэффективными.

В 1943—1945 гг. выявилась необходимость восстановления геологической документации на освобожденных от врага нефтепромыслах для введения их в эксплуатацию, усиления добычи нефти. Полезными могли быть только радиоактивные методы, с помощью которых можно получать информацию о породах при наличии стальной обсадной колонны.

По инициативе академика Л.С. Лейбензона и профессора Б.Б. Лацука в Московском нефтяном институте в 1947 г. были организованы специальная лаборатория по использованию достижений ядерной физики в нефтяной промышленности и ученый совет по той же проблеме. В работе совета и обсуждении результатов каждого этапа разработки принимали участие академики И.В. Курчатов, Л.С. Лейбензон, члены-корреспонденты Ю.П. Булашевич и В.В. Федынский, известные физики и геофизики — Г.Р. Гольбек, В.Н. Дахнов, Б.Г. Ерозолимский, С.Г. Комаров, А.А. Коржев, Н.К. Кухаренко, В.Ф. Печерников, Л.С. Полак, Д.М. Сребродольский и многие другие. Особое значение имело участие в исследованиях будущего академика Г.Н. Флерова, создавшего научную школу по ядерной геофизике в нашей стране, а также известных физиков Л.С. Полака и Б.Г. Ерозолимского.

Благодаря правильной постановке и разрешению физической задачи взаимодействия радиоактивных излучений с горными породами, а также новой форме научного и технического сотрудничества с научными учреждениями и производственными предприятиями, лаборатории в короткие сроки удалось разработать первые гамма- и нейтронные методы исследования разрезов нефтяных скважин с изотопными источниками. Была разработана также соответствующая аппаратура, которую начали серийно выпускать заводы нефтяной промышленности.

В тот период особенно интенсивно разрабатывались и внедрялись нейтронные методы, основанные на регистрации замедлившихся нейтронов (ННК) или гамма-квантов (НГК), возникающих при захвате быстрых нейтронов ядрами элементов горных пород при облучении источником прибора. Основной вклад в разработку конструкции и схемы приборов внесли Д.Ф. Беспалов, Г.Р. Гольбек, Б.Г. Ерозолимский.

Первые приборы нейтронного и гамма-каротажа с начала 50-х годов широко применялись на нефтяных промыслах Кубани и Западной Украины, а также Башкирии и Татарии.

Дальнейшее развитие теории и усовершенствование приборов нейтронного и гамма-каротажа нефтяных скважин дали возможность создавать различные методы для решения более широкого круга задач, в том числе, например, для нейтронного активационного анализа состава горных пород в нефтяных скважинах.

В 50-х годах ученые и инженеры нашей страны и некоторых иностранных геофизических фирм приступили к созданию управляемых скважинных источников излучений. Были сконструированы первые



Группа первых советских разработчиков метода и приборов радиоактивного каротажа, 1966 г.

Слева направо: Ю.С. Шимилевич, Д.Ф. Беспалов, Б.Г. Ерозолимский, А.С. Школьников, Л.Р. Войцик

образцы генераторов, создающих стационарное поле нейтронов по команде с земной поверхности. Разработка управляемых источников излучений достаточной мощности и малых габаритов, пригодных для работы в условиях высоких температур и давлений, агрессивной среды нефтяных скважин, оказалось довольно трудной научно-технической задачей.

Потребовалось много времени для окончательной отработки конструкции скважинного генератора нейтронов. При этом Г.Н. Флеров предложил новый более общий и, как оказалось, более результативный методологический подход к изучению взаимодействия радиоактивных излучений с горными породами. Он предложил изучать эти взаимодействия не только в пространстве, но и во времени. Следует подчеркнуть решающее значение идеи Г.Н. Флерова для всего последующего развития нефтяной ядерной геофизики. Для осуществления нового подхода в скважине на глубине необходимо было создать мощный импульсный поток нейтронов.

Изучение пространственно-временного и энергетического распределения нейтронов и гамма-квантов в горных породах разреза нефтяных скважин дало основание для уточнения представлений о протекающих сложных ядерных процессах взаимодействия излучений с веществом пород в их естественном залегании. Внедрение импульсных нейтронных методов началось в 1962 г. в Татарии. Разработанные под руководством Д.Ф. Беспалова и опробованные в Татарии импульсные генераторы нейтронов стали серийно выпускаться киев-

ским заводом с 1963 г. С этого времени импульсные методы применяются для исследований многих тысяч нефтяных и газовых скважин Башкирии, Татарии, Азербайджана, Краснодар, Урала, Поволжья, Западной и Восточной Сибири, Средней Азии, Прикаспийской впадины и других районов нашей страны, а также в Польше, Венгрии, ГДР, Болгарии и других странах.

Усиленное внимание к созданию новых радиоактивных методов исследования скважин со стороны нефтяников вызвано также необходимостью осуществления контроля за ходом разработки крупных нефтяных и газовых месторождений с применением закачки воды и других вторичных методов. Начиная с 1945 г. в нефтяной промышленности нашей страны во всевозрастающих масштабах внедрялись законтурное и внутриконтурное заводнение и другие методы искусственного воздействия на пласт. Сознательное управление энергией пласта и предотвращение его обводнения могло осуществляться только при систематическом контроле за движением контура закачиваемой воды и изменением положения водонефтяных контактов в каждой скважине. На первом этапе внедрения новых прогрессивных методов разработки нефтяных месторождений применялась закачка "меченой" жидкости или газа, затем были найдены косвенные методы определения положения водонефтяного контакта по данным различных видов ядерно-физических исследований. В 70-х годах при контроле за разработкой нефтяных месторождений широко использовались импульсные и другие методы ядерной геофизики.

Импульсные нейтронные методы в 70-х годах весьма эффективно применялись с целью "доразведки" разрабатываемых нефтяных месторождений. Они дают возможность выявить пропущенные продуктивные горизонты и даже залежи и получать дополнительную нефть без капитальных затрат на бурение новых скважин и дополнительное обустройство промыслов.

К концу 70-х годов было разработано большое количество разнообразных ядерно-физических методов исследования нефтяных и газовых месторождений, а также месторождений других полезных ископаемых. Они в основном могут разделяться по виду источника возбуждения физического поля (естественное излучение ядер радиоактивных элементов горных пород и вызванное излучение под воздействием источника в приборе); по виду регистрируемого излучения (альфа-, бета-, гамма-, нейтроны и др.) или характеру изучаемого поля (методы, основанные на измерениях стационарного поля; импульсные методы, позволяющие изучать поле во времени; спектрометрические методы).

Научным и координирующим центром в разработке ядерно-физических методов исследований нефтяных месторождений является Всесоюзный научно-исследовательский институт ядерной геофизики и геохимии, организованный Ф.А. Алексеевым в 1961 г. в г. Москве и являющийся единственным в мире институтом ядерно-геофизического профиля. Институт работает много лет в контакте с академиком Г.Н. Флеровым и многими научными и производственными нефтяными, физическими и приборостроительными организациями. Научны-



Ф. А. Алексеев (1911—1978)

ми центрами, по-прежнему, остаются лаборатории Московского института нефтехимической и газовой промышленности. В Академии наук научными центрами в области новых разработок ядерно-физических методов для разведки полезных ископаемых являются Уральский институт геологии и геофизики Уральского научного центра АН СССР в Свердловске под руководством чл.-кор. АН СССР Ю. П. Булашевича, а также лаборатория под руководством Е. М. Филиппова в Институте геологии и геофизики СО АН СССР в Новосибирске.

Очень важно, что созданы и успешно работают научные и производственные центры в различных нефтедобывающих районах в системе Министерства геологии и

Министерства нефтяной промышленности СССР, в основных нефтедобывающих районах созданы также научно-исследовательские и тематические партии в производственных геологических и нефтедобывающих предприятиях.

Таким образом, в 70-х годах завершилось формирование самостоятельного ядерно-физического направления в нефтяной геофизике. Нефтяная ядерная геофизика методами ядерной физики изучает строение и элементный состав горных пород нефтяных и газовых месторождений с целью получения новых достоверных данных, необходимых для решения геологических и эксплуатационных задач добычи нефти.

В дальнейшем развитии нефтяной ядерной геофизики наиболее важным и перспективным можно считать развитие методов, обеспечивающих точное и полное определение физико-химических и петрографических параметров нефтяных и газовых пластов: пористости, проницаемости, общих и извлекаемых запасов нефти и получения других данных, необходимых для составления проектов разработки и эксплуатации нефтяных месторождений. При составлении проектов эти данные необходимы, поскольку устанавливаются сроки эксплуатации месторождения и, следовательно, должны быть определены масштабы и сроки строительства нефтепромыслов, поселков, заводов, нефтепроводов и т. п.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЯДЕРНО-ФИЗИЧЕСКИХ МЕТОДОВ В ГИДРОГЕОЛОГИИ

4.1. ОТКРЫТИЕ ВЫСОКОЙ РАДИОАКТИВНОСТИ НЕФТЯНЫХ ПЛАСТОВЫХ ВОД

С поисками радиоактивных минеральных источников для лечебных целей, проводимыми в первые два десятилетия XX в., и формированием радиобальнеологии связано открытие высокой радиоактивности нефтяных пластовых вод. Это открытие и последующее изучение радиоактивности глубинных вод и возможных путей их обогащения радиоактивными элементами привели к формированию другой важной дисциплины — радиогидрогеологии.

Высокая радиоактивность пластовых вод впервые была обнаружена в водах Гейдельбергской скважины во время бурения. С самого начала бурения этой разведочной скважины предусмотрительные владельцы проводили систематические химические анализы состава поступающих на поверхность вод. Исследовалась и их радиоактивность с целью возможного их использования. Предполагалось, что если в процессе бурения будут вскрыты пласты с радиоактивной водой, то сразу же на месте возможно будет организовать курортное лечение.

В начале бурения поступающая из верхних горизонтов вода была самой обычной, с ничтожно малым содержанием радия. Неожиданно на глубине 998 м после пересечения битуминозной толщи и сбросовых трещин появился сильный приток горячей минерализованной воды. В ее сухом остатке, по анализу А. Беккера [Becker, 1923], содержалось 8,8% радия, а в самой воде $(1,74 \div 1,79) \cdot 10^{-10}$ г/л, т.е. почти в тысячу раз больше, чем в других известных природных водах. Сильнорadioактивным оказался и сопутствующий газ, в котором он установил также присутствие 0,65% гелия.

Открытие высокорadioактивной природной воды, поступающей из неизвестного глубинного источника, сразу привлекло внимание и практиков и ученых. Практики предлагали использовать воду в разбавленном виде для лечения больных, а в виде рассолов — для организации промышленного извлечения радия, который в то время уже представлял большую ценность. Ученых заинтересовало происхождение столь необычного источника вод. Для тех и других преж-

де всего необходимо было выявить источники и определить запасы воды.

По поводу происхождения высокорadioактивных вод известный немецкий геолог В. Саламон высказал предположение о возможной связи пластовой воды с расположенным вблизи скважины месторождением радиоактивных руд. Подвижные пластовые воды, по его мнению, могли постепенно вымывать радий из пород этого месторождения и поступать на поверхность [Salamon, 1924]. Только благодаря счастливому стечению обстоятельств — закладке буровой скважины именно в этом месте — удалось обнаружить, считал В. Саламон, столь уникальное и, вероятно, неповторимое явление.

Такое объяснение совпадения случайных обстоятельств для обогащения пластовых вод, предложенное В. Саламоном, было принято в то время без каких-либо возражений. Авторитет В. Саламона был настолько велик, что в последующие несколько лет никто даже не попытался проверить содержание радионуклидов в составе вод других месторождений. Высокая радиоактивность пластовых вод Гейдельберга оставалась долгое время единственным в своем роде явлением. Однако неожиданное открытие высокой радиоактивности пластовых вод в СССР поколебало почти установившееся в науке того времени мнение об уникальности природного феномена в Гейдельберге. Это произошло в начале 20-х годов, когда в СССР проводилось изучение химического состава нефтяных вод для наблюдения за ходом нефти и контроля за обводнением пластов. В те же годы были организованы экспедиции для поисков радиоактивных минералов и руд, выявлялись их месторождения, собирались данные о радиоактивности территории страны для составления карты радиоактивности. Экспедиции, направленные в разные районы страны, изучали не только радиоактивность горных пород, но и выявляли источники редких газов. Особенно тщательно исследовались условия выхода гелия и других газов, являющихся продуктами распада радиоактивных элементов.

Одна из экспедиций была направлена в Печорский край, где еще в XIX в. были найдены радиоактивные минералы. В конце лета 1926 г. участник экспедиции А.А. Черепенников, проводя поиски редких газов, заметил не совсем обычную воду, образующую какой-то особый красный осадок [Черепенников, 1928]. Вода изливалась из заброшенной "казенной" буровой скважины № 1 нефтяного промысла в районе Ухты. Он взял несколько проб воды. Анализ первой же пробы, произведенный Л.Н. Богоявленским в апреле 1927 г. в Ленинграде, обнаружил невиданно большое содержание в воде радия — около $5 \cdot 10^{-9}$ г/л [Богоявленский, 1928]. Такая радиоактивность природных вод была одной из самых высоких среди известных в то время. Для сравнения можно указать, что в ухтинских пластовых водах радия было в 5 раз больше, чем в подземных рассолах богатейшего в то время месторождения радия Иоachimовсталь в Чехословакии.

В Радиевом институте приняли меры к быстрейшему выявлению запасов радиоактивной воды и выяснению источников, откуда эта

вода поступает на поверхность. В случае стабильности поступления воды в течение длительного времени водоносный пласт можно было бы считать "промышленным месторождением радия нового типа", поскольку из пластовых вод с таким содержанием радия можно организовать его производство. В район Ухтинской буровой скважины сразу же были направлены виднейшие радиологи, геологи, геохимики и другие специалисты из научно-исследовательских организаций, Геологического комитета и Академии наук. Первые исследования радиоактивности природных вод в районе Ухты провели представители радиологического отдела Института прикладной геофизики (А.А. Ломакин) и радиологической лаборатории Главной палаты мер и весов (Л.Н. Богоявленский). Под их руководством были обследованы на радиоактивность все водные источники (реки, озера, нефтяные пластовые воды из скважин, воды подземных ключей), выходы природных газов, а также проведена радиометрическая съемка довольно обширной территории района. Геологически Ухтинский район был достаточно хорошо изучен, поскольку этот район был одним из старейших нефтедобывающих районов страны. Месторождение нефти, на котором пробурена скважина № 1, по данным геологов, не представляло ничего необычного. В районе Ухтинского месторождения, как и в Гейдельберге, источник обогащения вод был загадочным. Весьма странным представлялось и то, что радиеносная вода вытекала только из одной скважины.

Были высказаны различные предположения об источнике обогащения вод, которые требовали тщательной и всесторонней проверки. Вновь повторена гипотеза о возможных неизвестных ранее богатых радиоактивных рудах, залегающих ниже нефтеносных и водоносных пластов. Но геологическое строение района не давало никаких оснований предполагать существование не только месторождений радиоактивных руд, но даже каких-либо скоплений радиоактивных веществ. Ни сами нефтеносные пески, ни подстилающие горизонты и окружающие горные породы не содержали радий выше средних концентраций, обычно встречающихся во всех горных породах. Кроме того, нефтяные продуктивные пласты распространялись на обширной территории, в геологическом строении не отмечалось каких-либо нарушений и т.д. Все это могло свидетельствовать не только о концентрации, а, наоборот, о широком рассеянии радиоактивных источников, оказавших влияние на состав радиеносных глубинных вод.

В связи с геологическим строением района химики-радиологи Л.Н. Богоявленский и А.А. Ломакин вынуждены были отказаться от первой гипотезы, но сразу сформулировали новый несколько видоизмененный ее вариант. Они предположили, что радиеносность ухтинских пластовых вод, возможно, могла быть связана с кристаллическим фундаментом. Радий, по их мнению, мог выщелачиваться также из первичных урановых или ториевых руд кристаллического фундамента сульфатными пластовыми водами, затем происходило восстановление бактериальными процессами и в конце концов — перевод радия в растворимые соединения и обогащение им вод [Богоявлен-

ский, Ломакин, 1928]. Но никаких подтверждений своей гипотезы они не смогли найти.

Для решения этой интересной задачи Геологический комитет поручил радиологической лаборатории Московского университета под руководством профессора В.И. Баранова провести исследования в Ухтинском районе и выяснить происхождение высокой радиоактивности вод. В.И. Баранов тщательно обследовал район, провел новую серию анализов воды и осадка. Он заметил некоторое несоответствие в содержании бария и радия в воде и осадке. Оно могло возникнуть за счет ошибки лаборанта или плохо взятой пробы, а могло отражать следы какого-то неизвестного процесса. Во всяком случае, это несоответствие могло указать путь к поискам правильного ответа. Дело в том, что количество бария и радия должно быть одинаковым, если они попадали в воду и осадок во время одного и того же геохимического процесса.

В.И. Баранов решил прежде всего попытаться найти доказательства существования единого исходного геохимического процесса обогащения вод и осадка, характеристикой которого служат соотношения в химическом и изотопном составе вод и горных пород. Для проверки правильности своих предположений В.И. Баранов принял еще одно допущение о том, что во время этого неизвестного процесса могли оставаться постоянными и доли выделения в осадок радия и бария совместно с окисью обнаруженного в водах и осадке железа. При этом, по подсчетам В.И. Баранова, в воде радия должно было бы быть в 200 раз больше, а бария в 40 раз меньше, чем в осадке. При повторной проверке в пробах воды, отобранных А.А. Черепениковым и П.Т. Соколовым в 1927 г., содержание радия и бария оказалось весьма близким к предполагаемым цифрам, что фактически подтвердило правильность допущений В.И. Баранова и обоснованность выдвинутой им гипотезы [Баранов, Курбатов, 1933].

В пробах ухтинской глубинной воды В.И. Баранов обнаружил и другие радиоактивные элементы — мезоторий и радиоторий. Их содержание, как оказалось, также не соответствовало предполагаемой равновесной концентрации. Мезоторий составлял $2,1 \cdot 10^{-11}$ г/л, радиоторий — 4% в воде и 6% в осадке от равновесного его состояния с мезоторием, из которого он в основном образовывался. Содержание обнаруженного в воде тория-Х в десять раз превышало его равновесную концентрацию с радиоторием и составляло около 60% от равновесной с мезоторием.

Новые данные о содержании мезотория и тория-Х свидетельствовали о существенном отличии геохимического процесса обогащения радиоактивными элементами вод от процесса обогащения осадка. Все еще совершенно неопределенным оставался возможный источник обогащения и вод и осадка. При этом не могла быть исключена возможность поступления радия в воды и осадок из какого-либо общего источника, например неизвестной залежи радиоактивных руд, как предполагалось уже много раз. Можно было бы рассматривать и новый вариант — определять не источник, из которого поступали радиоактивные элементы, а постараться выявить воз-

возможность обогащения вод за счет неизвестного (возможно, очень сложного) геохимического процесса. В этом случае должна была существовать неизвестная исходная погребенная вода, допустил В.И. Баранов, в которой уран и торий могли быть связаны одинаковым образом, поскольку вода могла вымывать из пород равные части радия и мезотория. Если радий попадал в воду из сильнорадиоактивных руд, то отношение урана к торию в вытекающей пластовой воде сильно бы отличалось от их отношения в обычных горных породах.

Проверка показала, что в ухтинской радиеносной воде отношение урана к торию составляло 2,65 — цифра, характерная для большинства горных пород земной коры, не содержащих повышенное количество ни радия, ни тория, ни урана. Именно эта цифра доказывала, что исходная вода (за счет которой радий попадал в пластовую воду) не могла быть связана с радиоактивными рудами или скоплениями радиоактивных минералов. Отсюда следовал вполне закономерный вывод, что радиоактивные элементы в "исходную воду" могли попадать из обычных горных пород, но, вероятно, за счет неизвестных еще в то время сложных геохимических процессов.

Для получения дополнительных данных В.И. Баранов определил относительное содержание радиоактивных элементов в других районах. Если полученные им соотношения подтвердятся и там, то гипотеза окажется верна, и следует выяснить характер неизвестного геохимического процесса. В.И. Баранов и экспедиция Радиевого института обследовали Печорский край и другие районы Советского Союза. Относительное содержание радиоактивных элементов в природных водах других районов оказалось близким к 2,65, подтвердив закономерность выдвинутых В.И. Барановым допущений и предположений. Более того, отношение урана к торию в ухтинских водах оказалось величиной постоянной для земной коры в целом [Баранов, Курбатов, 1933].

Следует отметить, что со времени открытия высокой радиоактивности ухтинских пластовых вод усилилось изучение геохимии радиоактивных элементов, проводимое у нас в стране в то время под руководством Радиевого института, а затем — специализированного Института геохимии и аналитической химии АН СССР и ведомственных институтов. Уже в конце 20-х — начале 30-х годов процесс обогащения радием и радиоактивными элементами глубинных вод представлялся медленно и неравномерно протекающим, зависящим от степени выщелачиваемости пород, химического состава вод, степени застойности (изолированности) того или иного участка и других неизвестных факторов.

Дальнейшие наблюдения за составом вод Ухтинской скважины подтвердили эти предположения. С течением времени и по мере отбора воды как бы включались новые источники из застойных отделов района, содержание радия в водах несколько увеличилось (до $7,4 \cdot 10^{-10}$ г/л), достигло максимума (по данным Главной палаты мер и весов, концентрация радия составляла даже до $7,6 \cdot 10^{-10}$ г/л) и стало постепенно снижаться [Богоявленский, 1928]. В период наи-

большей концентрации радия из ухтинской воды была начата промышленная добыча радия — с помощью специальной кислотой обработки на месте создавались водные радиевые концентраты и доставлялись в Радиевый институт в Ленинград, а там из них извлекался чистый радий. Со временем ухтинские воды, поступающие на поверхность, становились все менее и менее радиоактивными, и добыча из них чистого радия была прекращена.

Следует отметить, что исследования В.И. Баранова и других советских ученых возможных процессов обогащения радием глубинных вод были достаточно убедительными и вскоре приняты учеными многих стран. В. Саламон вынужден был пересмотреть свои взгляды на происхождение высокой радиоактивности вод Гейдельбергской скважины и уникальность этого явления. Он согласился с концепцией В.И. Баранова о возможном ходе процесса обогащения глубинных вод Ухтинской скважины (а следовательно, и Гейдельбергской). Он признал, что обогащение радием глубинных вод возможно за счет вымывания радиоактивных элементов обычными глубинными водами определенного состава из обычных весьма распространенных горных пород. В докладе Гейдельбергской академии наук в 1931 г. В. Саламон официально признал обоснованность выводов советских ученых о происхождении радиоактивных пластовых вод и влиянии на процесс их обогащения неизвестных геохимических процессов [Вернадский, Хлопин, 1932].

4.2. НАЧАЛО СИСТЕМАТИЧЕСКОГО ИЗУЧЕНИЯ РАДИОАКТИВНОСТИ ВОД НЕФТЯНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ В СССР

После обнаружения радия в пластовых водах Ухтинского месторождения, опровергшего гипотезу В. Саламона об уникальности высокой радиоактивности вод Гейдельбергской скважины, в СССР началось интенсивное систематическое изучение радиоактивности нефтяных и поверхностных вод. По инициативе В.И. Вернадского были исследованы нефтяные воды грозненских и бакинских промыслов. Проводились определения концентрации в них радиоактивных элементов: урана, радия, тория, устанавливались соотношения радиоактивных изотопов, по химическому и изотопному составу выяснялось их происхождение, изучалась связь вод с окружающими горными породами, в ряде случаев определялся абсолютный возраст вод и пород.

В пластовых водах Новогрозненского нефтяного района уже в конце 1929 г. было обнаружено также "совершенно исключительное количество радия" [Тверцын, Милин, 1929]. В Грозный, как и на Ухту, сразу же прибыли представители Радиевого института. В их работе приняли участие местные специалисты — сотрудники физического отдела Грозненского нефтяного научно-исследовательского института. По данным Б.А. Никитина, в водах Грозненского района содержалось $1,83 \cdot 10^{-9}\%$ радия [Никитин, Комлев, 1930]. Пластовые воды Грозненского района оказались почти на порядок богаче вод Гейдельберга ($1,79 \cdot 10^{-10}\%$) и в 2 раза больше, чем ухтинские ($0,74 \cdot 10^{-9}\%$). Был сделан подсчет запасов радиеносной воды и опре-

делены возможности их промышленного освоения. По данным Б.А. Никитина, в Грозном ежегодно пластовыми водами выносилось на поверхность около 0,3 г радия, т.е. примерно столько же, сколько добывали его в год на радиевых рудниках в Конго.

В последующие три-четыре года на средства Союзнефти в районе Грозного проводились тщательные исследования вод нефтяных месторождений. Работу проводили специальные радиометрические группы и партии из Радиевого института и Института прикладной геофизики. Сильнорадиоактивные воды из буровых скважин поступали примерно пять лет. Затем содержание радия резко упало. В одной из скважин Грозного концентрация радия, например, уменьшилась в 300 раз [Комлев, 1931]. Через короткий срок, когда, видимо, исчерпались запасы застойных связанных с нефтяными залежами вод, пластовые воды уже не отличались от обычных нерадиоактивных природных вод.

Высокая радиоактивность пластовых вод грозненских нефтепромыслов подтвердила предположение В.И. Вернадского, В.И. Баранова и ученых Радиевого института о возможности нахождения радия в больших концентрациях в природных водах и целесообразности организации промышленной добычи радия из нефтяных пластовых вод. К сожалению, ученые не располагали данными о начальной концентрации радия в нефтяных водах. В.И. Вернадский тщательно исследовал химический состав радиеносных пластовых вод с тем, чтобы найти общие закономерности в поведении радия в геохимических процессах, связанных с обогащением пластовых вод. Оказалось, что в ухтинских водах присутствует заметное количество бария и отсутствуют сульфатные ионы, а в грозненских, наоборот, отсутствует барий и отмечено большое количество сульфатного иона [Вернадский, 1930]. В.И. Вернадский попытался найти общие связи повышенной активности нефтяных пластовых вод с некоторыми закономерностями распределения радиоактивности в земной коре.

Открытие радия в нефтяных водах Грозного, по его мнению, заставило "в сильной степени углублять и менять то представление, которое мы сейчас имеем". В.И. Вернадский обратил внимание на форму концентрации радия в пластовых водах. Эта новая форма растворенных соединений радиоактивных изотопов была интересной и требовала немедленного и детального разрешения [Вернадский, Хлопин, 1932]. С целью изучения этой новой формы концентрации радия в природных условиях по инициативе В.И. Вернадского были предприняты детальные обследования радиоактивности и химического состава вод нефтяных промыслов Баку, Челекена, Туркмении и Ферганской области.

Результаты исследований показали, что форма концентрации радия в нефтяных пластовых водах и стабильность содержания в них радия были весьма разнообразными, в водах некоторых месторождений радий полностью отсутствовал.

Так, при обследовании пластовых вод Бакинского нефтедобывающего района (нефтепромыслы Балахны, Сабунчи, Раманы, Сураха-

ны, о-в Артема, разведочные скважины Кара-Ухтур и Хурдалан в районе Биби-Эйбата) только в водах двух горизонтов продуктивной толщи, распространяющихся на большой площади, было обнаружено несколько повышенное содержание радия [Никитин, Меркулова, 1922]. По сравнению с Ухтой в бакинских водах радия было меньше почти на два порядка. По данным Б.А. Никитина, пластовые воды заведомо обводнившихся участков нефтепромысла были несколько беднее радием, чем воды на крыльях антиклинали. Кроме того, отмечено снижение концентрации радия в водах нижележащих пластов и соответствие ее ходу общей минерализации воды, уменьшению содержания хлора и щелочноземельных элементов. При этом оказалось, что содержание радия в водах, по-видимому, не зависело от их химического состава, так как в водах одного и того же пласта количество радия было разным. При стабильном химическом составе вод в одной из скважин концентрация радия за 16 месяцев уменьшалась на 40%. Он указывает также, что разнообразное содержание радия в водах одного пласта, уменьшение концентрации радия со временем в водах одной и той же скважины при почти неизменном химическом составе, параллельность хода изменения минерализации, химического состава и концентрации радия с глубиной могут свидетельствовать о возможности попадания радия в пластовые воды из каких-то сред, встречающихся на пути миграции пластовых вод.

Параллельно с изучением радиоактивности пластовых вод Б.А. Никитин исследовал также радиоактивность нефти, поскольку было высказано предположение о связи радиоактивности нефтяных вод с образованием нефти из органических остатков. В нефтях радий не был обнаружен. Происхождение же радия в водах нельзя было объяснить вымыванием его из нефти или вещества, из которого образовалась нефть [Никитин, Меркулова, 1933].

Длительное изучение радиоактивности и химического состава пластовых вод грозненских нефтяных промыслов выявило еще более сложную и запутанную картину. Концентрация радия в грозненских пластовых водах с глубиной увеличивалась, а не уменьшалась, как в Баку [Комлев, 1931]. Нефтяные воды Дагестана также отличались от исследованных раньше. При большом сходстве состава вод разных скважин дагестанских нефтепромыслов и при одинаковом содержании в них кальция были обнаружены и существенные их отличия. Так, в одной из дагестанских скважин радия было в 3 раза больше, а бария в 7 раз меньше, чем в другой. В водах, по данным Л.В. Комлева, найдено большое количество щелочноземельных элементов при малом содержании или полном отсутствии ионов серной кислоты. Общий ход изменений содержания радия в пластовых водах с глубиной более близок к бакинским, а не к ухтинским водам. В Дагестане, как и в Баку, с глубиной продуктивных пластов и появлением в пластовых водах щелочных составляющих концентрация радия уменьшалась [Комлев, 1933].

Изучение пластовых вод дагестанских нефтепромыслов (в частности, Дагестанские Огни) и источника Дузлук в том же районе дало

возможность предполагать существование связи повышенной радиоактивности с химическим составом вод. В Радиевом институте при обсуждении полученных результатов было показано, что концентрация радия в пластовых водах могла быть связана с водами определенного химического состава, сформированного в ходе геологических процессов в результате сходных геохимических и тектонических условий.

Однако при подсчете запасов радия в дагестанских пластовых водах, проведенных на основе выдвинутой Радиевым институтом гипотезы, оказалось, что в дагестанских пластовых водах должны содержаться сотни граммов чистого радия и, следовательно, рассолы дагестанских вод должны были бы представлять наиболее мощную сырьевую базу для добычи радия. Но дальнейшее изучение природных вод Дагестана и уточнение представлений о процессе обогащения вод радием не подтвердили такого рода жестких связей. При аналогичных, казалось бы, тектонических и геохимических условиях в других источниках и природных водах Северного Кавказа (Чеченская АО, Кубань) радий не был обнаружен.

При исследованиях радиоактивности природных вод о-ва Челекен было замечено некоторое сходство между радиоактивными пластовыми и поверхностными водами при концентрации в них радия порядка $4,8-6,0 \cdot 10^{-11}\%$ [Тагеева, Старик, 1931]. В Туркмении горячие источники Нефтедага и Боядага, как и пластовые воды, оказались радиоактивными [Курбатов, 1931]. Казалось, полученные данные могли бы подтвердить гипотезу о связи радиоактивных пластовых вод и природных источников с общими для тех и других геохимическими и тектоническими условиями. Но в то время истолковать замеченное сходство однозначно в пользу выдвинутой гипотезы было невозможно, требовались новые дополнительные данные.

Не вдаваясь в дальнейший перечень загадок и противоречий, встреченных исследователями при выяснении происхождения повышенной радиоактивности нефтяных пластовых вод некоторых месторождений Советского Союза, можно сказать, что в конце концов усилиями радиологов, химиков, геохимиков и геологов в конце 30-х годов можно было наметить основные положения генезиса радиоактивных пластовых вод.

4.3. ПОИСКИ ПУТЕЙ ОБОГАЩЕНИЯ РАДИЕМ ГЛУБИННЫХ ВОД

В результате изучения радиоактивности и химического состава нефтяных пластовых вод, проведенного в нашей стране в 1929—1932 гг., было установлено, что радиоактивные нефтяные пластовые воды — явление, весьма распространенное на нашей планете, а не уникальное, как думали раньше, после открытия высокой радиоактивности вод Гейдельбергской скважины. Более того, как показано в разд. 4.2, в процессе изучения радиоактивности пластовых вод в нашей стране выяснилось, что природные воды с высоким содержанием радия не всегда можно связывать с нефтяными месторождениями. Сходным химическим составом и аналогичной концентрацией радиоактивных

нуклидов часто обладают воды горячих источников, изливающихся на поверхность.

Было замечено, что условия формирования нефтяной залежи, действительно, в ряде случаев благоприятствуют повышенному содержанию радия в пластовых водах. Но могли оказывать влияние и геохимические факторы, не связанные с нефтяной залежью. Оно возможно, например, при сочетании особых свойств горных пород, ограничивающих нефтяную залежь, химических или других свойств самих вод. Было замечено, что почти во всех известных к тому времени радиоактивных нефтяных пластовых водах присутствуют в заметных количествах хлор, натрий, кальций. Можно было даже утверждать, что радиеносные нефтяные пластовые воды, как правило, относятся к типу хлорнатрокальциевых природных вод. Вопрос о происхождении радиеносных нефтяных пластовых вод оказался не только сложной научной, но и важной народнохозяйственной проблемой, поскольку от его решения зависел выбор направления поисков новых источников радия: расширение или свертывание поисков радиеносных вод, расширение или свертывание поисков радиоактивных руд и минералов.

Однако к началу 30-х годов природные, в том числе глубинные, пластовые воды были еще недостаточно исследованы. Не было собрано достаточно данных об общем распределении радиоактивных вод на территории страны, не изучено распределение таких вод по разрезу земной коры, не было даже выработано единого представления о формах нахождения радиоэлементов в природных растворах.

Вопрос об установлении формы нахождения радиоэлементов в природных водах был особенно важен, поэтому исследованиями в этой области физикохимии особенно тщательно занимались в Радиовом институте и ведомственных организациях. Ведь если радиоактивные элементы, как считал И.Е. Старик, даже в больших разведениях могли проявлять коллоидные свойства, то известными в то время способами можно было найти пути распределения веществ между растворителями, имеющимися обычно в природных условиях [Старик, 1930].

Что касается химического типа радиеносных пластовых вод, то, как было сказано, нефтяные радиоактивные воды в большинстве своем содержали хлор, кальций, натрий, т.е. относились к хлоркальциевонатриевому типу природных вод. Но тогда же стали известны радиеносные (т.е.содержащие радиоактивные элементы в больших количествах) воды, в которых хлор, натрий и кальций не преобладали. В.И. Вернадский выделил шесть типов радиеносных нефтяных пластовых вод в самостоятельные физико-химические системы, активно взаимодействующие с другими природными водами [Вернадский, 1960]. Под влиянием фундаментальных работ о природных водах В.И. Вернадского в отдельных нефтедобывающих районах начали изучать особенно тщательно химические типы и генетические связи нефтяных пластовых вод независимо от содержания в них радиоактивных элементов [Басилов, 1934]. Знания генетических связей пластовых вод нефтяных месторождений использовались для того, чтобы можно было принять действенные меры против обводнения скважин.

Первая сводная работа по анализу условий залегания, химического

состава и происхождения пластовых вод нефтяных месторождений была опубликована в 1935 г. известным гидрогеологом нефтяником В.А. Сулиным. В этой работе он показал связь нефтяных пластовых вод с другими природными водами [Сулин, 1935]. Сущность формирования глубинных нефтяных пластовых вод, по В.А. Сулину, состоящая в выщелачивании горных пород и их засолении, соответствует процессам опреснения, преобладающим при формировании вод суши, и концентрации солей в водах морей и океанов. Он разделял нефтяные пластовые воды в основном по солевому составу, но с учетом геохимических особенностей природной обстановки. Эти особенности, по его мнению, определяют не только солевой, но и газовый состав нефтяных вод. При взаимодействии глубинных вод с горными породами, отмечал В.А. Сулин, происходит не только выщелачивание, но и испарение, конденсация, ионный обмен, поглощение или выделение газов.

Имеют место и другие процессы, в результате которых увеличивается содержание растворенных в погребенных водах веществ или их выпадение в осадок, а также другие качественные изменения пластовой воды. В ходе миграции глубинных вод и концентрации их в зоне нефтяных месторождений воды могут обогащаться радиоактивными элементами, в том числе радиоактивными газами — радоном, тороном и др. Следовательно, радиоактивные нефтяные пластовые воды формируются в процессе образования нефтяного месторождения, и их состав определяется как региональными, так и локальными гидрогеологическими и геохимическими условиями.

По мере накопления знаний о составе нефтяных пластовых вод и динамики его изменения во времени не только в процессе образования залежи, но и особенно в процессе эксплуатации месторождения стали несколько проясняться генетические связи пластовых, в том числе радиоактивных, вод. В.И. Вернадский выделил радиеносные воды в число основных типов нефтяных пластовых вод. В 30-х годах появилась возможность найти пути определения связей в системе горные породы — нефтяные пластовые воды — нефтяная залежь. Были предприняты попытки уточнить влияние окружающей обстановки на развитие (жизнь) нефтяного месторождения и состава нефтяных вод. При этом, оказалось, что именно радиоактивные элементы являются как бы "документальным" свидетельством или "остатком" прошедших гидрогеологических процессов.

По содержанию стронция, брома и радиоактивных элементов в дальнейшем могла определяться, например, степень изолированности и сохранности нефтяной залежи. В хорошо изолированных и надежно защищенных от кислородного воздействия земной поверхности нефтяных месторождениях пластовые воды, обычно древние, часто реликтовые, являются наиболее концентрированными благодаря продолжительному застою режиму [Герасимов, 1968].

Остановимся несколько подробнее на работах в этом направлении, проведенных в Радиовом институте в начале 30-х годов. Под руководством В.И. Вернадского в институте были поставлены исследования связей радиоактивности нефтяных пластовых вод не

только с окружающими горными породами, но и с другими природными водами, исследовалась также связь химического состава вод и состава нефти данного месторождения. Поскольку состав нефти, как известно, зависит от ее происхождения и условий формирования, их сопоставление могло дать сведения и об условиях формирования вод. Следовало также иметь в виду общие теоретические исходные данные об источниках происхождения нефти.

Согласно теории органического происхождения нефти, материалом для образования нефти служили органические остатки древних морей и океанов. В морских илах был также обнаружен радий в больших количествах, чем в морской воде или в горных породах. Следовательно, предполагалась теоретически возможной связь повышенной радиоактивности пластовых вод нефтяных месторождений с радиоактивностью морских илов, древних органических осадков и составом нефти. При этом, по предположениям Б.А. Никитина и Л.В. Комлева, радий первоначально должен был бы концентрироваться в нефти в процессе ее образования из живых организмов [Никитин, Комлев, 1930]. При проверке состава современных вод и нефти это предположение не подтвердилось. Выявилось другое соотношение в радиоактивности нефти и пластовых вод. При определении радиоактивности нефти и пластовых вод одних и тех же месторождений нефти оказалось, что радий содержался только в пластовых водах, а в нефти он не обнаружен.

В Радиевом институте было проверено также содержание урана в нефти и пластовых водах. Предполагалось, что в случае концентрации урана в веществах, из которых образовалась нефть, либо уран, либо долгоживущий ионий должны были в процессе образования нефти перейти в водную фазу [Никитин, Меркулова, 1933]. Но из-за сложности определения малых концентраций урана техническими средствами того времени необходимые данные для доказательства или опровержения выдвинутого предположения не были получены до начала 40-х годов. Позднее в пластовых водах были обнаружены микроэлементы — спутники радиоактивных изотопов. По их содержанию можно было определить тип минерализации воды и косвенным образом — возможное присутствие в водах таких радиоактивных элементов, как уран.

В 1932 г. В.И. Вернадский и В.Г. Хлопин впервые в общем виде предложили гипотезу обогащения радием нефтяных вод. Они предполагали существование некоего равновесия по отношению к радю (а может быть, и к урану) между пластовыми водами и нефтью [Вернадский, Хлопин, 1932]. Такое равновесие могло быть представлено в виде $Ra_{\text{нефть}} \rightleftharpoons Ra_{\text{пл.вода}}$. В результате неизвестных геохимических процессов оно могло быть нарушено: если произошел сдвиг в сторону воды — радий обнаруживался в нефти, если в сторону нефти — радий обнаруживался в больших количествах в пластовой воде. При этом механизм обогащения радиоактивными элементами представлялся достаточно сложным, а установление простых связей между составом пластовых вод и нефтей был чрезвычайно затруднителен. В.И. Вернадский и В.Г. Хлопин предполагали, что существенную помощь могут оказать результаты исследований геохимии урана и радия (и

вероятно, других элементов) не только в пластовых, но и во всех природных водах.

Решающую роль в подходе к пониманию механизма обогащения вод радием (и другими радиоактивными элементами) сыграла фундаментальная работа В.И. Вернадского "История природных вод" [1960]¹. Поскольку бóльшая часть нефтяных пластовых вод представляет соленые воды и рассолы, а слабосоленые и пресные воды среди них встречаются редко, радиеносные нефтяные воды, по его мнению, являются смесью ископаемых морских вод с обычными пластовыми.

В.И. Вернадский считал близкими по химическому составу, например по содержанию в них йода, брома, марганца и других микроэлементов, воды пластовые и морские. Сходство вод замечалось и раньше. Так, еще в 1883 г. известный русский химик А.Л. Потылицын (1845—1905) сравнивал химический состав нефтяных и современных морских вод. Отмечая их сходство, он тогда же первым обратил внимание и на их различие [Потылицын, 1883].

В.И. Вернадский считал, что с пластовыми водами гораздо более сходны по химическому составу не морские воды, а морские осадки — илы. Он полагал, что формирование состава нефтяных пластовых вод начинается еще при образовании осадочных пород из морских илов, и обращал внимание на выявленное им различие в происхождении морской воды и морских осадков. В связи с этим он не исключал также возможности существования еще не установленной и даже не подмеченной связи между пластовыми водами повышенной активности и продуктивными нефтяными пластами. Этот вариант связи вошел в общую схему установленного им равновесия в системе нефть—пластовые воды, в которой в скрытой форме учитывалась также возможность обогащения пластовых вод с самого начала формирования нефтяной залежи и связь с происхождением нефти и нефтяной ловушки. Признавая одновременность формирования нефтяного месторождения и процесса обогащения радием нефтяных пластовых вод, В.И. Вернадский допускал в некоторых случаях и выпадение основной массы радиоактивных веществ в осадок вместе с другими минеральными веществами [Вернадский, 1960].

В.И. Вернадский допускал, что при формировании нефтяной залежи на больших глубинах мог происходить какой-то неизвестный мощный "радиохимический процесс", в результате которого может образовываться свободный кислород, происходить метаморфизация органического вещества и другие изменения. Кроме того, результатом неизвестных радиохимических и геохимических процессов являются также растворенные в пластовых водах радон, гелий, изотопы радия и мезотория и другие элементы.

Самые первые гипотезы о происхождении радиоактивных пластовых вод, как показано в разд. 4.5 и 4.2, связывали поступление в воды радиоактивных элементов и изотопов из нефти, богатых радиоактивных

¹Отдельные выпуски исследований В.И. Вернадского по истории природных вод были впервые опубликованы в 1924 г. во Франции на французском языке, в 1932 г. в СССР на русском языке.

руд и других природных объектов, с которыми непосредственно соприкасались воды. В конце 20-х — начале 30-х годов В. И. Баранов и др. рассматривали вопрос о поступлении радия в пластовые воды из обычных нерадиоактивных горных пород. В 1930 г. сотрудники Радиового института Б. А. Никитин и Л. В. Комлев также предполагали, что пластовые воды могли вымывать радий из обычных пород, непосредственно окружающих залежь [Никитин, Комлев, 1930]. Они в отличие от В. И. Баранова, предполагавшего обогащение вод в процессе миграции к нефтяной залежи, считали, что обогащение могло происходить уже после формирования залежи и прекращения какого-либо движения вод. Они подсчитали, что в течение длительного времени, когда залежь оставалась закрытой, воды могли стать радиоактивными даже при обычной концентрации радия в породах не более чем $n \cdot 10^{-11} \%$.

Можно считать, что в первые 3—4 года после открытия высокой радиоактивности нефтяных вод Ухтинского месторождения и проведения интенсивных исследований радиоактивности вод других месторождений нефти было высказано достаточно много разных, порой противоречивых, гипотез о происхождении радиоактивности в нефтяных водах. Наступило время, как считал В. И. Вернадский, пересмотреть направление исследований и начать планомерное изучение природных вод и геохимии радиоактивных элементов [Вернадский, 1960]. Отказавшись от идеи обогащения вод за счет существования какого-либо радиоактивного субстрата в виде месторождения радиоактивных руд или "высокордиоактивной нефти", исследователи основное внимание начали уделять изучению особенностей геохимических и химических процессов взаимодействия глубинных вод между собой и с горными породами.

Благодаря работам В. И. Вернадского, В. И. Баранова, Б. А. Никитина, Л. В. Комлева и других исследователей начала 30-х годов процесс обогащения радием нефтяных пластовых вод начал рассматриваться самостоятельно, вне связи с формированием нефти. Этот процесс происходил в геолого-геохимических условиях, близких на каком-то этапе к условиям формирования нефтяной залежи. Следует указать, что в 30-х годах начали изучать также и физико-геохимические условия процесса. Одновременно были начаты работы по изучению происхождения и состава окружающих нефтяную залежь горных пород, были проведены первые модельные лабораторные и полевые исследования характера геохимических, радиохимических и других процессов, возможно протекавших при формировании радиоактивных пластовых вод.

Остановимся на некоторых работах по изучению влияния состава окружающих горных пород на радиоактивность глубинных пластовых вод. В 1931 г. Л. В. Комлев, анализируя возможные пути миграции пластовых вод, пришел к выводу, что процесс выпадения радия в осадок должен происходить (если он происходит) на больших глубинах [Комлев, 1931]. Что касается присутствия радия в водах, если он в них обнаруживался, то, по его мнению, радий мог поступать в воды значительно позднее. Иными словами, идея Л. В. Комлева сводилась к тому, что если в пластовых водах обнаружен радий, то его источник

должен находиться на пути следования пластовых вод к нефтяной залежи. Если неизвестный источник весьма распространен в земной коре, то процесс перехода радия в раствор и обогащение вод должен быть аналогичен процессу поступления других химических элементов, т.е. соответствовать общей минерализации вод.

Л.В. Комлев предлагал рассматривать комплекс порода—капиллярная вода как единую капиллярную систему, в которой радий находится в рассеянном состоянии. Если в системе соблюдаются условия стабильности содержания радия, то в пластовых водах должны также присутствовать широко распространенные в горных породах элементы ториевого ряда. В первую очередь должны быть замечены мезоторий и торий-Х. По соотношению радия с его изотопами можно получить указание на генетические связи обнаруженных радиоактивных элементов.

Вскоре гипотеза Л.В. Комлева получила реальное подтверждение. В пластовых водах нефтяных месторождений Южного Дагестана В.В. Чердынцевым был обнаружен торий-Х, концентрация которого через некоторое время самопроизвольно увеличилась, что указывало на присутствие в воде мезотория [Комлев, Чердынцев, 1937]. В тех же водах были обнаружены атомы радия, которые сравнительно недавно поступили в раствор. Содержание радиоактивных элементов в пластовых водах Южного Дагестана не соответствовало равновесному составу природных вод и рассолов с древними материнскими глубинными горными породами. Это могло свидетельствовать о другом постоянном источнике обогащения вод в ходе непрерывного гидрохимического процесса. При этом благодаря особенностям химического состава вод, свойственным большинству радиоактивных вод, можно сказать, что вторичные процессы извлечения радия из раствора не происходили. Л.В. Комлев считал, что изменение концентрации радия, отмечавшееся в ряде случаев, могло происходить по "техническим причинам". Во время бурения нефтяных скважин при вскрытии новых нефтеносных и водоносных пластов с глубинными водами смешивались воды иного минералогического состава и с другим содержанием радия.

Исследования связей химического состава горных пород и природных вод дало возможность во второй половине 30-х годов установить ведущую роль щелочноземельных элементов в образовании соленых и рассольных вод и выявить особенности происходящих при этом геохимических процессов. Экспериментальные и экспедиционные работы в Радиевом институте проводились под руководством В.И. Вернадского. Экспериментальное изучение выщелачивания радия и его изотопов из образцов осадочных пород различными природными растворами подтвердило возможность извлечения радия водами определенного химического состава из нерадиоактивных пород. Было отмечено также в радиеносных пластовых водах жесткого типа присутствие кальция, стронция и бария, создающих благоприятные условия обогащения вод радием.

В 40-х годах в Радиевом институте исследования радиоактивности пластовых вод проводились под руководством И.Е. Старика. Изучая химический состав вод и его отдельные компоненты, он доказал

решающую роль катионов в процессе выщелачивания пластовых вод [Старик, Щепотьева, 1956]. Эти исследования, подтверждая гипотезу Л.В. Комлева, вносили некоторые уточнения в понимание механизма обогащения вод.

В 50-х годах большую работу по изучению радиоактивности пластовых вод провели Ф.А. Алексеев с сотрудниками в Институте нефти АН СССР, а затем в образованном в 1961 г. ВНИИЯГГ. Работы группы Ф.А. Алексеева не только подтвердили направленность процесса обогащения вод и значение щелочноземельных элементов в ходе этого процесса, но и доказали, что присутствие в водах хлоридов щелочноземельных элементов создает условия для обогащения вод радием и устраняет возможность извлечения его из растворов [Алексеев и др., 1968а]. На этом этапе исследований радиоактивности пластовых вод, по данным Л.В. Комлева, Ф.А. Алексеева и других исследователей, была показана возможность миграции радия из горных пород в результате проникновения в их капилляры вод, но при обязательном условии, что в исходных водах уран содержится в ничтожно малых количествах (менее 1% от равновесного с радием) или же полностью отсутствует. Отсюда следовал и другой вывод, что пластовые воды должны были обогащаться также изотопами ториевого ряда, которые содержатся в горных породах.

Кроме того, в 50-х годах по результатам изучения радиоактивных природных вод Русской платформы Н.В. Тагеева показала, что повышенная радиоактивность глубинных вод хлорнатрокальциевого типа является общим свойством не только глубинных, но и поверхностных вод такого типа и не всегда связана с нефтяным месторождением [Тагеева, 1958]. Накопление радия в природных водах оказалось явлением широко распространенным, связанным с проникновением глубинных вод в обычные нерадиоактивные песчано-глинистые породы. Причем отмечалось, что радий накапливался в наибольших количествах обычно в застойных водах, изолированных от общего ее круговорота. Этим можно было объяснить высокую радиоактивность пластовых вод некоторых нефтяных месторождений, которые, как правило, должны были длительное время оставаться закрытыми и изолированными.

В результате изучения концентрации урана в пластовых водах, проведенного в 50-х годах, было показано, что повышение его содержания, несомненно, зависит от геологической обстановки эпохи образования нефти, ее миграции и последующего формирования отдельных залежей и месторождения в целом [Алексеев и др., 1958].

В 50-х годах было уточнено влияние окружающих пород на содержание радиоактивных элементов вод, в частности было замечено влияние возраста этих пород. По данным американских исследователей, например, больше урана содержится в нефти и водах, относящихся к третичным отложениям, чем к палеозойским [Пирс и др., 1959].

В 50-х годах начались исследования возможной связи радиоактивности природных, в том числе пластовых, вод с геологическим строением данного района. Еще в прошлом веке академик Петербургской академии наук геолог Г.В. Абих (1806—1886) обратил внимание на минеральные

воды, отражающие некоторые геологические процессы на Кавказе [Абих, 1939]. В начале XX в. С.Н. Никитин установил непосредственную зависимость состава подземных вод от геологического строения [Никитин, 1911]. Почти одновременно А.Д. Стопневич, проводя длительные исследования пластовых вод в Ставропольском крае, считал их связанными с "явлениями геологического порядка" [Стопневич, 1923]. Зоны трещиноватости, разломы и другие нарушения, по его мнению, меняют распределение интенсивности уплотнения породы оттоков воды. Он неоднократно обращался в Геологический комитет с предложениями изучать состав природных вод.

В 60-х годах ученые вновь попытались выяснить связь повышенной радиоактивности пластовых вод с составом нефти. Однако в то время советские исследователи (Г.Х. Эффендиев и др.) не смогли добиться однозначных результатов. Ряд особенностей в распределении радиоактивных элементов в пластовых водах, по данным Г.Х. Эффендиева, можно было бы объяснить не влиянием состава нефти, а особенностями переходных зон контактов пластовых вод с породами [Эффендиев и др., 1964]. Более поздние исследования под руководством Ф.А. Алексева также не выявили связи радиоактивности вод с составом нефти, но и не подтвердили предположений Г.Х. Эффендиева о роли контактов вод с породами [Алексеев и др., 1968а].

В нефтегазоносных районах Туркмении, по данным Ф.А. Алексева, накопление урана в природных водах возрастало по мере их опреснения в предконтурной и подошвенной частях нефтяной залежи. Поскольку повышение содержания радия с приближением к водонефтяному контакту отмечалось лишь на нескольких месторождениях, то, по данным ВНИИЯГГ, оно не отражает генетическую связь с нефтью, а является скорее следствием изменения состава самих вод в зоне соприкосновения их с нефтяной залежью.

В последующее десятилетие в результате исследований источником повышенного содержания радиоактивных элементов в нефтяных пластовых водах признавались вмещающие горные породы. Считалось установленным, что на распределение радиоактивных элементов между горными породами и контактирующей пластовой водой оказывают влияние следующие факторы: химический состав природных вод и нефти, индивидуальные особенности геологического строения региона, характер геохимических процессов.

Процесс формирования радиоактивных нефтяных вод может быть представлен в следующем обобщенном виде. Пластовые воды формируются в течение длительного времени, когда начальные погребенные воды, перемещаясь по разломам и тектоническим зонам дробления и смятия, в конце концов сосредоточиваются в структурах, содержащих нефть или благоприятных для скопления нефти. В системе горные породы—природные воды—нефтяные пластовые воды—нефть на каждом этапе ее развития создается и существует определенное соотношение всех компонентов, в том числе комплекс растворенных в воде соединений радиоактивных элементов. В ходе геологического процесса при передвижении вод в другую природную обстановку состав ее меняется, однако при этом сохраняется ряд особенностей предыдущего

периода. В пластовых водах в ряде случаев сохраняются изотопные данные, характерные для каждого этапа этого сложного процесса. В результате изучения изотопного состава вод получены многочисленные доказательства широкого распространения процессов рудообразования и формирования нефтяных пластовых вод.

Открытие высокой радиоактивности нефтяных пластовых вод в Советском Союзе и организация систематического их изучения во многих нефтедобывающих регионах дали основания В.И. Вернадскому сделать широкие обобщения. Повышенная радиоактивность нефтяных вод, по его мнению, связана и с некоторыми другими явлениями в истории радия в земной коре [Вернадский, 1930]. Он утверждал, что наиболее богатые радием воды могут являться продуктом биосферы (а может быть, стратосферы), а не более глубоких земных оболочек. В.И. Вернадский не исключал возможной связи происхождения повышенной концентрации радия в пластовых водах, так же как и нефти, с биогенными процессами. Но это предположение могло быть подтверждено новыми исследованиями миграции радия и урана в природных водах и погребенных пластах, выяснением существования радиоактивного равновесия и характера отклонения от него. Причем такого рода исследования, по В.И. Вернадскому, должны быть проведены также количественными химическими методами.

4.4. ПОСТАНОВКА ИССЛЕДОВАНИЙ МИГРАЦИИ РАДИОНУКЛИДОВ В ЗЕМНОЙ КОРЕ

Поиски источников обогащения нефтяных пластовых вод и изучение геохимии радиоактивных элементов неизбежно привели к необходимости изучения миграции радиоактивных элементов в земной коре. В 20-х и 30-х годах изучение миграции радиоэлементов было связано в основном с необходимостью разработки критериев при поисках радиоактивных месторождений. К тому времени был накоплен опыт исследований радиоактивности многих природных объектов, в том числе минеральных источников, грязей, глубинных пластовых вод. Проведены фундаментальные работы по изучению свойств радиоактивных минералов и вод в химических и физических лабораториях.

Изучение миграции радиоактивных элементов должно было выявить распределение в земной коре тория, урана, иония, протактиния, радия, актиния, мезотория, радиотория, их генетические связи, химическую природу. Для подавляющего большинства известных в то время радиоактивных элементов с периодом полураспада менее одного года фактором, определяющим его местонахождение, являлась принадлежность данного элемента к урановому или ториевому радиоактивному семейству [Хлопин, 1926].

Родоначалники этих рядов, обладающие большой продолжительностью жизни, могли присутствовать в магме или растворах в момент образования минералов и пород и, следовательно, войти в кристаллическую решетку минералов. Продолжительность жизни таких элементов по сравнению с масштабами геологического времени мала, а значит, те их атомы, которые входят в состав минералов и пород в настоящее время, образовались уже после их сформирования. Радиоактивные элементы,

образовавшиеся из урана, тория и актиния, отличаются от их родоначальников своими кристаллохимическими свойствами. Новый состав минералов в большей степени зависит от условий существования минерала, агрессивности среды и миграции вод. В результате миграции радиоактивных элементов возможны и отчасти известны образовавшиеся вторичные минералы урана, тория и конечные продукты распада всех трех радиоактивных рядов [Хлопин, 1926].

До 20-х годов основное внимание исследователей уделялось изучению хорошо сохранившихся радиоактивных минералов, не затронутых вторичными геохимическими процессами и сохранившими радиоактивное равновесие в данном ряду. Помимо физико-химических свойств данного минерала, определялся возраст его образования. Позднее радиоактивные элементы в такого типа минералах рассматривали в качестве индикаторов разнообразных физико-химических и геохимических процессов. В 1909 г. Штрёмгольм и Сведберг впервые показали важное значение изоморфизма при выкристаллизации радиоактивных элементов с осадками обыкновенных солей [Strömholm, Svedberg, 1909]. Их наблюдение прошло почти незамеченным, и поэтому через пятнадцать лет, в середине 20-х годов, ученые вынуждены были снова вернуться к этому вопросу. Изучение перехода радиоактивных элементов из твердого состояния в жидкую фазу раствора проводилось в то время в несколько ином направлении. В 1913 г. К. Фаянс и П. Бир смогли сформулировать правило адсорбции и осаждения радиоактивных элементов. Они показали, что радиоэлемент будет соосаждаться с труднорастворимым осадком или адсорбировать на нем тем больше, чем менее растворимо его соединение с противоположно заряженной составной частью осадка [Fajans, Gohring 1913].

Представления о механизме распределения радиоэлементов между раствором и осадком были сформулированы Ф. Панетом в 1922 г. Он считал, что существует оживленный обмен атомами и ионами между растворами и поверхностью твердой фазы, что электроположительная и электроотрицательная части соли также и в твердом состоянии обладают особыми валентностями [Меркулова, 1937].

В Германии Ф. Панет, О.Ган, Г. Гримм, а в СССР В.Г. Хлопин и В.И. Баранов в первой половине 20-х годов опубликовали работы, посвященные взаимодействию раствора и минерала. Были исследованы ионный обмен в поверхностном слое при взаимодействии между раствором и осадком, влияние изоморфизма на распределение радия между кристаллической и жидкой фазой. Эти и другие работы позволили в дальнейшем сначала с некоторой осторожностью, а затем все более и более уверенно применять в качестве радиоактивного индикатора не только изотопы, но и ближайшие химические аналоги того элемента, за "судьбой" которого проводится наблюдение.

Постановка изучения миграции радиоэлементов и механизма процесса перехода радиоэлементов из одного состояния в другое, по мнению В.Г. Хлопина, в дальнейшем могла дать возможность наблюдать за перемещением в земной коре ряда обычных элементов, таких, как торий, барий, свинец, тантал, редкие земли и др. В процессе изучения миграции элементов В.Г. Хлопин предполагал получить

данные о последовательности отдельных химических процессов, а в некоторых особо благоприятных случаях и о времени, когда имел место тот или иной процесс [Хлопин, 1926].

В 30-х годах в Радиевом институте были выполнены экспериментальные и теоретические исследования форм нахождения и изменения радиоактивных элементов в природных условиях. Эти работы проводились под руководством Б.А. Никитина, а позднее под руководством И.Е. Старика. В результате более чем десятилетнего изучения выщелачивания изотопов радия и процесса эманирования была предложена схема нахождения радиоактивных элементов в минералах и породах. Было выяснено, что в кристаллическую решетку не входят продукты распада урана и тория, если они не являются их изотопами [Старик, 1943]. Установлено адсорбционное равновесие между растворенными в капиллярной воде и находящимися на стенках капилляров изотопами в то время, как эманации полностью растворены в капиллярной воде.

Миграция изотопов радия и его эманации, видимо, могла происходить диффузионным путем перехода в жидкую фазу элементов, входящих в кристаллическую решетку минерала при его растворении, и перехода в жидкую фазу элементов, находящихся в капиллярах и не входящих в кристаллическую решетку.

Одновременно с исследованиями радиоактивности природных вод геохимическая и химическая лаборатории Радиевого института провели комплексные исследования радиеносных вод нефтяных месторождений. По материалам 12 экспедиций института и результатам работ лабораторий нефтяных промыслов удалось вскрыть особую форму миграции радия и его изотопов ториевого ряда, которые оказались весьма обычными элементами в нефтяных пластовых водах. Были проведены экспериментальные исследования по выщелачиванию радия и его изотопов из осадочных пород различными растворами. В результате анализа полученных данных была показана возможность извлечения радия и его изотопов из обычных горных пород при воздействии на них вод определенного состава, благоприятствующего образованию природных стабильных изотопов радия. Эти представления в дальнейшем полностью подтвердились и в настоящее время являются общепринятыми.

Проведенные в 1939—1940 гг. экспедиционные исследования радиоактивности природных вод и горных пород кавказских минеральных источников дали основание и для теоретических обобщений. На основе полученных данных сложилось представление о процессах первичной миграции радиоэлементов в результате растворения, выщелачивания и эманирования. Во время региональных исследований были выявлены новые радоно-радиевые воды, установлены источники их обогащения и получены данные о радиоактивности вод и пород всего района. Оказалось, что концентрация радона в природных водах зависит от концентрации радия в породах, через которые мигрируют воды, коэффициента эманирования и времени соприкосновения активизирующих пород с водой.

Экспериментальное изучение сравнительной миграционной способ-

ности радия и мезотория, проводившееся под руководством И.Е. Старика в течение 8 лет, дало возможность установить постоянство отношения процента выщелоченного мезотория-I к проценту выщелоченного радия. Это отношение оказалось близким к единице, что означает почти одинаковую выщелачиваемость и радия и мезотория [Старик и др., 1941б]. Было проведено сравнение миграционной способности радия и иония. В Радиевом институте были проведены экспериментальные исследования возможных процессов перехода радиоактивных элементов из минералов и пород в растворы, проверены разные способы выщелачивания и растворения, аналогичные происходящим природным процессам.

Выяснилось, что торий, находящийся в капиллярах минерала и не входящей в кристаллическую решетку, выщелачивается из минералов [Старик, Полевая, 1957]. Атомы радиотория (изотопы тория), замещающие атомы распавшегося тория, входят в кристаллическую решетку. Переход радиотория в раствор, по мнению И.Е. Старика, связан с растворением минерала, незначительная часть радиотория, которая не вошла в кристаллическую решетку минерала, выщелачиваясь, переходит в раствор, так же как и торий-X, выщелачиваемость же тория-X определяется его диффузией из капиллярной в капельно-жидкую воду. При соприкосновении "гравитационной воды" с минералом наступает равновесие в системе радий—капиллярная вода—радий—гравитационная вода. Этот процесс получил название первичной миграции, в которой отмечаются три стадии: 1) попадание радия и его изотопов из породы в "капилляры"; 2) установление адсорбционного равновесия между радием в растворе и на стенках "капилляров"; 3) установление равновесия (благодаря диффузии) между радием в "капиллярной" воде и радием в гравитационной воде [Щепотьева, 1957].

Опыты И.Е. Старика показали, что большое количество радия выделяется при воздействии сильных кислот даже слабой концентрации [Старик, 1961]. Уран же выделяется только в концентрированные кислоты при значительном разрушении кристаллической решетки, часто при полном разрушении минерала. Уран и торий, являясь первозданными изотопами, не испытывавшие со времени последнего нуклеогенеза ни одного ядерного превращения, входят в кристаллическую решетку минералов вместе с другими устойчивыми элементами. Продукты же распада испытывают при вылете альфа-частиц радиоактивную "отдачу", которую И.Е. Старик сравнивает с отдачей пушки в момент вылета. Благодаря энергии отдачи атом преодолевает сотни межзольных расстояний кристаллической решетки и останавливается в произвольном участке минерала, нарушая строй кристаллической решетки, возможно, переходит в одну из микротрещин природного минерала. По этим трещинам, возникшим под действием тектонических процессов, циркулируют капиллярные воды. Для урана переход в раствор, как считает Старик, возможен только при разрушении кристаллической решетки минерала. При этом в воды поступает также и радий — подвижной элемент щелочноземельной группы. Атом радия при образовании из урана испытывает многократную отдачу и находится в менее прочном состоянии, чем атом первозданного радиоэлемента в кристаллической решетке.

Лабораторные исследования растворимости минералов, проведенные в Радиевом институте, показали, что растворимость вторичных урановых минералов значительно ниже растворимости других минералов, таких, например, как барит (сульфат бария) [Старик и др., 1941a]. Эти результаты подтверждали предположение о меньшей подвижности урана в природных соединениях. При сравнении миграционной способности радия и иония оказалось, что в природных условиях не происходит легкой миграции урана [Старик, Меликова, 1941]. Отмеченное И.Е. Стариком отсутствие радиоактивного равновесия во вторичных урановых минералах могло объясняться выщелачиваемостью радия, хотя при определенных условиях для месторождения в целом возможна незначительная миграция иония.

Различие в поведении урана и тория позднее изучал В.В. Чердынцев. Он отмечал большую активность урана в поверхностных слоях Земли в виде соединений уранила [Чердынцев, 1973]. Скелеты организмов, давших начало известнякам, и карбонатные породы неорганического происхождения обогащены миграционным ураном. Песчаники и сланцы, представляющие измельченный материал более древних пород, сохранили в основном нормальное отношение тория к урану. Торий в магматических процессах, по наблюдениям В.В. Чердынцева, ведет себя пассивно. В очень небольших количествах он поступает в природные воды, и только некоторые его продукты способны к самостоятельной миграции.

Большую миграционную способность урана по сравнению с торием В.В. Чердынцев объясняет различием их химических свойств. Химическими свойствами объясняется и малая подвижность ионов протактиния в обычном пятивалентном состоянии. Миграция радиоизотопов в зоне гипергенеза в основном зависит не только от химических, но и от радиоактивных свойств. В этой зоне главный фактор миграции элементов — природные воды, и в них отклонение радиоизотопов от обычного равновесного содержания отличается в наибольшей степени [Чердынцев, 1973].

4.5. ИЗУЧЕНИЕ СОДЕРЖАНИЯ УРАНА И НЕКОТОРЫХ ПРИРОДНЫХ ИЗОТОПОВ В ВОДАХ СУШИ

Выявить уран в природных водах долго не удавалось, хотя он был известен задолго до открытия явления радиоактивности. Из-за малой чувствительности аппаратуры того времени оказались безуспешными исследованиями на уран вод суши, включая воды урановых месторождений и рассолы. Как исключение можно отметить исследования Ш. Лепьерра, попытавшегося еще в 1908 г. определить химическим путем содержание урана в осадке сернистой воды источника Сан-Винсенте [Lepierre, 1908].

Только спустя 20 лет М. Перейра, П. Форьяж и Х. Корвалью с помощью спектрографического анализа и калориметрических исследований обнаружили в минеральных источниках Португалии уран в количестве $1 \cdot 10^{-8}$ — $1 \cdot 10^{-6}$ г/л воды [Pereira et al., 1930]. Однако найденные ими концентрации урана вызвали сомнения, поскольку применяв-

шиеся ими методы не могли обеспечить чувствительность, необходимую при измерениях таких ничтожных количеств.

Впервые в 1934—1935 гг. Ф. Гернеггеру и Б. Карлику удалось достаточно точно установить содержание урана в природных водах. Для этого они применили разработанный к тому времени люминесцентный метод. Вода из фьордов Швеции, по их данным, содержала урана $(0,3—3,0) \cdot 10^{-6}$ г/л [Hernegger, Karlik, 1935]. В дальнейшем люминесцентный метод определения концентрации урана в природных водах успешно применялся в широких масштабах, что дало возможность установить среднюю концентрацию урана в морях и океанах. Надо отметить, что средняя концентрация урана, установленная первыми работами Гернеггера и Карлика, подтвердилась дальнейшими исследованиями.

В 30—40-х годах наиболее широкие исследования на уран пресных и минеральных вод Центральной Европы провел известный ученый И. Гоффман. Благодаря его работам появилась возможность определения характера концентрации урана в пресных водах. По данным И. Гоффмана, 1940 г., в железистых источниках Франхбада уран содержался в количестве $2 \cdot 10^{-6}$ г/л, в источниках Кортильера — $4,8 \cdot 10^{-5}$, в источниках Кренцбурн — $2 \cdot 10^{-6}$, в кислом и серном источниках Прозауеро достигал $1,6 \cdot 10^{-5}$ и $9,3 \cdot 10^{-5}$ г/л соответственно [Hoffman, 1942]. В Карлсбадских минеральных источниках он обнаружил сдвиг в сторону обогащения вод радием, при содержании урана $1—1,2 \cdot 10^{-5}$ г/л радий составлял $(4,4—4,5) \cdot 10^{-11}$ г/л. В результате исследований многих ученых в начале 40-х годов установлены широкие пределы концентрации урана в водных источниках Центральной Европы: от $0,4 \cdot 10^{-5}$ в реках Марх и Вейндлигбах до $4,7 \cdot 10^{-5}$ г/л в Дунае в районе Вены [Старик и др., 19586].

В 1939—1940 гг. было начато систематическое изучение радиоактивности природных вод в Японии. По данным Н. Никаниши, наибольшая концентрация урана $0,95 \cdot 10^{-6}$ г/л наблюдалась в воде горячего источника Шинорима [Nikanishi, 1947]. Там же отмечена и наибольшая концентрация радия. Большинство источников Японии содержит уран в количествах, меньших $0,4 \cdot 10^{-6}$ г/л; в водах наиболее радиоактивного в Японии источника концентрация урана отмечена в пределах от $0,4 \cdot 10^{-6}$ до $0,04 \cdot 10^{-6}$ г/л, а в известном в Японии горячем источнике Шуденьи урана содержалось еще меньше — около $2 \cdot 10^{-9}$ г/л. Н. Никаниши не удалось обнаружить заметных количеств урана ни в речных водах, ни в подземных источниках.

В речных водах Швеции, по данным Ф. Косци, уран содержится также в незначительных количествах, концентрация урана колеблется в пределах $(0,3—20) \cdot 10^{-6}$ г/л [Koszy, 1954].

В 50-60-х годах в СССР, США и других странах началось систематическое изучение содержания в природных водах также и стабильных изотопов водорода, углерода, азота, кислорода, серы и тяжелых изотопов стронция и свинца.

Было выяснено, что разделение этих изотопов происходит в природных условиях. Так, в результате диффузии, испарения и кинетического эффекта при некоторых природных химических реакциях и биогенных процессах выделяются в первую очередь более легкие

Таблица 12

Средние концентрации различных радиоактивных изотопов в водах континентов по Ф.Ф. Косци (1956 г.)

Изотопы	Концентрация, г/л	Период полураспада	Равновесные концентрации, г/л
Урановый ряд			
^{238}U	$1,3 \cdot 10^{-6}$	$4,5 \cdot 10^9$ лет	$1,3 \cdot 10^{-6}$
^{230}Th	$1,5 \cdot 10^{-11}$	$8,0 \cdot 10^4$ лет	$2,3 \cdot 10^{-11}$
^{226}Ra	$0,7 \cdot 10^{-13}$	1622 года	$4,7 \cdot 10^{-13}$
^{222}Ra	$1,0 \cdot 10^{-14}$	3,825 сут	$3,0 \cdot 10^{-18}$
Ториевый ряд			
^{232}Th	$2,0 \cdot 10^{-11}$	$1,389 \cdot 10^{10}$ лет	
^{220}Ra		54,5 с	

изотопы. По данным 1975 г. все земные вариации изотопов углерода, кислорода и серы не намного отличаются от их содержания в метеоритах [Тугаринов, 1975]. Что касается тяжелых изотопов, то их содержание колеблется в достаточно широких пределах за счет непрерывного и необратимого их образования в процессе распада урана, тория, рубидия.

На основании систематического изучения содержания дейтерия в природных водах, проведенного в США, был сделан вывод о происхождении гидротермальных растворов за счет поверхностных вод и их глубинной циркуляции [Taylor, 1974].

Полученные в Швеции, США и Канаде средние значения концентрации радиоактивных изотопов оказались в основном близкими к средней концентрации изотопов в природных водах континентов (табл. 12).

В СССР изучением концентрации урана в природных водах в начале 30-х годов занимались в Радиевом институте под руководством В.И. Вернадского. Несмотря на недостаточность сведений об ураноносности природных вод в то время, В.И. Вернадский, исходя из общегеохимических представлений, высказал предположение о повсеместном нахождении урана и возможной его широкой миграционной способности в земной коре [Вернадский, 1954]. Изучение распределения урана в природных водах, по словам В.И. Вернадского, могло дать важные фактические материалы, характеризующие некоторые геологические и геохимические процессы.

С 1947 г., после окончания Великой Отечественной войны, у нас в стране началось систематическое изучение распространенности урана в природных водах. Изучение концентрации урана в водах суши имеет важное практическое значение при поисках урановых месторождений, поскольку дает возможность установить законы миграции урана в зоне гипергенеза. Именно в такого рода зонах могут происходить формирования крупнейших скоплений урановых минералов и месторождений осадочного типа (рис.4) [Радиевый институт..., 1972]. В эти годы работы проводились под руководством И.Е. Старика, а позднее Д.С. Николаева.

Были обследованы воды рек Печоры, Мезени, Северной Двины,

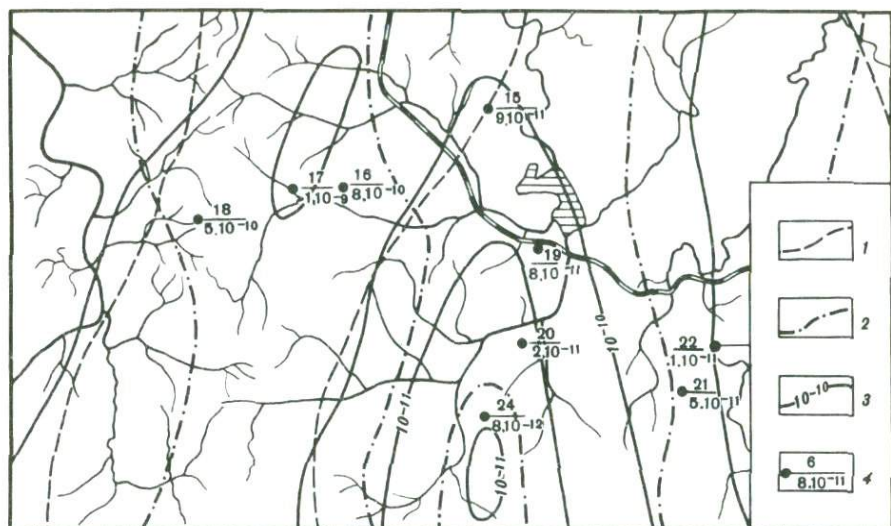


Рис. 4. Макет карты радиеносных вод для одного стратиграфического горизонта палеозойских пород (по В.М. Куканову)

1 — границы распространения литологических комплексов пород; 2 — изогипсы кровли пород; 3 — изогипсы содержания в водах радия, г/л; 4 — опорные радиогидрогеологические точки; цифры справа означают: в числителе — номер скважины, в знаменателе — содержание в водах радия, г/л

Невы, Волги, Оки, Камы, Белой, Дуная, Днестра, Риони, Терека и других крупнейших рек европейской части страны [Старик и др., 19586]. Исследована радиоактивность вод Оби, Иртыша, Катуня, Ангары, Селенги, Иркуты, Абакана, Лены, Амударьи, Сырдарьи, Урала, Нарына и других рек Сибири и Средней Азии. Изучались воды озер Ладожского, Имандры, Севана, Байкала, Зайсана, Кулундинского и др. Исследования образцов вод на содержание урана и радиоактивность проводились люминесцентными и калориметрическими методами.

Наибольшая концентрация урана в поверхностных водах, по данным, 50-х годов, порядка $(6,5-10) \cdot 10^{-6}$ г/л отмечена в водах Сырдарьи, наименьшая около $0,15 \cdot 10^{-6}$ г/л — в водах рек Ковда (у истока), Голец (близ впадения в оз. Имандра) [Там же]. Неожиданно высокая концентрация урана, в десятки раз большая, чем в водах рек, оказалась в водах некоторых колодцев и источников в Казахстане. Так, в одном колодце концентрация урана составляла $(52-100) \cdot 10^{-6}$ г/л, а в одном из источников, вытекающем из гранитов, количество урана было еще больше — порядка $120 \cdot 10^{-6}$ г/л [Старик и др., 19586].

В результате многолетних экспедиционных исследований на обширной территории страны удалось собрать фактические данные об ураноносности природных вод, установить вариации в содержании урана и изотопов уранового ряда в природных водоемах. Оказалось, что в природных водах преобладают изотопы уран-238 и торий-232, что в водах отношение $^{238}\text{U}/^{232}\text{Th}$ выше, чем в горных породах. Кроме того, было установлено, что в природных водах концентрация

изотопов уранового ряда ^{236}Th и ^{220}Ra ниже их возможных равновесных содержаний.

В послевоенный период начались интенсивные исследования ураноносности и нефтяных пластовых вод. С 1956 г. проводилось систематическое изучение концентрации урана в водах нефтяных месторождений Азербайджана под руководством Р.А.Алекперова и Г.Х. Эффендиева [1959]. По их данным, максимальное количество урана накапливается в гидрокарбонатнонатриевых водах, причем накопление урана идет параллельно с изменением солености вод.

Позднее исследования пластовых вод нефтяных месторождений Азово-Кубанской депрессии провел В.А. Филонов. Он, как и в Баку, обнаружил те же закономерности распределения концентрации радиоактивных элементов в пластовых водах нефтяных месторождений. По его данным, влияние нефтяной залежи наиболее полно проявляется в зоне водонефтяного контакта, в этой зоне уменьшается концентрация урана и накапливается радий [Филонов, 1962а]. В другой работе, рассматривая распределения радиоэлементов в пластовых водах месторождений Северного Предкавказья, В.А.Филонов указывает на их отличие от поверхностных вод. В пластовых водах, по данным В.А. Филонова, уран либо отсутствует, либо присутствует в незначительных количествах порядка $n \cdot 10^{-7}$ — $n \cdot 10^{-8}$ г/л [Филонов, 1962б]. Там же указывается на то, что в некоторых пробах уран содержится в больших количествах, доходя до $n \cdot 10^{-6}$ — $n \cdot 10^{-5}$ г/л.

Сравнивая полученные разными авторами сведения об ураноносности нефтяных пластовых вод, можно отметить общее в их выводах, касающееся изменения отношения радия к урану по мере удаления вод от нефтеносных площадей. Это отношение во многих случаях приближается к равновесному или смещается в сторону урана, в то время как в зоне водонефтяного контакта отношение радий/уран всегда смещается в сторону радия [Эффендиев и др., 1964].

Кроме того, было отмечено, что содержание урана в пластовых водах нефтяных месторождений, так же как и содержание в них радия, зависит от геохимического типа пластовых вод. По данным 50—60-х годов, содержание урана в пластовых водах в среднем можно считать близким к $n \cdot 10^{-7}$ — $n \cdot 10^{-6}$ г/л. Равновесие же радия и урана обычно сдвинуто в сторону радия [Там же]. В водах некоторых месторождений отмечено также изменение содержания изотопов радия во времени.

В 1953 г. советские ученые В.В. Чердынцев, П.И.Чалов и др. открыли явление естественного разделения урана-234 и урана-238. Ранее считалось, что для такого разделения необходимы особые условия. Суть открытия состояла в том, что разделение изотопов урана-234 и урана-238 происходит в естественных условиях при переходе этого тяжелого элемента периодической системы из природных кристаллов в жидкости, в том числе и в природные воды. При этом жидкость обогащается ураном-234, а образующийся при распаде урана-238 атом отдачи (уран-234) разрушает кристаллическую решетку, выбрасывая в пространство нарушенной структуры кристалла тысячи атомов. Поскольку атом урана-234 остается в разрушенной

области и впоследствии превращается в атом урана-234, в нарушениях природных кристаллов создается избыток урана-234 по отношению к урану-238. Природная вода или другая жидкость со временем выносит "уран-элемент", обогащенный ураном-234 [Конюшая, 1979].

Исследования советских ученых, подтвержденные работами коллег США, Японии, Англии и других стран, показали, что весь уран гидросферы и уран, поступивший из вод в другие земные образования, обогащены легким изотопом. Было доказано, что равновесное соотношение между ураном-234 и ураном-238 для урана, связанного с водой, является исключением [Чалов, 1975]. Даже в Мировом океане, большой природной системе, по данным Чалова, избыток урана-234 составляет около 17%.

Обнаружение разделения изотопов урана в естественных условиях показало, что методы измерения геологического времени для четвертичного периода истории Земли, основанные на накоплении промежуточных продуктов распада урана-238, дают неверные результаты, так как их исходной посылкой является невозможность разделения этих изотопов в естественных условиях [Конюшая, 1979].

Измерения содержания неравновесного урана с избытком урана-234 стали в дальнейшем использоваться для интерпретации радиоактивных аномалий при поисках и разведке уранового сырья. Кроме того, измерения содержания неравновесного урана дали возможность определять длительность существования крупных континентальных водоемов. В СССР по методу неравновесного урана были определены некоторые этапы истории Аральского моря, озер Балхаш и Иссык-Куль. Были получены новые данные о происхождении их вод, связях между ними в прошлом, это помогло решить некоторые другие ранее спорные вопросы. Решение таких вопросов имеет не только научное, но и важное народнохозяйственное значение, поскольку позволяет оценивать перспективы развития крупных водоемов, обоснованно решать вопросы природного экономического баланса и водообеспечения, а также охраны природной среды [Там же].

Методы измерения содержания неравновесного урана и учет его распределения в земной коре дают возможность решать многие задачи гидрологии, выявлять скрытые разломы земной коры.

Изучение содержания урана и его изотопов в поверхностных и пластовых водах дает возможность оценить среднюю концентрацию урана и его изотопов в данном регионе, выявить геохимические причины и условия перехода урана из твердой в жидкую фазу, проследить за дальнейшим его перемещением с жидкой фазой, установить момент перехода в осадок.

Для гидрологических исследований большое значение имело изучение содержания в природных водах изотопов радона, углерода, серы, стронция, кислорода, водорода и других элементов.

Изучение содержания радона и его изотопов в природных водах подтвердило возможность наличия теоретически предсказанной высокой его концентрации, превышающей почти на несколько порядков равновесное содержание. Систематическое изучение содержания радона и его изотопов в реках и озерах помогло получить дополнительную

ценную информацию о продвижении вод в земной коре, процессах перемешивания вод в водоемах и глубинных зонах.

В 50—60-х годах во многих странах мира, в том числе в СССР, широко развернулись систематические исследования концентрации изотопов углерода, особенно ^{14}C , в природных водах. Эти изотопы образуются в атмосфере под действием нейтронов космических лучей в форме двуокси углерода. Позднее было обнаружено образование изотопов углерода под действием нейтронов, высвобождающихся во время ядерных взрывов. При постоянном обмене изотопами углерода между атмосферой и биосферой общее перемещение углерода при образовании осадков составляет 4% от общего количества углерода [Ранкама, 1956]. По данным Е.К.Андерсона и В.Ф. Либби, все процессы перемешивания в гидросфере, атмосфере и биосфере заканчиваются, вероятно, в более короткий период, чем средняя продолжительность жизни ^{14}C [Anderson, Libby, 1951]. Либби показал, что концентрация изотопа ^{14}C во всем живом нашей биосферы одинакова и совпадает с исходной его концентрацией в атмосфере [Libby, 1946]. Как только гибнет живой организм, его изотоп углерода выключается из процесса кругооборота веществ в природе. Следует подчеркнуть, что при этом в погибший организм также не поступают новые порции изотопа. Эти наблюдения послужили основанием для разработки В.Ф.Либби нового радиоуглеродного метода определения абсолютного возраста долгоживущих растений, горных и вулканических пород, ископаемых остатков животных и т.д.

Изучение изотопов углерода дало возможность установить в начале 50-х годов мировое распределение изотопа ^{14}C и определить его среднее значение для нашей планеты [Ранкама, 1956]. Было установлено, что изотоп углерода неорганического происхождения более радиоактивен, чем органического. Отмечены различия в содержании изотопов древнейших органических остатков, что дало основание широко применять радиоуглеродный метод датирования четвертичных отложений, а также в археологии и антропологии.

Было выяснено, что распределение радиоуглерода в земной коре до некоторой степени зависит от циркуляции воды в природе. Кроме того, отмечены колебания в содержании изотопов серы — ^{32}S и ^{34}S в природных водах и их распространенности на Земле, вызванные их разделением во время длительных геологических и биологических процессов [Rankama, 1952]. Разделение этих изотопов, как считают, происходит за счет различия химических свойств молекул, содержащих серу.

В 50-х годах были изучены четыре известных в настоящее время изотопа стронция: ^{84}Sr , ^{86}Sr , ^{87}Sr и ^{88}Sr . Было установлено постепенное накопление ^{87}Sr , являющегося продуктом распада рубидия ^{87}Rb , и значительное (в 5 раз) увеличение отношения $^{87}\text{Sr}/^{98}\text{Rb}$ в земной коре [Ранкама, 1956]. Поскольку, как оказалось, содержание стронция в морской воде очень велико, а рубидия мало, то по отношению изотопов стронция различного происхождения, например $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, стало возможным определять возраст карбонатных пород.

По содержанию изотопов свинца различного происхождения в по-

верхностных водах оказалось возможным судить о циркуляции водных растворов в земной коре, продолжительности тех или иных геологических процессов и наметить пути практического использования изотопного состава вод для разведки некоторых рудных месторождений.

Большинство исследований, касающихся изотопного состава кислорода и водорода в природных водах, проводятся совместно. Полученные результаты могут оказать существенную помощь в изучении водообмена разных звеньев гидросферы, поскольку при кругообороте природные воды участвуют в разнообразных физико-химических процессах, сопровождающихся различным по величине фракционированием изотопов кислорода и водорода, входящих в состав воды.

Концентрация изотопа кислорода ^{18}O в поверхностных водах отличается от его содержания в воздухе. Выяснилось, что максимальное отношение изотопов кислорода $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ соответствует минимальному количеству растворенного кислорода, наблюдаемому в море на глубине около 650 м [Ранкама, 1956], что все морские, а возможно, и речные организмы, усваивают преимущественно изотоп кислорода ^{16}O , в результате чего создается заметное разделение изотопов кислорода в природных условиях.

И. Фридман и Г. Юри с помощью масс-спектрометрического метода установили, что в природных условиях разделение изотопов кислорода происходит в процессах испарения и конденсации [Friedman, Urey, 1952]. При этом происходит также и разделение изотопов водорода.

Изучение распространения в природных водах изотопов водорода связано с открытием в 1932 г. тяжелого изотопа водорода, названного дейтерием (D). Американские ученые Г. Юри и Г. Мэрфи рассчитали по формуле Н. Бора соотношение изотопов водорода и наблюдали их с помощью оптической спектрографии [Urey et al., 1932]. В отличие от изотопа с массовым числом 1, названным протием, у дейтерия массовое число равно 2. Позднее, в 1939 г., открыли новый стабильный радиоактивный изотоп водорода с массовым числом 3, получивший название трития (^3H , или T). Известно, что в чистой воде, имеющей формулу H_2O , все водородные атомы состоят из протия; вода с дейтериевыми водородными атомами (D_2O) называется тяжелой, или дейтериевой, водой; вода с тритиевыми водородными атомами (T_2O) называется тритиевой [Ранкама, 1956]. Помимо указанных изотопов водорода, в состав воды входят в различных комбинациях изотопы кислорода, образующие около 18 различных молекул воды.

В 40-х годах во всех странах началось изучение распределения содержания дейтерия в земной коре и природных водах. Единство природных вод нашей планеты потребовало исследований изотопного состава самых различных типов вод. Знание закономерностей распределения дейтерия в природных поверхностных водах может помочь в выяснении источников формирования изотопного состава земной коры, поскольку движение вод в земной коре зависит от кругооборота поверхностных вод. Исследования концентрации дейтерия в атмос-

ферных осадках, проведенные в разных странах, показали, что в них содержится минимальное количество дейтерия, причем его концентрация колеблется в зависимости от времени года, географического положения и характера самих осадков.

Максимальная концентрация дейтерия в дождевой воде обычно отмечается в летних дождях, минимальная — в декабрьских и февральских снегах [Брезгунов, 1967]. Вариации концентрации дейтерия в атмосферных осадках отмечаются в интервале от 0,88 до 1,0 (относительно стандарта), в реках, проточных озерах и грунтовых водах дейтерий отмечен в пределах от 0,91 до 1,02, а в бессточных водах и морях его пределы равны от 1,08 до 1,13. Сведения о многочисленных работах по исследованиям содержания дейтерия в природных водах сведены в библиографическом справочнике А.Г. Кимбэла, изданном в США в 1949 г. [Kimbell, 1949].

В СССР работы по определению концентрации дейтерия в природных водах были начаты в 50-х годах сотрудниками Института ядерной геофизики и геохимии под руководством Ф.А. Алексеева. Содержание дейтерия в водах рек европейской части страны оказалось близким к содержанию в атмосферных осадках, за исключением вод р. Москвы, где колебания концентрации дейтерия могли быть связаны с сезонными явлениями [Брезгунов, 1967]. По данным ВНИИЯГГ, в поверхностных водах европейской части СССР дейтерия содержится несколько меньше в северных, чем в среднеевропейских реках, хотя их режим сходен, но видимо, имеется разница в испарении с площади водосбора. В сибирских реках дейтерия еще меньше, что объясняется влиянием холодных питающих масс за счет таяния высокогорных снегов.

Особое значение для гидрогеологии имели исследования содержания дейтерия в подземных водах артезианских бассейнов. ВНИИЯГГ исследовались Днепровско-Донецкой, Волго-Уральский, Западно-Сибирский, Ангаро-Ленский, Азово-Кубанский, Амударьинский, Ферганский, Азербайджанский и другие артезианские бассейны.

Большинство исследованных артезианских бассейнов являются нефтегазоносными, поскольку именно в такого рода бассейнах возможен достаточно представительный отбор проб из водоносных горизонтов наблюдательных, разведочных и эксплуатационных скважин. Во всех бассейнах исследовался изотопный состав водорода подземных вод самого различного возраста. Концентрация дейтерия в них сильно колеблется, но не выходит за пределы значений, характерных для поверхностных вод [Брезгунов, 1967]. Этот факт дает основание высказать предположение о генетической связи подземных и поверхностных вод и, что также существенно, об отсутствии значительного фракционирования изотопов водорода при движении вод в земной коре. Оказалось, что воды с концентрацией дейтерия, близкой к современным морским водам, составляют менее 5% от общего количества исследованных проб подземных вод, что залегают они на глубинах 1000 м и более и имеют высокую минерализацию.

В пределах одного бассейна, как выяснилось, содержание дейтерия широко колеблется, и эти колебания, как правило, связаны с увеличением концентрации дейтерия в застойных зонах по сравнению

с зонами более активного водообмена. Различие в изотопном составе, в том числе в содержании дейтерия, в пластовых водах, близких к поверхности и взятых с больших глубин, дает основание связывать формирование их изотопного состава с инфильтрационным происхождением подземных вод в зонах гипергенеза или с процессами фракционирования изотопов водорода при движении вод в земной коре. Сопоставление концентрации дейтерия в поверхностных и подземных водах определенного артезианского бассейна, по данным ВНИИЯГГ, позволяет уточнить происхождение подземных вод, выделить различные гидродинамические зоны, выявить области питания [Брезгунов, 1967].

Предполагалось, что формирование изотопного состава водорода подземных вод происходит за счет смешения инфильтрационных и седиментационных вод с соответствующим содержанием дейтерия. Другие процессы фракционирования изотопов водорода при миграции вод в земной коре оказывают существенно меньшее влияние на ее изотопный состав. Подтверждением этого положения могло служить отмеченное исследователями совпадение интервала изменения концентрации дейтерия в подземных водах из разновозрастных отложений с разным химическим составом с соответствующим интервалом для природных вод, участвующих в современном гидрологическом цикле, а также корреляция содержания в подземных водах тяжелых изотопов водорода и кислорода [Там же].

Изучение свойств и содержания в природных водах тяжелого радиоактивного изотопа водорода — трития (Т, или ^3H), открытого в 1939 г., началось особенно интенсивно после первых испытаний атомного оружия. Естественный тритий, как было ранее указано, образуется в верхних слоях атмосферы под действием нейтронов космического излучения высокой энергии на атомы азота [Libby, 1946]. На высоте около 80 км, по данным Либби, пары воды полностью диссоциируются фотохимически в атомы кислорода и водорода, а следовательно, тритий, образованный космической радиацией, не может входить в молекулы воды [Ранкама, 1956]. Вместо этого он образует молекулы, которые в очень низкой концентрации взаимодействуют с кислородом и в виде тритиевой воды атмосферных осадков участвуют в круговороте воды в природе. Период полураспада трития около 12,5 лет. Содержание трития в атмосферном воздухе чрезвычайно низкое: в 10 см^3 воздуха присутствует только один атом трития, а вся атмосфера содержит приблизительно одну грамм-молекулу (около 6 г) трития [Faltings, Harteck, 1950]. Общее количество трития ограничивается также равновесием между его образованием и распадом. Следы трития всегда присутствуют в атмосфере Земли и природных водах.

Первые определения содержания трития в поверхностной воде были сделаны Гроссе и др. в 1951 г. на образцах, коэффициент обогащения которых составлял 10^6 по сравнению с первоначальной поверхностной водой [Grosse et al., 1951]. В 1952 г. Либби предложил использовать тритий при определении возраста составляющих вод разного происхождения и географического происхождения

дождевой, ледниковой или другой воды [Libby, 1952a, b]. По его данным оказалось, что при определенных условиях содержание трития в дождевой воде в 20 и более раз превышает содержание его в речной воде. Высокая концентрация трития, по предположениям Либби, должна наблюдаться в засушливых районах с редкими дождями, в которых тритий, образовавшийся под действием космического излучения, мог со временем накапливаться. В дальнейшем Либби предположил, что наблюдаемые различия в содержании трития в воде являются мерой измерения времени пребывания паров воды в атмосфере [Libby, 1952a, b; Ранкама, 1956]. В 1951 г. Б. Хартек считал возможным использовать тритий для геохронологии.

Исследования Либби содержания трития в водах озер в США и Норвегии показали, что трития в оз. Мичиган в 5 раз больше, чем в норвежских озерах [Libby, 1953]. Различие, по его мнению, могло быть объяснено за счет источников поступления трития.

Работы советских исследователей подтвердили возможность применения трития в качестве природного индикатора. Поскольку образования трития в земной коре практически не происходит, то по концентрации трития в воде изучаемого резервуара можно определить средний возраст воды или время нахождения ее в этом резервуаре, а также рассчитать скорость оборота воды [Глазов, 1962]. Для такого рода исследований необходимо знать содержания трития, которое изменяется и во времени в атмосферных осадках в разных географических зонах. Изучение содержания трития в водах рек дало возможность произвести расчет скорости оборотов в бассейне грунтовых вод и определить удельное значение источников их питания.

Метод измерения природного трития был применен и для контроля за обводнением подземных разработок каменного угля, железной руды, слюды и других полезных ископаемых. При этом могли решаться самые различные гидрологические задачи, например динамическая задача, основанная на определении возраста поступающей в выработку воды. По определениям содержания трития были выявлены источники обводнения шахт, а также степени обводнения нефтяных месторождений в процессе их разработки.

В 50-х годах за счет испытаний термоядерного оружия в атмосфере содержание трития в природных водах увеличилось более чем в 10 раз [Эриксон, 1964]. Наблюдения за содержанием трития оказались чрезвычайно важными, поскольку давали картину ядерного загрязнения природных вод. Новые добавки трития, связанные с ядерными взрывами, ученые стали использовать в качестве искусственных индикаторов. Резкое изменение содержания трития служило своеобразным репером и давало возможность следить за движением медленных горизонтальных водных потоков в озерах и других водоемах суши [Эриксон, 1964]. Систематические наблюдения за вариациями содержания трития в природных водах давали геологам и гидрологам возможность наблюдать как бы слоистую структуру грунтовых вод, изучать степень проникновения атмосферных осадков в земную кору.

4.6. ФОРМИРОВАНИЕ РАДИОГИДРОГЕОЛОГИИ

Формирование радиогидрогеологии как самостоятельный научно-технической дисциплины можно отнести к началу 50-х годов. Объектом новой науки являются природные воды Земли, предметом — их изотопный состав различного происхождения. Изучение изотопного состава, а в дальнейшем и радиоактивного излучения природных вод в рамках радиогидрогеологии проводится физико-химическими и радиометрическими методами специалистами, получившими подготовку в высших учебных заведениях. В СССР подготовка специалистов в области радиогидрогеологии предусматривается программами геологических и геологоразведочных высших учебных заведений, соответствующих кафедр в других вузах.

Со времени открытия радиоактивности горячих источников за почти 50-летний период были проведены широкие обследования природных вод суши, фундаментальные физико-химические исследования поведения радиоактивных элементов и изотопов, разработано и с успехом применялось большое количество специальных ядерно-физических методов, в том числе методов, основанных на использовании природных изотопов, искусственных изотопных индикаторов, использующих герметизированные радиоактивные источники, и др. С их помощью проводятся поисково-рекогносцировочные, поисково-съёмочные, поисково-разведочные исследования природных вод суши, а также наблюдения во время эксплуатации тех или иных источников.

Поисковые радиогидрогеологические рекогносцировочные работы обычно проводятся с целью предварительного ознакомления с радиоактивными характеристиками изучаемой территории, выявления районов повышенной радиоактивности и т.п. В результате такого рода работ составляются мелкомасштабные (1:1 000 000; 1:500 000; 1:200 000) радиогидрогеологические карты [Токарев, Щербаков, 1956]. По этим картам определяются районы радиоактивных лечебных вод, а также районы вод, богатых ураном, радием и радоном (рис. 5).

По картографическим отображениям радиогидрогеологических условий исследованных территорий проводится особое радиогидрогеологическое районирование страны. По полученным данным о радиоактивности природных водных источников при районировании выделяются главнейшие комплексы пород, с которыми связаны радиоактивные воды, в том числе, например, нефтеносные фации. Типовые средненормальные гидрохимические разрезы нефтяных и газовых месторождений, построенные по полевым и лабораторным материалам, дали возможность, например в Азербайджане, определить средний химический состав вод, приуроченных к различным стратиграфическим горизонтам [Гаджи-Кусумов, Карцев, 1975].

При радиогидрогеологических исследованиях с помощью радиоактивных и стабильных изотопов-индикаторов или по измерениям гамма- и нейтронного излучения можно получить сведения о фильтрационных свойствах пород, установить направление и скорость движения подземных потоков, оценить условия питания грунтовых вод, взаимосвязь водоносных пластов, а также связь поверхностных и подземных вод (рис. 6). Глубинные воды являются растворителем

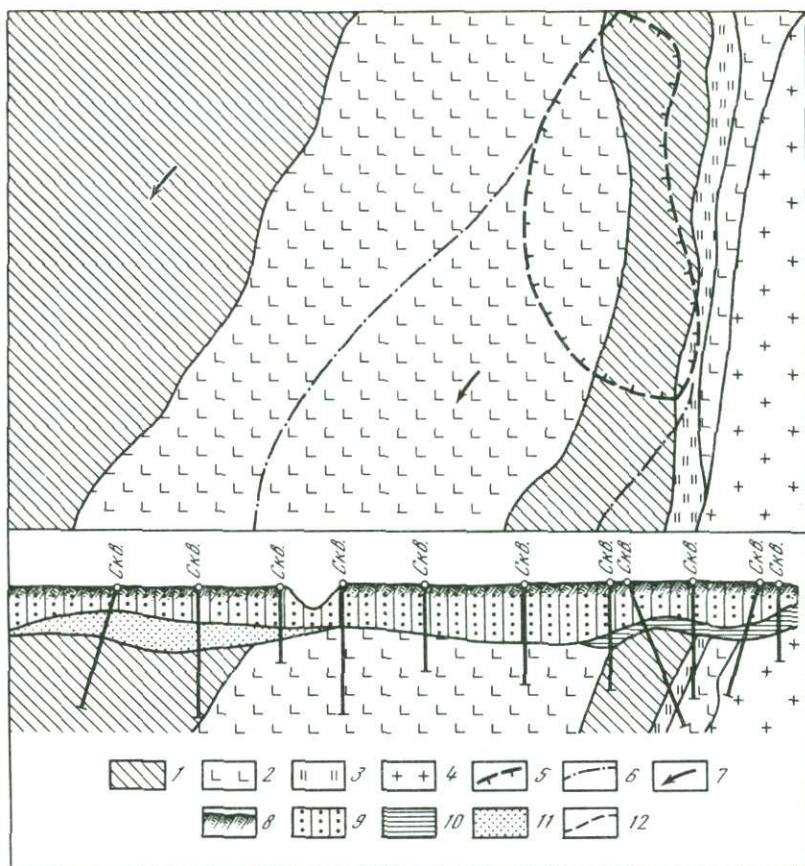


Рис. 5. Макет карты радиоактивных вод докембрийских отложений по А.Н. Токареву и А.В. Щербакову

1 — роговики амфиболо-магнетитовые; 2 — гнейсы амфиболовые, биотитовые; 3 — сланцы гранато-амфиболовые; 4 — граниты; 5 — граница радиогидрогеологических аномалий; 6 — граница радиогидрогеологического ореола рассеяния; 7 — направление движения подземных вод; 8 — почва; 9 — лессовые суглинки; 10 — глины; 11 — пески; 12 — уровень воды

химических и радиоактивных элементов пород. Их изотопный состав оказался чрезвычайно надежным показателем как глобальных, так и региональных природных процессов [Изотопы гидросферы, 1975].

Идеальными индикаторами некоторых гидрогеологических процессов, таких, как взаимодействие воды с породами, газами, органическими соединениями и др., оказались изотопы водорода и кислорода. В 50—60-х годах было начато изучение закономерностей формирования изотопного состава вод отдельных природных резервуаров с целью установления процессов движения глубинных вод и их происхождения. В подземных водах, как было установлено, условия разделения изотопов водорода и кислорода практически не меняются и наследуются с момента их формирования [Изотопы гидросферы, 1975. С. 62].

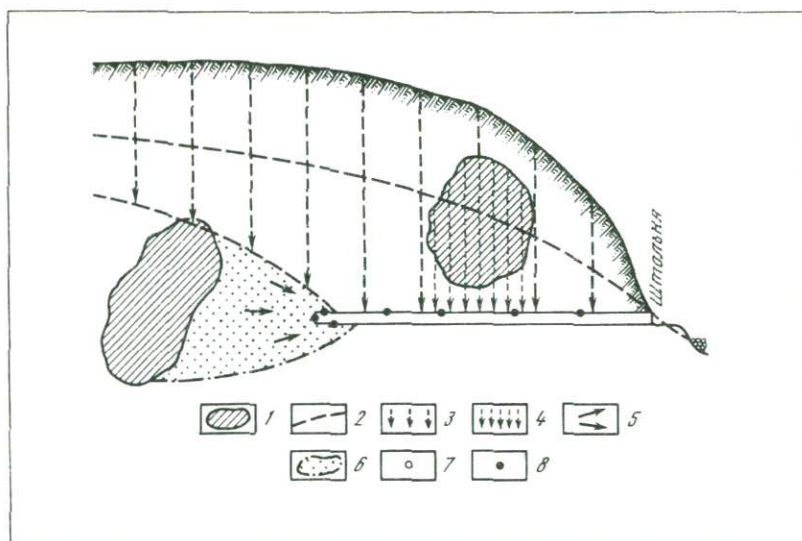


Рис. 6. Возможные положения водных аномалий по отношению к рудному телу по А.Н. Токареву и А.В. Щербакову

1 — рудное тело; 2 — уровень подземных вод; 3 — натуральный фон; 4 — аномальное содержание; 5 — направление движения подземных вод; 6 — ореол аномальных вод; 7 — места взятия проб воды; 8 — аномальные водоисточники

В связи с этим по содержанию дейтерия в подземных водах, например, может быть выявлена доля вод морского или атмосферного происхождения даже при одинаковом солевом их составе. На изменение содержания в подземных водах изотопа кислорода ^{18}O основное влияние оказывают процессы, отражающиеся в изменении соотношения концентрации ^{18}O в "первичной" подземной воде и водо-вмещающих кислородсодержащих породах, степени равновесия между кислородом воды и породы, а также в изменении температуры, соответствующей такому равновесию. Эти факторы ведут к кислородному изотопному сдвигу, т.е. к обогащению воды тяжелым кислородом за счет обмена с кислородом вмещающих пород.

Выявление кислородного сдвига, в свою очередь, дает возможность определять температуру взаимодействия воды и породы, что на практике позволяет с большей степенью надежности отличать термальные воды, прошедшие стадию глубинной миграции, от "местных грунтовых вод" даже при равенстве их температур. Следует отметить, что надежность расшифровки радиогидрогеологических определений зависит от всего комплекса данных. При расшифровке изотопных данных всегда необходимо учитывать общие геологические, гидрологические, океанологические и гидрогелогические условия данного региона [Там же. С. 41].

Радиогидрогеологические данные оказались весьма надежными в выработке геохимических предвестников землетрясений, поскольку области распространения основной массы очагов землетрясений зем-

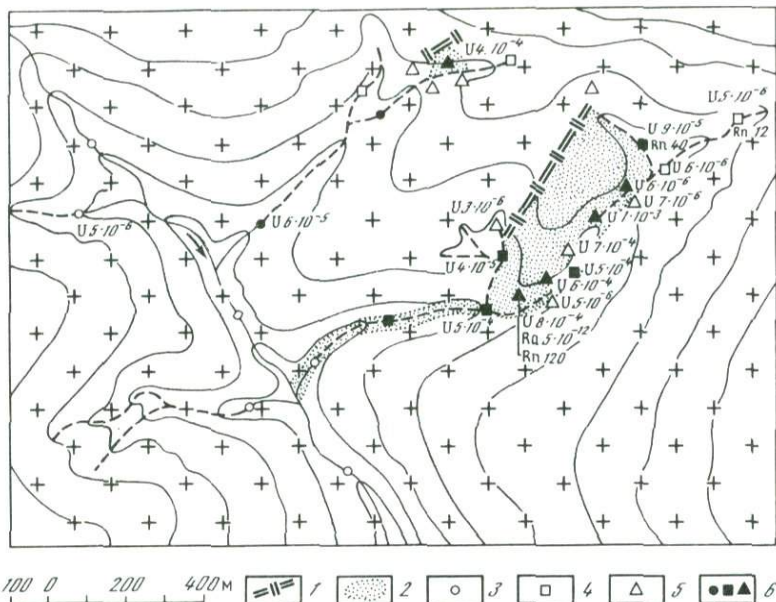


Рис. 7. Макет карты радиологического опробования вод разведочных выработок (по А.Н. Токареву и А.В. Щербакову)

1 — рудоносная структура; 2 — ореолы аномальных вод; 3 — места взятия проб воды из источников и ручьев; 4 — шурфы, пройденные в первой стадии поисковых работ; 5 — шурфы, пройденные во второй части поисковых работ; 6 — аномальные водоисточники, цифры указывают содержание урана и радия в г/л и содержание радона в эманах

ного шара и воды в земной коре совпадают. Изучение радиогидрогеологических условий в сейсмоактивных районах СССР обнаружило изменение содержания изотопов урана в глубинных и поверхностных водах во время невыясненных процессов, предшествующих или (и) сопутствующих землетрясениям [Тыминский, 1971].

Советскими исследователями было установлено, что в результате землетрясений в подземных водах могут изменяться концентрации изотопов урана и других элементов, а также концентрация радиогенных газов: гелия, радона и аргона. Так, например, по данным В.Г. Тыминского, перед Ташкентским землетрясением 1966 г. концентрация радона в местных минеральных водах увеличилась почти в 5 раз, а после землетрясения изменились содержание гелия и изотопный состав урана, углерода, аргона. Предполагалось, что процесс подготовки землетрясения сопровождается интенсификацией физико-химических процессов обогащения подземных вод, созданием газохимической аномалии, проявляющейся в широкой гамме химических показателей [Конюшая, 1979]. Эти аномалии помогают получить важную информацию о процессах, протекающих на больших глубинах.

Изучение Дагестанского землетрясения 1968 г. подтвердило высказанные предположения об изменении изотопного состава вод перед землетрясением. Аналогичная проверка была проведена и в других

районах СССР. На основе изменения изотопного состава минеральных вод в 1970 г. было предсказано землетрясение в Сарыкамыше за три месяца до сейсмического толчка. Приведенные данные свидетельствуют о необходимости систематического изучения химического и изотопного состава природных вод в сейсмоактивных районах. Изменение радиоактивности и химического состава природных вод свидетельствует об активности происходящих геологических процессов и путях миграции радиоактивных элементов в условиях высокой тектонической активности [Тыминский, 1971].

Радиогидрогеологические исследования оказались чрезвычайно важными и незаменимыми при решении важнейшей проблемы распределения воды на Земле. Эта проблема особенно остро начала проявляться в 50—60-х годах, когда в ряде стран начала ощущаться нехватка воды. Поскольку природные процессы перемещения влаги в гидрологическом цикле носят глобальный характер, в 1964 г. по инициативе ЮНЕСКО в рамках международного гидрологического десятилетия начались совместные исследования [Справочное руководство..., 1971]. Предполагалось в разных странах одновременно по единой программе провести работы по установлению закономерностей распределения и перемещения поверхностных и подземных вод (рис. 7). Организованный координационный международный совет создал ряд рабочих групп, в том числе группу по ядерным методам в гидрологии и гидрогеологии. В состав этой группы вошли представители Англии, Индии, Израиля, Италии, СССР, США, Франции, ФРГ и Швеции, а также представители Международного агентства по атомной энергии, ЮНЕСКО и других международных организаций. Группа разработала и издала "Справочное руководство по применению ядерных методов в гидрологии и гидрогеологии" на русском и английском языках в 1971 г. Согласно этому руководству, радиогидрогеологические исследования проводились по намеченному в каждой стране плану.

Как было показано, практическое применение методов радиогидрогеологии для изучения изотопного состава природных вод Земли дает возможность получать объективные данные, необходимые при решении принципиальных вопросов гидрологии, гидрогеологии, океанологии и метеорологии с позиции единства всех вод планеты, что особенно важно при изыскании практических путей рационального использования водных ресурсов Земли.

ИЗУЧЕНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ РАДИОИЗОТОПОВ В МОРЯХ И ОКЕАНАХ

5.1. НАЧАЛО СИСТЕМАТИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ РАДИОАКТИВНОСТИ МОРСКИХ ВОД И ОСАДКОВ

Первые исследования радиоактивности морских вод и осадков были выполнены в начале XX в. Дж. Джоли. Он исследовал образцы вод и осадков, взятые со дна океанов исследовательским судном "Челленджер" в 1872—1876 гг. во время кругосветного путешествия. В некоторых образцах глубоководных отложений, особенно в красных глинах, поднятых с больших глубин, Дж. Джоли выявил чрезвычайно большое содержание радия — порядка 10^{-11} г/г [Joly, 1908].

Высокое содержание радия в глубоководных образцах Дж. Джоли считал закономерным и соответствующим возможному, по его мнению, общему ходу повышения радиоактивности с глубиной океана. Он считал, что глубоководный радий постоянно накапливается по мере осаждения его из поверхностных вод. Кроме того, на больших глубинах может образовываться дополнительный радий за счет распада урана. В дальнейшем определения Дж. Джоли чрезмерно высокого содержания урана в глубоководных океанических отложениях подтвердились исследованиями К.С. Пиггота и Г. Петтерсона. Объяснения же причин этого явления оказались ошибочными и были опровергнуты работами В. Урри и Ф. Хехта.

По данным В. Урри и К.С. Пиггота, концентрация радия в океанических осадках меняется по сложному закону: в верхних частях кернов содержание радия сначала увеличивается, затем после достижения максимальной величины уменьшается до какой-то средней постоянной величины [Piggot, Urry, 1941].

Изменение концентрации радия в глубоководных отложениях по такому достаточно сложному закону, по мнению Пиггота и Урри, также может являться свидетельством нарушения радиоактивного равновесия в ряду урана при выпадении его в осадок.

Изучение сочетаний радиоэлементов в море, проведенное в последующие годы, показало, что морская вода содержит уран в количествах, значительно больших, чем можно было ожидать исходя из условий радиоактивного равновесия с имеющимся радием. В то же время, как было замечено, содержание радия в донных отложениях

было значительно больше, чем то, которое можно было предполагать исходя из содержания урана. Кроме того, прямые определения содержания урана в глубоководных осадках выявили его низкое содержание в них, не превышающее 10^{-6} г/г. Оказалось, что часть радия, соответствующая урану, составляет только 10^{-13} г/г, или несколько процентов от радия, полученного в результате радиоактивного распада иония, отлагающегося в поверхностных осадочных слоях [Kröll, 1953; Necht, 1952].

Избыток радия в морских осадках и недостаток его в морской воде, по мнению Г. Петтерсона, мог образоваться в процессе осаждения на морское дно материнского элемента радия — иония [Patterson, et al., 1953]. Развивая практическое направление использования гипотезы Г. Петтерсона об осаждении иония из морской воды на дно океана, К.С. Пиггот и В. Урри в 1941 г. предложили так называемый иониевый метод определения возраста морских осадков [Piggot, Urry, 1941]. Суть метода состоит в том, что ионы радиоэлементов уранового ряда выпадают из раствора морской воды в резко неравновесных соотношениях. В связи с неодинаковой их способностью к ионному обмену радия всегда больше, чем урана. При этом содержание иония определялось в то время косвенными методами по содержанию радия исходя из того, что с течением времени эти элементы будут находиться в радиоактивном равновесии. Методики определения малых количеств радия были разработаны и позволяли определять радий с точностью до $\pm 10\%$ даже в случаях, когда его количество не превышает 10^{-14} г/г ила.

В 1951 г. советский ученый В.И. Баранов на заседании Комиссии по определению абсолютного возраста геологических формаций сообщил о новых способах прямого определения иония в океанических осадках и уточнении гипотезы миграции радиоэлементов в морской воде и осадках. Превышение содержания радия в донных отложениях, не соответствующее радиоактивному равновесию, В.И. Баранов объяснял тем, что радий обладает большой подвижностью в природных соединениях, а уран, образуя легко растворимые комплексы, остается в воде [Баранов, Кузьмина, 1954].

В 40-х годах в Гетеборгском океанографическом институте были проведены многочисленные определения количества радия в образцах глубоководных морских отложений, представленных в институт шведской экспедицией на судне "Альбатрос". Определения радия проводили Петтерсон, Бернет, Кролл и др. [Patterson, et al.; Kröll, 1953]. Одновременно концентрацию радия на образцах из разных районов измеряли Пиггот, Урри, Сандерман, Уттербэк [Piggot, Urry, 1941; Utterback, Sanderman, 1948].

Полученные результаты о содержании радия в образцах глубоководных отложений сводятся к следующему:

содержание радия в верхних поверхностных слоях красных глин и радиоляриевых илов не превышает $(1-4) \cdot 10^{-11}$ г/г;

изменение содержания радия по глубине осадка идет неравномерно, на построенной кривой на глубинах от 40 до 80 см отмечаются два максимума и минимум;

ниже этих пределов концентрация радия уменьшается до 10^{-12} — 10^{-13} г/г, причем на этих уровнях, как показали непосредственные определения урана, радий находится в радиоактивном равновесии с ураном.

Кроме того, исследования подтвердили нерегулярное распределение радия в верхних частях керна, которое могло быть связано с подвижностью радия, мигрирующего от своего материнского вещества иония (^{230}Th) и тем самым нарушающего радиоактивное равновесие между ними. Это явление могло быть объяснено известной в то время тенденцией радия концентрироваться с марганцем. Первая попытка использовать распад переотложенного радия для измерения скорости радиального роста марганцевых конкреций была сделана в 1936 г. Л.М. Курбатовым, а в 1943 г. независимо Г. Петтерсоном [Курбатов, 1940; Patterson et al., 1953].

В конце 40-х годов в том же Гетеборгском океанографическом институте началось систематическое изучение содержания урана в океанических и морских водах. Институт совместно с Венским радиевым и Норвежским исследовательскими институтами организовал изучение концентрации радия и урана в морских водах. Для точного определения малых концентраций урана был использован новый в то время люминесцентный метод, разработанный в Венском радиевом институте. С помощью этого метода Г. Гернеггер и сотрудники определили, что в морской воде нормальной ($35^0/00$) солености содержится уран-238 (концентрация $3 \cdot 10^{-6}$ г/г), уран-235 ($3 \cdot 10^{-8}$ г/л), уран-234 ($1,6 \cdot 10^{-10}$ г/л).

В начале 50-х годов в СССР и одновременно в Брюсселе был разработан метод прямого определения содержания иония. По советской методике изотопы тория-230 (иония) отделялись в растворе от других радиоактивных элементов при помощи ионообменной колонки [Баранов, Кузьмина, 1954]. Метод давал возможность определять концентрацию иония порядка 10^{-11} г/г в образце весом до 0,5 г. Пул и Мэтьюз измерили количество тория фотографическим способом в марганцевых конкрециях [Poole, Matthews, 1951].

Применение метода прямого определения концентрации иония на образцах донных отложений дало возможность установить еще одно очень важное явление — в естественном распределении иония и радия в глубоководных отложениях в каждом слое действительно существует радиоактивное равновесие между ионием и радием. Обнаруженное явление опровергало известную в то время гипотезу дифференциальной миграции одного из элементов из первоначального слоя.

К тому времени были получены многочисленные данные по вертикальному распределению радия в глубоководных морских осадках. Были исследованы образцы, полученные различными экспедициями, в том числе научно-исследовательскими судами Советского Союза. В свете новых данных были пересмотрены возможности иониевого метода определения возраста морских осадков и выяснены границы его применения, установлена скорость седиментации урана.

Накопление урана, приносимого реками в океан, и отложения

урана в шельфовых зонах, по данным Р. Бирса и Г. Гудмена, происходит с постоянной скоростью, поскольку не было обнаружено заметных различий в концентрации урана в палеозойских отложениях и современных сланцах [Beets, Goodman, 1944]. Для постоянства скорости отложений имело значение сохранение химического состава океана в течение примерно $7 \cdot 10^7$ лет. Сопоставление новых данных дало основание для выдвижения новой гипотезы об образовании иония в осадках в основном за счет радиоактивного распада растворенного в воде урана [Rubey, 1951]. Был сделан также вывод о приблизительно постоянстве содержания иония и урана в океане в течение по крайней мере $4 \cdot 10^5$ лет [Старик, 1961].

В 50-х годах были получены фактические материалы, опровергающие гипотезу о миграции иония в морских осадках. Согласно данным Пиггота, Урри, Кролла и других исследователей, миграция иония в морских осадках, если она происходит, протекает чрезвычайно медленно и в течение длительного времени [Urry, Piggot, 1942; Kroll, 1953].

Кроме того, было замечено, что торий, содержащийся главным образом в остаточных минералах, имеет тенденцию к гидролизу и едва-ли переносится водами в растворенном состоянии [Косци, Рошольт, 1964]. Остаточные минералы, как правило, откладываются в устьях рек на отмелях и практически нерастворимы в морской воде. Изотопы тория, входящие в минералы, легко осаждаются или адсорбируются коллоидами [Piggot, Urry, 1939]. Видимо, таким путем легко извлекается большая часть тория-230 (иония), находящегося в равновесии с ураном.

В морских сапропелях с увеличением концентрации урана уменьшается содержание тория [Koszy, 1949]. Ф. Косци объясняет это явление связью тория с глинистой фракцией. В качестве доказательства правильности данного предположения он провел экстраполяцию содержания тория на 100% глины, когда для шведских глинистых сланцев содержание тория может достигать $3 \cdot 10^{-6}$ г/г, что приблизительно соответствует концентрации тория в базальтах. Во время экспедиционных работ на некоторых отмелях, главным образом внутри фьордов и в разных районах Балтийского, Черного и других морей, были обнаружены сапропели, содержащие в больших количествах уран в пределах от $50 \cdot 10^{-6}$ до $100 \cdot 10^{-6}$ г/г [Strom, 1948].

Многочисленные экспедиционные и лабораторные исследования, проведенные в 30—50-х годах, подтвердили факт избытка радия в глубоководных осадках и исчезновение из морской воды почти 90% радия, образовавшегося из урана, растворенного в морской воде [Старик, 1961].

Со временем колебания концентрации радия и иония по глубине морских осадков многие ученые стали объяснять не только радиохимическими, но и чисто гидрологическими процессами. Одной из причин стали вновь считать изменение скорости седиментации. Другими причинами могли быть скорость осаждения иония или горизонтальные гидромеханические смещения ранее отложенных слоев донными течениями [Петтерсон, 1956].

Таблица 13

Концентрация в океане долгоживущих радиоактивных изотопов, относящихся к трем естественным рядам распада (по: [Косци, Рошольт, 1964])

Радионуклид	Тип распада	Концентрация радионуклида	
		в воде, г/л	в верхнем слое донных осадков, г/г
^{238}U	α	$3 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-6}$
^{235}U	α	$3 \cdot 10^{-8}$	$7,1 \cdot 10^{-9}$
^{234}U	α	$1,6 \cdot 10^{-10}$	$8,1 \cdot 10^{-11}$
^{231}Pa	α	$2 \cdot 10^{-12}$	$1 \cdot 10^{-11}$
^{234}Th	β	$4,3 \cdot 10^{-17}$	$1,4 \cdot 10^{-17}$
^{232}Th	α	$2 \cdot 10^{-8}$	$5 \cdot 10^{-6}$
^{230}Th	α	$3 \cdot 10^{-13}$	$2 \cdot 10^{-10}$
^{228}Th	α	$4,0 \cdot 10^{-18}$	$7 \cdot 10^{-16}$
^{227}Th	α	$7 \cdot 10^{-20}$	$1,3 \cdot 10^{-17}$
^{227}Ac	β, α	$1 \cdot 10^{-15}$	$5,9 \cdot 10^{-15}$
^{226}Ra	β	$1,4 \cdot 10^{-17}$	$2,3 \cdot 10^{-15}$
^{226}Ra	α	$1 \cdot 10^{-13}$	$4 \cdot 10^{-12}$
^{22}Rn	α	$6,3 \cdot 10^{-19}$	$2,5 \cdot 10^{-17}$
^{210}Po	α	$2,2 \cdot 10^{-17}$	$8,8 \cdot 10^{-16}$

Почти полный спектр природных радиоактивных элементов и изотопов в морских водах и осадках был выявлен в начале 60-х годов. В океане были обнаружены радиоактивные изотопы, относящиеся к трем радиоактивным рядам распада, родоначальниками которых являются уран-238, уран-235, торий-232 и группа изотопов, распадающихся непосредственно на устойчивые элементы. Ф. Косци и Дж. Рошольт в 1964 г. опубликовали подробную сводку концентрации радиоактивных изотопов различного происхождения в морских водах и осадках [Косци, Рошольт, 1964]. В табл. 13 указаны основные природные изотопы, относящиеся к трем основным радиоактивным рядам.

К тому времени систематические исследования содержания радионуклидов в морской воде и осадках дали возможность установить пути поступления каждого из них в Мировой океан. Поступления радионуклидов в воды и осадки, как известно, могут происходить многочисленными и разнообразными путями, например за счет приноса с континентов водами рек и подземными водами, вместе с осадками из атмосферы в виде пыли, приносимый ветром с континентов, или другими путями. При этом в Мировой океан могут поступать не только радионуклиды, относящиеся к трем основным радиоактивным рядам, но и первичные радиоизотопы, не являющиеся членами рядов распада.

На поверхности раздела океанических вод с донными отложениями происходят обменные процессы: сначала выпадение радионуклидов из раствора и адсорбция их на частицах, а затем последующее осаждение частиц, сопровождаемое обратным процессом — растворением донных осадков. К числу первичных долгоживущих радионуклидов, не являющихся членами рядов радиоактивного распада,

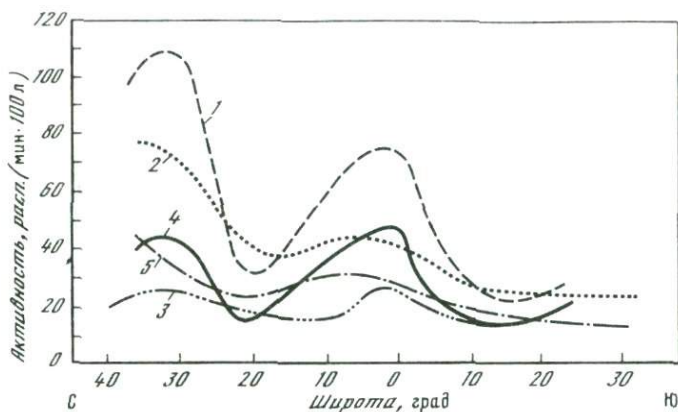


Рис. 8. Широтное распространение радиоактивности в поверхностных водах Атлантического океана по Б.А. Нелепо

1 — ^{137}Cs (1963 г.); 2 — то же (1964 г.); 3 — ^{90}Sr (1962 г.); 4 — то же (1963 г.); 5 — то же (1964 г.)

относятся ^{187}Re с периодом полураспада в $5 \cdot 10^{10}$ лет, составляющий 62,9% в смеси изотопов. Затем ^{115}In (период полураспада $6 \cdot 10^{-14}$), содержание которого в смеси изотопов составляет 95,77%, ^{87}Rb с периодом полураспада $4,7 \cdot 10^{10}$ лет, концентрация которого в морской воде $3,3 \cdot 10^{-5}$ г/л, а также ^{40}K (бета-излучатель, период полураспада $1,25 \cdot 10^9$ лет) с концентрацией в воде $4,2 \cdot 10^{-5}$ г/л. К такого рода радионуклидам относятся также ^{176}Lu , ^{147}Sm , ^{144}Nd , ^{142}Ce [Косци, Рошольт, 1964].

Изучение распределения радионуклидов в морской воде и отложениях еще на раннем этапе изучения радиоактивности морей показало, что приток радиоактивных элементов из атмосферы и их переход в водную фазу из донных отложений с большим успехом можно использовать для определения скоростей перемешивания океанических и морских вод, прослеживания путей движения водных масс в природных условиях.

Исследования осаждения и седиментации радиоактивных элементов, связанных с частицами пород, вынесенных в океан, используются прежде всего при определении не только реальной скорости седиментации в конкретных районах Мирового океана, но и средней скорости седиментации в океанических осадках Земли. Эти же данные используются при определении абсолютного возраста океанических вод и осадков радиоактивными методами и для выделения древнейших и более молодых морских геологических образований. С проведением геохронологических исследований связана большая часть данных о содержании радионуклидов в морских и океанических осадках и водах. Изучение геохронологии вод и осадков стимулировало развитие морской геохимии и ядерной геологии.

В послевоенные годы особую актуальность приобрели наблюдения за продвижением в Мировом океане полей высокой активности. Эти поля начали образовываться после проведения первых

ядерных взрывов и дальнейших систематических испытаний ядерного оружия. Из атмосферы в океан начали поступать большие количества искусственных изотопов, образующих достаточно концентрированные поля зараженных вод (рис. 8).

Оказалось, что поля высокой активности, постепенно расширяясь и захватывая все большие глубины, однако сохраняют свои границы и передвигаются в Мировом океане с юга на север, заражая радиоактивностью и прибрежные воды континентов. Особенно опасными составляющими радиоактивных полей являются долгоживущие радионуклиды, такие, например, как ^{36}Cl и ^{14}C . Разработка методов расчета распределения и продвижения радиоактивных полей, базирующихся на эмпирических данных исследований радиоактивности морских вод и осадков, а также на создании математической теории, постепенно выделялась в специальное научное направление, получившее название ядерной гидрофизики.

5.2. СОВЕТСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РАДИОАКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В МОРСКИХ И ОКЕАНИЧЕСКИХ ОСАДКАХ В 40—60-х ГОДАХ

Первые советские исследования на радиоактивность морских осадков были выполнены К.Г. Кунашевой в 1944 г. В образцах донных отложений, поднятых со дна Баренцева моря, она определила несколько повышенное содержание радия и тория [Кунашева, 1944]. В последующее десятилетие в СССР в Академии наук был создан исследовательский морской флот. Исследовательский корабль "Витязь" приступил к систематическим исследованиям океанов и морей в 1949 г. В первые годы "Витязь" провел комплексные океанографические исследования, в том числе и определения радиоактивности в районе северо-западной части Тихого океана, детально исследуя районы Курило-Камчатской впадины, затем субтропические и тропические районы северной части Тихого океана. В конце 1957 г. было введено в строй самое большое в то время научно-исследовательское судно "Михаил Ломоносов". Экспедиция на этом корабле по программе Международного геофизического года в 1957—1958 гг. обследовала сначала район между Англией и Исландией и большую часть Северной Атлантики, а затем акваторию Западной и Центральной Атлантики.

Систематическое изучение акватории Индийского океана было начато в 1959 г. экспедициями на корабле "Витязь". До 1965 г. за почти шесть лет плаваний на советских судах были получены важные материалы о гидрологии и радиологии Индийского океана. В 1966 г. исследовательское судно "Академик С. Вавилов" обстоятельно исследовало северо-западную часть Индийского океана, Аденский залив и Красное море. В те же годы советский научно-исследовательский флот пополнился новыми судами "Петр Лебедев", "Академик Курчатов". В августе 1967 г. вошло в строй судно "Космонавт Владимир Комаров", а с января 1969 г. — "Академик Вернадский" и другие суда. Создание исследовательского флота в системе Академии наук дало возможность провести эксперименты глобального масштаба и получить данные о радиоактивности вод морей и океанов.

В процессе систематического гидрологического изучения морей и океанов, проводимого научно-исследовательскими судами Академии наук и других ведомств, в 1957—1959 гг. началось также систематическое изучение радиоактивности морских и океанических осадков. Исследовалось содержание и распределение в осадках урана, тория и продуктов их распада. Особенно детально исследовался уран, геохимия которого представляет самостоятельный интерес [Baturin et al., 1972]. Рассмотрим некоторые результаты советских исследований содержания урана в морских и океанических осадках.

Первые подробные исследования содержания урана в морских и океанических осадках провели в 1957—1958 гг. В.И. Баранов и Л.А. Кузьмина, затем в 1958—1959 гг. — И.Е. Старик с сотрудниками Радиового института, а позднее — сотрудники Института океанологии АН СССР. По их данным, содержание урана в осадках колеблется в пределах от 10^{-5} до $10^{-3}\%$ [Баранов, Кузьмина, 1957]. Оказалось, что концентрация урана в грубозернистых осадках обычно ниже, чем в тонкозернистых, однако прямая связь между гранулометрией и содержанием урана в осадках не отмечается. И.Е. Старик отметил связь содержания значительной части урана в терригенных отложениях с минералами тяжелой фракции [Старик и др., 1959].

Советскими учеными исследовалось содержание урана в осадках Тихого, Индийского и Атлантического океанов, а также в донных отложениях Черного, Каспийского, Средиземного, Балтийского и Аральского морей. Повышенное содержание урана наблюдалось в осадках глубоководных впадин внутренних водоемов, а в океанах — в осадках шельфов [Батурин и др., 1967а]. В том и другом случае повышенное содержание урана в осадках исследователи связывали с концентрацией урана органическими и фосфатными компонентами осадков. В осадках внутриконтинентальных морей, Аральском, Каспийском, Балтийском и Черном, как и в океанах, отмечалось соответствие содержания урана и $C_{орг}$ в поверхностном слое и во всей толще отложений [Коченов и др., 1965]. Гидрогенное происхождение урана в осадках могло бы объясняться относительной подвижностью и изотопным составом осадков, соответствующим содержанию урана в морской воде [Николаев и др., 1965].

Советскими исследователями изучался также механизм извлечения урана из морской воды. Поскольку концентрация урана во взвесьях не превышает $2 \cdot 10^{-4}\%$, несмотря на высокое содержание в них и $C_{орг}$ и Р, способность извлекать уран из морской воды органическое вещество могло приобретать только при достижении определенной степени минерализации воды. Кроме того, было замечено уменьшение концентрации урана в придонных водах Черного моря с $3 \cdot 10^{-6}$ до 10^{-7} г/л, что свидетельствовало об извлечении растворенного урана не только взвесью, а в основном поверхностью осадков у границы раздела вода—дно [Батурин и др., 1966]. Несовместимость разнообразных факторов, влияющих на накопление урана при седиментогенезе, является, видимо, причиной невысокого содержания урана в поверхностном слое осадков — порядка $(2-4) \cdot 10^{-3}\%$. В ходе даль-

нейших процессов, протекающих ниже границы раздела вода—осадок, часть урана переходит в подвижную форму, при этом становится возможной вторичная концентрация урана [Батурин и др., 1976б].

Подробно исследовалось соотношение между содержанием урана в воде и осадках. Отношение $уран_{воды}/уран_{осадков}$ как оказалось, зависело от гидрохимического режима водоемов. Так, в Черном море в условиях сероводородного заражения вод этот коэффициент (называемый коэффициентом распределения) достигает 10 000. В Аральском море, воды которого насыщены кислородом, коэффициент распределения не превышает 200. Уменьшение коэффициента распределения урана в водах и осадках Аральского моря объяснялось повышенной концентрацией урана в воде, достигающей $60 \cdot 10^{-6}$ г/л [Коченов и др., 1965]. Г.Н. Батуриным было показано, что концентрация урана в бассейне оказывает влияние и на показатель концентрации урана на органических компонентах осадков $уран/S_{орг}$. Это отношение возрастает, кроме того, и по мере уменьшения скорости осадкообразования [Батурин и др., 1967а]. Вторичная концентрация урана в слоях осадков, обогащенных органическим веществом, видимо, происходит за счет повышенного его содержания в иловых водах. В.В. Чердынцев показал, что в процессе диагенеза и перехода сорбированного урана уран способен выщелачиваться из пелагических осадков, а накопление урана в фосфоритовых конкрециях происходит одновременно с их формированием [Чердынцев и др., 1966]. Позднее сигнетичность урана в фосфоритовых конкрециях на океанских шельфах послужила основной предпосылкой при использовании его изотопного состава для определения абсолютного возраста конкреций [Kolodny, Kaplan, 1970].

К началу 70-х годов советскими учеными было достаточно широко исследовано содержание урана в железо-марганцевых конкрециях, взятых со дна океана. В конкрециях из Тихого океана концентрация урана находится в пределах $(20—30) \cdot 10^{-4}\%$, а среднее содержание урана океанических конкреций колеблется в пределах $(0,6—58) \cdot 10^{-4}\%$ [Чердынцев и др., 1971]. Пестрый изотопный состав в ядрах, корках и конкрециях в целом свидетельствует, по данным Чердынцева, в пользу их молодого возраста и вулканогенного происхождения.

В результате изучения содержания урана в морских и океанических осадках, проведенного советскими учеными к началу 70-х годов, были установлены некоторые общие закономерности распределения урана в осадках. К ним относятся:

- 1) обогащение осадков ураном, характерное для глубоководных морских впадин и продуктивных шельфов, в океанах происходит за счет извлечения урана из морской воды и концентрации его на органическом веществе и фосфатных компонентах;

- 2) способность излекать уран из морской воды органическое вещество приобретает при определенной минерализации этой воды;

- 3) отношение между содержанием урана в воде и морских осадках зависит от гидрохимического режима водоема: при сероводородном заражении (например, в Черном море) оно повышено;

в водах, насыщенных кислородом (например, в Аральском море), оно понижено.

С конца 50-х годов, помимо изучения распределения в осадках урана, проводились систематические исследования содержания в осадках продуктов распада урана и изотопов тория и протактиния в различных морях и главным образом в Индийском и Тихом океанах. Советскими исследователями В.И. Барановым, И.Е. Стариком, Ю.В. Кузнецовым, Н.И. Поповым, Е.А. Романкевичем, П.Л. Безруковым и др. проведены обстоятельные исследования морской геохимии и изучен механизм выпадения на дно океана продуктов распада урана и некоторых членов ряда актиния и тория. К таким продуктам распада относятся торий-230, радий-226, протактиний-231, торий-232 и др. В результате многолетних экспедиционных и физико-химических лабораторных исследований были выявлены закономерности отложений в осадках элементов, присутствующих в морской воде в ультрамалых количествах. Изучены основные парагенетические связи изотопов радия, тория, протактиния с компонентами осадкообразующего материала.

При исследованиях глубоководных осадков Индийского океана были выявлены пространственное распределение на поверхности дна тория-230 и протактиния-231 и их связь с распределением железа, марганца, органического углерода и фосфора [Кузнецова и др., 1966, 1968]. Органический углерод и фосфор, а также частично железо и марганец являются, как показали исследования, компонентами органического вещества планктонного происхождения. Исходя из этого факта был сделан вывод об основном транспорте тория-230 и протактиния-231 на океанское дно. Этим транспортером могло быть взвешенное органическое вещество морской воды. Прямые определения изотопов тория во взвесах морской воды подтвердили правильность высказанного предположения.

Результаты изучения связей между торием-230 и биогенным CaCO_3 в осадках оказались противоречивыми. По данным И.Е. Старика, содержание тория-230 на разных горизонтах осадков пропорционально содержанию CaCO_3 [Старик и др., 19586]. Однако почти десять лет спустя Ю.В. Кузнецов, изучая их содержание в поверхностном слое осадков на разных участках океанического дна, не нашел прямой связи между торием-230 (а также протактинием-231) и CaCO_3 [Кузнецов и др., 1966].

Отсутствие прямой связи между торием-230 и CaCO_3 в образцах, исследованных Ю.В. Кузнецовым с сотрудниками, могло объясняться недостаточной представительностью образцов. Образцы, которыми располагал Ю.В. Кузнецов, были подняты с глубин ниже "критических" для CaCO_3 . Часть первоначально осажденного CaCO_3 на таких участках дна растворилась, и пропорциональность между торием-230 и CaCO_3 , если она имела место при осаждении, должна была нарушиться.

Была изучена возможность извлечения тория-230 и протактиния-231 из водной толщи океана и осаждение их с коллоидными

гидроокисями некоторых элементов. В.И. Баранов, Е.А. Романкевич, Ю.В. Кузнецов рассматривали возможности поставки на дно океанов радионуклидов с разными гидроокисями, например с железом или марганцем.

Было изучено распределение изотопов тория по фракциям осадков шельфа и материкового склона Антарктики (сектор Индийского океана). По данным И.Е. Старика, основная масса содержащегося в них тория-232 приурочена к тяжелым фракциям осадка, включающим обломки терригенных материалов, а большая часть тория-230 относится к легким фракциям, состоящим из пелитовых частиц [Старик и др., 1959]. Наблюдалась прямая корреляционная связь между торием-232 и терригенными компонентами, в том числе силикатным кремнеземом. Фракционирование изотопов тория и характер их связей с различными компонентами осадка, по мнению Ю.В. Кузнецова, могут свидетельствовать о различии форм этих изотопов, в которых они находятся в осадках [Кузнецов, 1969]. Очевидно, что торий-232 присутствует главным образом в составе терригенных минералов, а торий-230 сорбирован на поверхности пелитовых частиц.

Выявленные при радиохимическом изучении осадков факты убедительно свидетельствуют о разнообразии геохимического поведения в океане изотопов одного и того же элемента, например тория. Это обстоятельство следует учитывать при использовании соотношений тория-230 к торию-232 для определения возраста морских осадков.

Изучение величины отношения изотопов тория в различных поверхностных осадках имеет большое значение для понимания закономерностей осаждения изотопов тория на дно океана. В процессе выполнения международных геофизических проектов связь этого отношения с типом океанских осадков была изучена на примере осадков западной части Тихого океана. В 60-х годах было показано соответствие разных отношений тория-230 к торю-232 разным генетическим типам осадков [Романкевич и др., 1966]. При переходе от терригенных осадков к биогенным (известковым фораминиферовым) и к полигенным (красным глубоководным глинам) отношение активности возрастает.

Во время рейсов советских научно-исследовательских судов была изучена зависимость отношения торий-230/торий-232 от гранулометрического состава осадков. Между ними установлена прямая зависимость: отношение возрастает в ряду пески—алевриты—алевритоглинистые—глинистые илы. Е.А. Романкевичем, П.Л. Безруковым, В.И. Барановым, Л.А. Христиановой получены данные, указывающие на существование вариаций отношения изотопов тория в осадках одного и того же типа [Романкевич и др., 1966]. Так, красные глубоководные глины в экваториальной и северной областях Тихого океана характеризуются более высокими значениями, чем в средних широтах. Исследовалось не только содержание, но и подвижность радионуклидов в донных отложениях. Полученные результаты оказались весьма важными для понимания морской геохимии природных радионуклидов и для морской ядерной геохронологии. Наиболее надежная информация была получена при сопоставлении вертикального распределения в осадках пар

материнского и дочернего изотопов, когда дочерний изотоп поступает в осадок только при распаде основного изотопа. Такими парами, заслуживающими весьма серьезного изучения, могли быть, по мнению советских ученых, $^{230}\text{Th}/^{226}\text{Ra}$, $^{232}\text{Th}/^{228}\text{Th}$ и др. Результаты выполненных параллельно определений тория-230 и радия-226 по вертикали колонок для осадков Тихого и Индийского океанов, оказались, однако, неоднозначными [Баранов, Христианова, 1960; Романкевич и др., 1966]. В некоторых осадках торий-230 и радий-226 находились в радиоактивном равновесии, но встречались и такие, в которых это равновесие было существенно нарушено.

Нарушение радиоактивного равновесия могло быть объяснено возможной миграцией радия-226 в осадках, претерпевших глубокие диагенетические преобразования. Кроме того, отклонение содержания радия-226 в осадке от равновесного могло быть вызвано тем, что, помимо радия-226, образующегося непосредственно в осадке за счет распада тория-234, на дно поступает также некоторое количество радия из морской воды [Старик и др., 1961].

Изучение геохимии протактиния и тория-230 в океанских осадках в начале 60-х годов проводили как советские, так и иностранные ученые. В 1961 г. Рошолт высказал гипотезу об идентичности механизмов осаждения тория-230 и протактиния-231 из морской воды в океан и на этом основании предложил использовать соотношение этих радионуклидов для абсолютной датировки донных отложений [Rosholt et al., 1961].

Тщательная проверка высказанного Рошолтом предположения, проведенная советскими учеными, подтвердила правильность гипотезы. По результатам анализа осадков из южной части Индийского океана установлено, что основные закономерности пространственного распределения протактиния-231, а также зависимости концентрации этого радионуклида от типа осадков и отдельных компонентов их химического и гранулометрического состава почти полностью повторяют соответствующие закономерности и для тория-230 [Кузнецов и др., 1966]. При этом советские ученые выявили связи и между концентрациями этих радионуклидов в различных осадках, что подтверждает большую аналогию в поведении того и другого радионуклида при осаждении их на дно океана.

Содержание изотопов свинца в водных отложениях морей оказалось близким к среднему значению распространенности свинца в земной коре. Наиболее близким к средним значениям оказались донные отложения илов Тихого океана. По данным И.Е. Старика, ^{204}Pb в донных отложениях содержится 1,34%, ^{206}Pb — 25,35%; ^{207}Pb — 20,95%, ^{208}Pb — 52,40% [Старик, 1961]. В третичных и четвертичных отложениях средняя концентрация этих изотопов составляет соответственно 1,35; 25,20; 21,15; 52,30%. Близость средних значений содержания изотопов свинца в твердой земле и в океане И.Е. Старик объясняет тем, что изотопы свинца в океане извлекаются природными водами из минералов окружающих берегов. Поскольку берега занимают значительные площади, концентрация поступающих изотопов свинца должна быть близкой к средней распространенности их в земной коре.

Накопление изотопов свинца в океанических водах, как видно из приведенных данных, происходит с разной скоростью. Разное поступление изотопов свинца ^{204}Pb , ^{206}Pb , ^{207}Pb , ^{208}Pb в воды, а затем в осадки могло быть связано с разницей в периодах полураспада материнских радиоэлементов, конечными продуктами распада которых являются разные изотопы свинца.

С 60-х годов развернулись исследования общей гамма-активности морских, а в конце 70-х — и океанских осадков. Проведенное в 1953—1954 гг. изучение естественного гамма-излучения нефтегазоносных площадей показало соответствие аномалий "гамма-поля" структуре месторождения. Позднее, в 1965 г., проводились измерения общей радиоактивности морских осадков с целью изучения неотектоники в прибрежно-шельфовой зоне Каспийского моря. Здесь были установлены пониженные значения "гамма-поля" в сводовой части структуры и повышенные — на склонах и прилегающих прогибах [Шацов, 1969]. Соответственно было установлено и различие в фациальном составе: на приподнятых участках морского дна (сводах структур) распространены крупнозернистые осадки, на прогибах — наиболее мелкие фации [Морозов и др., 1968].

Различие в интенсивности "гамма-поля" на своде и крыльях структур оказалось тем больше, чем активнее проявились тектонические движения в процессе осадконакопления и чем больше была амплитуда поднятий. Анализируя при этом спектр гамма-излучения в прибрежно-шельфовой зоне, удастся определять и вещественный состав осадков на дне моря [Там же].

Изучение спектрального состава морских осадков прибрежно-шельфовой зоны Каспийского моря показало, что по мере удаления от устья р. Куры в сторону моря уменьшается содержание изотопов, в первую очередь ^{40}K , который вносит основной вклад в повышенную активность в этой зоне [Роров, 1971]. Соответственно уменьшается интенсивность естественного гамма-излучения. Непрерывное картирование фациального состава донных осадков, по предложению Ф.А. Алексеева, могло быть использовано в качестве поискового признака для выявления структур в разведке морских нефтяных месторождений [Алексеев и др., 1968б].

В океанических осадках с повышенной гамма-активностью на глубинных горизонтах осадочной толщи наибольший вклад вносит также изотоп ^{40}K [Роров, 1971]. Изучение общей гамма-активности в колонках донных отложений, видимо, может быть полезным для обнаружения прослоев с повышенным содержанием калия. Следовательно, по гамма-спектральному анализу можно установить распределение вдоль колонки различных изотопов, в том числе тория-230, калия-40 и др., без разрушения анализируемого образца. Полученные данные дают надежные основания для ориентированной датировки осадков, слагающих колонку [Попов, Греков, 1971]. Проведенные советскими учеными исследования радиоактивности морских и океанских осадков дали возможность выявить некоторые общие закономерности формирования донных отложений в морях и океанах, определить основные пути обогащения осадков ураном, торием, протактинием, продуктами их распада и другими различными радиоактивными изотопами. Получен-

ные результаты определений изотопного состава донных отложений послужили надежным основанием для их датировки. Данные измерений "гамма-поля" в прибрежных зонах и на шельфе морей и океанов используются в разведке морских полезных ископаемых и при решении других практических задач геофизики и геологии.

5.3. ВОЗМОЖНЫЕ ИСТОЧНИКИ КОНЦЕНТРАЦИИ ПОЛЕЙ РАДИОНУКЛИДОВ В ОКЕАНЕ И МОРЯХ

Новый этап в изучении радиоактивности морских и океанических воды осадков начался после 1945 г. и связан с интенсивным радиоактивным загрязнением Мирового океана глобальными и локальными поступлениями искусственных радионуклидов. В результате атомных и термоядерных испытаний и захоронения отходов атомных производств искусственные радионуклиды стали поступать в Мировой океан в огромных количествах — более всего с атмосферными осадками как в районах испытаний атомного оружия, так и при последующем глобальном их выпадении из высоких слоев атмосферы и даже из стратосферы. Большой объем радионуклидов поступает в Мировой океан также и с водами рек, в которые тем или иным путем (в основном за счет подземных вод) попадают отходы ядерных производств и атомных электростанций. Кроме того, радионуклиды могут попадать в океан непосредственно с отработанными водами и другими отходами атомных судов и, конечно, из разрушаемых морской водой контейнеров с радиоактивными отходами, ранее сброшенных в океан, т.е. из огромной и теперь весьма опасной океанической "радиоактивной свалки".

В 1963 г., когда основными ядерными державами был подписан Московский договор о частичном прекращении испытаний ядерного оружия, интенсивность загрязнения осколками радиоактивного деления океана, атмосферы и твердой земли несколько уменьшилась. Но за счет испытаний Китайской народной республики, Франции и других неприсоединившихся к договору стран выброс искусственных радионуклидов в атмосферу и, следовательно, в Мировой океан непрерывно продолжается до сих пор. Кроме того, в последние годы США возобновили подземные ядерные испытания.

По данным Американской национальной академии наук к 1963 г. в океане, на континенте, коралловых островах и других местах были произведены ядерные взрывы общей мощностью более 190 Мт [Radioactivity in the marine..., 1971]. В результате в атмосферу и воды Мирового океана поступали искусственные долгоживущие изотопы стронций-90, цезий-137, углерод-14, трития и др. По данным Б.И. Стыро, наибольшую часть радионуклидов в атмосфере составляют стронций-90 и цезий-137 [Стыро, 1960; Стыро, 1968]. Исследованиями распространения осколков деления в атмосфере после ядерных взрывов занимается ядерная метеорология [Стыро, 1960].

Формирование полей концентрации искусственных радионуклидов в водах Мирового океана зависит не только от выпадений из высоких слоев атмосферы осколков деления, но и от непосредственного

загрязнения и, следовательно, от расположения испытательных полигонов в данном регионе. Поэтому часть Атлантического и Индийского океанов, где не производились испытания, загрязнялась в основном за счет глобальных выпадений осколков деления и продвижения полей, сформировавшихся ранее в других местах. Так, в 1954 г. наибольшие концентрации стронция-90 в водах Тихого океана были зарегистрированы в районе аттола Бикини, где проводилась большая часть испытаний; через 4 месяца поля высокой активности были обнаружены на расстоянии 2000 км, через 8 месяцев продвинулись на 7000 км и приблизились к Филиппинским островам, а к лету 1955 г. достигли берегов Японии [Нелепо, 1970].

Радиоактивное загрязнение Мирового океана независимо от путей поступления осколков деления постепенно распространялось в толще морских вод и продвигалось вместе с течениями. Систематическое изучение распространения радиоактивного загрязнения океана началось в конце 50-х годов. К первым относятся работы японских и американских ученых И. Мияки, К. Сарухаши, В.Т. Боуэна, Т. Сугихиры, Г.Г. Рокко, В.С. Брокера и др. Они начали изучать распространение радиоактивного загрязнения в толще океанических вод.

И. Мияки и другие японские исследователи первыми изучили распределение загрязнения по глубине в Тихом океане, но, к сожалению, они ограничились изучением только верхнего перемешанного слоя [Mijake, Sazuhashi, 1960, 1968]. В этих слоях загрязнение, по их данным, оказалось не очень сильным. В последующих работах японские исследователи обнаружили привнесенную радиоактивность уже на глубине 600 м. Источниками загрязнения, как они считали, могли быть радионуклиды, попавшие в поверхностные воды, и, возможно, еще какие-либо не выясненные в то время дополнительные локальные источники. В 1960 г. японские ученые первыми обнаружили высокую концентрацию стронция-90 на глубине 5 км в Тихом океане [Mijake et al., 1960].

Американские ученые подробно исследовали загрязненность Атлантического океана и получили данные о сильном загрязнении радионуклидами океанических вод.

Работы В.Т. Боуэна и Т. Сугихиры о распределении радиоактивности по глубине в центральной и северной частях Атлантического океана обсуждались на 2-й Международной конференции по мирному использованию атомной энергии в 1958 г. В обстоятельных статьях, опубликованных в 1958 г. в Трудах конференции, в 1959 г. в журнале "Nature" и в 1961 г. в особых документах конгресса США, они представили сводку распределения стронция-90 в океанических водах по годам. По их данным, наблюдаются две волны нарастания радиоактивности, особенно четко выделявшихся на двух глубинах: 0,3—0,5 км и около 1,5 км [Bowen, Sugihara, 1958, 1960, 1961]. Их результаты были подтверждены работами В. Брокера [Россо, Вроескер, 1963].

Большой объем исследований распространения осколков деления в глубины океана был проведен советскими учеными на экспедиционном судне "Михаил Ломоносов" в 1959—1962 гг. Советские исследователи также отметили скачки в распределении радиоактивности по глубине,

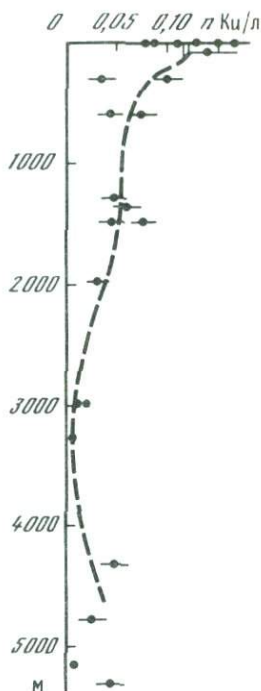
Рис. 9. Вертикальное распределение ^{90}Sr в толще вод Индийского океана по Б.А. Нелепо

согласующиеся с увеличением потока радиоактивности через поверхность океана и совпадающие с очередными испытаниями термоядерного оружия в 1957—1963 гг. (рис. 9) [Нелепо, 1970]. Наибольшая интенсивность выпадений осколков деления в океан приходится на 1957—1958 гг., когда общая мощность ядерных взрывов составила более 30, и на 1961—1962 гг. при общей мощности взрывов, превышающей несколько сот мегатонн.

Рокко и Брокер исследовали радиоактивное загрязнение Карибского моря и Южной Атлантики. Исследовалось загрязнение поверхности и его распространение по глубине в Карибском море до 200 м, а в Южной Атлантике до 100 м [Россо, Вроекер, 1963]. Они определили распространение по глубине в основном двух изотопов — цезия-137 и стронция-90. Наибольшее загрязнение стронцием (40 ± 10) расп./мин на 100 л оказалось на поверхности в Северной Атлантике, наименьшее (порядка 17 расп./мин на 100 л) — на глубинах 100 м в Южной Атлантике и 200 м в Карибском море.

Интересны работы Т.Р. Фолсома с сотрудниками по определению распределения концентрации цезия-137 по глубине в Тихом океане. Они обнаружили, что на глубине примерно 175 м концентрация изотопа резко падает [Folsom, 1966]. Этот скачок, по их мнению, совпадает с максимумом солености, что может свидетельствовать о привносе радиоактивных вод из других северных районов с более сильным выпадением продуктов распада. Т.Р. Фолсом показал, что в исследованном ими северо-западном районе Тихого океана происходит интенсивное проникновение цезия-137 на глубину. Т.Г. Ширасава и Е.А. Шуерт позднее подтвердили более глубокое радиоактивное загрязнение в центральных и западных районах Тихого океана, чем в его восточной части [Shirasawa, Schuehert, 1968]. По их данным, загрязнение глубинных вод океана стронцием-90 и цезием-137 в 1965 г. достигло глубины почти 4 тыс. м.

В Индийском океане первые исследования советских ученых выявили значительное вертикальное перемещение искусственных радиоактивных изотопов, особенно стронция-90, который был обнаружен практически на всех глубинах до 6 км [Нелепо, 1970]. Сотрудники Института океанологии АН СССР Н.И. Попов и др. высказали предположение, что большое количество стронция-90 в водах Индийского океана могло поступить не только из стратосферы, но и, вероятно, путем тропосферного переноса осколков деления от взрывов в Тихом океане [Попов, Патин, 1966]. Причем была отмечена большая скорость



распространения радионуклидов по вертикали с отчетливым минимумом на глубине около 3 км, обусловленным, по-видимому, особенностями глубинной циркуляции вод в данном районе [Нелепо, 1970].

Привнос искусственных радиоактивных изотопов за счет вымывания отходов ядерных производств сначала почвенными водами, а затем перенос их водами рек и ручьев наиболее сильно сказываются на повышении радиоактивности внутренних морей и прибрежных зон океанов. Исследования советских ученых сотрудников Радиового института под руководством Л.И. Гедеонова выявили сложный характер распространения изотопов стронция по глубине в Черном и Средиземном морях. В докладе на II Международном океанографическом конгрессе В.И. Беляев с сотрудниками показали почти полное совпадение хода распределения стронция-90 и цезия-137 по глубине в Черном море. Сначала до глубины примерно 150 м идет резкий спад активности, а затем активность воды остается почти неизменной [Беляев и др., 1966]. Причем абсолютное значение концентраций радионуклидов в Черном море дает основание предполагать значительный вклад именно рек в общий баланс радионуклидов в море.

Сильное радиоактивное загрязнение вод Средиземного моря стронцием-90 обнаружили советские ученые во время экспедиции на судне "Михаил Ломоносов" в 1965 г. Они выявили, что до глубины 2,5 км концентрация стронция-90 почти вдвое больше, чем в открытом океане [Нелепо, 1970]. Причем основным источником загрязнения, видимо, являются ядерные производства Франции, отходы которых поступают непосредственно в Средиземное море.

Опасное радиоактивное загрязнение было обнаружено в водах Ирландского моря. Здесь, как и в Средиземном море, основным источником загрязнения являются, видимо, отходы английских заводов по переработке облученных стержней и элементов атомных реакторов, а также другие отходы атомной промышленности. По данным Л. Махра, в Ирландское море, например, сбрасывается в больших количествах не только стронций-90, но и стронций-89, цезий-138, ниобий-95, изотопы рутидия и другие радионуклиды [Machra, 1963]. Вместе с изотопами в море поступают также небольшие количества урана, полония и другие радиоэлементы.

Значительно возросла активность радионуклидов, поступивших в Черное море в 1963 и в 1965 г., а в Северном море примерно за 2-3 года загрязнение вод возросло почти в 10 раз: с 23 в 1960—1961 гг. до 220—230 расп./мин на 100 л в 1963—1964 гг. [Aarkrog, 1964]. Как видно, сброс отходов атомных производств недопустимо ускоряет радиоактивное загрязнение морских вод в этой части планеты.

Примерно такая же картина наблюдается и у берегов Соединенных Штатов Америки, первого в мире государства, начавшего разработку атомного оружия. Большая часть (более 90%) атомного производства США связана с центрами, атомные отходы которых тем или иным путем попадают в реки Колумбия, Тенесси, Миссисипи и затем распространяются в Тихом и Атлантическом океанах.

В докладе Г.М. Паркера на 3-й Международной конференции по



План Хэнфордского залива на р. Колумбия, США

мирному использованию атомной энергии в Женеве указываются основные источники загрязнения р. Колумбия [Parke, 1964]. К ним относятся предприятия в Ханфорде и национальная испытательная станция в Айдахо. Наибольшее загрязнение происходит за счет сбросов вод ханфордских реакторов по производству плутония, часть за счет слива в грунт радиоактивных отходов перерабатывающих ядерных заводов. Кроме того, в грунтовые воды поступают сильноактивные отходы, хранящиеся в специальных емкостях под землей в зоне дейст-

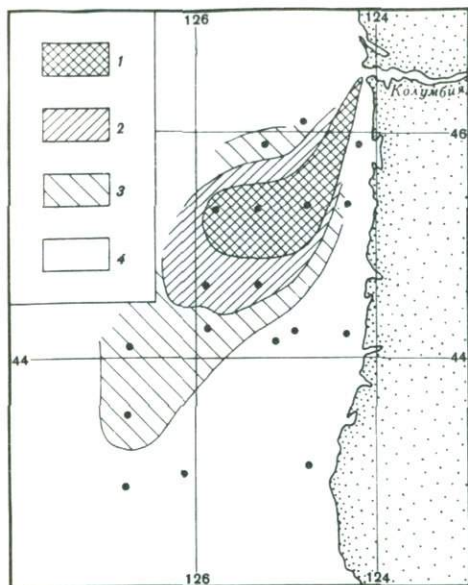


Рис. 10. Образование и распространение в Тихом океане поля ^{51}Cr , поступившего с водами р. Колумбия по Б.А. Нелено

1 — более 100 отн. ед.; 2 — 50—100, 3 — 25—50; 4 — менее 25 отн. ед.

вия заводов, из-за неизбежной со временем порчи герметичности стенок емкостей. Из-за утечек через поврежденные стенки заражается сначала почва, а через некоторое время адсорбированные радионуклиды вымываются подземными водами во время паводков и сильных дождей и попадают в реку. В докладе указывается также на возможность радиоактивного загрязнения р. Колумбия и за счет спуска воды, охлаждающей реакторы, показано изменение поля радиоактивности искусственных радионуклидов, сформировавшихся в устье р. Колумбия по мере его движения в океане на расстояние свыше 500 км. На рис. 10 показана схема распространения поля хрома-51 от устья р. Колумбия в Тихом океане, составленная по данным Г.Л. Остерберга и сотрудников [Osterberg et al., 1966].

Строительство атомных электростанций и захоронение их радиоактивных отходов также сказалось на общем увеличении загрязнения Мирового океана. Вопрос о вкладе атомных электростанций в общее радиоактивное загрязнение рассматривался на 3-й Международной конференции по мирному использованию атомной энергии в Женеве [Belter, 1965]. Было установлено, что в период с 1949—1963 г. среди отходов радиоактивных производств в реки и океан поступали цезий-137, рубидий-106, стронций-90, церий-141, церий-144, цирконий-95, ниобий-95, иод-131, а с 1955 г. начал поступать и кобальт-60 [Parker et al., 1966].

В.Г. Белтер провел сравнительную оценку вклада в общее загрязнение, поступающее через р. Колумбия в океан. По его данным, наибольшее загрязнение вносят атомные производства [Belter, 1965]. Из приведенных самых кратких сведений видно, что в Ирландском и Средиземном морях, в Атлантическом океане, у устья р. Колумбия,

происходит интенсивное радиоактивное загрязнение вод, причем наибольшую часть радионуклидов вносят атомные производства.

При рассмотрении радиоактивного загрязнения Мирового океана, помимо перечисленных путей поступления искусственных радионуклидов, следует также учитывать и непосредственные захоронения в морях и океанах отходов ядерных производств. В 1946 г., когда США впервые начали сбрасывать в море стальные бочки с твердыми отходами производства, считалось, что бочка может выдержать давление воды на глубинах свыше 1,5 км в течение более 10 лет. Кроме того, для балласта бочки дополнительно цементировались. Однако уже через несколько лет выявилась недостаточная прочность такого рода контейнеров, и морские и океанические воды начали все более интенсивно заражаться. В некоторых местах, где было сброшено большое количество контейнеров, воды стали опасными для пребывания человека. Ярким примером этого типа радиоактивного загрязнения может служить захоронение американских отходов у берегов Испании, неожиданно быстрое повреждение контейнеров и заражение прибрежных вод, вызвавшее протест населения.

В связи с интенсивным радиоактивным загрязнением Мирового океана за счет локальных и глобальных продуктов атомных и термоядерных взрывов, поступления искусственных радионуклидов от отходов атомных производств в 50-х годах началось систематическое изучение радиоактивности океанических вод. Эти исследования проводились многими странами, результаты обсуждались на очередных конференциях по мирному использованию атомной энергии в Женеве.

Наибольшие концентрации долгоживущего изотопа стронция-90, как указывалось, были зарегистрированы в 1954—1958 гг. в экваториальных водах Тихого океана, где США проводили испытания ядерного оружия. При постепенном выравнивании концентрации радиоактивных вод по акватории Тихого океана советскими учеными в 1958—1961 гг. отмечено повышение радиоактивности вод у Калифорнийского побережья за счет привноса реками отходов атомных производств США [Шведов, Патин, 1968]. Повышение радиоактивного загрязнения было также обнаружено и в Ирландском, и в Северном морях. Источниками его можно считать отходы английских атомных производств. Отходы французских атомных производств весьма сильно загрязнили воды Средиземного моря. Как указывалось, радиоактивность вод моря за 2-3 года возросла почти в 10 раз и превысила радиоактивность океанических вод.

Резкое увеличение радиоактивного загрязнения вод Мирового океана к концу 50-х годов вышло за рамки чисто научных исследований и стало предметом активного обсуждения международными организациями, включая ООН, в результате чего в 1963 г. основными ядерными державами был подписан Московский договор о запрещении испытаний ядерного оружия в атмосфере, космосе и под водой.

В этот и последующий периоды загрязнение океана продолжалось, хотя и несколько замедленными темпами. Основным источником загрязнения по-прежнему остается образовавшийся ранее стра-

тосферный резервуар долгоживущих искусственных радионуклидов, непрерывно пополняемый взрывами, проводимыми Францией и КНР. Продолжается загрязнение океана и за счет увеличения стока радиоактивных отходов ядерных производств США, Англии, Франции.

Во все увеличивающихся количествах стали непосредственно поступать в Мировой океан радионуклиды из поврежденных контейнеров прежних захоронений и слива отходов энергетических установок атомного флота.

По данным Американской национальной академии наук, к 1968 г. построено и находилось в стадии строительства более 160 атомных подводных лодок [Radioactivity..., 1971]. В отличие от сухопутных установок подобного типа, использующих замкнутый цикл охлаждения, в атомных подводных лодках воды, охлаждающие энергетические установки, по мере нагревания сбрасываются в море и заменяются новыми. Во время рабочего процесса охлаждающие воды становятся радиоактивными, и их периодическое поступление в открытый океан создает новый дополнительный источник радиоактивного загрязнения океана. Поскольку число атомных подводных лодок и других судов с каждым годом все увеличивается, этот, казалось бы, не очень значительный источник дополнительного загрязнения становится все более и более ощутимым в общем балансе радиоактивности Мирового океана.

Советскими учеными были проведены систематические исследования радиоактивности Атлантического, Тихого и Индийского океанов, а также Северного, Балтийского, Ирландского, Средиземного, Черного, Каспийского, Азовского и других морей. Было выявлено глубинное распределение радиоактивности в океанах [Нелепо, 1970; Зудин, Нелепо, 1975]. Отмечены совпадения максимумов загрязненности воды и атмосферы в средних широтах Атлантического океана [Геденов, 1967; 1968]. Выявлено более высокое содержание долгоживущих радионуклидов в закрытых морях, чем в открытой части океана, а также увеличение площади прибрежных районов с повышенной активностью [Иванова, Геденов, 1972; Материалы Всесоюзного симпозиума..., 1973].

Советские исследования радиоактивного загрязнения вод морей и океанов убедительно показали все возрастающую опасность загрязнения гидросферы искусственными радионуклидами не только при проведении ядерных взрывов в атмосфере или под землей, но и при любом захоронении радиоактивных отходов ядерного производства как в морях, так и на суше.

5.4. ФОРМИРОВАНИЕ ЯДЕРНОЙ ГИДРОФИЗИКИ

Продолжающееся поступление искусственных радионуклидов в Мировой океан и формирование в его водах достаточно сильно выраженных и сохраняющихся долгое время полей концентрации радиоактивных отходов вызвало необходимость изучения их распределения и распространения. В предыдущих параграфах были рассмотрены некоторые первые обобщения исследований радиоактивности морских и

океанических осадков, показаны возможные источники дополнительных поступлений искусственных радионуклидов в моря и океаны, образующих поля их концентрации в Мировом океане.

В конце 50-х годов для расчетов возможного распространения полей концентрации и вообще радиоактивного заражения гидросферы были предложены первые модели процессов формирования полей в зависимости от характера действия атмосферных источников загрязнения. Прежде всего были рассмотрены возможности прогноза распространения в океанах определенных скоплений радионуклидов. Некоторые авторы попытались теоретически предсказать возможный широтный эффект распределения искусственной радиоактивности на поверхности океана. Однако в океане распространение радионуклидов подчиняется воздействию многих, подчас конкурирующих, процессов, и простая аналогия оказалась неприемлемой. Выпавшие с атмосферными осадками радионуклиды, попадая в состав океанических вод, сразу включаются в процессы интенсивной глобальной и локальной циркуляции.

Задача теоретического предсказания распространения полей искусственных радионуклидов и радиоактивного заражения океанов поэтому значительно усложняется. При расчетах возможного поведения радиоактивного поля, как оказалось, необходимо учитывать не только глобальные атмосферные выпадения и океанические потоки, но и реальные гидрофизические процессы, характерные для каждого района океана. Широтный же эффект глобальных атмосферных выпадений учитывается только при определении потоков радионуклидов на поверхности океана.

Первыми моделями процесса переноса радиоактивности в океане были так называемые ящичные модели перемешивания вод, используемые при определении их возраста. Один из таких вариантов "ящичной" модели переноса радионуклидов был предложен в 1961 г. Ф. Косци (рис. 11). Входящий в формулу расчета переноса радионуклидов возраст вод Ф. Косци предлагал определять с помощью естественных радиоактивных индикаторов, находящихся в морской воде [Косци, Рошольт, 1964]. Он предлагал использовать для этих целей, например, радий-226, уран-238, торий-232. Исходя из того, что единственным источником радия-226 могут быть породы морского дна, Ф. Косци пытался объяснить этим увеличение концентрации радия от поверхности к более глубоким слоям. Согласно его расчетам, возраст глубинных вод в океане может быть порядка 1800 лет, промежуточных вод — 280 лет, а поверхностных — около 15 лет. Правда, эти расчеты он относит только к водам в ограниченном районе — от 40° ю.ш. до 40° с.ш. Возраст арктических и других холодных вод Ф. Косци считал порядка 200 лет, а антарктических — около 50 лет.

Вычисления Ф. Косци были весьма приближенными и не соответствовали реальным условиям распространения радиоактивного загрязнения. Несмотря на это, расчеты Ф. Косци послужили мощным толчком к развитию нового направления — разработке статистических методов расчета распространения полей концентрации радио-

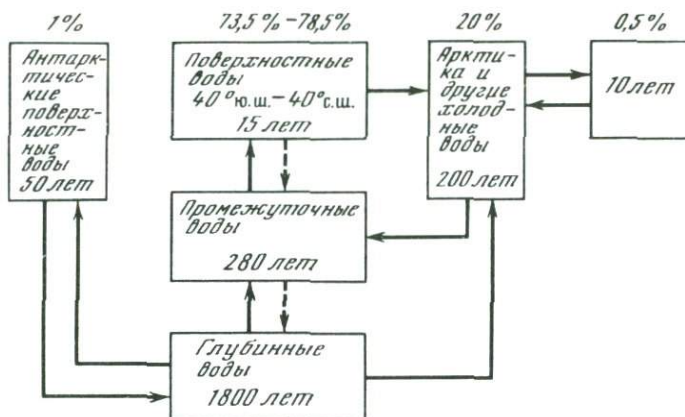


Рис. 11. Схема распределения «возраста» вод в океане по Ф. Косци

нуклидов в Мировом океане и методов прогноза радиоактивного загрязнения гидросферы.

К "ящичным" моделям относится также и 6-ящечная модель, предложенная В.С. Брокнером в начале 60-х годов. Он попытался рассчитать перенос радиоактивности в океане, используя результаты непосредственных измерений в океане. В.С. Брокнер разделил Мировой океан на два основных и четыре промежуточных слоя. К основным слоям, по его модели, относились холодные глубинные и теплые поверхностные воды. Теплый слой он разделил еще на четыре промежуточных слоя — по 150 м каждый. По его данным, холодные глубинные воды составляют примерно 80% объема всего Мирового океана при средней расчетной глубине в 3500 м [Нелепо, 1970]. Он также считал возможным существование довольно длительных застойных явлений. Время пребывания молекулы воды на глубине он оценивал по возрасту вод, определяемому по углероду-14 и равному 1000 лет.

При расчете по своей модели В.С. Брокнер принимал ряд допущений. Помимо возраста глубинных вод в 1000 лет, он считал, что: в каждом выделенном им резервуаре происходит мгновенное перемешивание радионуклидов, попавших на поверхность океана; отсутствует выход глубинных вод на поверхность промежуточного резервуара и контакт их с источником загрязнения невозможен; скорость обмена вод между резервуарами постоянна.

Приняв указанные допущения, В.С. Брокнер предложил формулу для расчета концентрации радионуклидов на разных глубинах и в поверхностных водах в зависимости от скорости обмена между резервуарами, доли радионуклидов, попадающих в нижний резервуар, от средней глубины океана, фактора биологического переноса и постоянной полураспада того или иного радионуклида. После некоторых других упрощений В.С. Брокнер вывел довольно простую зависимость скорости обмена радионуклидами между резервуарами от некоторых факторов и определил изменение коэффициента диффузий радионуклидов с глубиной.

Модель В.С. Брокнера вызвала глубокий интерес со стороны исследователей разных стран, ее достоинства и недостатки широко обсуждались в научной печати с целью найти наиболее оптимальные параметры при моделировании сложных процессов переноса радионуклидов в Мировом океане.

Среди американских ученых наиболее подробно рассмотрел эту модель В.Т. Боуэн, показавший, что основным недостатком модели В.С. Брокнера является несоответствие определения скорости распространения радиоактивности в океане, вычисляемой по измерениям искусственных и естественных радионуклидов [Bowen, 1961]. Поэтому данные В.С. Брокнера и не могли согласовываться с реальными измерениями. Фактические измерения степени радиоактивности и ее распространения в океане показали, что стронций-90, цезий-137, углерод-14 перемешиваются с незараженными водами в течение длительного времени, а не мгновенно, как предполагал В.С. Брокнер. Были показаны выходы глубинных вод на поверхность и наличие непосредственного их контакта с источниками радиоактивного загрязнения, что не учитывал и, можно сказать, отрицал В.С. Брокнер. Скорость распространения радиоактивного загрязнения оказалась не постоянной, как считал В.С. Брокнер, а переменной, причем ее изменения существенно зависели от глубины резервуара и хода турбулентных нисходящего и восходящего потоков.

Советские ученые также подробно изучили модель В.С. Брокнера. По их данным, недостатки 6-ящечной модели В.С. Брокнера главным образом связаны с некорректностью определения возраста вод, проводимого на основе перемещения водных масс без учета турбулентной диффузии [Беляев и др., 1966].

Следует подчеркнуть, что и другие так называемые ящичные модели процесса распространения радионуклидов в океане также не учитывали турбулентную диффузию, которая в то время была еще недостаточно изучена. В дальнейшем авторы последующих предлагаемых оценок интенсивности обмена вод, распределения и распространения искусственных радионуклидов вынуждены учитывать турбулентную диффузию. Учет турбулентной диффузии вносил существенные поправки в расчеты, часто изменяя полученные результаты в несколько раз. Так, по данным Беляева, при вычислении концентрации радионуклидов, например в средней части слоя толщиной в 200 м, в определении возраста вод поправка на турбулентную диффузию составляет порядка 0,64—0,2. Внесение такой поправки означает, что предполагаемое нахождение на глубине зараженных радиоактивных вод должно быть значительно (в 2 или 5 раз) уменьшено.

Одновременно с разработкой общих моделей переноса радиоактивности в океане в 50-х и особенно в 60-х годах во многих странах пытались найти пути определения турбулентной диффузии.

Первые определения турбулентной диффузии были проведены с помощью упрощенных моделей диффузии, без учета вертикальных скоростей, и предварительного задания потоков радиоактивности на поверхности океана [Нелепо, 1970. С. 170]. Так, американские исследователи вычислили коэффициент вертикальной диффузии на осно-

вании измеренной бета-активности в слое 100—1000 м. Для тропических районов Тихого океана коэффициент диффузии оказался равен $40 \text{ см}^2/\text{с}$.

На 10-м Международном конгрессе по Тихому океану в Гонолулу обсуждались расчеты степени радиоактивного загрязнения северо-западной части Тихого океана, проведенные с учетом коэффициента турбулентной диффузии группой под руководством И. Мияки. При расчетах они использовали коэффициент вертикальной турбулентной диффузии радионуклидов, вычисляли перенос изотопов в предположении существования мгновенного точечного источника радионуклидов. По их данным, концентрация радиоизотопов зависела от общего количества изотопов, внесенных в поверхностный слой, предполагаемого времени распространения изотопов с момента поступления изотопов в океан и глубины океана. Для слоя 200—4000 м после трехлетнего распространения мгновенного поступления радиоизотопов коэффициент турбулентной диффузии оказался равным $200 \text{ см}^2/\text{с}$.

Полученные разными исследователями в начале 60-х годов значения коэффициента турбулентной диффузии, несмотря на большие расхождения, впервые дали возможность представить в первом приближении процесс распределения радиоактивного загрязнения в океане.

На 10-м Международном конгрессе в Гонолулу обсуждались также доклады советских ученых, посвященные расчетам скоростей радиоактивного загрязнения океана. В работе А.Г. Колесникова и др. впервые дано количественное описание процесса распространения стронция-90 по трехслойной модели для некоторых случаев распределения коэффициента турбулентной диффузии и вертикальной составляющей течений в пределах каждого слоя. В расчетах использовались коэффициенты турбулентной диффузии и значения вертикальной составляющей скорости, измеренные во время плавания научно-исследовательского судна "Михаил Ломоносов" в Атлантическом океане [Нелепо, 1970]. А.Г. Колесниковым выявлено различие в распределении и распространении стронция-90 по глубине в областях опускания водных масс в высоких широтах и их подъема в тропических областях. В промежуточном слое, как показали расчеты, коэффициент турбулентной диффузии линейно возрастает с глубиной, а вертикальная составляющая скорости равна нулю и т.д. [Там же].

В дальнейшем разрабатывались и другие методы процессов распространения радионуклидов в океане, исследовались возможности применения статистического анализа для расчетов и прогнозов радиоактивного заражения конкретных районов океанов.

Повышенная концентрация стронция-90 в Атлантическом океане, выявленная во время экспедиций, могла быть объяснена передвижением полей радиоактивности из других районов океана. При расчетах продвижения полей советский исследователь Н.М. Кошляков выделил пять основных океанических и атмосферных резервуаров. Два резервуара, выделенных Н.М. Кошляковым, соответствуют слоям конвективно-ветрового перемешивания (один в районе от 10° до 50° с.ш., вто-

рой — к югу от 10° с.ш. и к северу от 50° с.ш.). Третий резервуар — слой, расположенный ниже конвективно-ветрового перемешивания, ограниченный положением главного термоклина. Четвертый резервуар, по Н.М. Кошлякову, располагается ниже третьего. Пятым резервуаром Н.М. Кошляков считает атмосферу.

Расчеты Н.М. Кошлякова основывались на измерениях стронция-90 на поверхности океана, выполненных в 1954—1962 гг. По данным Н.М. Кошлякова, полное обновление воды происходит в первом резервуаре конвективно-ветрового перемешивания, например, за 0,39 г. В слое, расположенном ниже и ограниченном положением главного термоклина, — за 2,1 года. Эти данные свидетельствуют об активных процессах вертикального обмена вод и опровергают данные Ф. Косци и В.С. Брокнера о значительных застойных глубинных водах в океане.

Советские исследователи, в частности, Б.А. Нелепо, показали, что каким бы застойным ни казался тот или иной район океана, сброшенные каким-либо путем радиоактивные отходы и другие искусственные радионуклиды быстро распространяются на большие расстояния.

Известный советский океанолог Б.А. Нелепо в книге, вышедшей в 1970 г., сформулировал основные задачи ядерной гидрофизики [Нелепо, 1970]. Показано, как с помощью метода объективного анализа может быть определена оптимальная интерполяция распространения полей радиоактивности на поверхности Атлантического океана и показана возможность теоретически прогнозировать радиационную обстановку в океане на основании некоторых выборочных дискретных экспедиционных наблюдений [Там же. С. 185].

В 1971 г. вышла подробная монография американских ученых, в которой на основании анализа совокупности явлений самого различного масштаба они попытались дать общие представления о глобальном распределении радиоактивности в Мировом океане [Radioactivity..., 1971]. В соответствии с крупномасштабной циркуляцией и турбулентной диффузией в океане в районах впадения рек, связанных с переносом радиоактивных отходов атомных производств, по их данным, наибольшее значение приобретают процессы перемешивания и турбулентной диффузии. Сначала за счет турбулентной диффузии образуется локальная среда гомогенизации, а через некоторое время начинают сказываться турбулентные вихри все большего масштаба [Зудин, Нелепо, 1975. С. 19].

При загрязнении глобальными выпадениями осколков деления на особенностями формирования полей концентрации искусственных радионуклидов, по американским данным, решающее влияние оказывают крупномасштабные процессы переноса водных масс в океане. Расчеты переноса радионуклидов проводились по отдельным резервуарам, на которые условно был разделен океан в зависимости от степени солености (рис. 12). В указанной монографии были выделены полярный, субполярный, умереннотропический, тропический, экваториальный, индо-малайский, присредиземноморский и североатлантический резервуары [Radioactivity..., 1971]. Приведена четкая

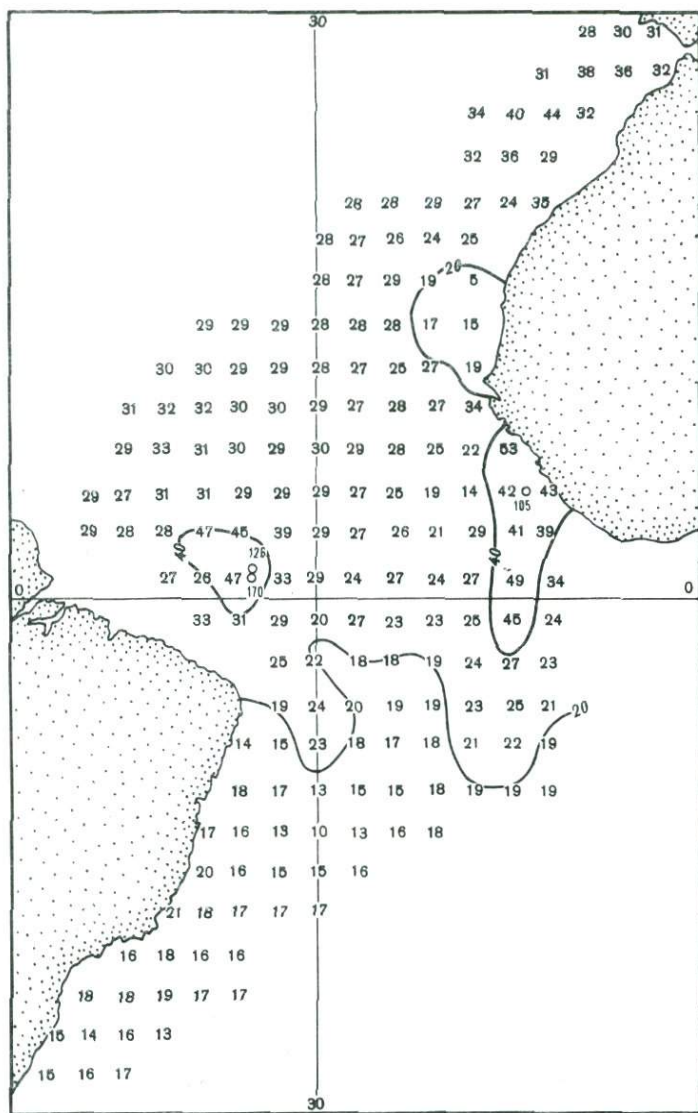


Рис. 12. Карта—схема концентрации полей ^{90}Sr на поверхности Атлантического океана

схема границ водных масс Мирового океана (рис. 13). В пределах выделенных резервуаров могли рассматриваться особенности распространения радионуклидов и введено их осреднение.

Возможности теоретического прогнозирования распространения полей концентрации радионуклидов в Мировом океане рассматривались в ряде работ советских исследователей. Можно указать, например, на работы Попова Н. и Патина С.А. [1966], Зудина О.С. и Нелепо Б.А., Г.А. Середы и др. Наиболее полный статистический

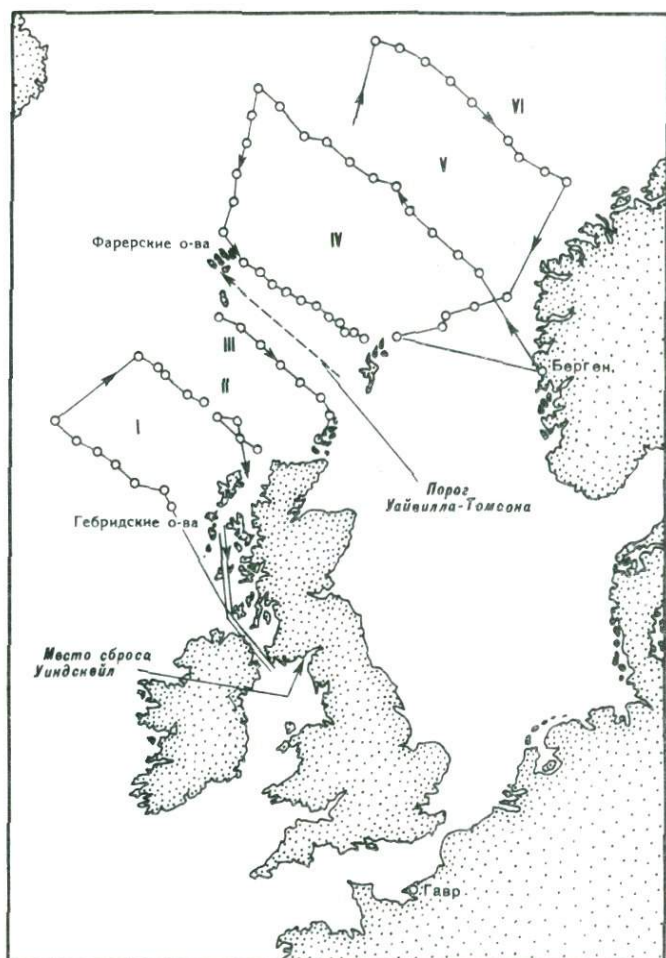


Рис. 13. Схема разрезов при изучении полей радиоактивности в сев.—вост. части Атлантического океана по Б.А. Нелепо

анализ ядерно-гидрофизических полей на акваториях океана дан в книге О.С. Зудина и Б.А. Нелепо [1975], составляющей основу ядерной гидрофизики.

Примерно за 20 лет советскими, американскими и японскими учеными выявлены зоны концентрации полей искусственных радионуклидов, предложены различные модели их расчета.

К началу 70-х годов во многих странах было проведено большое число специализированных теоретических и экспедиционных исследований радиоактивности морей и океанов. Эти исследования, как правило, широко обсуждались на многих международных форумах. Особое внимание результатам такого рода исследований уделяет Международная комиссия по мирному использованию атомной энергии. Постепенно исследования радиоактивного загрязнения океанов и мо-

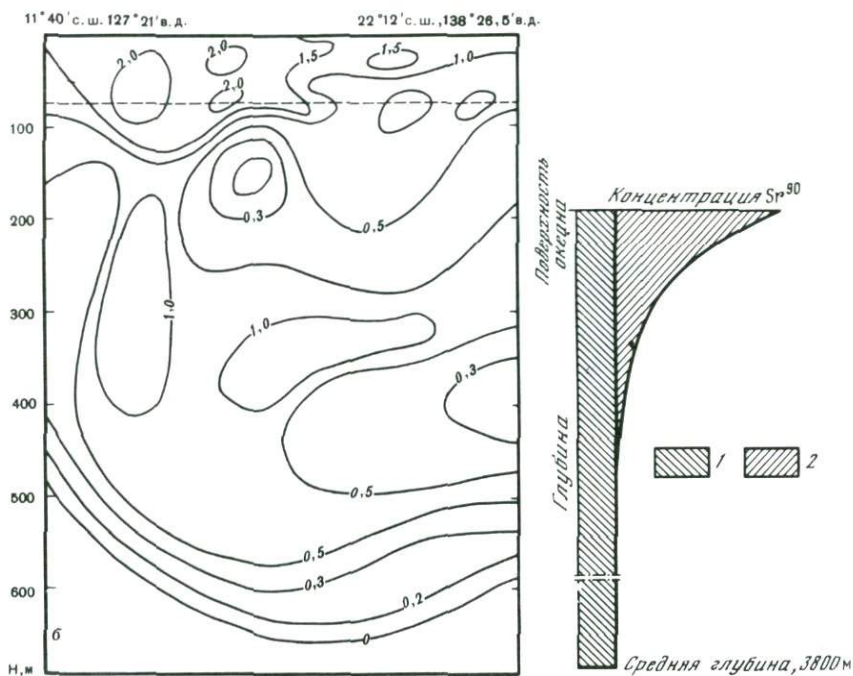
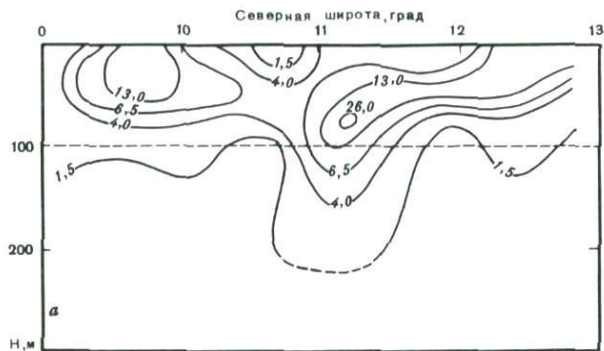


Рис. 14. Распределение радиоактивности по глубине в Тихом океане в 1954—1955 гг по Мияки, пКи/л

а — верхние перемешанные слои; б — глубинные слои

Рис. 15. Идеализированный профиль Мирового океана для расчета запаса ^{90}Sr в водах по Б.А. Нелепо

1 — глубинная составляющая; 2 — поверхностная составляющая

рей обособились в самостоятельное научное и прикладное направление, получившее название ядерной гидрофизики. Новая наука находится в стадии формирования, но, возможно, в ближайшем будущем разделится на ряд более узких специализированных направлений.

Предметом изучения ядерной гидрофизики являются поля концентрации искусственных радионуклидов в морях и океанах. Ядерная гидрофизика использует методы математической статистики, теории фильтрации, различные разделы физико-математических и прикладных наук, а также результаты экспериментальных экспедиционных исследований по гидрологии моря, океанологии, ядерной геофизике и ядерной геохимии вод и осадков, ядерной метеорологии и т.п. В задачи ядерной гидрофизики входит расчет возможного распространения полей концентрации искусственных радионуклидов (рис. 14) и прогноз радиоактивного загрязнения океанов и морей от глобальных поступлений из атмосферы и стратосферы осколков деления атомных взрывов, сброса радиоактивных отходов ядерных производств и других источников радиоактивного загрязнения атмосферы и водной среды Земли (рис. 15).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Открытие явления радиоактивности и исследования в области ядерной физики коренным образом изменили представления о структуре материи, привели к перестройке всего фундамента естествознания, способствовали возникновению и развитию глубоких теоретических построений и проведению тончайших экспериментов не только в области физики и химии, но и в области изучения Земли.

Применение результатов исследований в области радиоактивности в изучении геологических образований началось еще в то время, когда неизвестно было, что радиоактивность является свойством ядра. Можно даже считать факт открытия радиоактивности уранового минерала А. Беккерелем первым опытом автордиографии в минералогии. Когда же в 1898 г. была открыта радиоактивность тория, начались поиски других радиоактивных элементов и минералов. Вскоре стало известно, что, помимо урановых и ториевых элементов, радиоактивностью обладают рубидий и широко распространенный в земной коре калий.

В первые же годы после открытия явления радиоактивности урановых и других радиоактивных минералов возник вопрос о возможности практического использования нового вида энергии и новых свойств. После открытия терапевтического эффекта радиоактивных emanаций и горячих радоновых источников начались интенсивные поиски такого рода минеральных источников и их исследования, закончившиеся в первом десятилетии XX в. выделением самостоятельной научно-практической области — радиобальнеологии.

Интенсивное изучение природы радиоактивного распада, начавшееся в конце XIX в. и не увенчавшееся успехом, дало возможность в начале XX в. установить ряды распада основных радиоактивных элементов и их конечные продукты, определить постоянную скорости распада для каждого радиоактивного ряда, выявить определенные закономерности в постоянстве соотношений между материнскими и дочерними радионуклидами. Одновременно начали проводиться определения радиоактивности горных пород, минералов, океанических и других вод и осадков. Эти исследования показали широкую распространенность радиоактивных элементов в земной коре и возможное влияние радиоактивности на ход геологических процессов. Было определено, что радиоактивность, являясь эндотермическим процессом, может оказать влияние на термическую историю Земли.

Надо отметить, что, несмотря на несостоятельность первых попыток увязать динамику земной коры с явлениями радиоактивности и трудностями даже в подходе к решению проблемы тепловой истории Земли, важная роль радиоактивного распада в физической жизни нашей планеты была признана позднее многими геологами, геофизиками и геохимиками [Войткевич, 1956].

Большое влияние на развитие наук о Земле и формирование новых направлений в изучении нашей планеты оказали методы измерения времени существования отдельных геологических образований, позволившие составить представления о времени формирования земной коры и планеты в целом. Попытки определить возраст пород и длительность отдельных периодов в развитии Земли предпринимались еще до открытия явлений радиоактивности, и в XIX в. удалось сформировать шкалу относительного геологического времени, ставшую основой для геологических реконструкций и теорий.

В начале XX в. начались исследования в области измерения абсолютного геологического возраста природных объектов по непрерывному распаду радиоактивных элементов, поскольку горные породы, содержащие радиоактивные элементы и накопившие продукты их распада, представляют собой особого рода "документ о возрасте".

В качестве "атомных часов геологического времени" использовались тяжелые радиоактивные элементы, такие, как уран-238 (период полураспада 4,5 млрд лет), торий-232 (период полураспада 14,1 млрд лет) и др., которые сразу после открытия явления радиоактивности начали исследовать физики и химики. Эти тяжелые элементы с большим периодом полураспада на протяжении геологических эпох постепенно превращаются в два устойчивых изотопа свинца и гелия. Уран-238, как оказалось, связан с конечным дочерним продуктом — радиогенным свинцом-206, а не с изначальным свинцом-204, который считают одним из основных составных частей Вселенной.

На основании предположения о постоянстве радиоактивного распада на протяжении всего времени существования нашей планеты были разработаны и продолжают разрабатываться методы определения абсолютного возраста геологических образований.

Результаты первых определений абсолютного возраста произвели, можно сказать, революцию в геологии и астрономии, поскольку до того времени не было ясности и единого мнения о возрасте Земли и длительности отдельных периодов в ее развитии. Большое число приближенных вычислений, проведенных на основе различных предположений и не всегда надежных обобщений, приводило к самым разным мнениям о возрасте Земли. Униформисты, например, считали, что возраст планеты бесконечен, другие под влиянием Дарвина оценивали возраст планеты в несколько сот миллионов лет, а физики во главе с лордом Кельвином определяли возраст Земли только в 24 млн лет на основе расчета времени охлаждения первоначально огненножидкой Земли. По данным же первых определений абсолютного возраста, проведенных свинцовым и гелиевым методами, возраст Земли оценивался примерно в 1 млрд лет.

Дальнейшее развитие радиоактивных методов определения абсолютного возраста геологических образований базировалось на достижениях в исследованиях устойчивых радионуклидов с использованием масс-спектрометров и другой новейшей специальной аппаратуры, позволяющей определять ничтожно малые количества изотопов. Обобщение данных многочисленных определений древних минералов позволило А. Холмсу и Ф.Г. Гоутермасу в 1946 г. определить возраст Земли примерно в 2—3 млрд лет. Дальнейшее увеличение точности применяемой аппаратуры и методов позволило выявить малые количества стабильных изотопов, не поддававшиеся ранее определениям. По данным начала 60-х годов, возраст Земли считался в диапазоне 4,5—6,0 млрд лет, что согласуется с расчетами времени, необходимого для нагревания первоначально холодного планетного образования до современных температур на Земле.

Определения абсолютного возраста геологических образований радиоактивными методами дали возможность выявить важнейшие закономерности в развитии Земли. Было установлено, что в различных частях земного шара наблюдается довольно правильная последовательность абсолютного возраста геологических образований вплоть до 2 млрд лет, которая согласуется с последовательностью тех же пород, определяемых геологическими методами.

Исследования радионуклидов в естественных образованиях и определения их абсолютного возраста подтвердили правильность более старых геологических интерпретаций, согласно которым, например, одни горные пояса считались старше других. Однако новые данные об определении абсолютного возраста геологических образований не могли быть распространены на большие регионы, поскольку определение возраста отдельных минералов могло относиться только к отдельным пунктам. Многочисленные неувязки в определении возраста отдельных формаций, разногласия в оценке их возраста и отсутствие независимых друг от друга методов определения абсолютного возраста не давали возможности провести взаимную проверку полученных результатов. Все это затрудняло систематизацию данных и замедляло составление шкалы абсолютного геологического возраста, соответствующей шкале относительного возраста геологических формаций. Возникшие трудности были преодолены только в конце 30-х годов. Шкала абсолютного геологического времени постепенно начала формироваться, в нее включались проверенные и надежные данные.

В 60-х годах в лабораториях всего мира тщательно изучались многочисленные схемы радиоактивного распада с целью использования их в качестве основы для создания надежного геологического "хронометра". В эти годы интенсивно разрабатывались калий-аргоновый, рубидиево-стронциевый, ураново-свинцовый, радиоуглеродный и другие новые методы определения абсолютного возраста и их модификации. Особенно широкое распространение получил радиоуглеродный метод, предложенный в 1947 г. В.Ф. Либби в связи с открытием естественного радиоуглерода, образующегося в атмосфере под воздействием космических лучей. Открытие естественного

радиоуглерода физики сравнивают по значимости с открытием явления радиоактивности.

Новые радиоактивные методы изучения изотопного состава природных образований послужили основанием для использования радиоактивных излучений элементов горных пород при разведке полезных ископаемых. Проведенная впервые в СССР в 1920 г. при поисках радоновых источников радиометрическая съемка в последующие годы широко применялась при поисках радиоактивных руд и минералов во всех странах. Особенно широкий размах новый вид разведки достиг в 50—60-х годах в Канаде, где использовались специальные радиометры, установленные на самолетах и вертолетах, позволившие обследовать на радиоактивность всю территорию страны.

К радиоактивным методам разведки относятся методы изучения геологического разреза нефтяных и газовых скважин по регистрации естественной, а затем и наведенной активности горных пород, слагающих геологический разрез. Метод был разработан в СССР в 1937 г., получив название радиоактивного каротажа, затем усовершенствован в США и Франции, где в 1941 г. впервые предложено использовать нейтронные источники облучения пород и регистрировать их ответное излучение. Важным шагом в развитии методов изучения радиоактивности геологического разреза было предложение Г. Н. Флерова изучать вызванное нейтронное излучение пород не только в пространстве (по разрезу), но и во времени с применением импульсного генератора нейтронов. Ядерно-физические методы изучения геологических разрезов, в первую очередь нефтяных скважин, в настоящее время широко применяются при контроле за геологическими процессами, протекающими на больших глубинах, например при контроле за продвижением фронта закачиваемой воды или газа на крупнейших месторождениях нашей страны.

Были разработаны самые разнообразные ядерно-физические методы, повышающие эффективность поисков и разведки полезных ископаемых. Использование ядерно-физических основ дало возможность разработать методы, выявляющие пространственно-временное распределение урана, тория, бора и лития, например, с одновременным определением их локальной и общей концентрации в минералах, образцах горных пород, природных водах и нефтях.

Рассеянные в литосфере, гидросфере и атмосфере уран-238, торий-232, калий-40, рубидий-87 и другие естественные радионуклиды, как было установлено, участвуют во всех геохимических и геологических процессах.

Изучение поведения и распределения радиоактивных изотопов и стабильных изотопов-индикаторов или измерения гамма- и нейтронного излучения, помимо научного значения, обеспечило применение полученных результатов для решения практических задач радиогидрогеологии. Эти сведения дают возможность судить о фильтрационных свойствах пород, о направлении и скорости движения подземных вод, об условиях питания грунтовых вод, взаимосвязи водоносных пластов и связи поверхностных и подземных вод. Выявление зако-

номерностей изотопного состава природных вод показало, что в подземных водах условия разделения изотопов водорода и кислорода практически не меняются и наследуются с момента их формирования. В связи с этим по изотопному составу природных вод может быть выявлена доля вод морского или метеорного происхождения даже при одинаковом солевом их составе. По изотопному составу вод может быть на практике с большой степенью достоверности выявлена часть термальных вод, прошедших стадию глубинной миграции, и часть "местных грунтовых вод" даже при равенстве их температур.

Данные радиогидрогеологии, выделившейся в самостоятельное направление, оказались весьма надежными при решении принципиальных вопросов гидрогеологии, гидрологии с позиций единства всех вод планеты.

В послевоенный период в метеоритах, атмосфере, гидросфере, литосфере были открыты неизвестные ранее радионуклиды, часть которых образовывается под действием космических лучей. Изотопы водорода и кислорода молекул воды оказались идеальными индикаторами гидрогеологических процессов при изучении взаимодействия воды с породами, газами, органическими соединениями. Полученные результаты дают возможность объективно судить о процессах движения воды и делать выводы о ее происхождении в каждом конкретном случае.

Изучение изотопного состава воды в природных условиях дает возможность определять скорость миграции изотопов одного и того же элемента и выявлять некоторые региональные и глобальные геологические процессы, в которых участвует вода, являясь сильнейшим природным растворителем. Эффект разделения изотопов и изменение изотопных отношений в природных условиях используется в качестве поискового критерия при разведке месторождений некоторых природных ископаемых, например для выявления "слепых" рудных тел в пределах полей известных месторождений радиоактивных минералов.

Кроме того, изучение миграции изотопов позволяет получить данные для понимания ядерных причин вариаций изотопного состава элементов, определяемых химическими свойствами ядер и энергетикой ядерных реакций.

Изучение изотопного состава и выявление его изменений в водных телах в пределах полей известных месторождений радиоактивных деления геохимических предвестников землетрясений, поскольку области распространения основной массы очагов землетрясений земного шара и массы воды в земной коре совпадают, изотопный состав которой меняется во время невыясненных процессов, предшествующих землетрясениям или сопутствующим им.

Радиогидрогеологические исследования оказались весьма важными при решении важнейшей проблемы распределения воды на Земле. Изучение изотопного состава природных вод Земли в рамках международного гидрологического десятилетия дает возможность получать объективные данные о глобальных перемещениях влаги в гидрологи-

ческом цикле, что особенно важно при изыскании практических путей рационального использования водных ресурсов Земли.

В 40-х годах в связи с появлением ядерных реакторов, испытаниями и применением ядерного оружия в природе сильно увеличилось количество искусственных радиоактивных изотопов. В атмосфере, гидросфере и биосфере было внесено большое количество стронция-90, цезия-137, углерода-14 и других радионуклидов. В эти годы правительствами разных стран начали выделяться значительные суммы на исследования распространения искусственных радионуклидов. Были разработаны разнообразные ядерно-физические методы наблюдений в глобальных масштабах некоторых динамических процессов в гидросфере и литосфере.

В 50-х годах проникновение методов ядерной физики в науки о Земле еще более усилилось, возрос интерес к геофизике, геохимии, океанографии и наукам, занимающимся исследованиями космического пространства. В Мировом океане выявлены радиоактивные поля и среды искусственных радионуклидов "взрывного" происхождения. Во многих странах, в том числе в Советском Союзе, было проведено большое число специализированных исследований загрязнения морей и океанов глобальными выпадениями осколков деления при ядерных испытаниях и взрывах. В 50-х годах американскими и японскими исследователями было установлено быстрое загрязнение вод Тихого океана, в частности у берегов Калифорнии, вод Средиземного моря в районе Лионского залива за счет попадания отходов атомных производств и исследовательских центров.

Было выявлено, что загрязнение вод Мирового океана происходит не только за счет выбросов в атмосферу продуктов ядерных взрывов, но и за счет разрушающихся контейнеров прежних захоронений ядерных отходов в морях. Кроме того, небольшая, но постоянная часть загрязнений идет по водным артериям, куда попадают вымываемые грунтовыми водами отходы ядерных производств. Распространение концентрированных радиоактивных полей в Мировом океане независимо от источников их образования происходит в соответствии с крупномасштабной циркуляцией и турбулентной диффузией в районах взрывов или впадения рек. Изучение радиоактивного загрязнения вод Мирового океана и распространение концентрированных полей постепенно обособилось в самостоятельное направление, но ввиду важности и широты проблемы, возможно, в ближайшем будущем в этом направлении будут выделены более узкие задачи, решение которых будет представлять самостоятельное направление в науках об океане и в рамках прикладной ядерной физики. Исследованиям радиоактивного загрязнения океанов и морей уделяет особое внимание Международная комиссия по мирному использованию атомной энергии, результаты исследований регулярно обсуждаются на международных конгрессах и симпозиумах, поскольку эти вопросы связаны непосредственно с угрозой жизни и здоровью человека.

Следует подчеркнуть, что изучение радиоактивности минералов, природных вод и других природных объектов, с одной стороны, и физико-химическое их изучение — с другой, способствовали форми-

рованию новых ядерно-физических направлений в изучении Земли и в то же время прогрессу ядерной физики.

Так, многие последствия влияния радиоактивных излучений на минералы были известны еще до открытия явления радиоактивности, но правильно объяснены только физиками. Классическим примером такого положения может служить открытие в 1873 г. Ф. Розенбушем плеохроических ореолов в слюде, которые долгое время оставались загадкой для геологов; только в 1907 г. Дж. Джоли показал, что ореолы — это повреждение минерала, вызванное действием альфа-излучения мельчайших включений урана в течение геологического времени. Или другой пример: инертный газ гелий был открыт на Земле В.Ф. Гиллебрандом в 1891 г. и в 1895 г. в урановом минерале клевеите В. Рамзаем, а в 1908 г. Э. Резерфорд и Г. Гейгер установили тождество между альфа-частицами и дважды ионизированным атомом гелия.

Примером влияния геологических гипотез на развитие ядерной физики может служить следующий факт. В 1948 г. Ф. Берч высказал предположение о значении калия в тепловом режиме Земли в докембрийское время и возможном его влиянии и на последующее развитие Земли. Было установлено, что калий чрезвычайно распространенный элемент в земной коре, что он, хотя и слаборадиоактивен, но все же может выделять достаточное количество тепла. Проведенные после этого дополнительные исследования позволили уточнить период полураспада калия, оказавшийся чрезвычайно большим, кроме того, была исследована схема распада калия и разработана "теория сильно запрещенных бета-переходов".

Под влиянием достижений ядерной физики в науках о Земле сформировались самостоятельные ядерно-физические направления исследований вещества планеты. Изучение распределения и перемещения естественных и искусственных радионуклидов способствовало углублению знаний о глобальных проблемах развития Земли. Полученные данные резко изменили представления о происхождении и эволюции Земли, ее возрасте и тепловом режиме, энергетических ресурсах и процессах рудообразования, перемещениях и круговороте воды и т.д., показали неотвратимость распространения радиоактивного загрязнения природных вод, почв и всей биосферы осколками испытаний ядерного оружия и отходами атомных производств.

Дальнейшее использование достижений ядерной физики при изучении Земли будет способствовать формированию новых ядерно-физических направлений и отраслей геологии и геофизики, даст возможность получить и обобщить данные о радиоактивности земной коры и планеты в целом, установить связи радиоактивности земного вещества с Космосом, использовать полученные данные для мирных практических целей обеспечения жизни и созидательной деятельности человека на Земле.

ЛИТЕРАТУРА

- Абих Г.В.* О появившемся на Каспийском море острове и материалы к познанию грязевых вулканов в Каспийской области. Пер. с нем. 2-е изд. Баку: Изд-во АН АЗССР, 1939. 82 с.
- Алекперов Р.А., Эффендиев Г.Х.* О содержании урана в нефтях // Геохимия. 1956. № 6. С. 122—125.
- Алекперов Р.А., Эффендиев Г.Х.* К вопросу о форме нахождения урана в некоторых керогеновых сланцах // Докл. АН АЗССР. 1959. № 9. С. 32—34.
- Александров С.П.* Радиография туюмюунских руд // Минеральное сырье. Л.: Госгеолиздат, 1926. С. 673—691.
- Алексеев Ф.А., Готтих Р.П., Воробьева В.Я.* Закономерности в распределении радиоактивных элементов и естественного гамма-поля нефтегазоносных областей // Радиометрия нефтегазоносных областей. М.: Недра, 1968а. С. 3—18.
- Алексеев Ф.А., Ермаков В.И., Филонов В.А.* К вопросу о содержании радиоэлементов в водах нефтяных месторождений // Геохимия. 1958. № 7. С. 72—78.
- Алексеев Ф.А., Ерозолимский Б.Г., Беспалов Д.Ф.* и др. О результатах применения нейтронных импульсных методов и аппаратуры для исследования разреза скважин // Ядерная геофизика при поисках и разведке полезных ископаемых. М.: Недра, 1960. С. 3—38.
- Алексеев Ф.А., Шацов А.Н., Готтих Р.П.* Использование подводной радиометрии для изучения неотектоники и поисков структур в зоне шельфа // Проблемы геохимических поисков нефтяных и газовых месторождений и вопросы ядерной геологии. М.: Недра, 1968б. С. 222—237.
- Андрусов Н.И.* О возрасте Земли // Природа. 1912. № 3. С. 393—416.
- Антипов И.А.* О некоторых минералах из русских месторождений // Горн. журн. 1908. № 4. С. 255—261.
- Аристотель.* Метеорологика. Л.: Гидрометеоздат, 1983. 240 с.
- Арыбашев С.А., Плешанова В.Г.* Прибор с замкнутым потоком воздуха для обследования минералогических коллекций на радиоактивность // Вестн. Геол. ком. 1928. № 8. С. 35—39.
- Астон Ф.* Изотопы: Пер. с англ. Л., М.: Химиздат, 1923. 160 с.
- Багашев И.А.* Минеральные источники Забайкалья и задачи их изучения // Труды физико-медицинского общества. М., 1910. С. 78—86.
- Баранов В.И.* Радиоактивность минеральных источников и методы их исследования // Курорт. дело. 1926а. № 8. С. 1—6.
- Баранов В.И.* Радиоактивность Ижевского минерального источника // Там же. 1926б. № 8. С. 6—10.
- Баранов В.И.* К методике определения тория по эманации // Тр. Гос. радиевого ин-та. 1930. Т. 1. С. 37—41.
- Баранов В.И., Кречмер С.И.* Применение фотопластинок с толстым эмульсионным слоем к изучению распределения радиоактивных элементов в природных объектах // ДАН АН СССР. 1935. Т. 1. № 1. С. 543—550.
- Баранов В.И., Кузьмина Л.А.* Иониевый метод определения возраста морских илов: Прямое определение иония // Там же. 1954. Т. 47, № 3. С. 483—485.
- Баранов В.И., Кузьмина Л.А.* Содержание радиоактивных элементов в донных отложениях Тихого океана в районе Японских островов // Геохимия. 1957. № 1. С. 23—32.

Баранов В.И., Курбатов И.Д. О содержании радиоэлементов в воде и ее отложениях // Тр. Гос. радиевого ин-та. 1933. Т. 2. С. 139—156.

Баранов В.И., Христианова Л.А. Новые данные по радиоактивности Индийского океана // Тр. VII сес. Комис. по определению абсолют. возраста геол. формаций. М.: Изд-во АН СССР, 1960. С. 392—410.

Барсуков О.А., Блинова Н.М., Выборных С.Ф. Радиоактивные методы исследования нефтяных и газовых скважин. М.: Гостоптехиздат, 1958. 320 с.

Басилов К. Предварительная классификация буровых вод нижнего отдела продуктивной толщи нефтепромысла имени Орджоникидзе // Азерб. нефт. хоз-во. 1934. № 4. С. 68—73.

Батурич Г.Н., Коченов А.В., Ковалева С.А. Некоторые особенности распределения урана в водах Черного моря // ДАН СССР. Т. 166. 1966. № 3. С. 698—700.

Батурич Г.Н., Коченов А.В., Сенин Ю.М. Концентрация урана в современных океанических осадках в зонах подъема вод // Геохимия. 1967а. № 1. С. 456—462.

Батурич Г.Н., Коченов А.В., Шимкус К.М. Уран и редкие металлы в колонках донных осадков Черного и Средиземного морей // Там же. 1967б. № 1. С. 41—50.

Беккерель А. О невидимых лучах, испускаемых солями урана // ЖРФХО. Ч. физ. 1896а. Т. 280, вып. 5Б. С. 94—95.

Беккерель А. О различных особенностях невидимых лучей, испускаемых солями урана, и излучения противокатодной стенки трубки Крукса // Там же. 1896б. Т. 28, вып. 5Б. С. 95—104.

Беккерель А. Испускание новых лучей металлическим ураном // Там же. 1896в. Т. 28, вып. 6Б. С. 104—107.

Беляев В.И., Колесников А.Г., Нелепо Б.А. О радиоактивности морских вод и осадков // Докл. на II междунар. океаногр. конгр. Киев: Наук. думка, 1966. С. 34—39.

Бертенсон Л.Б. Радиоактивность в лечебных водах и грязях. СПб., 1914. 204 с.

Богоявленский Л.Н. Отчеты по обследованию радиоактивности в Западном Алтае и химического состава соляных озер Кулундинской степи в 1920 и 1921 гг. // Отчет Геологического комитета за 1921 г. Пг.: Изд-во Геолкома, 1922. С. 240—260.

Богоявленский Л.Н. О применении радиометрической съемки к разведке нефтяных месторождений // Нефт. и сланцевое хоз-во. 1923. № 2. С. 236—238.

Богоявленский Л.Н. О принципах радиометрической съемки и ее применениях // Изв. Ин-та прикл. геофизики. 1925. Вып. 1. С. 57—68.

Богоявленский Л.Н. О причинах радиоактивности Белокуринских термальных источников // Белокуринские горячие источники на Алтае. Л.: Изд-во Геолкома, 1926. С. 29—44.

Богоявленский Л.Н. Радиометрическая разведка нефти // Изв. Ин-та прикл. геофизики. 1927. Вып. 3. С. 113—122.

Богоявленский Л.Н. Ухтинское месторождение радия // ДАН СССР. Сер. А. 1928. № 14/15. С. 268—272.

Богоявленский Л.Н., Ломакин А.А. Аномалия проникающего излучения на Ухтинском месторождении нефти // Изв. Ин-та прикл. геофизики. 1928. Вып. 4. С. 165—172.

Боргман И.И. Явление с лучами Беккереля, испускаемыми урановой охрой // ЖРФХО. Ч. физ. 1900. Т. 32, вып. 1А. С. 58.

Боргман И.И. Исследования некоторых русских целебных грязей в отношении радиоактивности // Там же. 1904. Т. 34, вып. 5А. С. 183—204, 219.

Брезгунов В.С. Закономерности распределения дейтерия в природных водах на основе данных фотонейтронных методов: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 1967. 19 с.

Бубнов С.Н. Основные проблемы геологии. М.: ОНТИ, 1934. 184 с.; 2-е изд., испр. и доп. М.: Изд-во МГУ, 1960. 233 с.

Булашевич Ю.П. Теория нейтронного каротажа в применении к разведке нефтяных и угольных месторождений // Изв. АН СССР. Сер. геогр. и геофиз. 1948. № 2. С. 123—129.

Бурксер Е.С. Отчет радиологической лаборатории за 1910 г. // Тр. хим. и радиол. лаб. 1911. № 1. С. 24—40.

Бурксер Е.С. О задачах радиологической лаборатории // Дневник XIII съезда русских естествоиспытателей и врачей. Пг., 1913. С. 423—425.

Бурксер Е.С. О радиологических исследованиях минеральных источников // Там же. Пг., 1915а. Вып. 3. С. 34—41.

Бурксер Е.С. О терапевтическом действии и исследованиях радиоактивности мине-

ральных источников // Тр. Всерос. съезда по борьбе с раковыми заболеваниями. Пг., 1915б. С. 344—346.

Бурксер Е.С. О радиоактивности минеральных вод и лечебных грязей // Тр. съезда по улучшению отеч. лечеб. местностей. Пг., 1915в. Вып. 3. С. 42—43.

Бурксер Е.С. Отчет экспедиции для исследования радиоактивности минеральных источников Тифлиской губернии // Тр. хим. и радиол. лаб., 1916. С. 100—125.

Бурксер Е.С. Радиоактивность минеральных лечебных вод и лечебных грязей. Основы курортологии. М.: Медгиз, 1932. 340 с.

Бюффон. Всеобщая и частная естественная история. СПб. Ч. I. 1789. 375 с.; Ч. II. 1790. 401 с.

Вернадский В.И. Задачи дня в области радия // Изв. Рос. АН. 1911. Т. 5, N 1. С. 61—72.

Вернадский В.И. Записка об организации при Российской Академии наук Государственного радиевого института // Там же. Сер. VI. 1922. Т. 6. С. 68.

Вернадский В.И. К вопросу о радиоактивности нефтяных буровых вод // ДАН СССР. Сер. А. 1930. N 15. С. 399—401.

Вернадский В.И. Радиоактивность и новые проблемы геологии // Основные идеи геохимии. Л.: Изд-во АН СССР, 1935а. С. 23—39.

Вернадский В.И. О некоторых очередных проблемах радиогеологии // Изв. АН СССР. 1935б. ОМОН, сер. VII. N 1. С. 1—18.

Вернадский В.И. О значении радиогеологии для современной геологии // Тр. XVII сес. Междунар. геол. конгр. М.: Изд-во АН СССР, 1939. Т. I. С. 215—239.

Вернадский В.И. Избранные сочинения. М.: Изд-во АН СССР, 1954. Т. I. 696 с.

Вернадский В.И. История природных вод // Избр. соч. М.: Изд-во АН СССР, 1960. Т. 4. 680 с.

Вернадский В.И. Страницы автобиографии. М.: Наука, 1981. 350 с.

Вернадский В.И., Хлопин В.Г. Об исследованиях на радий нефтяных месторождений Союза // ДАН СССР. А. 1932. С. 55—59.

Вернов С.Н. Продолжительность и характер разряда в счетчиках Гейгера—Мюллера // Тр. Гос. радиевого ин-та. 1933. Т. 2. С. 143—148.

Виноградов А.П., Задорожный И.К., Зыков С.И. Возраст Земли по изотопному составу свинца // Тр. Первой сес. Комис. по определению абсолют. возраста геол. формаций. М.: Изд-во АН СССР, 1954. С. 112—135.

Виноградов А.П., Тугаринов А.И. Геология докембрия // Геохимия. 1961. N 9. С. 723—731.

Виноградов А.П., Тугаринов А.И., Зыков С.И., Ступикова Н.И. О возрасте пегматитов станогового комплекса // Там же. 1960а. N 5. С. 381—391.

Виноградов А.П., Тугаринов А.И., Зыков С.И., Ступикова Н.И. О возрасте горных пород Алданского щита // Там же. 1960б. N 7. С. 563—569.

Войткевич Г.В. Радиогеология и ее значение в познании истории Земли. М.: Госгеолиздат, 1956. 112 с.

Волков В.А., Вонский Е.В., Кузнецова Г.И. Химики; Биографический справочник. Киев: Наук. думка, 1984. 735 с.

Высоцкий Б.П. Проблемы истории и методологии геологических наук. М.: Недра, 1977. 280 с.

Вяльцев А.Н. Открытие радиоактивности как узел в сети научного развития // Учение о радиоактивности: История и современность. М.: Наука, 1973. С. 23—46.

Гаджи-Кусумов А.С., Карцев А.А. Газонефтепромысловая геохимия. М.: Недра, 1975. 128 с.

Гайсинский М. Вклад лаборатории Кюри в науку о ядре // Учение о радиоактивности: История и современность. М.: Наука, 1973. С. 69—127.

Ган О. Радиоактивность и история Земли. М.; Л.: Гостехтеориздат, 1933. 48 с.

Гедеонов Л.И. Содержание стронция-90 и цезия-137 в водах Атлантического океана и его морей в апреле-июле 1964 г. М.: Атомиздат, 1967. 63 с.

Гедеонов Л.И. Содержание стронция-90 и цезия-138 в водах Атлантического океана и его морей в августе—ноябре 1963 г. М.: Атомиздат, 1968. 58 с.

Герасимов А.П. Роль радия в динамике земной коры // Изв. Геол. ком. за 1921 г. 1922. Т. II. С. 43—64.

Герасимов А.П. Радиоактивные процессы и основные вопросы геологии // Тр. III Всесоюз. съезда геологов. Ташкент: Изд-во Среднеазиат. отд-ния Геолкома, 1929. Вып. 2. С. 243—254.

- Герасимов В.Г.* Подземные воды центральной части Волго-Камского края и их роль в формировании нефтяных залежей: Автореф. дис. ...-ра геол.-мин. наук. М., 1968. 41 с.
- Герлинг Э.К.* К вопросу о гелиевом дыхании Земли // ДАН СССР. 1935. N 4. С. 39—45.
- Герлинг Э.К.* Гелиевый метод определения возраста и его применение для определения пород и минералов Северной Карелии // Тр. XVII сес. Междунар. геол. конгр. М.: Изд-во АН СССР, 1940. Т. 4. С. 537—546.
- Герлинг Э.К.* Аргонный метод определения возраста и его применение для расчленения докембрийских образований Балтийского и Украинского щитов // Геохимия. 1956. N 5. С. 30—42.
- Герлинг Э.К., Павлова Т.Г.* Определение возраста двух каменных метеоритов по аргонному методу // ДАН СССР, 1951. N 7. С. 85—86.
- Герлинг Э.К., Шуколюков Ю.А.* К вопросу определения возраста по соотношению изотопов стронция и цезия в осадочных породах // Геохимия. 1957. N 3. С. 187—190.
- Глазов Н.В.* Применение радиоактивных изотопов в инженерных изысканиях. М.: Госатомиздат, 1962. 188 с.
- Гольмс А.* Возраст Земли. М.; Л.: Госиздат, 1930. 118 с.
- Гордеев Д.И.* История геологических наук. М.: Изд-во МГУ, 1972. Т. 2. 324 с.
- Горшков Г.В., Граммаков А.Г., Старик И.Е., Шпак В.А.* Некоторые данные о физических основах радиоактивных геофизических методов разведки // Тр. XVII сес. Междунар. геол. конгр. М.: Изд-во АН СССР, 1940. Т. 4. С. 495—497.
- Горшков Г.В., Курбатов Л.М.* Опыт определения геологического строения пластов по интенсивности гамма-излучения в буровых скважинах // Журн. геофизики. 1937. Т. 7, N 1. С. 90—104.
- Горшков Г.В., Лятковский Н.М.* Нейтронный каротаж // Вестн. ЛГУ. 1946. N 2. С. 41—46.
- Граммаков А.Г.* О влиянии некоторых факторов на распространение радиоактивных эманаций в природных условиях // Журн. геофизики. 1935. Т. 5, N 3. С. 42—46.
- Деятельность Главной палаты мер и весов в 1923 г. // Второе годовое собрание Главной палаты мер и весов. Л.: Изд-во Гл. палаты мер и весов, 1924. С. 1—243.
- Джолли Дж.* История поверхности Земли. Л.; М.: Госиздат, 1929. 190 с.
- Дэвис Ф.Дж.* Сцинтилляционные счетчики // Ядерная геология. М.: Мир, 1956. С. 51—71.
- Дядькин И.Г., Баталина Э.П.* Изменение во времени пространственно-энергетического распределения нейтронов от импульсного источника // Атом. энергия. 1961. Т. 10, вып. 1. С. 122—126.
- Ерозолимский Б.Г., Войцк Л.Р., Попов Н.В.* и др. Новые методы исследования буровых скважин, основанные на использовании импульсных нейтронных источников // Нефт. хоз-во. 1958. N 11. С. 58—64.
- Ерчиковский Г.О.* Полевой гамма-спектрометр и его применение для поисков радиоактивных руд // Труды по изучению радия и радиоактивных руд. Л.: Изд-во АН СССР, 1928. Т. 3. С. 127—160.
- Журнал присутствия Геологического комитета // Изв. Геол. ком. за 1920 г. 1924. Т. 39, N 7/10. С. 184—186.
- Журнал присутствия Геологического комитета за 1922 г. // Изв. Геол. ком. за 1922 г. 1926. Т. 41, N 6/9. С. 230.
- Зайцева Л.Л., Фигуровский Н.А.* Исследования явлений радиоактивности в дореволюционной России. М.: Изд-во АН СССР, 1961. 224 с.
- Записки Минералогического общества: Протоколы. Сер. II. 1900. Ч. 38, вып. 2. С. 38—41.
- Записки Минералогического общества: Протоколы. Сер. II. 1905. Вып. 2. С. 59—60.
- Записки Минералогического общества: Протоколы. Сер. II. 1908. Вып. 1. С. 18—20.
- Зотов П.П.* Вопросы абсолютной геохронологии // Происхождение и история Земли. Алма-Ата: Изд-во Каз. ун-та, 1972. С. 133—227.
- Зудин О.С., Нелено Б.А.* Статистический анализ информации о радиоактивном загрязнении океана. Л.: Гидрометеоздат, 1975. 112 с.
- Иванова Л.М., Геденов Л.И.* Содержание стронция-90 и цезия-137 в водах Балтийского моря в 1970 г. // Атом. энергия. 1972. Т. 33, вып. 4. С. 835—838.
- Изотопы гидросферы. М.: Недра, 1975. 278 с.
- Ильина Т.Д.* Развитие ядерной геофизики в СССР. М.: Наука, 1978. 220 с.
- Казаков Б.Н., Ильина Т.Д.* Леонид Николаевич Богоявленский. М.: Наука, 1981. 128 с.

- Калицкий К.П.* По поводу статьи Л.Н. Богоявленского о применении радиометрической съемки к разведке нефтяных месторождений // Нефть и сланцевое хоз-во. 1923. N 2. С. 239—240.
- Карстенс Э.Э.* Опыт исследования радиоактивности кавказских минеральных вод // Зап. рус. бальнеол. о-ва в Пятигорске. 1909—1910. Т. 11, N 1. С. 24—68.
- Карстенс Э.Э.* Химический состав кавказских минеральных вод по новейшим исследованиям. Пятигорск: Изд-во бальнеол. о-ва, 1910. 280 с.
- Карус Е.В.* Ядерная геофизика в решении современных геологических задач // Вестн. АН СССР. 1972. N 1. С. 33—38.
- Кириков А.П., Богословская Т.Н., Горшков Г.В.* Эманлирующая способность руд и горных пород Табошарского урано-радиевого месторождения // Изв. Всесоюз. геол.-развед. об-ния. 1932а. Т. 61, вып. 84. С. 1293—1299.
- Кириков А.П., Тверской П.Н., Граммаков А.Г.* К вопросу об эманационном методе поисков радиоактивных объектов // Там же. 1932б. Т. 61, вып. 82. С. 1269—1283.
- Кожевников Д.А.* Исследования пространственно-энергетического распределения нейтронов в среде с высоким водородсодержанием // Тр. МИНХ и ГП. 1959. N 25. С. 12—32.
- Кожевников Д.А.* Нейтронные характеристики горных пород и их использование в нефтепромысловой геологии. М.: Недра, 1974. 192 с.
- Кожевников Д.А., Мархасин В.И., Марьенко Н.И.* Влияние параметров ближней зоны на показания стационарных нейтронных методов // Нефтегазовая геология и геофизика. М.: Недра, 1971. N 10. С. 71—83.
- Кожшаров Н.* Материалы для минералогии России. СПб., 1862. Т. 4. 365 с.
- Коловрат-Червинский Л.С.* О выделении эманации из твердых или расплавленных солей, содержащих радий // Труды радиевой экспедиции Российской Академии наук. СПб., 1918. N 8. С. 41—47.
- Комлев Л.В.* К вопросу о содержании радия в нефтяных водах Новогрозненского района // ДАН СССР. А. 1931. N 7. С. 174—178.
- Комлев Л.В.* К вопросу о происхождении радия в пластовых водах нефтяных месторождений // Тр. Гос. радиевого ин-та. 1933. Т. 2. С. 207—223.
- Комлев Л.В.* Радиологические исследования в Хибинских тундрах // Хибинские апатиты. Л., 1935. Т. 6. С. 35—40.
- Комлев Л.В.* Некоторые вопросы геохимии урана и тория в гранитных магмах // К 50-летию научной деятельности академика В.И. Вернадского. Л.; М.: Изд-во АН СССР, 1936. С. 547—553.
- Комлев Л.В., Прокопенко Н.М.* Инструкция по сбору образцов изверженных горных пород для определения их абсолютного возраста радиоактивными методами // Тр. Гос. радиевого ин-та. 1933. Т. 2. С. 245—248.
- Комлев Л.В., Чердынцев В.В.* Продукты распада тория в радиосносных водах Южного Дагестана // Там же. 1937. Т. 3. С. 82—86.
- Конюшая Ю.П.* Открытия советских ученых. М.: Моск. рабочий, 1979. 688 с.
- Косци Ф.Ф., Рошольт Дж.* Радиоактивность в океанографии // Ядерная геология. М.: Мир, 1964. С. 40—81.
- Котульский В.К.* О радиоактивности золотоносных областей // Геологические исследования в золотоносных областях Сибири. СПб., 1912. Вып. 8. С. 54—57.
- Коченов А.В., Батулин Г.Н., Ковалева С.А. и др.* Уран и органическое вещество в осадках Черного моря // Геохимия. 1965. N 3. С. 303—313.
- Кузнецов Ю.В.* О формах нахождения иония (тория-230) и тория (торий-232) в океане // Там же. 1969. N 2. С. 177—184.
- Кузнецов Ю.В., Елизарова А.Н., Лисицын А.П., Френклин М.С.* Исследования механизма осаждения Ra^{231} и тория-230 из океанических вод // Радиохимия. 1966. Т. 8, вып. 4. С. 459—468.
- Кузнецов Ю.В., Симонюк З.Н., Лисицын А.П., Френклин М.С.* Изотопы тория в поверхностном слое донных осадков из Индийского океана // Геохимия. 1968. N 2. С. 218—227.
- Кунашева К.Г.* Содержание радия и тория в илах Баренцевого моря // Тр. Биогеохим. 1944. Т. 7. С. 98—105.
- Курбатов И.Д.* Радиоактивность источников и буровых вод Нефте-Дага и Челекена // ДАН СССР. 1931. N 7. С. 168—170.
- Курбатов Л.М.* О радиоактивности железо-марганцевых пород и определение ско-

рости их образования радиоактивными методами // Тр. XVII сес. Междунар. геол. конгр. М.: Изд-во АН СССР, 1940. Т. 4. С. 513—527.

Ларсен Е.С., Фейр Ж. Распределение урана и тория в интрузивных породах // Ядерная геология. М.: Мир, 1956. С. 104—121.

Лейпунская Д.И. Нейтронный активационный анализ горных пород: Дис. ... д-ра физ.-мат. наук. М., 1969. 44 с.

Лотце Р. Древность Земли в свете современной науки. Л.: Сеятель, 1924. 96 с.

Лукашевич О. Неорганическая жизнь Земли. СПб., 1908. 238 с.

Лэйн А.С. Исходный пункт в измерении геологического времени // Тр. XVII сес. Междунар. геол. конгр. М.: Изд-во АН СССР, 1940а. Т. 4. С. 523—526.

Лэйн А.С. Измерения геологического времени // Там же. 1940б. Т. 4. С. 527—531.

Макареня А.А., Поздышева В.А. Изучение радиоактивности русскими учеными: (Из истории организации новых научных исследований) // Учение о радиоактивности: История и современность. М.: Наука, 1973. С. 144—154.

Макарюнас К.В. С какой точностью постоянны константы радиоактивного распада // Сильные и слабые утверждения в ядерной спектроскопии и теории ядра. Л. Наука, 1981. С. 25—38.

Марбл Дж.П. Результаты исследований алланита (ортита) как указателя геологического возраста // Тр. XVII сес. Междунар. геол. конгр. М.: Изд-во АН СССР, 1940. Т. 4. С. 533—535.

Материалы Всесоюзного симпозиума по изученности Черного и Средиземного морей и охраны их ресурсов. Киев: Наук. думка, 1973. 340 с.

Мезерницкий П.Г. К вопросу о радиоактивности некоторых русских минеральных вод // ЖРФХО. Ч. физ. 1908. Т. 40, вып. 3А. С. 120.

Мезерницкий П.Г. К вопросу о радиоактивности некоторых русских минеральных вод // Там же. 1911. Т. 43, вып. 5А. С. 244—255.

Меркулова М.С. Распределение радия между кристаллами и растворами труднорастворимых солей // Тр. Гос. радиевого ин-та. 1937. Т. 3. С. 141—156.

Морозов В.И., Невеский Е.Н., Петрусев С.С., Федоровский Ю.П. Радиометрический и спектрометрический анализы донных отложений на борту судна // Океанология. 1968. Т. 9, вып. 3. С. 522—527.

Мотт В.Е., Этингер Н.М. Радиоактивный каротаж при разведке и добыче нефти // Тр. V Междунар. нефт. конгр. М.: Гостоптехиздат, 1961. Т. 1. С. 338—347.

Мочалов И.И. Владимир Иванович Вернадский. М.: Наука, 1982. 488 с.

Мысовский Л.В. Государственный радиевый институт и его деятельность // Природа. 1925. N 7/9. С. 217—222.

Нелепо Б.А. Ядерная гидрофизика. М.: Атомиздат, 1970. 224 с.

Ненадкевич К.А., Волков П.А. О новом минерале — тангенте из Тьюмююна // ДАН СССР. Сер. А. 1926. С. 43—48.

Никитин Б.А., Комлев Л.В. Содержание радия в буровых водах Бакинского нефтяного района и Дагестанской области // Тр. Гос. радиевого ин-та. 1930. Т. 1. С. 157—173.

Никитин Б.А., Меркулова М.С. Радий нефтяного месторождения Биби-Эйбат // Там же. 1933. Т. 2. С. 160—172.

Никитин С.Н. Условия залегания подземных вод на территории европейской части России. СПб., 1911. 180 с. (Прил. к Изв. Геол. ком.; Т. 20).

Николаев Д.С., Лазарев К.Ф., Корн О.П. и др. К изотопному составу урана в водах и осадках Черного и Азовского морей // ДАН СССР. 1965. Т. 165, N 1. С. 187—189.

Овидий. Метаморфозы. М.: Худож. лит., 1977. 430 с.

Озмидов Р.В. Горизонтальная турбулентность и турбулентный обмен в океане. М.: Наука, 222 с.

Организация науки в первые годы советской власти (1917—1925 гг.). Л.: Наука, 1968. 420 с.

Орлов П.П. Радиоактивные вещества и нахождение их в природе // Протоколы общества естествоиспытателей и врачей при Томском университете за 1908—1910 гг. Томск, 1912. С. 86—90.

Орлова М.П. Нахождение радиоактивных элементов в минеральных глинах и радиоактивность некоторых сибирских грязей // Курорт. дело. 1926. N 8. С. 10—20.

От редакции // Тр. хим. и радиол. лаб. 1911. Т. 1. С. 1.

Отчет Геологического комитета за 1922 г. Л.: Изд-во АН СССР, 1926. 456 с.

Отчет о деятельности Академии наук за 1912 г. СПб.: Изд-во Рос. АН, 1912. 360 с.

- Отчет о деятельности Академии наук за 1914 г. СПб.: Изд-во Рос. АН, 1914. 380 с.
- Отчет о деятельности Академии наук за 1916 г. Пг.: Изд-во Рос. АН, 1916. 320 с.
- Отчет о состоянии и деятельности Геологического комитета за 1921 год // Изв. Геол. ком. 1924. С. 1—540.
- Очкур А.П., Фельдман И.И.* Ядерно-геофизические методы определения вещественного состава пород. М.: ВИЭМС, 1970. 60 с.
- Павлов А.П.* Очерк истории геологических знаний. М.: Госиздат, 1921. 84 с.
- Пермяков В.И.* К вопросу об определениях геологического возраста минералов и горных пород Хибин и Северной Карелии // Тр. XVII сес. Междунар. геол. конгр. М.: Изд-во АН СССР, 1940. Т. 4. С. 507—512.
- Петржак К.А.* Определение постоянной распада тория с помощью счетчика Винн—Вильямса // Тр. Гос. радиевого ин-та. 1938. Т. 4. С. 149—160.
- Петтерсон Г.* Радиоактивные элементы в океанических водах и осадках // Ядерная геология. М.: Мир, 1956. С. 152—157.
- Пирс А.П., Миттон Д.В., Барнет П.* Геохимия урана в органических веществах нефтеносных пород // Тр. 2-й Междунар. конф. по мир. использ. атом. энергии (Женева, 1958 г.). М.: Атомиздат, 1959. Т. 8. С. 232—236.
- Погодин С.А., Либман Э.П.* Как добыли советский радий. М.: Атомиздат, 1971. 232 с.; 2-е изд., испр. и доп. 1977. 268 с.
- Погребов А.Т.* Радиоактивность фосфоритов в бассейнах рек Десны и Ивоти // Материалы к изучению естественно-производительных сил Западной области. Смоленск: Запоблиздат, 1932. Вып. 1. С. 75—79.
- Полканов А.А., Герлинг Э.К.* Геохронология докембрия Балтийского щита // Тр. XXI сес. Междунар. геол. конгр.: Докл. сов. ученых. М.: Изд-во АН СССР, 1960. С. 195—207.
- Понтекорво Б.М.* Энрико Ферми (1901—1954) // Успехи физ. наук. 1955. N 3. С. 42—48.
- Понтекорво Б.М.* Грани таланта: (Размышления о научном пути и судьбе Энрико Ферми) // Наука и жизнь. 1974. N 1. С. 32—33.
- Попов В.И.* Некоторые основные положения ядерной теории развития земной коры // Зап. Узб. отд-ния Всесоюз. минерал. о-ва. 1955. Вып. 7. С. 5—90.
- Попов Н.И., Греков А.С.* Гамма-спектрометрический метод датировки морских осадков // Океанология. 1971. Т. 11, вып. 3. С. 522—529.
- Попов Н.И., Патин С.А.* Основные черты глобального распределения стронция-90 на поверхности Мирового океана (1960—1961 гг.) // Тр. ин-та океанологии АН СССР. 1966. Т. 82. С. 230—239.
- Потылицын Л.Н.* Состав вод, сопровождающих нефть // ЖРФХО. Ч. хим. 1883. Вып. 3. С. 6—9.
- Программа международного конгресса по радиоактивности и электричеству // ЖРФХО. Ч. физ. 1910. Т. 42, вып. 3А. С. 147—148.
- Радиевый институт имени В.Г. Глопина. Л.: Наука, 1972. 244 с.
- Ранкама К.* Изотопы в геологии. М.: Изд-во иностр. лит., 1956. 464 с.
- Ратнер А.П.* К теории распределения электролита между твердой кристаллической решеткой и жидкой фазой // Тр. Гос. радиевого ин-та. 1933. Т. 2. С. 67—77.
- Решение первой сессии Комиссии по определению абсолютного возраста геологических формаций АН СССР // Тр. Первой сес. Комис. по определению абсолют. возраста геол. формаций. М.: Изд-во АН СССР, 1954. С. 225—229.
- Романкевич Е.А., Безруков П.Л., Баранов В.И., Христианова Л.А.* Стратиграфия и абсолютный возраст глубоководных осадков западной части Тихого океана: Результаты исследований по международным геофизическим проектам // Океанология. 1966. N 14. С. 38—46.
- Савченко В.П.* Законы, управляющие системой: "жидкость + газы", и их приложение к выяснению генезиса природных газов // Природ. газы. 1936. N 11. С. 142—145.
- Свинне Р.И.* О радиоактивности некоторых русских минеральных вод // ЖРФХО. Ч. физ. 1913. Т. 45, вып. 8. С. 454—460.
- Силард Б.* Таблицы руд урана и тория. Одесса, 1910. 80 с.
- Соколов А.П.* Ионизация и радиоактивность воздуха // Зап. рус. бальнеол. о-ва в Пятигорске. 1903—1904. Т. 6. С. 325—414.
- Соколов А.П.* Наблюдения ионизации воздуха в Пятигорске и Кисловодске с 27 мая по 9 июля 1903 г. // ЖРФХО. Ч. физ. 1903. Т. 36, вып. 5А. С. 143—182.
- Соколов А.П.* Радиоактивность некоторых русских минеральных вод, грязей и почв // Там же. 1905. Т. 37, вып. 4А. С. 101—153.

Соколов А.П. О тепловом режиме Земли // Дневник XII съезда русских естествоиспытателей и врачей. М., 1910. Отд. I. С. 213—229.

Соловьев Ю.И. О работах В. Рамзая по радиоактивности воздуха // Учение о радиоактивности: История и современность. М.: Наука, 1973. С. 128—143.

Соседко А.Ф., Комлев Л.В., Чердынцев В.В. Содержание радия в породах горнодиоритового массива Букан-Тау (Центральные Кызылкумы) // Тр. СОПС. Сер. Каракалпакия. 1933. Т. 1. С. 193—202.

Спицын В.И. О механизме выделения эманации радия из радиоактивных минералов в жидкие среды // Труды по изучению радия и радиоактивных руд. Л.: Изд-во АН СССР, 1956. Т. 2. С. 29—35.

Спицын В.И., Баранов В.И. Из истории работ по радиоактивности в Московском университете // Радиохимия. М.: Изд-во МГУ, 1952. С. 5—26.

Справочное руководство по применению ядерных методов в гидрологии и гидрогеологии. М.: Недра, 1971. 256 с.

Старик И.Е. К вопросу о коллоидных свойствах полония // Тр. Гос. радиевого ин-та. 1930. Т. 1. С. 29—75.

Старик И.Е. Вопросы геохимии урана и радия // К 50-летию научной деятельности академика В.И. Вернадского. Л.; М.: Изд-во АН СССР, 1936. С. 445—449.

Старик И.Е. Радиоактивные методы определения геологического времени. Л.; М.: ОНТИ НКТП, 1938. 176 с.

Старик И.Е. Форма нахождения и условия первичной миграции радиоэлементов в природе // Успехи химии. 1943. Т. 12, вып. 4. С. 287—307.

Старик И.Е. Современное состояние радиоактивных методов определения возраста древних и молодых образований // Тр. Первой сес. Комис. по определению абсолют. возраста геол. формаций. М.: Изд-во АН СССР, 1954. С. 9—21.

Старик И.Е. Ядерная геохронология. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1961. 200 с.

Старик И.Е., Кузнецов Ю.В., Граценко С.М., Френкlich М.С. К вопросу об иониевом методе определения возраста морских осадков // Геохимия. 1958а. N 1. С. 3—13.

Старик И.Е., Кузнецов Ю.В., Лезин В.К. О формах нахождения урана и тория в донных отложениях Антарктиды // Радиохимия. 1959. Т. 1, вып. 3. С. 321—324.

Старик И.Е., Лисицын А.П., Кузнецов Ю.В. О механизме удаления радия из морской воды и его накопления в донных осадках морей и океанов // Докл. междувед. комис. по изуч. Антарктики. М.: Изд-во АН СССР, 1961. С. 70—133.

Старик И.Е., Меликова О.С. К вопросу о миграции иония в природных условиях // ДАН СССР. 1941. Т. 31, N 9. С. 912—914.

Старик И.Е., Николаев Д.С., Старик Ф.Е., Меликова О.С. Содержание урана в природных водах СССР // Тр. Гос. радиевого ин-та. 1958б. Т. 8. С. 251—261.

Старик И.Е., Полевая Н.И. Выщелачиваемость продуктов распада тория и радиотория из минералов // Там же. 1957. Т. 7. С. 102—118.

Старик И.Е., Самарцева А.Г., Яценко М.Л. Растворимость вторичных урановых минералов // ДАН СССР. 1941а. Т. 31, N 9. С. 910—911.

Старик И.Е., Сегель Н.М. Определение возраста радиоактивным методом // Тр. Гос. радиевого ин-та. 1937. Т. 3. С. 200—209.

Старик И.Е., Сегель Н.М., Верещагин В.В. Сравнительная миграционная способность радия и мезотория // ДАН СССР. 1941б. Т. 32, N 4. С. 252—253.

Старик И.Е., Смагина А.С. Эманационное определение радия в горных породах // Тр. Гос. радиевого ин-та. 1933. Т. 2. С. 104—116.

Старик И.Е., Соботович Э.В., Ловцюс Г.П. и др. Об определении возраста пород // Геохимия. 1957. N 7. С. 584.

Старик И.Е., Щепотьева Е.С. Методы определения радиоактивности природных образований. М.: Госгеолтехиздат, 1956. 230 с.

Старосельская-Никитина О.А. История радиоактивности и возникновения ядерной физики. М.: Изд-во АН СССР, 1963. 428 с.

Стенон Н. Сочинения. М.: Изд-во АН СССР, 1957. 151 с.

Стопневич А.Д. Об исследованиях пластовых вод буровой скважины в Ставрополье // Изв. Геол. ком. за 1919 г. 1923. Т. 38. С. 39—45.

Стыро Б.И. Вопросы ядерной метеорологии. Вильнюс: Изд-во АН ЛитССР. 1960. 280 с.

Стыро Б.И. Самоочищение атмосферы от радиоактивных загрязнений. Л.: Гидрометеониздат, 1968. 288 с.

- Сулин В.А. Воды нефтяных месторождений. М.: ОНТИ НКТП, 1935. 320 с.
- Тагеева Н.В. Геохимия и происхождение радия в пластовых хлоридно-щелочно-земельно-натриевых рассолах // Тр. лаб. гидрогеол. проблем. 1958. Т. 20. С. 63—69.
- Тагеева Н.В., Старик И.Е. Содержание радия в нефтяных водах острова Челекен // ДАН СССР. 1931. N 7. С. 163—167.
- Тверцын В.С., Милин В.Б. Радиоактивность буровых вод Грозненского района // Нефт. хоз.-во. 1929. N 11/12. С. 112—115.
- Титов В.С. Радиоактивность горячих источников Белокурихи // Дневник XII съезда русских естествоиспытателей и врачей. М., 1910. Отд. 2. С. 368—369.
- Токарев А.Н., Щербаков А.В. Радиогидрогеология. М.: Госгеолиздат, 1956. 264 с.
- Толмачев П.И. Гелий в газах термальных источников Памира // ДАН СССР. 1933. T 4, N 1. С. 94—97.
- Труды XVII Международного геологического конгресса. М.: Изд-во АН СССР. Т. 1. 1939. 676 с.; Т. 4. 1940. 495 с.
- Тугаринов А.И. Источник рудного вещества по изотопным данным // Геология руд. месторождений. 1975. N 4. С. 30—43.
- Тугаринов А.И., Войткевич Г.В. Докембрийская геохронология материков. М.: Недра, 1966. 387 с.
- Тугаринов А.И., Орлова Л.П., Зыков С.И., Чупахин М.С. О формах нахождения свинца в урановой смолке в связи с определением абсолютного возраста минералов // Тр. IV сес. Комис. по определению абсолют. возраста геол. формаций. М.: Изд-во АН СССР, 1957. С. 204—212.
- Тышинский В.Г. О роли гидрохимических показателей при изучении тектонической активности региона // Геохимия. 1971. N 1. С. 107—109.
- Фаулер Г. Ядерный картаж буровых скважин для целей разведки минералов и изучения почв // Ядерная геология. М.: Мир, 1956. С. 326—332.
- Фаулер Г. Возраст пород, планет и звезд. М.: Атомиздат, 1968. 94 с.
- Ферсман А.Е. К морфологии и геохимии Тюя-Муюна // Труды по изучению радия и радиоактивных руд. Л.: Госгеолиздат, 1928. Т. 3. С. 1—125.
- Ферсман А.Е., Щербаков Д.И. Тюя-Муюнское месторождение радиевых руд в Фергане. М.: Госгеолтехиздат, 1925. 40 с.
- Физический энциклопедический словарь. М.: Сов. энциклопедия, 1983. 928 с.
- Филиппов Е.М. Ядерно-геофизические методы изучения элементного состава горных пород: Автореф. дис. ... д-ра геол.-минер. наук. М., 1962. 40 с.
- Филиппов Е.М. Прикладная ядерная геофизика. М.: Наука, 1965. 480 с.
- Филонов В.А. Об одной особенности распределения активных элементов в зоне водо-нефтяного контакта // Геохимия нефти и нефтяных месторождений. М.: Изд-во АН СССР, 1962а. С. 38—46.
- Филонов В.А. Радиоактивные элементы в водах нефтяных месторождений Северного Предкавказья // Ядерная геофизика. М.: Гостоптехиздат, 1962б. С. 112—124.
- Флеров Г.Н., Петржак К.А. Спонтанное деление урана // Физ. журн. 1940. N 3. С. 275—280.
- Хан О. Прикладная радиохимия. М.; Л.: Госхимиздат, 1947. 276 с.
- Хлопин В.Г. К вопросу о химическом составе и возрасте тьямунита // ДАН СССР. 1925. Апр.-июнь. С. 73—76.
- Хлопин В.Г. Содержание гелия в Беломорской смоляной руде // ДАН СССР. А. 1926. Окт. С. 195—198.
- Хлопин В.Г. Геохимия благородных газов и радиоактивность // Природные газы. Л.: Стройгиз, 1931. С. 61—82.
- Хлопин В.Г. Развитие радиоактивных исследований в Союзе за 15 лет // Природа. 1932. N 11/12. С. 1011—1032.
- Хлопин В.Г. Природные газы Средней Азии и проблема их использования // Минеральные богатства Средней Азии. Л.: ОНТИ, 1935. С. 426—441.
- Хлопин В.Г. Методы определения геологического возраста, основанные на явлении радиоактивного распада // Академику В.И. Вернадскому к 50-летию научной и педагогической деятельности. М.: Изд-во АН СССР, 1936. Т. 1. С. 397—419.
- Хлопин В.Г. Радиоактивный метод определения геологического возраста в применении к некоторым геологическим образованиям СССР // Тр. XVII сес. Междунар. геол. конгр. М.: Изд-во АН СССР, 1940. Т. 4. С. 485—494.
- Хлопин В.Г. Радий и его получение из русского сырья // Хлопин В.Г. Избр. тр. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1957. Т. 1. С. 17—82.

Хлопин В.Г., Баранов В.И., Соколов В.А. К вопросу об определении радия в слаборадиоактивных веществах по гамма-лучам // ДАН СССР. 1925. Апр.-июнь. С. 77—80.

Хлопин В.Г., Владимиров М.Е. Геологический возраст уранитов и монацитов из пегматитовых жил Северной Карелии // Изв. АН СССР. Сер. хим. 1938. N 2. С. 489—497.

Хлопин В.Г., Герлинг Э.К., Барановская Н.В. О нахождении в природе некоторых устойчивых продуктов самопроизвольного деления урана // Изв. АН СССР. ОХН. 1947. N 6. С. 77—90.

Хлопин В.Г., Герлинг Э.К., Иоффе Э.М. Выделение гелия из минералов и горных пород // ДАН СССР. 1934. Т. 3, N 2. С. 121—126.

Хлопин В.Г., Никитин Б.А. К вопросу о содержании радия в нефтяных водах Грозненского района // Там же. 1930. N 15. С. 393—398.

Хлопин В.Г., Пасвик М.А. Миграция урана и радия в пределах главной жилы Тюямуонского месторождения // Тр. по изуч. радия. 1928. Т. 3. С. 105—110.

Чалов П.И. Изотопное фракционирование природного урана. Фрунзе: Илим, 1975. 236 с.

Чердынцев В.В. Ядерная вулканология. М.: Наука, 1973. 208 с.

Чердынцев В.В., Кадыров Н.Б., Новичкова Н.В. Происхождение железо-марганцевых конкреций Тихого океана по данным о изотопах // Геохимия. 1971. N 3. С. 339—354.

Чердынцев В.В., Казачевский И.В., Кислицына Г.Н. и др. Неравновесный уран в карбонатных отложениях и определение их возраста // Там же. 1966. N 2. С. 139—145.

Черепенников А.А. Проявления радиоактивности в Ухтинском районе // Вестн. Геол. ком. 1928. N 4. С. 18—23.

Черепенников А.А. Несколько опытов по извлечению и анализу газов из горных пород и минералов // Тр. Гос. радиевого ин-та. 1933. Т. 2. С. 136—139.

Чузаев Л.А., Покровский В.П. К теории спитарископа // ЖРФХО. Ч. физ. 1909. Т. 2, вып. 1. С. 298—301.

Шаллер Г.Е. Новое в радиоактивном каротаже // Тр. IV междунар. нефт. конгр. М.: Гостехиздат, 1956. Т. 2. С. 338—347.

Шацов А.Н. Морская радиометрия. М.: Недра, 1969. 120 с.

Шведов В.П., Патин С.А. Радиоактивность океанов и морей. М.: Атомиздат, 1968. 232 с.

Шимилевич Ю.С., Школьников А.С. Физические основы импульсного нейтрон-нейтронного каротажа // Портативные генераторы нейтронов в ядерной геофизике. М.: Атомиздат, 1962. С. 64—72.

Шкала геохронологического времени американского комитета по определению абсолютного возраста // Пробл. сов. геологии. 1935. Т. 5, N 11. С. 1065.

Штерне К. Эволюция мира. М., 1909. 490 с.

Шепотьева Е.С. Об условиях образования природных радиеносных вод // Тр. Гос. радиевого ин-та. 1957. Т. 6. С. 41—54.

Шербаков Д.И. К минералогии окрестностей селения Лякан в Южной Фергане // ДАН СССР. А. 1926. Окт. С. 191—194.

Эрикссон Э. Радиоактивность в гидрогеологии // Ядерная геофизика. М.: Мир, 1964. С. 82—102.

Эффендиев Г.Х., Алекперов Р.А., Нуриев А.Н. Вопросы геохимии радиоактивных элементов нефтяных месторождений. Баку: Изд-во АН АзССР, 1964. 152 с.

Яковлев К.П. Специальный практикум по радиоактивности. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1913. 18 с.

Aarkrog A. Disposal of radioactive wastes into seas, oceans and surface waters // Risö Rep. 1964. Vol. 85, N 107. P. 1020—1026.

Alvarez L.W., Cornog R. Helium and hydrogen of mass // Phys. Rev. 1939. Vol. 56. P. 613—615.

Ambrohn R. Methoden der angewandten Geophysik. Dresden, 1926. 250 S.

Anderson E.C., Libby W.F. World-wide distribution of natural radiocarbon // Phys. Rev. 1951. Vol. 81. P. 64—67.

Arnold J.R. Scintillation counting of natural radiocarbon // Science. 1954. Vol. 119. P. 155—157.

Baturin G.N., Iljina T.D., Popov N.I. Soviet investigations of natural radionuclides in marine and ocean sediments // Proc. Roy. Soc. Edinburgh. 1972. N 16. P. 183—191.

Becker A.Z. Radiamreiche Erd Isolen Abhandle Heidelberg // Angew. unid allgem. Chem. Bull. 1923. N 131. S. 209-210.

- Becquerel H.* Sur les radiations émises par phosphorescence // C. r. Acad. sci. 1896a. Vol. 122. P. 420—421.
- Becquerel H.* Sur les radiations invisibles émises par les corps phosphorescents // Ibid. 1896b. Vol. 122. P. 501—503.
- Becquerel H.* Sur quelques propriétés nouvelles des radiations invisible émises par divers corps phosphorescents // Ibid. 1896c. Vol. 122. P. 559—564.
- Becquerel H.* Sur les radiations invisibles émises par les sels d'uranium // Ibid. 1896d. Vol. 122. P. 689—694.
- Becquerel H.* Sur les propriétés des radiations invisibles émises par les sels d'uranium, et du rayonnement de la par anticathodique d'un tube de Crookes // Ibid. 1896e. Vol. 122. P. 762—767.
- Becquerel H.* Emission de radiations nouvelles par l'uranium métallique // Ibid. 1896f. Vol. 122. P. 1086—1088.
- Beers R.F., Goodman C.* Distribution of radioactivity in ancient sediments // Bull. Geol. Soc. Amer. 1944. Vol. 55. P. 1229—1253.
- Begemann F., Giese J., Hess D.C.* Disposal of radioactive wastes // Phys. Rev. 1957. Vol. 107, N 2. P. 540—548.
- Beltier W.G.* Peaceful uses of atomic energy // Proc. III Intern. conf. Geneva, 1965. Vol. 14. P. 1020—1025.
- Boltwood B.B.* The origin of radium // Philos. Mag. Ser. 6. 1905. Vol. 9. P. 599—613.
- Boltwood B.B.* On the ultimate desintegration products of the radioactive elements // Amer. J. Sci. Ser. 4. 1907. Vol. 23. P. 77—78.
- Bowen V.T., Sugihara T.T.* Considerations on the disposal of radioactive wastes // Proc. II Intern. conf. peaceful uses of atomic energy. Geneva, 1958. Vol. II. P. 242—248.
- Bowen V.T., Sugihara T.T.* Disposal of radioactive wastes into seas and oceans // Nature. 1960. Vol. 186, N 4718. P. 334—343.
- Bowen V.T., Sugihara T.T.* Hearings before the Subcommittee on research development and radiation of the Joint Committee on Atomic Energy. Wash. (D.C.): Congress USA, 1961. V.N. doc. A/AC/82/2/2/660.
- Brewer A.K.* Mass-spectrographic determination of the isotope advancement and of the atomic weight of rubidium // J. Amer. Chem. Soc. 1935. Vol. 60. P. 691—693.
- Brougniat A.* Tabbeandes terrains, qui composent l'ecord du globe, on essai sur la structure de la partie connue de la terra. Milano, 1829. 230 p.
- Burton B.* Radioactivity // Annual report of the Board Scientific advice of India, 1913—1914. Calcutta, 1915. P. 128—150.
- Cook K.L.* The new methods of explorations research // Mining Eng. 1954. Vol. 6, N 2. P. 180—186.
- Curie M.* Sur la radioactive // J. Phys. 1912. N 2. P. 232—239.
- Curie Moris.* Sur les e'sarts de poids atomiques obtenus avec le plomb provenant de divers mineraux // C. r. Acad. sci. 1914. Vol. 158. P. 1676—1679.
- Curie M., Debierne A.* Sur le polonium // Radium. 1910a. Vol. 7. P. 38—40.
- Curie M., Debierne A.* Sur le radium métallique // C. r. Acad. sci. 1910b. Vol. 151. P. 523—525.
- Curie M.* La Radium et les radioéléments. Paris, 1925. 502 p.
- Curie P.* Sur les corps radioactifs // J. chim. phys. 1903. P. 456—490.
- Curie P., Bouchard Ch., Balthazard V.* Sur l'effect physiologique de l'émanation du radium // C. r. Acad. sci. 1904. Vol. 138. P. 1384—1387.
- Curie P., M^{me} Curie.* Sur une substance nouvelle radioactive, contenue dans la pechblende // Ibid. 1898. Vol. 127. P. 175—178.
- Curie P., Curie M.* Sur la radioactivité provoquée par les rayons de Becquerel // Ibid. 1899. Vol. 129. P. 714—716.
- Curie P., Curie M.* Sur les corps radioactifs // Ibid. 1902. Vol. 134. P. 85—87.
- Curie P., Curie-Sklodowska M., Bemont G.* Sur une nouvelle substance fortement radioactive, contenue dans la pechblende // Ibid. 1898. Vol. 127. P. 1215—1217.
- Curie P., Laborde A.* Sur le chaleur d'egege spontament par les sels de radium // Ibid. 1903. Vol. 136. P. 673—675.
- Curie P., Laborde A.* Sur la radioactivité du gaz produit par les sources chaudes // Ibid. 1904. Vol. 138. P. 1150—1153.
- Curie P., Laborde A.* Sur la radioactivité du gaz produit par les sources chaudes // Ibid. 1906. Vol. 142. P. 1462—1465.
- Dempster A.* Isotopic constitution of uranium // Nature. 1936. Vol. 136. P. 120—130.

- Deutsch S., Kipper P., Piccioto E.* Radioactive measurements // *Nuovo cim.* 1957. Vol. 6, N 4. P. 796—800.
- Dorn E.* Sur les rayons de radium // *C. r. Acad. sci.* 1900. Vol. 130. P. 1126—1129.
- Elster J., Geitel H.* Substanz deren Emmanation in der Bodenluft und in der Atmosphäre enthalten ist // *Phys. Ztschr.* 1903. Bd. 4. S. 522—527.
- Elster J., Geitel H.* Substanz deren Emmanation in der Bodenluft und in der Atmosphäre enthalten ist // *Phys. Ztschr.* 1905. Bd. 5. S. 11—14.
- Ellsworth H.V.* Radioactive minerals as geological age indicators // *Amer. J. Sci.* 1925. Vol. 9. P. 127—134.
- Evans F.G.* Introduction to atomic nucleons. Cambridge, 1940. 142 p. (Mass. Inst. of Technol. Class Notes).
- Evans R.D., Goodman C., Keevil N.B.* et al. Intercalibration and comparison in two laboratories of measurements incident to the determination of geological ages rocks // *Phys. Rev.* 1939. Vol. 55. P. 931—946.
- Fajans K., Gohring O.* Über des Uran X_2 — das neue Element der Uranreihe // *Phys. Ztschr.* 1913. Bd. 14. S. 877—884.
- Faltings V., Hardeck P.* Der Tritiumgehalt der Atmosphäre // *Ztschr. Naturforsch. A.* 1950. Bd. 5. S. 438—443.
- Faul H.* Logging of drill holes by neutron-gamma scattering // *Nuclear geology.* N.Y.; L., 1954. P. 326—333.
- Folsom T.R., Sireekumazan C.* Disposal of radioactive wastes into seas and oceans // *Proc. II Intern. oceanogr. congr. Geneva.* 1966. Vol. 18. P. 423—427.
- Friedman J., Urey H.C.* Deuterium content of natural water // *Bull. Geol. Soc. Amer.* 1952. Vol. 63. P. 1252—1258.
- Geiger H., Nuttall J.* The ranges of the particles from the thorium and actinium products // *Philos. Mag. Ser. 6.* 1912. Vol. 24. P. 647—654.
- Genter W., Goebel K., Präg R.* Argonbestimmungen on Kalium-Mineralien // *Geochim. et cosmochim. acta.* 1954. Vol. 5. P. 124—133.
- Genter W., Präg R., Smis G.* Argonbestimmungen an Kalium-Mineralien // *Geochim. et cosmochim. acta.* 1953. Vol. 4. P. 11—20.
- Giesel E.* Über Radium und radioaktive Stoffe // *Ber. Dt. chem. Ges.* 1900. Bd. S. 3569—3572.
- Giesel F.* Über Radium und radioaktive Stoffe // *Chem. Ber.* 1902. Bd. 35. S. 3608—3611.
- Goldberg S., London E.* Zur Frage der Beziehungen Zwischen Becquerelstrahlen und Hautaffektionen // *Dermatol. Ztschr.* 1903. Bd. 10. S. 457—462.
- Goldschmidt V.M.* Geochemische Verteilungsgesetze der Elemente // *S.-Ber. Heidelberg. Akad. Wiss. Math. Naturwiss. Kl.* 1937. N 4. S. 112—118.
- Gow I.D., Pollock H.C.* Development of compact evacuated pulsed neutron conce // *Rev. Sci. Instrum.* 1960. Vol. 31, N 3. P. 30—32.
- Grabau A.W.* Principles of stratigraphy // *Nature.* 1926. Vol. 92. P. 399—403.
- Gray J.A.* Liberation of helium from radioactive minerals by grinding // *Proc. Roy. Soc. London. A.* 1909. Vol. 82. P. 291—306.
- Gregory A.F.* Analysis of radioactive sources in aeroradiometric survey over oil fields // *Canad. Mining and Met. Bull.* 1955. Vol. 49, N 20. P. 173—178.
- Grosse A.* An unknown radioactivity // *Phys. Rev.* 1932. Vol. 42. P. 565—569.
- Grosse A.V., Jonston W.H., Wolfgang R.L., Libby W.F.* Tritium in nature // *Science.* 1951. Vol. 113. P. 1—10.
- Groven C., Govaerts G.Y., Gueben G.* Photographic action of artificial radio-elements // *Nature.* 1938. Vol. 141. P. 916—917.
- Hahn O.* A new radio-active elements which evolves thorium emanation // *Proc. Roy. Soc. London A.* 1905. Vol. 76. P. 115—117.
- Hahn O., Strassman F., Walling E.* Herstellung wägbarer Mengen des Strontiniscops // *Naturwissenschaften.* 1937. Bd. 25. S. 189—194.
- Hahn O., Walling E.* Über die Möglichkeit geologischer Altersbestimmungen Rubidium-halter Mineralen und Gesteine // *Ztschr. anorg. und allgem. Chem.* 1938. Bd. 236. S. 78—82.
- Hayase J.* Radioactivity and geology // *Amer. Miner.* 1954. Vol. 39, N 9/10. P. 761—776.
- Hecht F.* Minerale und gesteine radioaktive Eigenschaften Altersbestimmung // *Londolt-Börswstein. Lohlenwerte und Funktionen.* 6. Aufl. B. etc., 1952. Bd. 3. S. 284—312.
- Heé A.* Recherches sur la radioactivité d'un granite des Vosges par la méthode photographique // *C. r. Acad. sci.* 1948. Vol. 227. P. 356—358.

- Heé A., Yarkov M.* Autoradiographie des rayons beta du potassium // *Ann. géophys.* 1953. Vol. 9. P. 153—157.
- Henderson G.Z., Turnbull L.G.* A quantitative study of pleochroic haloes // *Proc. Roy. Soc. London. A.* 1934. Vol. 145. P. 582—591.
- Hernegger F., Karlik B.* Uranium in sea water Göteborgs // *Kgl. sven. vetenskapsakad. handl. Ser. B.* 1935. Vol. 4, N 12. P. 15—21.
- Herr W., Merz E.* Radioactive dating // *Ztschr. Naturforsch. A.* 1958. Bd. 13. S. 231—239.
- Hevesy G.* Die Verletzung der Radioelemente // *Phys. Ztschr.* 1911. Bd. 12. S. 1213—1217.
- Hoffman J.* Über in Süswasser gelöste und von Sedimenten mitgerissene Urannengen // *Chem. Erde.* 1942. Bd. 14. S. 239—252.
- Holland H.D., Kulp J.L.* The mechanism of removal of ionium and radium from the oceans // *Geochim. et cosmochim. acta.* 1954. Vol. 5. P. 312—318.
- Holmes A.* Radioactivity and geological time // *Nature. Res. Council. Bull.* 1928. Vol. 78. P. 124—159.
- Holmes A.* Geological time // *Nature.* 1935. Vol. 135. P. 680—695.
- Holmes A.* The measurement of geological time // *Rep. Comm. Measur. Geol. Time.* 1947. N 1347-48. P. 16—20.
- Holmes A.* Radioactivity and measurement of geological time // *Trans. Edinburgh. Geol. Soc.* 1959. Vol. 17, N 13. P. 183—191.
- Holmes A., Harwood H.F.* The age and composition of the whin sill and the related dikes of the north of England // *Mining Mag.* 1928. Vol. 21. P. 493—542.
- Holmes A., Lawson R.W.* The radioactivity of potassium and its geological significance // *Philos. Mag.* 1926. Vol. 7, N 2. P. 1218—1233.
- Houtermans F.G.* Über ein neues Verfahren zur Durchführung chemischer Altesbestimmungen nach der Blei-Method // *S.-Ber. Heidelberg. Akad. Wiss. Math.-naturwiss. Kl. Abt. II.* 1951. S. 123—136.
- Hurley P.M.* Ages by the helium method // *Nuclear geology. N.Y.; L.,* 1954. P. 391—431.
- Hurley P., Goodman C.* Helium retention in common rock minerals // *Bull. Geol. Soc. Amer.* 1941. Vol. 52. P. 545—560.
- Hurley P., Goodman C.* Helium age measurement // *Ibid.* 1943. Vol. 64. P. 305—324.
- Inghram M.G., Brown H.S., Patterson C.C., Hess D.C.* The branching ratio of K^{40} radioactive decay // *Phys. Rev.* 1950. Vol. 80. P. 916—917.
- Johnson D.X.* Locating buried radioactive sources and analyses // *Nuclear geology. N.Y.; L.,* 1954. P. 288—326.
- Joly J.J.* On the radium content of deep-sea sediments // *Philos. Mag. Ser. 6.* 1908. Vol. 16. P. 190—197.
- Joly J.J.* Radioactivity and geology. L., 1909. 287 p.
- Joly J.J.* Pleochroic haloes of various geological ages // *Proc. Roy. Soc. London. A.* 1923. Vol. 102. P. 682—705.
- Joly J.J.* The Earth's surface. L., 1925. 118 p.
- Jomans A.H., Hopkinson E.S.* Neutron lifetime a new nuclear log // *J. Petrol. Technol.* 1964. Vol. 16, N 3. P. 62—68.
- Keevil N.B.* The distribution of the helium and radioactivity in rocks // *Amer. J. Sci. Ser. 5.* 1938. Vol. 36. P. 406—416.
- Keevil N.B.* Helium retentivities of minerals // *Trans. Geophys. Union.* 1941. Vol. 11. P. 501.
- Keevil N.B., Yolliffe A.W., Larsen E.S.* The distribution of helium and radioactivity in rocks // *Amer. J. Sci.* 1942. Vol. 240. P. 831—846.
- Kellog W.E.* Observations and interpretation of radioactive patterns // *Mines. Mag.* 1957. Vol. 7. P. 5—9.
- Kimbell A.H.* Bibliography of research on heavy hydrogen compounds national nuclear energy. N.Y., 1949. 400 p. (Manhattan Project. Techn. Sect. Div. III; N 4-AC).
- Knopf A., Schuchert Ch., Kovarik A.F. et al.* The age of the Earth // *Nature. Res. Council. Bull.* 1931. Vol. 80. P. 487.
- Kolodny J., Kaplan J.R.* Uranium isotopes in sea-floor phosphorites // *Geochim. et cosmochim. acta.* 1970. Vol. 34, N 1. P. 3—24.
- Koszy F.K.* The thorium content of cambrian alum shales of Sweden // *Sver. geol. unders. C.* 1949. Vol. 43, N 7. P. 12—17.
- Koszy F.* Geochemical balance in the hydrosphere // *Nuclear geology. N.Y.; L.,* 1954. P. 120—127.

- Kovarik A.F., Adams N.J.* The desintegration constant of thorium C // *Phys. Rev.* 1938. Vol. 54. P. 413—418.
- Kröll V.* Vertical distribution on radium in deep-sea sediments // *Nature.* 1953. Vol. 171. P. 742—748.
- Kulp Y.Z.* Geological age // *Intern. Proc. Geol. Amer.* 1959. Vol. 61. P. 1479—1489.
- Kurbatov L.M.* The age of minerals // *Nature.* 1935. Vol. 136. P. 871—879. — *Idem* // *Arctica.* 1936. N 4. P. 95—101.
- Lane D.A., Torchinsky B.B., Spunks J.W.* Determining soil moisture and density by nuclear radiations // *Amer. Soc. Test. Mater. Spec. Techn. Publ.* 1953. Vol. 134. P. 23—34.
- Lane Wells* Radioactivity Well Logging Bull. 1944. Vol. 44, N 5. P. 1—50.
- Larsen E.S., Keevil N.B., Harrison H.S.* Method for determining the age of igneous rocks using the accessory minerals // *Bull. Geol. Soc. Amer.* 1952. Vol. 63. P. 1045—1052.
- Lepierre Ch.* Analyse des eaux de S. Vicente. Rome, 1908. 48 p.
- Levine C.A., Seaborg G.T.* The occurrence of plutonium in nature // *J. Amer. Chem. Soc.* 1951. Vol. 73. P. 3278—3283.
- Lex Prix Nobel.* Norstedt; Stockholm, 1901—1982.
- Libby W.F.* Atmospheric helium-3 and radiocarbon from cosmic radiation // *Phys. Rev.* 1946. Vol. 69. P. 671—672.
- Libby W.F.* Radioactivity and nuclear theory // *Amer. Rev. Phys. Chem.* 1950. Vol. 1. P. 93—106.
- Libby W.F.* On radiocarbon dating time // *Science.* 1951. Vol. 114, P. 291—298.
- Libby W.F.* Radiocarbon dating // *Chem. Eng. News.* 1952a. Vol. 30. P. 3444—3449.
- Libby W.F.* Radiocarbon dating. Chicago, 1952b. 230 p.
- Libby W.F.* Chicago radiocarbon dating. III // *Science.* 1952 C. Vol. 116. P. 673—682.
- Libby W.F.* Radiocarbon dates // *Chem. Eng. News.* 1953. Vol. 31. P. 1980—1988.
- Lo Surdo A.* Elio e neon "sintetici" // *Atti Accad. naz. Lincei. Rend. Cl. sci. Ser. 5a.* 1921. Vol. 30(i). P. 85—88.
- Mache H.* Radioaktivität // *Wien. Ber.* 1904. Bd. 113. S. 1329—1337.
- Machra L.* Fallout radiation standards and counter measures. Wash. (D.C.), 1963. 28 p.
- Mayne K.J., Lambert R.S., York D.* Isotopes // *Nature.* 1959. Vol. 183. P. 4656—4663.
- Meyer St.* Die Vorgeschichte der Gründung und das erste Jahrzehnt des Institutes für Radiumforschung. Wien. 1950. 10 S.
- Meyer St., Schweideler E.* Weitere Notiz über das Verhalten von Radium im magnetischem Felde // *Berichte.* 1899. Bd. 36. S. 323—324.
- Meyer St., Schweideler E.* Untersuchungen über radioaktive Substanzen // *S.-Ber. Wien.* 1906. Bd. 115. S. 63—88.
- Meyer St., Schweideler E.* Bemerkung zu einer Notiz des Herrn H.W. Schmidt betreffend RaE, und RaE₂ // *Phys. Ztschr.* 1907. Bd. 8. S. 457—458.
- Mijake J., Sazuhashi K.Y.* Disposal of radioactive wastes. Vienna, 1960. 40 p.
- Mijake J., Sazuhashi K.Y.* Disposal of radioactive wastes // *Proc. XI Pacific sci. congr.* Tokyo, 1966. P. 532—535.
- Mijake J., Sazuhashi K.Y.* Disposal of radioactive wastes Ya-fa. Vienna, 1968. Vol. 8. P. 168—170.
- Murray I., Renard A.F.* Report on deep-sea deposits based on the specimens collected during the voyage of H.M.S. Challenger. L., 1891. 523 p. + atlas.
- Nelson J.M.* Prospecting for uranium with car-method equipment // *US Geol. Surv. Bull.* 1953. N 988-1. P. 211—221.
- Nier A.O.* Evidence for the existence of an isotope of potassium of mass 40 // *Phys. Rev.* 1935. Vol. 48. P. 283—284.
- Nier A.O.* The isotopic constitution of uranium and the half-lives of the uranium isotopes // *Ibid.* 1939a. Vol. 55. P. 150—153.
- Nier A.O.* The isotopic constitution of radiogenic leads and the measurement of geological time // *Ibid.* 1939b. Vol. 55. P. 155—163.
- Nier A.O.* A redetermination of the relative abundance of the isotopic of carbon, nitrogen, oxygen, argon and potassium // *Ibid.* 1950. Vol. 77. P. 789—793.
- Nier A.O., Thompson R.W., Murphey F.* The isotopic constitution of lead and the measurement of geological time // *Ibid.* 1941. Vol. 60. P. 112—116.
- Nikanishi N.* Fluorometric microdetermination of uranium measurement of fluorescence intensity and determination of uranium content in natural substance // *J. Chem. Soc. Jap.* 1947. Vol. 68. P. 42—48; 1948. Vol. 69. P. 4—10.

- Nuclear geology. N.Y.; L., 1954. 556 p.
- Osterberg G.L.* et al. Disposal of radioactive wastes into seas, oceans and surface waters. Vienna: IAEA, 1966. P. 303—307.
- Paneth F., Peters K.* Heliumuntersuchungen // Ztschr. phys. Chem. 1928. Bd. 1. S. 253—269.
- Parker F.L.* et al. Disposal of radioactive wastes into seas, oceans and surface waters. Vienna: IAEA, 1966. P. 33—37.
- Parker H.M.* et al. Peaceful uses of atomic energy // Proc. III Intern. peaceful conf. Geneva, 1964. Vol. 14. P. 523—527.
- Patterson C., Goldenberg E.D., Inghram M.* Isotopic compositions of Quaternary leads from the Pacific Ocean // Bull. Geol. Soc. Amer. 1953. Vol. 64. P. 1387—1388.
- Penck A.* Alpen im Eiszeitalter. Leipzig, 1909. Bd. 1/2. 250 S.
- Pereira M.A., Foryaz P.H. de Garvalho.* Analyse des eaux de Portugal // C. r. Acad. sci. 1930. Vol. 191. P. 95—97.
- Petterson H.* Das Verhältniß Thorium zu Uran in den Gesteinen und im Meer // Anz. Akad. Wiss. Wien. Math.-naturwiss. Kl. 1937. Bd. 3. S. 127—128.
- Piggot C.S.* Lead isotopes and the problem of geologic time // J. Wash. Acad. Sci. 1928. Vol. 18. P. 269—274.
- Piggot C.S., Urry W.D.* The radium content of an ocean—bottom core // Ibid. 1939. Vol. 29. P. 405—415.
- Piggot C.S., Urry W.D.* Radioactivity of ocean sediments. III. Radioactive relations in ocean water and bottom sediments // Amer. J. Sci. 1941. Vol. 239. P. 81—91.
- Pontecorvo B.* Neutron well-logging // Oil and Gas J. 1941. Vol. 40, N 18. P. 32—33.
- Poole J.H., Matthews C.M.* The theory of the use of alpha ray ranges in nuclear emulsions for the determination of the radioactive contents of materials // Sci. Proc. Roy. Dublin Soc. 1951. Vol. 25. P. 305—316.
- Popov N.Y.* Gamma-ray spectrometry // Init. Rep. Deep Sea Drill. Project. 1971. Vol. 6. P. 27—29.
- Radioactivity in the marine envelopment. Wach. (D.C.), 1971. 342 p.
- Rajowsky B.* Das Geiger—Müller Zählrohr im Dienste des Bergbaues // Ztschr. Phys. 1943. Bd. 120. S. 627—638.
- Ramsay W., Soddy F.* Gases occluded by radium bromide // Nature. 1903. Vol. 68. P. 246—251.
- Rankama K.* Isotope geology of sulfur // Bull. Commis. geol. Finl. 1952. Vol. 157. P. 13—21.
- Regand Cl.* Marie Sklodowska-Curie (1867—1934). P., 1935. 290 p.
- Reinganum M.* Streunung und photographische Wirkung der Alpha // Atrahlen. Phys. Ztschr. 1911. Bd. 12. S. 1076—1077.
- Rocco G.G., Broecker W.S.* The vertical distribution of cesium-137 and strontium-90 in oceans // J. Geophys. Res. 1963. Vol. 68, N 15. P. 1—14.
- Roshalt J.M., Emiliani C., Geiss J.* et al. Absolute dating of deep-sea cores by the Pa²³¹/Th²³⁰ method // J. Geol. 1961. Vol. 69, N 2. P. 162—185.
- Rubey W.W.* Geological history of sea water // Bull. Geol. Soc. Amer. 1951. Vol. 62. P. 1138—1139.
- Rutherford E.* Uranium radiation and the electrical conduction produced by it // Philos. Mag. Ser. 5. 1899. Vol. 47. P. 109—163.
- Rutherford E.* A radioactive substance emitted from thorium compounds // Ibid. 1900. Vol. 49. P. 1—14.
- Rutherford E.* Radioactivity. 2nd ed. Cambridge, 1905a. App. A. 552 p.
- Rutherford E.* Some properties of the α -rays from radium // Philos. Mag. Ser. 6. 1905b. Vol. 10. P. 163—176.
- Rutherford E.* The scattering of α - and β -particles by matter and structure of the atom // Ibid. 1911. Vol. 21. P. 669—688.
- Rutherford E.* Collision of δ -particles with light atoms // Ibid. 1919. Vol. 37. P. 537—587.
- Rutherford E.* Bakerian lecture: Nuclear constitution of atoms // Proc. Roy. Soc. London A. 1920. Vol. 97. P. 374—400.
- Rutherford E., Geiger H.* The charge and nature of the α -particle // Ibid. 1908. Vol. 81. P. 162—173.
- Rutherford E., Soddy F.* The cause and nature of radioactivity. Pt I // Philos. Mag. Ser. 7. 1902a. Vol. 4. P. 370—396.
- Rutherford E., Soddy F.* The cause and nature of radioactivity. Pt II // Philos. Mag. Ser. 6. 1902b. Vol. 4. P. 569—585.

- Rutherford E., Soddy F.* The radioactivity of uranium // *Ibid.* 1903a. Vol. 5. P. 441—445.
- Rutherford E., Soddy F.* A comparative study of the radioactivity of radium and thorium // *Ibid.* 1903b. Vol. 5. P. 445—457.
- Rutherford E., Soddy F.* Radioactivity change // *Ibid.* 1903c. Vol. 5. P. 576—591.
- Salamon W.* Radiumreiche Erd Isolen // *Abh. Heidelberg. Akad. Wiss. Math.-naturwiss. Kl.* 1924. N 14. S. 22—29.
- Schweidler E.* Premier congress international pour l'étude de la radiologie et de l'ionisation tenu à Liegny du 12—14 septembre 1905, Bruxelles // *C. r. Acad. sci.* 1906. Vol. 142. P. 1—18.
- Sella A., Pochettino A.* Analyse des eaux de Roma // *Atti Roy. Accad. Lincei. Roma.* 1902. Vol. 5. P. 527—535.
- Shirasawa T.H., Shuehert E.A.* Fallout program // *Quarterly summary report.* N.Y., 1968. P. 100—140.
- Skłodowska-Curie M.* Rayons émis par les composés de l'uranium et du thorium // *C. r. Acad. sci.* 1898. Vol. 126. P. 1101—1103.
- Smith F., Genter W.* Argonbestimmungen an Kalium-Mineralien // *Geochim. et cosmochim. acta.* 1950. Vol. 1. P. 22—27.
- Smith V.R., Hemmendinger A.* The radioactive isotope of rubidium // *Phys. Rev.* 1937. Vol. 51. P. 1052—1053.
- Soddy F.* The chemistry of radio-elements. L., 1914. 46 p.
- Soddy F., Hyman H.* The atomic weight of lead from Ceylon thorite // *J. Chem. Soc.* 1914. Vol. 105. P. 1402—1408.
- Stead F.W.* Airborne radioactivity surveying speeds uranium prospecting // *Eng. and Mining J.* 1950. Vol. 151, N 9. P. 74—77.
- Step J., Becke F.* Das Vorkommen des Uranpferches zu St. Joachimstahl // *S.-Ber. Akad. Wiss. Wien. Math.-naturwiss. Kl.* 1904. Bd. 1, N 113. S. 585—618.
- Stigand J.A.* Outlines of the occurrence and geology of petroleum. L., 1925. 96 p.
- Strom K.M.* A concentration of uranium in block muds // *Nature.* 1948. Vol. 162. P. 922—929.
- Strömholm D., Svedberg T.* Untersuchungen über die Chemie der radioaktiven Gündstoffe // *Ztschr. anorg. Chem.* 1909. Bd. 61. S. 338—346; Bd. 63. S. 197—206.
- Strutt R.Y.* Helium and radioactivity in rare and common minerals // *Proc. Roy. Soc. London A.* 1908a. Vol. 80. P. 572—594.
- Strutt R.Y.* The accumulation of helium in geological time // *Ibid.* 1908b. Vol. 81. P. 272—277.
- Strutt R.Y.* The leakage of helium from radioactive minerals // *Ibid.* 1909. Vol. 82. P. 166—169.
- Taylor H.P.* The application of oxygen and hydrogen isotope studies to problem of hydrothermal alteration and desposition // *Econ. Geol.* 1974. Vol. 69, N 6. P. 843—888.
- Thompson F.G., Rowlands S.* Dual decay of potassium // *Nature.* 1943. Vol. 52. P. 103—112.
- Urey H., Brickwedde F., Murphy G.* An isotope of hydrogen of mass 2 and its concentration // *Phys. Rev.* 1932. Vol. 40. P. 1—15.
- Urry W.D.* Further studies in the rare gases. I. Permeability of various glasses of helium // *J. Amer. Chem. Soc.* 1932. Vol. 54. P. 3887—3901.
- Urry W.D.* Ages by the helium method. II. Past Keweenawan // *Bull. Geol. Soc. Amer.* 1936. Vol. 47. P. 1217—1233.
- Urry W.D., Piggot C.S.* Radioactivity of ocean sediments, concentration of the radioelements and their significance in red clay // *Amer. J. Sci.* 1942. Vol. 240. P. 93—103.
- Utterback C.L., Sanderman L.A.* Radium analyses of mineral sediments in northern Pacific and adjacent waters // *J. Mar. Res.* 1948. Vol. 7. P. 635—643.
- Vernadski V.I.* Die Radioaktivität und die neue Probleme der Geologie // *Ztschr. Elektrochem.* 1932. Bd. 38, N 8a. S. 519—527.
- Walkoff W.* Radioaktivität // *Photogr. Rdsch.* 1900. N 10. S. 1018—1031.
- Wetherill G.W., Tilton G.R., Davis G.L., Albrich L.* The measurement of geological time // *Geochim. et cosmochim. acta.* 1956. Vol. 9, N 5/6. P. 292—305.
- Williams G.A., Ferguson J.B.* The diffusion of hydrogen and helium through silice and other glasses // *J. Amer. Chem. Soc.* 1922. Vol. 44. P. 2160—2167.
- Wood D.O.* Liberation of helium from minerals by the action of heat // *Proc. Roy. Soc. London A.* 1911. Vol. 84. P. 70—78.

ИМЕННОЙ УКАЗАТЕЛЬ

- Ааркrog А. (Aarkrog) 216
Аббот С.Г. 91
Абих Г.В. 178, 179
Адамс Л. 23
Адамс Ф. 62
Алекперов Р.А. 188
Александров С.П. 127
Алексеев Ф.А. 152, 156, 161, 162, 178, 179, 192, 212
Амбронн Р. 133, 134, 135, 137
Андерсон Е. К. (Anderson) 190
Андрусов Н.И. 21, 56
Аносов Ф.Я. 21
Антипов И.А. 16, 17
Аристотель 49, 50
Арнольд Дж. (Arnold) 106
Арцыбашев С.А., 34, 130
Афанасьев А.П. 28
- Багашев И.А. 32
Баклунд Х.Г. 61
Баясов А.А. 145
Бальтазар В. (Baltasar) 24
Баранов В.И. 29, 30, 33, 45, 82, 166—169, 176, 181, 201, 202, 207, 209—211
Барановская Н.В. 82
Бартон Р. (Burton) 14
Басидов К. 172
Батурин Г.Н. 207, 208
Бауман В.И. 119
Бегеманн Ф. (Begemann) 100
Безруков П.Л. 209, 210
Бекетов Н.Н. 17
Беккер А. (Becker) 163
Беккерель А. 4, 5, 15, 23, 26, 127, 230
Белтер В.Г. 218
Беляев В.И. 216
Беляев В.Н. 21
Белянкин Д.С. 20
Бернет 201
Бертенсон Л.Б. 25, 26
Берч Ф. 236
Беспалов Д.Ф. 156, 159, 160
Бехтерев В.М. 24
Бир П. (Beer) 181
Бирс Р. (Beers) 203
- Богоявленский Л.Н. 32, 33, 117—120, 122—124, 133, 134, 164, 165, 167
Болтвуд Б. (Boltwood) 63, 68
Бор Н. 191
Боргман И.И. 28, 29, 35
Бородин И.П. 21
Боуэн В.Т. (Bowen) 214, 223
Бочков Л.И. 137
Браун Е.В. (Brown) 74
Брезгунов В.С. 192, 193
Брокер В.С. (Brocker) 214, 215, 223, 225
Бруньяр А. (Brougniart) 52, 56
Брюер А. (Brower) 102
Бубнов С.Н. 87
Булашевич Ю.П. 132, 147, 158, 159, 162
Бурксер Е.С. 31—37
Буш Б. 148
Бушар Ш. 24
Бюффон 51, 61
- Валков В. (Walkoff) 23
Валлинг (Walling) 104
Вальден П.И. 21
Вебер В.Н. 119
Везерилл Г. (Wetherill) 104
Верещагин В.В. 82
Вернадский В.И. 4, 14, 16—22, 28, 39—48, 79, 80, 82, 84, 85, 90, 94, 95, 110, 119, 135, 158, 168, 169, 172—177, 180, 186
Вильямс Г.А. 77
Вилкинсон Г. 107
Виноградов А.П. 109, 113—116
Владимирова М.Е. 21, 82, 88, 89
Войткевич Г.В. 65, 69, 76, 231
Войцик Л.Р. 156, 160
Волков В.А. 30
Воскобойников Г.М. 149
Вуд Д.О. (Wood) 65
Высоцкий Б.П. 51, 61
- Гаджи-Кусумов А.С. 195
Галлей Э. 55, 58
Гайсинский М. 4—6
Ган. О. (Hann) 10, 29, 63, 65, 66
Гаррисон Г.И. (Harrison) 100
Гаутермас Ф.Г. (Houtermaus) 100

- Гаутон 55
 Геденов Л.И. 216, 220
 Гейгер Г. (Geiger) 9, 71, 84, 236
 Гейм А. (Heim) 60
 Гейманн Б. 84
 Гейсс Дж. (Geiss) 100
 Гентер В. (Genter) 103
 Гейтель Г. (Geitel) 23
 Гейровский Я.Ж. 84
 Гендерсон Г.Н. (Henderson) 73, 74
 Герасимов А.П. 20, 41, 45, 82, 118
 Герасимов В.Г. 173
 Герлинг Э.К. 45, 82, 85, 89, 101—103, 107, 113
 Гернеггер Ф. (Hernegger) 185, 202
 Гизель Ф. (Giesel) 23
 Гики 55
 Гиллебрандт В.Ф. 236
 Глазов Е.Ф. 194
 Голицын Б.Б. 17, 21
 Гольбек Г.Р. 159
 Гольдберг С.В. 24, 25
 Гольдшмидт В. М. (Goldschmidt) 104
 Гордеев Д.И. 95
 Горшков Г.В. 137—139, 147, 158
 Гоутермас Ф.Г. 232
 Гоффман И. (Hoffman) 185
 Грабау А. (Grabau) 61
 Граммаков А.Г. 125, 137, 139, 158
 Грегори А.Ф. (Gregory) 126
 Гребенщиков В.И. 47
 Греков А.С. 212
 Гримм Г. 181
 Гриммит В.Е. 107
 Гросс В.Г. 92
 Гроссе А. (Grosse) 74, 193
 Грот П. 42
 Грэй Дж.А. (Gray) 64, 65
 Губкин И.М. 122
 Гудмен Г. (Goodman) 203
 Гудмен К. (Goodman) 101, 102, 147
- Дахнов В.Н. 159
 Дарвонд Г.Н. 145
 Деберн А. (Debierne) 7
 Де-Геер К. 59, 60
 Дейч С. (Deutsch) 108
 Демокрит 49
 Демпстер А. (Dempster) 96
 Денистик С.А. 147
 Джолли Дж.Дж. (Joly) 38—42, 46, 55, 58, 69—72, 89, 200, 236
 Добротин Н.И. 79
 Дорн Е. (Dorn) 22
 Дорфман Я.Г. 142
 Дэвис К.В. 101
 Дэвис Ф.Дж. (Devis) 131
 Дэвисон К.В. 55
 Дядькин И.Г. 147, 155
- Ельсворт Г.В. 88
 Ермолин Г.И. 82
 Ерозолымский Б.Г. 152, 153, 155, 156, 159, 160
 Ерчиковский Г.О. 120, 121, 124
- Жадин В. 139
 Жуковский М. 24
- Зайцева Л.Л. 28, 32, 36
 Зверев В.Н. 21
 Заленский В.В. 21
 Зильберминц В.А. 21
 Зотов П.П. 116
 Зудин О.С. 225, 226, 227
- Иванов Е.В. 21
 Иванова А. 145
 Иванова Л.М. 220
 Иванс Р.Д. 78, 110
 Ильина Т.Д. 30
 Иорк Д. (Jork) 112
 Иоффе А.Ф. 142
- Калицкий К.П. 121, 122
 Калп Дж.Л. (Kalp) 104, 112, 114
 Кантор С.А. 147
 Каплан Дж. Р. (Kaplan) 208
 Карлик Б. 185
 Карпинский А.П. 15, 17, 21
 Карпов Б.Г. 16
 Карстенс Э.Э. 30
 Карус Е.В. 157
 Карцев А.А. 195
 Касперович Г.И. 20
 Кауфман Л.Э. 47
 Келлог В.Е. (Kellog) 126
 Кельвин 61
 Кивил Н.В. (Keevil) 78, 100, 101
 Кимбэл А.Г. (Kimbél) 192
 Киппер П. (Kipper) 108
 Кириков А.П. 125, 137
 Кирш Г. (Kirsch) 84
 Кларк Ф. (Klark) 55, 56
 Коварик А.Ф. (Kovarik) 74, 97
 Кожевников Д.А. 147, 154, 155, 157
 Колесников А.Г. 224
 Коловрат-Червинский Л.С. 21
 Колодный Дж. (Kolodny) 208
 Кокшаров Н.Н. 15
 Комаров С.Г. 159
 Комлев Л.В. 45, 81, 168—170, 174, 176—178
 Коновалов Д.П. 123
 Конюшая Ю.П. 189, 198
 Корвалью Х. 184
 Коржев А.А. 148, 159
 Косци Ф. (Koszy) 185, 186, 203—205, 221, 222, 225
 Котульский В.К. 21, 33
 Коченов А.В. 207, 208

- Кошляков Н.М. 224, 225
Кречмер С.И. 45
Критский В.В. 20
Кролл В. (Kröll) 201, 203
Крутиков А. 145
Крыжановский В.И. 20, 21
Кузнецов Ю.В. 209, 210
Кузьмина Л.А. 201, 202, 207
Кук К. (Cook) 127
Куканов В.М. 187
Кулик Л.А. 20, 21
Кунашева К.Г. 206
Купервизер К. 12
Курбатов Л.М. 85, 90, 93, 138, 166, 167, 171, 202
Курнаков Н.С. 21
Курчатов И.В. 79, 142, 144, 159
Кухаренко Н.К. 159
Кюве Ж. 52
Кюри М. (Curie) 5—7, 14, 21, 27, 29, 37, 42, 62, 68, 116, 127
Кюри П. (Curie) 5—7, 23—26, 37, 46, 62, 64
- Лаборд А. (Laborde) 24, 64
Ламберт Р.С. (Lambert) 112
Лапук Б.Б. 144, 159
Лаппоран А. (Lapporan) 55, 57
Ларсен Е.С. (Larsen) 100, 101, 128
Лаусон Э. (Lauson) 74
Лебедев В.Е. 147
Леденцов Х.С. 18
Лезедова М.Е. 20
Лейбензон Л.С. 144, 159
Лейпунская Д.И. 132
Леонардо да Винчи 50
Лепьерр Ш. (Lapierre) 184
Либби В.Ф. (Libby) 190, 193, 194
Либман Э.П. 18, 19
Линденер Б.А. 21
Лисицын Л.И. 28
Лодочников В.Н. 21, 119
Ломакин А.А. 124, 165, 166
Лондон Е.С. 24
Ло Сурдо А. (Lo Surdo) 77
Лотце Р. 53, 57, 59, 60, 61
Лоусон Р. (Lawson) 67
Лукашевич О. 53, 54
Лучицкий В.И. 21
Лэйн А.С. (Lane) 74, 85, 90—92, 95
Лятковская Н.М. 137—139, 147
- Макареня А.А. 42
Макарюнас К.В. 116
Мак-Кой Г.Н. 84
Марбл Дж.П. (Murble) 85, 89, 90, 92
Марсен Е. (Marsden)
Матвеев К.К. 21
Махе Г. (Mache) 25, 26
Махра Л. (Machra) 216
- Мезерницкий П.Г. 28
Мейер Ст. (Meyer) 11, 12, 25, 26
Мейтнер Л. (Meitner) 84
Меликова О.С. 82, 184
Меркулова М.С. 170, 174
Меррей Д.Ш. (Murray) 56
Милян В.Б. 168
Мияки И. (Mijake) 214, 228
Морозов В.И. 212
Москвин И.М. 21
Мотт В.Е. (Mott) 141
Мочалов И.И. 42
Муррей Дж. (Murrey) 55, 57
Мурчисон Р. 56
Мушкетов Д.И. 20, 119
Мысовский Л.В. 44, 79, 124, 135
Мэйн К.И. (Maune) 112
Мюльберг М. 134, 135
- Наливкин Д.В. 21
Нелло Б.А. 205, 214—216, 218, 220, 223—228
Нельсон Дж. М. (Nelson) 126
Ненадкевич К.А. 16, 19, 21, 22, 45, 79, 80, 88
Никитин Б.А. 47, 168—170, 174, 176, 182
Никитин В.В. 119
Никитин С.Н. 179
Николаев Д.С. 186, 207
Никаниши Н. (Nikanischi) 185
Никонов А.И. 137
Нир А.О. (Nier) 78, 96, 97, 100
Нопф А. (Knopf) 74, 75, 110, 111
Нэттол Дж. (Nuttall) 71, 84
- Обручев В.А. 95
Овидий 50
Орлов П.П. 31, 32
Остерберг Г.Л. (Osterberg) 218
- Павлов А.П. 50, 55
Павлов И.П. 22
Павлова Т.Г. 103
Палладин В.И. 22
Панет Ф. (Paneth) 12, 47, 77, 84, 88, 89
Паркер Г.М. (Parker) 216, 217, 218
Пасвик М.А. 47, 79
Патин С.А. 215, 219, 226
Пенк А. (Penck) 61
Перейра М. (Pereira) 184
Пермяков В.М. 82, 85, 86
Перрен Ж. 122
Перфильев Н.А. 106
Петтерсон Г. 105, 200—203
Петржак К.А. 83, 84, 106
Печерников В.Ф. 159
Пиггот К.С. (Piggot) 100, 105, 200, 201, 203
Пирс А.П. 178
Плещанова В.Г. 130
Погодин С.А. 18, 19

- Покровский В.П. 129
 Полак Л.С. 144, 145, 159
 Полевая Н.И. 183
 Полесницкий А.Е. 47
 Полканов А.А. 113
 Поляченко А.Л. 147
 Понтекорво Б.М. 141—144, 147, 158
 Попов Н.В. 156
 Попов Н.И. 209, 212, 215, 226
 Потылицын А.Л. 175
 Похетино А. (Pochetino) 23
 Прокопенко Н.М. 45, 81
 Пул Дж. Г. (Poole) 202
- Раевская Е.А.** 145
Раевский Б. (Rajewsky) 150
Рамзай У. (Ramsay) 10, 11, 15, 64, 236
Ранкама К. (Rankama) 190, 191, 193, 194
Рассел Ф. 147
Ратнер А.П. 45
Ревуцкая Е. Д. 20, 21
Резванов Р.А. 147
Резерфорд Э. 7—10, 22, 26, 29, 62, 63, 68, 70, 84, 88, 89, 129, 236
Рейнганум М. (Reinganum) 127
Рессел Г.В. 89
Рид 55
Розе Г. 15
Розенбуш Ф. 236
Рокко Г.Г. (Rocco) 215
Романкевич Е.А. 209, 210, 211
Ромер 55
Роуланд С. (Rowlands) 102
Рошольт Дж. (Roscholt) 203, 204, 205, 211, 221
Руби В.В. (Rubey) 203
Рыкачев М.А. 22
Рэлей Дж.У. 73
- Савченко В.П.** 45
Саламон В. (Salamon) 164, 168
Самойлов Я.В. 19, 20, 22
Сандерман Л.А. (Sanderman) 201
Сарухаши К. (Saruhasy) 214
Сведберг Т. (Svedberg) 181
Свинне Р.И. 30
Сегель Н.М. 82, 83
Селла А. (Sella) 23, 37
Серда Г.А. 226
Сибуров В.К. 145
Смагина А.С. 82
Смит В. (Smith) 51, 56
Смитс С. (Smiths) 103
Снесарев А.П. 29
Содди Ф. (Soddy) 8, 9, 10, 64, 67, 68
Соколов А.П. 28, 29, 32—35
Соколов В.А. 29
Соколов Д.В. 21
Соколов П.Т. 166
Соловьев С.П. 45
- Соловьев Ю.И.** 10
Спицин В.И. 29, 30
Соседко 45
Сребродольский Д.М. 159
Старик И.Е. 63, 73, 82, 83, 85, 86, 88, 89, 93, 96—98, 103—104, 108, 115, 171, 172, 177, 178, 182—187, 203, 207, 209, 211
Старосельская-Никитина О.А. 26, 62
Стено Н. (Stenon) 50, 51
Стиганд Я. (Stigand) 134
Стид Ф.В. (Stead) 126
Столетов А.Г. 28
Стопневич А.Д. 179
Страбон 50
Странский 47
Стретт Д.У. 38
Стретт Р.Дж. (Strutt) 64
Стьеро Б.И. 213
Судин В.А. 173
Сугихира (Sugihira) 214
Сицлард Б. (Сицлард) (Scillard) 13, 14
- Тареева Н.В.** 171, 178
Тареев И.Н. 145
Тверской П. 125
Тверцын В.С. 168
Титов В.С. 32
Титтл В. (Tiettle) 148
Токарев А.Н. 195—198
Толмачев П.И. 45, 47
Томпсон Ф. (Thomson) 102
Томпсон Дж.Дж. (Thomson) 7, 102
Тугаринов А.И. 100, 113, 115, 116, 186
Турнболл Л.Г. (Turnball) 73
Тымирский В.Г. 198, 199
Тэйлор Г.П. (Taylor) 186
- Умов Н.А.** 42
Урри В. (Urry) 77, 78, 89—92, 101, 105, 110, 200, 201, 203
Уттербэк С.Л. (Utterback) 201
- Фаас А.В.** 119
Фамицын А.С. 22
Фаулер Г. (Fauler) 62, 150, 151
Фауль Х. (Faul) 148, 151
Фаянс К. (Fajans) 181
Федоровский Н.М. 20, 21
Федьинский В.В. 159
Фезенфельд Г. (Fresenfeld) 84
Фейр Ж. 128
Фергюсон Дж. (Ferguson) 77
Ферми Э. 141, 142, 144
Ферсман А.Е. 19, 21, 22, 42, 44
Фигуровский Н.А. 28, 32, 36
Филиппов Е.М. 132; 148, 149, 158, 162
Филонов В.А. 188
Фирон Г. 147
Флеров Г.Н. 106, 144, 152, 153, 159—161
Фолсом Т.Р. (Folsom) 215

- Форяж П. 184
Фридман И. (Friedman) 191
Фурманье П. 94
- Харлей П. (Harley) 77, 101, 102
Хартек Б. 194
Хевеши Д. (Hevesy) 12, 89
Хехт Ф. (Hecht) 201
Хи А. (Hee) 108, 128
Химстедт Ф. (Himstedt) 23
Хияси 108
Хлопин В.Г. 22, 37, 44—47, 79, 80, 82, 84, 89, 102, 107, 135, 169, 174, 180—182
Холин А.И. 147
Холмс А. (Holmes) 46, 57—59, 67, 72, 74—75, 77, 88—89, 92, 97, 102, 104, 106, 109—112, 114, 116, 232
Христианова Л.А. 210, 211
- Чалов П.И. 188, 189
Чердынцев В.В. 100, 184, 188, 208
Черепеников А.А. 45, 82, 83, 164, 166
Чернышев Ф.Н. 17
Чугаев Л.А. 129
Чураков А.Н. 119
- Шаллер Г.Е. 140, 158
Шацов А.Н. 212
- Шведов В.П. 219
Швейдлер Э. (Schweidler) 11, 26
Шимилевич Ю.С. 155, 160
Широсава Т.Г. (Schirosawa) 215
Школьников А.С. 155, 160
Шпак В.А. 137, 158
Штерне К. 52
Штремгольм Д. (Strömholm) 181
Шуерт Е.А. (Schuert) 215
Шуколюков Ю.А. 107
Шухерт Ч. 74, 75, 89
- Щепотьева Е.С. 178, 183
Шербаков А.В. 44, 195—198
Шербаков Д.И. 121
- Элсворт Г.В. (Ellsworth) 69
Эльстер Дж. (Elster) 23
Эриксон Э. 194
Этингер Н.М. 141
Эффендиев Г.Х. 179, 188
- Юри Г. (Urey) 191
- Яковлев К.П. 29
Якубсон К.И. 147
Ярков М. (Jarkov) 128

ОГЛАВЛЕНИЕ

ОТ РЕДАКТОРА	3
ВВЕДЕНИЕ	4
<i>Глава 1</i>	
ПЕРВЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РАДИОАКТИВНОСТИ ЗЕМНОЙ КОРЫ	13
1.1. Начало систематических поисков радиоактивных минералов и руд	13
1.2. Первые работы по определению радиоактивности минеральных источников	22
1.3. Изучение радиоактивности минеральных источников и грязей в России	27
1.4. Зарождение радиобальнеологии	37
1.5. Обобщения Дж. Джели результатов первых исследований радиоактивности земной коры	38
1.6. Вклад В.И. Вернадского в формирование радиогеологии как обобщающей науки о радиоактивности земной коры	41
<i>Глава 2</i>	
ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ В ГЕОХРОНОЛОГИИ	49
2.1. Первые попытки выделения отдельных периодов в развитии Земли	49
2.2. Поиски путей определения абсолютного возраста геологических формаций и периодов в истории Земли	55
2.3. Первые методы использования постоянной времени распада радиоактивных элементов для определения абсолютного возраста минералов	62
2.4. Организация систематических работ по ядерной геохронологии в 20–30-х годах	74
2.5. Дискуссия о методах определения абсолютного возраста пород на XVII сессии Международного геологического конгресса и организация международной комиссии	85
2.6. Становление методов ядерной геохронологии в 40–50-х годах	95
2.7. Формирование международной шкалы абсолютного возраста геологических формаций	109
<i>Глава 3</i>	
РАЗРАБОТКА ПЕРВЫХ ЯДЕРНО-ФИЗИЧЕСКИХ МЕТОДОВ РАЗВЕДКИ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ	117
3.1. Зарождение радиометрической съемки	117
3.2. Развитие методов определения радиоактивности образцов геологических коллекций	127
3.3. Первые методы определения геологического разреза по радиоактивности отдельных слоев	133
3.4. Первые нейтронные методы исследований нефтяных и рудных скважин	141
3.5. Зарождение пространственно-временных нейтронных методов разведки полезных ископаемых	152
3.6. Формирование нефтяной ядерной геофизики в СССР	158

Глава 4

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЯДЕРНО-ФИЗИЧЕСКИХ МЕТОДОВ В ГИДРОГЕОЛОГИИ	163
4.1. Открытие высокой радиоактивности нефтяных пластовых вод.....	163
4.2. Начало систематического изучения радиоактивности нефтяных месторождений в СССР	168
4.3. Поиски путей обогащения радием глубинных вод	171
4.4. Постановка исследований миграции радионуклидов в земной коре.....	180
4.5. Изучение содержания урана и некоторых природных изотопов в водах суши ...	184
4.6. Формирование радиогидрогеологии	195

Глава 5

ИЗУЧЕНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ РАДИОИЗОТОПОВ В МОРЯХ И ОКЕАНАХ	200
5.1. Начало систематических исследований радиоактивности морских вод и осадков.....	200
5.2. Советские исследования содержания радиоактивных элементов в морских и океанических осадках в 40—60-х годах	206
5.3. Возможные источники концентрации полей радионуклидов в океане и морях ...	213
5.4. Формирование ядерной гидрофизики	220
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	230
ЛИТЕРАТУРА.....	237
УКАЗАТЕЛЬ ИМЕН	253

Научное издание

Ильина Татьяна Дмитриевна

**ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА
В НАУКАХ О ЗЕМЛЕ
Исторический очерк**

*Утверждено к печати
Институтом истории естествознания
и техники АН СССР*

*Редактор М.А. Суханов
Художник А.С. Александров
Художественный редактор М.Л. Храмцов
Технические редакторы
И.И. Джиоева, Г.П. Каренина
Корректор В.П. Крылова*

Набор выполнен в издательстве
на электронной фотонаборной системе

ИБ N 37299

Подписано к печати 13.07.88. Т — 07464
Формат 60×90^{1/16}. Бумага офсетная N 1.
Гарнитура Таймс. Печать офсетная
Усл.печ.л. 16,5. Усл.кр.-отт. 16,5. Уч.-изд.л. 20,1
Тираж 800 экз. Тип.зак. 469. Цена 4 р. 30 коп.

Ордена Трудового Красного Знамени
издательство "Наука"
117864 ГСП-7. Москва В-485,
Профсоюзная ул., д. 90

Ордена Трудового Красного Знамени
1-я типография издательства "Наука"
199034, Ленинград В-34, 9-я линия, 12

ИЗДАТЕЛЬСТВО "НАУКА"

Готовятся к печати книги:

ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ИСТОРИИ ФИЗИКИ И МЕХАНИКИ. 1989.

20 л. 3 р. 90 к.

Сборник посвящен истории некоторых проблем физики и механики, изученных в основном в XIX — XX вв. Раздел "История физики" представлен статьями о развитии теории относительности, оптики и теории элементарных частиц. В раздел "История механики" входят работы по истории общей механики, гидромеханики, механики тел переменной массы и механики машин. Остальные статьи посвящены методологическим вопросам развития науки.

Книга предназначена историкам науки, физикам и механикам.

НАУЧНАЯ ПЕРЕПИСКА П.Н. ЛЕБЕДЕВА.

47 л. 7р. 50к.

Книга содержит свыше 55 писем выдающегося русского физика П.Н. Лебедева (1866—1912) и его корреспондентов, среди которых известные русские и зарубежные ученые А.А. Белопольский, А.Г. Столетов, П.П. Лазарев, Г.А. Лоренц, В. Вин, С. Аррениус, С. Кольрауш и многие другие. Большая часть писем публикуется впервые. Несомненные литературные данные авторов делают чтение не только интересным, но и увлекательным.

Книга предназначена читателям, интересующимся историей науки.

ДОРМАН И.В. КОСМИЧЕСКИЕ ЛУЧИ, УСКОРИТЕЛИ И НОВЫЕ ЧАСТИЦЫ.

18 л. 3р. 10к.

Книга посвящена истории эффективного использования естественного источника частиц высоких и сверхвысоких энергий — космических лучей — для открытия и исследования большого семейства новых частиц. Рассматривается история создания и усовершенствования ускорителей, многочисленных экспериментов на них. Показана перспективность использования тандема "космические лучи — ускорители" в стремительном прогрессе физики элементарных частиц.

Книга рассчитана на специалистов в области физики космических лучей, ускорителей и частиц высоких энергий, а также на читателей, интересующихся историей науки.

ФИЗИКА ЯДРА И ЧАСТИЦ: ТЕРМИНОЛОГИЯ.

5 л. 50к.

Сборник содержит представленные в системном порядке термины и определения основных понятий физики ядра и частиц, рекомендуемых Комитетом научно-технической терминологии. Термины рекомендуется применять в научно-технической литературе, учебном процессе и документации. Каждая позиция сопровождается иностранными эквивалентами русских терминов на английском, французском и немецком языках.

Сборник рассчитан на научных работников, занимающихся физикой ядра и частиц, преподавателей высшей школы и средних специальных учебных заведений, а также для всех интересующихся проблемами языка науки и техники и построения терминосистем.

ВОСПОМИНАНИЯ ОБ АКАДЕМИКЕ М.А. ЛЕОНТОВИЧЕ.

14л. 2р. 10к.

В сборнике помещены статьи о крупном физике-теоретике, создателе советской школы теоретической физики плазмы академике М.А. Леонтовиче (1903—1981). Воспоминания, написанные его ближайшими друзьями, коллегами и учениками, раскрывают роль М.А. Леонтовича в развитии науки, воспитании новых поколений советских ученых.

Книга предназначена физикам, историкам науки, а также широкому кругу читателей.

ЛИФШИЦ ИЛЬЯ МИХАЙЛОВИЧ.

(Материалы к библиографии ученых СССР).

5л. 30к.

В издание включены статьи о жизни и деятельности академика И.М. Лифшица (1916—1982), выдающегося советского ученого в области квантовой теории твердого тела, электронной теории металлов, теории неупорядоченных систем, а также хронологический указатель его трудов.

Книга рассчитана на специалистов в области физики и истории науки.

АРЦИМОВИЧ ЛЕВ АНДРЕЕВИЧ.
(Материалы к библиографии ученых СССР).
5л. 30к.

Издание включает основные даты жизни и деятельности академика Л.А. Арцимовича (1909—1973), выдающегося советского ученого в области атомной и ядерной физики, краткий очерк его научной и педагогической деятельности. Приведен хронологический указатель его трудов.

Книга рассчитана на специалистов в области физики и истории науки.

ЗАКАЗЫ ПРОСИМ НАПРАВЛЯТЬ ПО ОДНОМУ ИЗ ПЕРЕЧИСЛЕННЫХ АДРЕСОВ МАГАЗИНОВ "КНИГА—ПОЧТОЙ" "АКАДЕМКНИГА":

Магазины "Книга—почтой:"

252030 Киев, ул. Пирогова, 4

197345 Ленинград, Петрозаводская, 7

117192 Москва, Мичуринский пр-т, 12

4p-30x3

4999