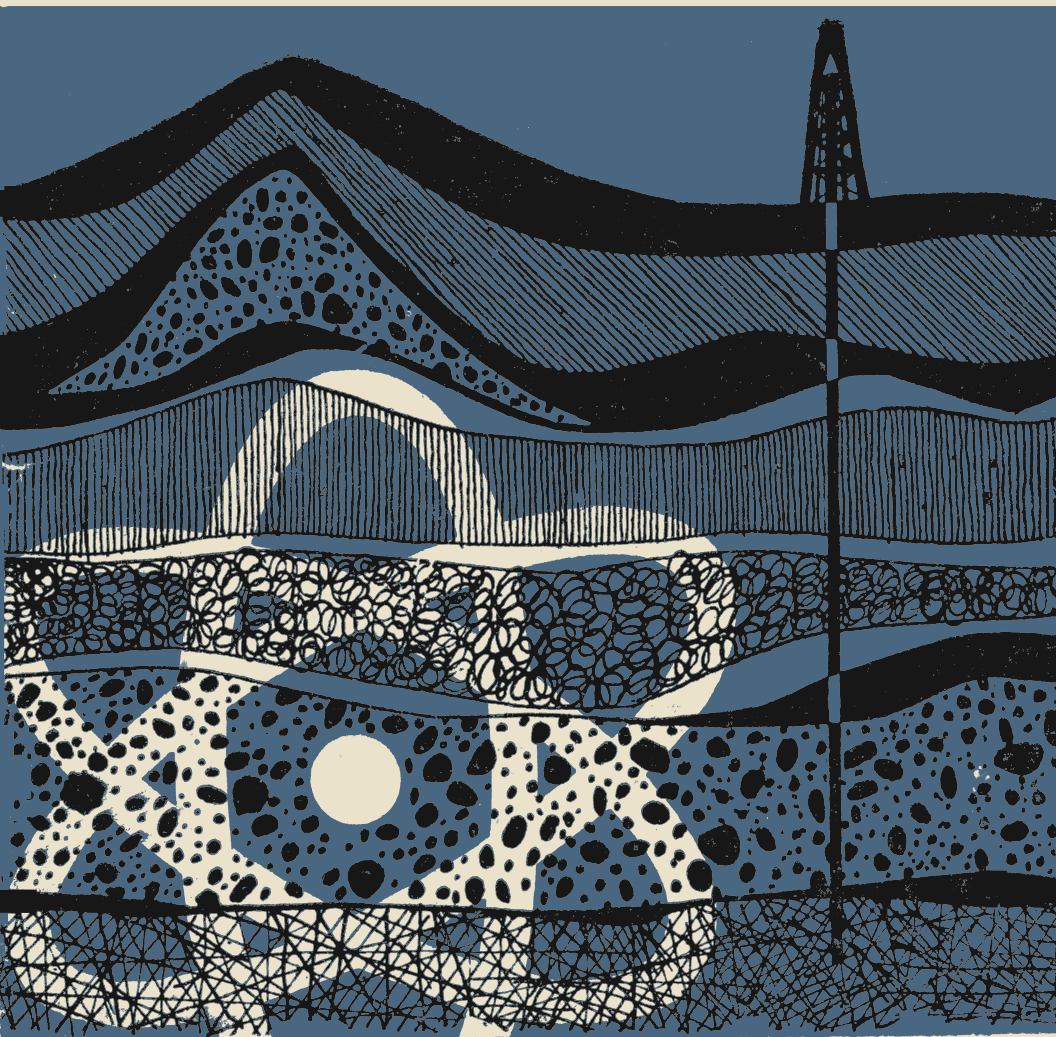


А. А. Малахов

ГЕОЛОГИЯ и атом



Доктор геолого-минералогических наук, профессор

А. А. МАЛАХОВ

ГЕОЛОГИЯ И АТОМ

(Проблемы ядерной геологии)

ИЗДАТЕЛЬСТВО «ЗНАНИЕ»

**Всесоюзного общества по распространению
политических и научных знаний**

Москва 1962

СОДЕРЖАНИЕ

	<i>Стр.</i>
Изотопы в геохимии	8
Изотопы в общей геофизике	11
Изотопы в исторической геологии	14
Изотопы в космогонии	21
Изотопы в динамической геологии	26
Изотопы в петрографии и минералогии	31
Изотопы при изучении полезных ископаемых	34
Заключение	39
Литература	40

Автор

Малахов Анатолий Алексеевич

Редактор В. Н. Тихомиров

Худож. редактор Е. Е. Соколов

Техн. редактор А. С. Назарова

Корректор Э. А. Шехтман

Оформление художника Р. И. Мухина

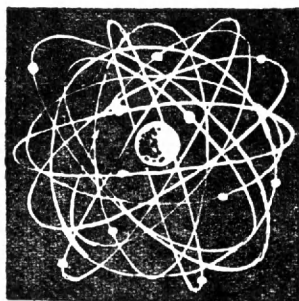
Сдано в набор 30.VI 1962 г. Подписано к печати 24.X 1962 г. Изд. № 277.

Формат бум. 60×92¹/₁₆. Бум. л. 1,25. Печ. л. 2,5. Уч.-изд. л.

А 08896. Цена 7 коп. Тираж 18 000. Заказ 2242.

Издательство «Знание». Москва, Центр, Новая пл., д. 3/4.

Типография изд-ва «Знание». Москва, Центр, Новая пл., д. 3/4.



Хмурые, поросшие мхом скалы центральной части Кольского полуострова раскрыли недавно ученым одну из величайших тайн природы. Они поведали точную дату своего рождения. Цифра оказалась весьма внушительной; она поразила воображение многих. Три с половиной миллиарда лет назад здесь в результате сложных геологических процессов возникли эти породы.

Определили этот возраст советские ученые — академик А. А. Полканов и профессор Э. К. Герлинг. Они разработали один из современных методов подсчета геологического возраста горных пород, за что и были удостоены Ленинской премии. Методом Полканова — Герлинга сейчас пользуются ученые всего мира.

А. А. Полканову и Э. К. Герлингу удалось установить, что гранито-гнейсы центральной части Кольского полуострова не единственные в своем роде. Примерно этот же возраст имеют многие руды Конголезской республики, а также породы из района Свазиленд в Южной Африке. Возможно, что таков же возраст древних гнейсов Бандельканд в Индии и породы из Варравуна-Илгарн-Кагурли в Австралии.

А вот другие образцы, раскрывающие нам иные страницы великой летописи природы. В гнейсах Мадагаскара было обнаружено углисто-графитовое вещество, возникшее, по-види-

мому, в результате накопления органической массы каких-то примитивных водорослей. Геологический возраст этих пород — два миллиарда шестьсот миллионов лет. Значит, уже тогда на Земле существовала жизнь! Это пока самые древние следы жизни на нашей планете.

Несколько лет тому назад удалось установить некоторые подробности из жизни так называемого белемнита, или «чертова пальца», — моллюска, обитавшего в водах океана более ста миллионов лет назад. Выяснилось, что прожил он три года. Причем летом окружавшая его вода имела температуру плюс 17,6°, а зимой плюс 11°. Температура ныне не существующего моря была установлена с точностью до одной десятой градуса.

Ее помогли определить соотношения изотопов кислорода, накопившегося в раковине моллюска десятки миллионов лет назад. Такие же записи температурного режима сохранили окаменевшие остатки и других ископаемых моллюсков.

Можно было бы привести множество подобных примеров. Все они представляют содержание новой науки, имеющей пока несколько названий. Ее называют «радиогеология», «ядерная геология» и т. д.

В задачу этой науки входит исследование геологических явлений методами ядерной физики и химии. Специалисты по ядерной геологии изучают абсолютный возраст горных пород, возникших десятки и сотни миллионов лет назад, воссоздают картины древних и современных геологических процессов, ведут поиски полезных ископаемых методами, основанными на знании физики и химии атома и др. Можно было бы закрепить за этой наукой исторически сложившееся название «Радиогеология», предложенное в прошлом В. И. Вернадским, но в наши дни оно не отражает всего объема науки, использующей сейчас не только явления радиоактивности, но и процессы, связанные с ядерными реакциями.

В развитии ядерной геологии имеются три этапа: 1) геохимический; 2) переходный и 3) геологический.

Первый этап относится к 1902—1935 годам, второй — от 1935 до 1956 года и третий — от 1956 года до наших дней.

На первом этапе — геохимическом — характерна попытка использовать явление радиоактивного распада для познания некоторых закономерностей геологической науки. Естественно, что на этом этапе ядерная геология развивалась в недрах геохимии, где в это время накапливались первые сведения о свойствах радиоактивных элементов. В 1902 году Пьер Кюри впервые высказал мысль о том, что радиоактивный распад урана может быть применен для определения абсолютного возраста горных пород. В 1907 году канадский исследователь Б. Болтвуд, изучая радиоактивный свинец, получил первые данные о возрасте некоторых минералов.

Активным пропагандистом радиогеологии был В. И. Вернадский. В 1935 году он подвел первый итог развития новой науки. Материалами для этого послужили исследования, проведенные В. Г. Хлопиным, К. А. Ненадкевичем, И. Е. Стариком, Э. К. Герлингом, а также иностранными учеными — Ф. Панетом, Г. Хевеши, А. Холмсом, Г. Элсвортом, Дж. Джолли и многими другими.

Вернадский отчетливо наметил две задачи молодой науки: определение возраста древнейших горных пород и выяснение характера и форм радиоактивного распада на нашей планете.

Во второй этап — переходный — радиогеология прочно утвердилась в геологической науке. Методы геохимии и геофизики были применены для решения геологических задач, разрабатывалась новая методика.

На третьем этапе ядерная геология обрела свою теорию, расширились области ее практического применения и оформились методы исследований геологических процессов. Этому способствовало также и то, что на международных конференциях по мирному использованию атомной энергии, состоявшихся в Женеве в 1955 и 1958 годах, было представлено много новых интересных материалов по использованию атомной энергии в различных видах промышленности и науки.

Коллективный труд ученых всего мира позволил заглянуть в глубь микромира. Датский физик Нильс Бор в 1913 году построил одну из первых моделей атома; английский ученый Эрнест Резерфорд заложил основы современного учения о радиоактивности и строении атомов; французские ученые Фредерик и Ирен Жолио-Кюри открыли в 1935 году искусственную радиоактивность. Немалый вклад в познание атома внесли швейцарский ученый Вольфганг Паули, немецкий ученый Макс Планк, американский ученый Карл Андерсон, итальянский ученый Энрико Ферми, советские ученые Д. В. Скобельцын, В. И. Векслер, И. В. Курчатов и многие другие.

К настоящему времени в составе атома обнаружено до сорока элементарных частиц с продолжительностью жизни от миллионных долей секунды до многих миллиардов лет. Элементарные частицы являются либо составными частями атомов (электроны, протоны, нейтроны и др.), либо возникают в результате ядерных превращений вещества (мезоны, гипероны и др.).

Электроны — легкие элементарные частицы, имеющие отрицательный заряд; они движутся вокруг ядра по сложным орбитам. Орбиты образуют электронные слои — оболочки ядра атома; количество электронных слоев зависит от места, которое занимает элемент в периодической системе. У водорода, например, — один слой, у лития — два, у актинидов

(элементов третьей группы периодической системы, следующих за актинием) — семь и пр. Число электронов равно количеству протонов; потеря электрона или его приобретение ионизирует атом.

Протоны, вместе с нейтронами составляющие ядро атома, — тяжелые элементарные частицы, имеющие положительный заряд. Нейтроны также тяжелые элементарные частицы, но без электрического заряда; они входят в состав всех химических элементов (за исключением легкого изотопа водорода). Протоны и нейтроны, обладая очень малыми размерами по сравнению с атомом, сосредоточивают в себе почти всю его массу. Например, кубический метр платины весит 21,5 т; причем этот вес сосредоточен в основном в массе ядер, размер которых всего несколько тысячных долей кубического миллиметра. Если представить себе величину атома платины равной зданию Московского университета, то ядро атома было бы равно песчинке; в этой-то песчинке и сосредоточивается вся масса атома.

В природных процессах, протекающих на Земле и в ее недрах, происходит главным образом естественный, самопроизвольный распад вещества. Существует несколько видов ядерных превращений: альфа-распад, бета-распад, электронный захват, изомерные превращения, спонтанное деление ядер и пр.

Альфа-распад сопровождается потоком ядер гелия (альфа-частиц). При этом рождается новый элемент, располагающийся в менделеевской таблице на две клетки влево от исходного элемента.

При бета-распаде вылетает поток электронов. Внутри ядра возникает новый протон. Это приводит к рождению нового элемента, располагающегося в таблице Менделеева на одну клетку вправо от материнского элемента.

Электронный захват возникает при поглощении электрона оболочки одним из протонов ядра. Рожденный при этом новый элемент располагается в периодической системе на одну клетку влево от исходного.

При изомерных превращениях испускаются гамма-лучи. Новых элементов при этом не возникает.

Спонтанное деление ядер характерно для самых тяжелых элементов периодической системы.

Особенно важно выяснить условия формирования тяжелых элементов. Они могут быть образованы за счет синтеза (соединения) атомных ядер. Такие реакции протекают при чудовищно высоких температурах и в естественных условиях на Земле пока не известны.

В результате названных ядерных реакций могут образовываться новые химические элементы и их разновидности. Так возникают изотопы, занимающие в периодической систе-

ме элементов то же место, что и их прародители, но имеющие иные, чем они, атомные веса. Изотопы отличаются друг от друга составом ядра и иными ядерными свойствами. Так, например, элемент хлор состоит из двух устойчивых изотопов: ${}_{17}\text{Cl}^{35}$ и ${}_{17}\text{Cl}^{37}$. Цифры у символов означают, что у этих изотопов по семнадцать протонов в ядре элемента, но разное число нейтронов. У первого изотопа их 18 ($35-17$), у второго — 20 ($37-17$).

У многих элементов, кроме устойчивых, существуют неустойчивые короткоживущие изотопы, получаемые искусственным путем.

Для того чтобы шире ознакомить читателя с современной ядерной геологией, мы расскажем о ее применении в крупных разделах геологической науки: геохимии, геофизике, исторической геологии, космогонии, динамической геологии, петрографии, минералогии, при изучении полезных ископаемых.

ИЗОТОПЫ В ГЕОХИМИИ



Основоположники геохимии академики В. И. Вернадский, А. Е. Ферсман считали важнейшим делом наблюдения за поведением атомов в разнообразных условиях, ибо только это могло дать объяснение превращений веществ при изменениях среды, осветить проблемы образования и распада вещества. Они прослеживали жизнь атомов в атмосфере, в земной коре, в областях «вечной» мерзлоты. Они высказывали предположения о поведении атомов в неведомых недрах Земли.

Возьмем хотя бы водород. Это самый легкий элемент периодической системы. Формы его бытия крайне разнообразны. В атмосфере он один из основных элементов; в земной коре он важнейшая составная часть многих минералов; вся водная оболочка — это сфера господства водорода.

В геохимии изотопов особенно важна группа тех элементов, которые претерпевают радиоактивный распад. Так, природный уран в течение своей баснословно длинной жизни постоянно распадается. Природный уран состоит из смеси трех изотопов: U^{238} , U^{235} , U^{234} . Каждый из них имеет различный период полураспада. У U^{238} , например, он продолжается четыре с половиной миллиарда лет. Конечными продуктами распада в этом случае оказываются свинец и гелий. На точных подсчетах количеств урана, свинца и гелия и были основаны первые методы определения геологического возраста горных пород.

Недостатком уранового метода является то, что уран связан с породами, которые довольно редко встречаются в природе.

Разработка новых методов определения абсолютного геологического возраста горных пород — одна из основных проблем ядерной геологии.

Но так как это ее направление зародилось в недрах геохимии, то именно перед геохимиками стояла задача упрощения методов определения абсолютного возраста. Сейчас для этих целей используется около 25 изотопов разнообразных элементов. Правда, из 25 изотопов в ядерной геологии применяются лишь некоторые, а именно: углеродный, аргоновый, урано-свинцовый, ториево-свинцовый, ураново-гелиевый, ториево-гелиевый, свинец-свинцовый (по изотопам свинца: Pb^{206} , Pb^{207} , Pb^{208}), рубидиево-стронциевый и др., а также из ведущих методов определения абсолютного возраста — калий-аргоновый, разработанный советским ученым Э. К. Герлингом. Этот метод удобен тем, что калиевые минералы в природе встречаются очень часто. Поэтому калий-аргоновый метод применяется не только в лабораториях нашей страны, но и во всех крупнейших научных центрах мира. Если в прошлом при использовании свинцового и гелиевого методов определялся абсолютный возраст только тех пород, в которых содержались свинец и гелий, то теперь перечень пород значительно расширился.

При применении калий-аргонового метода в специальных установках выделяют тот аргон, который накопился в минерале в течение всего его существования. Чаще всего в этом случае исследуют слюду или полевые шпаты. Чтобы выделить накопившийся аргон, минерал нагревают до 1200° . Точность наблюдений имеет первостепенное значение, так как количества аргона ничтожны. За 100 миллионов лет в грамме слюды образуется 0,03 кубических миллиметра этого газа.

После определения количеств аргона-40 и калия-40 рассчитывают возраст породы с учетом периода полураспада калия-40.

Прибор, который определяет количество изотопов, называется масс-спектрометром. Принцип его работы основан на определении масс изотопов, преобразованных в положительные ионы.

Большое значение получили и те методы, которые помогают нам выяснить ход геологических процессов. Для этой цели часто используют так называемые меченые атомы — короткоживущие радиогенные изотопы, срок жизни которых продолжается лишь дни и недели. К их числу принадлежат: натрий-24 с периодом полураспада 15 часов, фосфор-32 с периодом полураспада 14,3 дня, скандий-46 с периодом полураспада 83,29 дня и многие другие.

С помощью этих изотопов можно установить скорость движения обломков в русле реки, проследить поведение газов в пустотах Земли и многие другие явления.

Здесь работа исследователя сводится к наблюдению за передвижением изотопов в тех или иных геологических условиях. Для этой цели применяют радиометры — приборы, улавливающие излучения, возникающие при радиоактивном распаде изотопа. Ими могут быть измерены альфа, бета, гамма или нейтронные излучения. Чаще всего измеряют бета- и гамма-излучения.

Обычно радиометры состоят из счетчика — ионизирующей камеры, регистрирующей радиоактивные частицы, и лампового усилителя, показания которого передаются на гальванометр, телефонный аппарат, самопишущий прибор. Радиометры, между прочим, используются в геологической разведке и поисках некоторых полезных ископаемых. Установленные на самолет и снабженные самописцами, они значительно облегчают и ускоряют поисковые работы.

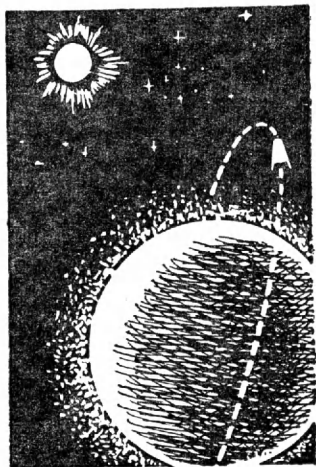
Особую группу образуют многочисленные элементы и их изотопы, которые не распадаются по крайней мере в течение известного нам геологического времени. Эти так называемые нерадиогенные изотопы используются для изучения явлений, связанных с образованием горных пород. Учет количеств нерадиогенных изотопов производится также масс-спектрографическими методами.

Много геохимических проблем стоит перед специалистами по ядерной геологии. Одна из них проблема динамики химического состава Земли.

В самом деле, изменяется ли химический состав Земли? Расчеты показывают, что изменяется. Только за счет ядерных превращений ежегодно обновляется около миллиона тонн вещества нашей планеты. Этот процесс в прошлые геологические эпохи протекал с еще большей интенсивностью. Отсюда напрашивается вывод, что вещество Земли со времени своего образования должно было претерпеть сильные изменения. Распад тяжелых атомов приводит к постепенному упрощению химического состава Земли. Ведь такие естественные радиоактивные изотопы, как рубидий, индий, олово, лантан, лутеций, рений и другие, образовались в свое время за счет распада трансурановых элементов, некогда существовавших на нашей планете.

Причем надо учесть, что эти изменения необратимы. Если исключить влияние космических частиц, то на Земле не известны силы, которые могли бы осуществить реакции синтеза элементов. Как мы увидим ниже, проблемами синтеза химических элементов сейчас занимается геокосмогония.

ИЗОТОПЫ В ОБЩЕЙ ГЕОФИЗИКЕ



Области применения изотопов в геофизике и геохимии часто трудно разграничить.

Общая геофизика разбивается на три крупных раздела: физику воздушной оболочки, физику водной оболочки и физику Земли, или геофизику.

Крупный раздел теоретической геофизики (и геохимии) посвящен воздушной и каменной оболочкам Земли, а также ее глубинным областям — мантии и ядра. Особенно много интересного узнали ученые в последнее время в связи с проведением Международного геофизического года. Это был год искусственных спутников Земли и Солнца, исследований сил тяжести и магнитных свойств Земли.

Современные представления о строении верхних слоев атмосферы, полученные с помощью новейших методов исследований, показали, что в ней широко распространены ядерные реакции. Они возникают под воздействием космических частиц, идущих к нам не только от Солнца, но и других сгустков вещества, разбросанных во вселенной. Попав в зону магнитного поля Земли, космические частицы начинают двигаться вокруг нас, подчиняясь в своем движении направлениям магнитных силовых линий. Установлено, что даже на расстоянии свыше 50 тыс. км от поверхности Земли все еще встречается немало электронов. Существует два своеобразных пояса космических частиц вокруг Земли: первый (верхний) распо-

жен между 35—50 тыс. км над поверхностью планеты, второй — от 300—1500 до 5—8 тыс. км. Профессора И. С. Шкловский и В. И. Красовский называют эти зоны «коронай» земного шара. Распределение космических частиц в верхних слоях атмосферы, как мы видим, не подчиняется так называемому правилу геосфер. Согласно этому представлению, атмосфера состоит из сфер, как бы вложенных друг в друга. Теперь это правило устарело.

Вопрос о верхней границе атмосферы стал дискуссионным. Одно кажется несомненным — существует постепенный переход от атмосферы Земли к области межпланетного газа.

На высоте в 3—4 тыс. км от поверхности Земли в одном кубическом сантиметре пространства насчитывается до 1000 пар ионов. Атмосфера в этих пределах (или зона межпланетного газа) состоит главным образом из водорода, но здесь же регистрируются и электрически заряженные космические частички. Нижняя граница экзосферы (внешняя геосфера Земли) расположена на высоте около 500 км. От поверхности Земли до этой границы атмосфера постепенно становится более разреженной и, наконец, в ее составе сохраняется только ионизированный водород и некоторое количество ионизированного атомарного азота и кислорода. Каждая частичка здесь движется со скоростью в несколько тысяч километров в секунду. В затененной стороне Земли ионизация атмосферы незначительна, но под влиянием Солнца часть верхней атмосферы (экзосферы) ионизируется, становится электропроводящей. Нагрев влияет и на скорости движения частиц. Между прочим, благодаря корпускулярному и электромагнитному излучениям Солнца в полярных зонах начинается свечение ионизированных молекул азота и возникают полярные сияния.

В ионосфере (интервал от 80 до 500 км над поверхностью Земли) плотность атмосферного газа постепенно увеличивается. На высоте в 300 км она равна 1 млрд. частиц в одном кубическом сантиметре. Химический состав ее в основном тот же, что и в экзосфере. Степень ионизации также связана с солнечной радиацией.

В верхней атмосфере (экзосфере и ионосфере) большой интерес представляют ядерные реакции, идущие под воздействием бомбардировки атомов атмосферы космическими частицами. При бомбардировке атомов азота нейтронами и протонами здесь возникают изотоп водорода тритий, изотоп бериллия — Be^7 , изотоп углерода — C^{14} и др. Некоторые из этих изотопов проникают в нижние слои атмосферы и усваиваются растениями или поглощаются морскими осадками.

По представлениям В. В. Белоусова, радиоэлементы распределены в теле Земли неравномерно и образуют очаги главным образом в поверхностных частях земной коры. Если

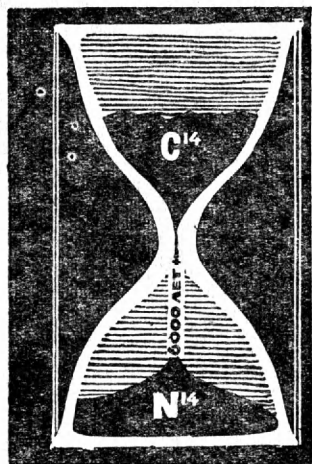
бы радиоэлементы были распределены равномерно по всей планете, то в результате их распада выделилось бы такое количество тепла, которое распавило бы и сделало неустойчивым внутреннее вещество Земли.

Если подытожить все известные нам гипотезы о внутреннем строении нашей планеты, то мы увидим, что подавляющее большинство их авторов считают ядро Земли железо-никелевым. Эти представления опираются в основном на два факта — на наличие геосфер, подтверждаемых сейсмическими наблюдениями, и на несоответствие между средней плотностью Земли (5,52) и плотностью поверхностных масс (2,7—2,8).

Расслоение внутренних зон Земли на геосферы может быть объяснено не только изменениями химического состава внутри Земли. Образование геосфер могло возникнуть и в результате особого агрегатного состояния внутренних частей Земли, создавшегося при давлениях в сотни тысяч и миллионы атмосфер. Вполне возможно, что при таких давлениях могут быть изменены ядерные свойства вещества, и оно может оказаться близким по своему строению веществу сверхтяжелых звезд, обладающих, как известно, огромными плотностями. Наконец, можно предположить, что внутренние части Земли находятся в так называемом плазменном, или четвертом состоянии вещества.

При применении геофизических методов разведки полезных ископаемых широко используются изотопы, например, при радиоактивном каротаже скважин. Под термином каротаж понимают изучение физических свойств горных пород без извлечения их на поверхность. Для этой цели опускают в скважину приборы, измеряющие физические поля тех пород, которые пройдены скважиной. Большое значение при этом имеет измерение электрических полей (электрокаротаж) и магнитных полей (магнитный каротаж). Изучение физики атома привело к созданию гамма-каротажа, нейтронного каротажа и пр.

ИЗОТОПЫ В ИСТОРИЧЕСКОЙ ГЕОЛОГИИ



Историю нашей Земли как планеты со времени образования земной коры изучает ряд геологических наук, которые объединяются под общим названием — историческая геология.

Особенно важно знать, изучая развитие Земли, геологический возраст всех образований, слагающих земную кору. Выяснение возраста горных пород до открытия радиоактивного распада производилось почти исключительно на основании изучения окаменелых органических остатков. Но в том случае, если породы оказывались «немыми», то есть не содержащими окаменелостей, порой возникали непреодолимые препятствия. Особенно трудно было расшифровать возраст магматических образований, а также возраст древнейших, так называемых, докембрийских пород.

После открытия калий-аргонового метода число определений возраста резко возросло. Калий-40 встречается во многих породах, он входит в состав важнейших минералов, из которых состоит большая часть земной коры.

Долгое время во всех учебниках мира приводились сведения о том, что возраст древнейших горных пород на Земле равен двум миллиардам лет. Сейчас эта цифра изменена.

Мы уже писали о возрасте древнейших пород Кольского полуострова, а также некоторых районов Африки, Индии и

Австралии. Сейчас мы располагаем тысячами определений разнообразных горных пород, которые помогают нам заново рассмотреть возрастные периоды нашей планеты и составить новую геохронологическую таблицу, разработка и уточнение которой продолжается (см. табл. 1 на стр. 18).

В докембрийских образованиях органические осадки крайне редки. Это затрудняло выяснение возраста многих докембрийских горных пород. Теперь докембрий расчленен весьма детально по данным определений абсолютного возраста. Правда, точность определений абсолютного возраста древнейших горных пород пока еще невелика. Кроме того, определяя возраст окаменелостей, встречающихся в геологических толщах, можно, в свою очередь, выяснить возраст самих толщ.

Любопытный пример этому даст история с окаменелой раковинкой древнего морского животного — брахиоподы. Сотрудник Горно-геологического института Уральского филиала Академии наук СССР А. С. Шур исследовал абсолютный возраст брахиопод, состоящих из глауконитового известняка, а, как известно, в глауконите содержится до 7—8% калия. Этого количества калия оказалось достаточно для определений возраста. Результат был блестящим. Возраст этой брахиоподы оказался равным 420 миллионам лет, то есть соответствовал ордовикскому периоду (см. табл. 1).

Накопление сведений по определениям абсолютного возраста горных пород приведет в будущем к созданию геологической карты мира, возрастные индексы на которой будут достаточно точными.

В последнее время в археологии большое распространение получил метод определения абсолютного времени, основанный на точных количественных подсчетах радиоактивного изотопа углерода (C^{14}) в древесине. Радиоактивный изотоп углерода возникает в верхних слоях атмосферы под влиянием бомбардировки космическими частицами атомов азота. Токами воздуха радиоактивный углерод опускается на Землю и окисляется. Образовавшаяся двуокись углерода усваивается растениями. Отношение радиоактивного изотопа углерода к нерадиоактивному в любом виде древесины всегда можно подсчитать. Известно, что период полураспада радиоактивного изотопа углерода равен приблизительно шести тысячам лет. Зная средний процент содержания в древесине различных изотопов углерода, можно подсчитать, сколько лет пролежала древесина в земле. Оказалось, что этим методом можно датировать археологические стоянки и археологические памятники с точностью от 50 до 500 лет.

Радиоуглеродный метод дал возможность подойти к решению одной из сложнейших загадок — к проблеме существования и гибели Атлантиды.

Известно, что древние египтяне и ассирийцы начинают

свое летоисчисление с некоего события, происшедшего 11500 лет назад. Радиоуглеродным методом была получена любопытная цифра: оказалось, что последний ледниковый период в Европе закончился 12 тысяч лет назад. Гидрологи, изучавшие грунт со дна Северного Ледовитого океана, установили, что теплые воды Гольфстрима проникли в Северный Ледовитый океан также 12 тысяч лет назад. 12 тысяч лет назад погиб таймырский мамонт, труп которого был найден в погребенных болотистых почвах, сформировавшихся на Таймыре при отступлении ледника. И, наконец, недавно группа американских ученых обнаружила в пробе грунта со дна Атлантического океана мощный слой вулканического пепла, накопившегося 12 тысяч лет назад.

Совпадение дат всех этих событий дало основание профессору Н. Ф. Жирову высказать следующую гипотезу: Атлантида существовала в центре Атлантического океана. Это был огромный остров-материк, который перегораживал Атлантический океан, закрывал доступ на север теплым водам Мексиканского залива и Карибского моря. Теплые воды совершали круговое движение у берегов гигантского острова Атлантиды. 12 тысяч лет назад разразилась катастрофа, сопровождавшаяся колоссальными разломами земной коры и вулканическими извержениями необычайной силы.

В результате катастрофы произошел разлом Атлантиды, и она погрузилась на дно атлантики. После катастрофы Гольфстрим проложил себе путь к берегам Европы, и появление теплых экваториальных вод на севере ускорило отступление льдов с европейского континента.

Многие палеогеографические проблемы решаются сейчас с помощью нерадиогенных изотопов. В одной из проб илистого осадка со дна Тихого океана, взятой у берегов острова Ревилья Хихедо с глубины 4725 м, было обнаружено много фораминифер, живших в начале третичного периода, то есть около 60 миллионов лет назад. Раковины фораминифер исследовали на содержание нерадиогенных изотопов кислорода (O^{16} и O^{18}). Перед этим исследование раковин современных животных показало, что определенные соотношения O^{16} и O^{18} возникают при изменениях температур. Возраст тихоокеанских раннетретичных фораминифер оказался равным 60 миллионам лет, а температура воды, в которой они в то время обитали, была от $+9,4$ до $+11,5^\circ$, т. е. на 5° выше, чем в наши дни.

Так изотопный метод помог получить ценнейшие данные по палеоклиматологии.

Изучая воздействие изотопов на современные организмы, исследуя воздействия радиоактивного облучения на ход некоторых химических реакций, ученые пришли к выводу, что этот фактор (радиация) существовал на Земле издревле и всегда

оказывал влияние на ход неорганической и органической эволюции.

В развитии жизни на Земле отчетливо наметилось два основных этапа — абиогенный период органо-химической эволюции и биогенный. По А. И. Опарину, начальные этапы абиогенной эволюции связаны с формированием углеводов и их развитием, а также с образованием из углеводов асимметричных органических соединений и их окислением и восстановлением. В результате таких реакций в природных условиях возникали сложные органические соединения, из которых позднее, в биогенную стадию эволюции, сформировались белковые молекулы. Считалось, что стимуляторами таких реакций были гроззовые разряды, ультрафиолетовое облучение и пр.

Изучение элементарных частичек атома выдвинуло идею о роли атомной (может быть, космической) радиации на ход органо-химической эволюции вещества. Эта идея подкрепляется экспериментом. Так, при производстве бензина, при крекинге нефти, на одном из заводов было проведено предварительное гамма-облучение сырой нефти с помощью кобальта-60. Оказалось, что облучение ускоряет процесс расщепления тяжелых углеводов, он происходит энергичнее и приводит к большому выходу легких углеводов (бензина).

Когда зародилась жизнь на Земле и как она развивалась? И на эти вопросы пытается дать ответ ядерная геология. Установлено, например, что графитовые гнейсы Украины имеют возраст 2200 млн. лет. Графит в этих гнейсах мог образоваться только за счет накопления углерода из каких-либо водородослей. А графитовые сланцы Мадагаскара, как мы уже говорили, имеют возраст 2600 миллионов лет. Следовательно, жизнь на Земле возникла на древнейших этапах ее развития.

В развитии жизни на Земле выделяют четыре крупных этапа: докембрийский, палеозойский, мезозойский и кайнозойский (см. табл. 1).

Докембрийский этап был самым длительным — значительно более двух миллиардов лет. В это время не только зародилась жизнь на Земле, но и прошли первые фазы ее эволюции. В осадках протерозоя находят окаменевшие следы червей, окаменелые остатки губок, ракообразных, моллюсков. Известны также первые наземные растения — псилофиты. Мы еще не знаем подробностей эволюции этих организмов, так как докембрийские осадки сильно изменены (метаморфизованы). Вместе с метаморфизмом в породах стираются и остатки следов окаменелостей. Так, например, обычный известняк со следами окаменелостей при метаморфизме превращается в кристаллическую породу — мрамор. Кристаллизация уничтожает следы жизни.

Таблица I

**Геохронологическая шкала по данным определения абсолютного
возраста на 1960 г. ***

Эры, периоды и эпохи (цифрами обозначена их продолжительность в миллионах лет)			Время, прошед- шее от начала периода (в мил- лионах лет)
Кайнозойская эра 70			
Четвертичный период 1			1
Третичный период 69	Неоген	Плиоцен	10
		Миоцен	25
	Палеоген	Олигоцен	40
		Эоцен	70
		Палеоцен	
Мезозойская эра 155			
Меловой 70	Верхний		100
	Нижний		140
Юрский 45			185
Триасовый 40			225
Палеозойская эра 345			
Пермский 45			270
Каменноугольный 50			320
Девонский 80			400
Силурийский 20			420
Ордовикский 60			480
Кембрийский 90			570
Докембрийские эры около 3000			
Рифейская (Докембрий IV) 600			1100—1200
Протерозойская (Докембрий III)			1800—1900
Архейская (Докембрий II)			2600—2700
Катархейская (Докембрий I)			3400—3500

* По данным Комиссии по определению абсолютного возраста геологических формаций при ОГГН Академии наук СССР.

Второй этап — палеозойский — длился около 350 миллионов лет. Это этап бурной эволюции морских и наземных растений и животных. 570 миллионов лет назад в морях появились многочисленные членистоногие из класса трилобитов, ныне полностью вымершие.

400 миллионов лет назад сформировались первые позвоночные животные. Они принадлежали к группе панцирных рыб. Понадобилось еще около 130 миллионов лет, чтобы в процессе эволюции из группы рыб выделились животные, обладавшие жабрами, и легкими, имевшие вместо плавников лапы. Так, 270 миллионов лет назад возникли амфибии. Спустя 20 миллионов лет после этого события появились первые рептилии. Это произошло четверть миллиарда лет назад. Выход животных на землю совпал с пышным развитием растительности (главным образом папоротникообразных) и появлением многочисленных насекомых.

Третий этап развития жизни — это царство гигантских рептилий, летающих ящеров и птиц (птицы появились 140 миллионов лет назад). Начало третьего этапа отстоит от нашего времени на 225 миллионов лет, конец — на 70 миллионов лет. В это время меняется не только облик фауны, но происходит смена растительности. Папоротникообразные формы уступили хвойным. Хвойные появились еще с конца палеозойской эры, примерно с середины пермского периода. В конце мезозойской эры, около ста миллионов лет назад, возникли первые покрытосеменные и цветковые растения. В мезозое (160 миллионов лет назад) сформировались первые млекопитающие.

Четвертый этап — кайнозойский. Он длился 70 миллионов лет. Кайнозой — это царство млекопитающих, покрытосеменных растений, разнообразных моллюсков и насекомых. Первые человекообразные обезьяны появились 40 миллионов лет назад; первый же человек жил около миллиона лет назад. С появлением человека начался четвертичный, или, как его иногда называют, антропогенный, период в жизни Земли.

Углеродный метод позволил довольно точно установить последние этапы эволюции человека и его культуры. Так, конец верхнего палеолита отделен от нас 10—10,5 тысячами лет. Бронзовый век начался 4,5 тысячи лет назад; железный — 2,5 тысяч. В эволюционном развитии жизни на Земле отмечены этапы массового вымирания и зарождения новых форм. Причины многих из них пока еще неясны.

Почему, например, 570 миллионов лет назад, в начале палеозойской эры (см. табл. 1) появились в огромных количествах различные представители животного мира?

Эпохи массового вымирания представителей животного и растительного мира намечаются в конце ордовика, перми и мела (см. табл. 1).

Почему, далее, вымерли гигантские ящеры, населявшие в период мезозойской эры всю Землю? На кладбище окаменелых мезозойских динозавров в Средней Азии обнаружены десятки миллионов тонн костей этих животных.

Причины вымирания пытались объяснить изменениями климата. Но следов большого похолодания или, наоборот, потепления не обнаружено. Может быть, эти катастрофы связаны с влиянием радиации на организмы? Ведь установлено, что облучение, несомненно, влияет на развитие организмов.

В одном из каналов в Голландии, куда сбрасывались отходы радиоактивных реакций, были обнаружены лягушки, у которых насчитывалось 6 лапок, с 10—15 пальцами на каждой. Интересно, что такие уродства могут быть наследственно закреплены и передаваться из поколения в поколение. Радиоактивное излучение, затрагивая хромосомы, может привести к изменению наследственности. При перестройке молекулярной структуры хромосом могут возникнуть новые устойчивые породы животных и растений. Это открывает громадные практические перспективы. Уже сейчас облучение радиоактивными лучами может использоваться в производстве. Так, по данным Э. Я. Граевского и Н. И. Шапиро, облучение пенициллиновых грибков приводит к возникновению их разновидностей, обладающих в десятки раз большими лечебными свойствами, что очень важно при изготовлении лекарств.

При увеличении радиоактивного облучения организмы гибнут. Для каждого вида животного или растения существует своя норма облучения, превышение которой приводит к их гибели. Рыбы, например, могут безболезненно воспринимать дозы облучения в сотни раз большие, чем те, которые смертоносны для человека.

В. И. Красовский и И. С. Шкловский считают, что изменение интенсивности радиоактивного излучения было связано со вспышками сверхновых звезд в Галактике. Они считают, что в 200 миллионов лет раз могла произойти вспышка сверхновой звезды на расстоянии около 8 парсек¹ от солнечной системы. Каждая вспышка могла дать увеличение радиации в 3—10 и более раз. Подсчеты показывают, что при вспышке сверхновой звезды выделяется за несколько дней столько энергии, сколько ее может дать несколько миллиардов солнц. Изменение радиационного баланса могло вызвать образование новых жизненных форм или привести к массовому вымиранию организмов.

¹ Парсек — астрономическая единица, равная 3,26 светового года.

ИЗОТОПЫ В КОСМОГОНИИ



Историческая геология тесно связана с космогонией. Вопросы возникновения и развития жизни Земли как планеты входят в компетенцию и космогонии, и исторической геологии. Более того, без геологических знаний нельзя понять многие процессы, протекающие на звездах и планетах. Недаром методы ядерной геологии применяются сейчас в космогонии.

Бесчисленное разнообразие небесных тел и форм существования вещества в космосе дают богатый материал для познания процессов, происходящих на Земле и внутри нее, так как законы развития вселенной при всем их множестве едины.

В космогонии — науке об образовании и развитии небесных тел — изотопные методы нашли широкое применение. Ядерные реакции задолго до открытия их на Земле были обнаружены на Солнце и звездах. Некоторые типы ядерных реакций, происходящие в космосе, или же существуют на Земле, или здесь еще не открыты.

Для того чтобы понять процессы формирования небесных тел, и в том числе нашей планеты — Земли, важно изучать метеориты, анализировать строение планет и Солнца. Ядерная космогония позволяет накапливать факты, которые лягут в основу будущих теорий происхождения Земли и других планет солнечной системы.

С помощью искусственных спутников Земли и путем непосредственных наблюдений установлено, что ежедневно на поверхность Земли выпадает от 3000 до 20 000 г мелкораздробленного метеоритного вещества. Крупные метеориты — большая редкость. Ни один из искусственных спутников Земли ни разу не столкнулся с крупным метеоритом. Микрометеориты же ударялись о поверхность искусственных спутников довольно часто. В среднем на один квадратный метр поверхности спутников за 100 секунд приходится один удар. Иногда при встрече с роем метеоритов количество соударений резко возрастало.

Рои мелких обломков космического вещества, попадая в атмосферу, ионизируют газовые молекулы воздуха. Это приводит к таким неожиданным явлениям, как сверхдальние приемы телевизионных передач, которые никто не планировал. Так, 3 сентября 1956 года в районе Омска были приняты телевизионные передачи из Москвы. Прием произошел в то время, когда обильный рой метеоритной пыли выпал на поверхность Земли. Рой содержал большое количество железо-никелевых частиц.

Крупные обломки метеоритного вещества были проанализированы многими методами для определения их абсолютного возраста. Полученные при этом результаты различны.

При расчете времени образования метеоритов встал вопрос: одинакова ли скорость образования продуктов радиоактивного распада на Земле и в космосе и аналогично ли протекает этот процесс в столь различной обстановке? При расчете возраста метеоритов гелиевым методом оказалось, что некоторые образцы, содержавшие малые количества гелия, имеют возраст до одного миллиона лет.

Другие, содержащие большое количество гелия, сформировались свыше миллиарда лет назад. Полученные результаты позволили высказать ряд гипотез. Так, некоторые ученые считают, что количество гелия в метеоритах уменьшается из-за высоких температур, царящих вблизи Солнца. Увеличение же количества гелия связано с космической радиацией, под воздействием которой возникает избыток этого элемента.

Особенно много таких гипотез высказано по поводу Тунгусского феномена.

Так, большую популярность несколько лет назад приобрела гипотеза писателя А. Казанцева. По его мнению, в Тунгусской тайге взорвался управляемый космический корабль, имевший запас атомного горючего. Главными аргументами в доказательство этой гипотезы А. Казанцев считает: отсутствие метеоритного кратера, свидетельствующего о взрыве, происшедшем в воздухе (а не в результате удара о Землю), и сходство явлений, сопровождавших взрыв, с тем, что наблюдается при взрыве атомных бомб. Гипотеза как будто под-

креплялась расчетами Штернфельда, который говорит, что день 30 июня 1908 года был одним из наиболее выгодных для прилета корабля с Венеры.

Экспедиции в 1958—1961 годах в район Подкаменной Тунгуски установили, что взрыв действительно произошел в воздухе. Об этом свидетельствует неповрежденный лес над местом взрыва. В то же время экспедиции не подтвердили повышенной радиоактивности почвы, хотя начальником одной из экспедиции — К. П. Флоренским и отмечается, что, судя по срезам деревьев, после взрыва начался их активный рост, а это могло быть связано с повышенной радиацией, бывшей в то время. К. П. Флоренский поддерживает сейчас гипотезу Астаповича о том, что в Тунгусской тайге упало ядро кометы. Им обнаружены небольшие скопления микроскопических частичек железо-никелевого расплава и намечен ареал рассеяния этих частиц.

Высказанные гипотезы не единственны. Есть предположение о взрыве метеорита под влиянием мощного электрического заряда, возникшего при прохождении метеорита через атмосферу.

Загадка Тунгусского феномена еще не решена. Нужны дополнительные факты, чтобы решить этот сложный вопрос современной науки.

Много новых материалов появилось в последние годы по «геологии» планет солнечной системы и Луны. Эти данные получены в результате применения радиоспектроскопии ближайших к нам небесных тел. Так, например, с Венеры приходят к нам на Землю радиосигналы, напоминающие грозовые разряды; непонятно при этом то, что сигналы поступают всегда из одних и тех же определенных точек планеты.

Расшифровка радиосигналов (в том числе и отраженных) позволяет судить о химическом составе ближайших к нам небесных тел.

Раньше считалось, что Луна — источник лишь отраженных световых волн и радиоволн. Но вот 3 ноября 1958 года советским ученым Н. А. Козыревым были получены спектрограммы района кратера Альфонса, свидетельствующие о вулканическом извержении на Луне. Полученные спектрограммы позволили выяснить состав газов, выделявшихся при извержении. Возможность вулканических извержений на Луне подтверждают также английские ученые П. Уилкинс и Ф. Брюин, наблюдавшие 19 ноября 1958 года небольшое красноватое пятно около центрального пика Альфонса.

Еще большее количество материалов мы получаем при изучении Солнца. К сведениям по спектроскопии Солнца теперь прибавились многочисленные материалы, полученные при радиоспектроскопии его отдельных участков.

По современным данным, Солнце — это гигантский газо-

вый шар с тяжелым ядром, расположенным внутри газовой массы. На поверхности Солнца температура достигает 4500—7000°. Самая низкая температура (4500°) наблюдается в области пятен — гигантских вихревых воронок; высшая (7000°) — в области хромосферных вспышек. Солнце окружено короной и «сверхкороной». «Сверхкорона» отстоит от поверхности светила на расстоянии от 5 до 30 солнечных радиусов. На этих больших высотах зарегистрированы максимальные температуры, достигающие миллионов, миллиардов, а иногда и триллионов градусов.

Энергия Солнца поддерживается за счет постоянно идущих термоядерных реакций (реакций синтеза).

Солнце в ходе этих реакций теряет в одну секунду миллионы тонн своей массы. При той же интенсивности этих реакций Солнце за миллиард лет потеряет 1/25000 своей массы.

Изучение хромосферных вспышек показывает, что, кроме обычных термоядерных реакций, на Солнце происходят иные реакции, во время которых высвобождается еще большее количество энергии (и теряется большее количество массы). Такие вспышки-взрывы отмечались: 28 апреля и 7 марта 1942 года, 25 июля 1946 года, 8 марта 1947 года, 19 сентября 1949 года, 16 июля 1958 года, 26 марта 1959 года и пр. Во время таких вспышек в несколько минут из очага, занимающего одну тысячную часть поверхности Солнца, выделяется столько энергии, сколько за это же время излучает все Солнце. Во время взрыва 23 февраля 1956 года была зарегистрирована мощность, равная мощности взрыва ста миллионов водородных бомб. Академик В. А. Амбарцумян предполагает, что вещество, вызывающее это явление, просачивается из зоны солнечного ядра. Во время вспышек на Солнце наблюдается много разнообразных элементов и их изотопов. Так, при вспышке 16 июля 1958 года были зарегистрированы спектральные линии ионизированных атомов стронция, бария, азота, магния, натрия, кальция и т. д.

Хромосферные вспышки вызывают на Земле мощные магнитные бури. В это время Солнце выбрасывает большое количество элементарных частиц, в том числе ядер атомов, несущихся со скоростями, близкими к скорости света. Эти частицы, обладая огромной энергией в несколько миллиардов электроновольт, нарушают магнитное поле Земли и проникают до ее поверхности.

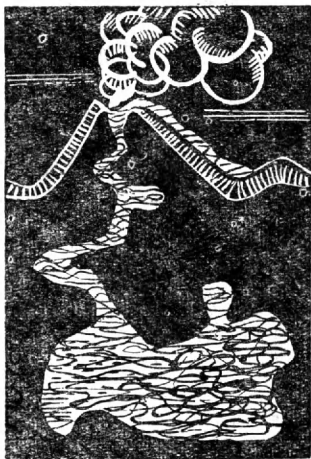
Еще большую мощность имеют взрывы в нашей и других галактиках. В 1054 году китайский астроном Ма Туан-линь наблюдал появление звезды необычайной яркости. Звезда горела 55 дней. Ма Туан-линь довольно точно указал координаты этой звезды. Сейчас в этой части неба располагается Крабовидная туманность. Из области Крабовидной туманности несутся радиосигналы, а это значит, что, здесь до сих пор

не прекращаются термоядерные реакции большой мощности и силы.

Академиками В. Г. Фесенковым, Г. А. Шайном и другими исследователями сфотографированы многочисленные яркие туманности нашей Галактики. Особый интерес при этом представляют радиотуманности, от которых также поступают радиосигналы.

Академик В. А. Амбарцумян установил, что в пределах Галактики есть звездные ассоциации, в которых очень бурно протекают ядерные реакции. Реакции идут с такой интенсивностью, что вещества этих звезд хватит всего на несколько миллионов лет. Отсюда ясно, что жизнь некоторых звезд столь же быстротечна по сравнению с другими звездами, как жизнь бабочки-однодневки при сопоставлении с человеческой.

ИЗОТОПЫ В ДИНАМИЧЕСКОЙ ГЕОЛОГИИ



Издавна людей привлекала разгадка грозных явлений природы. Как объяснить вулканические извержения и катастрофические землетрясения? Почему рождаются горы?..

Объясняет эти явления наука, называемая динамической геологией. Процессы, протекающие внутри Земли и порождающие вулканизм, землетрясения и горообразование, называют в геологии эндогенными — внутренними.

Горы не вечны. Их разрушают поверхностные и подземные воды, и ветер, и колебания температуры воздуха и т. д. Все процессы, возникшие от этих причин, объединены в геологии под названием экзогенных — внешних. Применение методов ядерной геологии в этой отрасли знаний открыло новые большие перспективы.

В изучении экзогенных процессов большое значение приобрели методы меченых атомов. Их применение особенно показательно на примере изучения развития и преобразования (динамики) морских побережий, процессов, связанных с геологической деятельностью рек и протекающих в озерных бассейнах. Изучение геологической деятельности моря имеет очень большое значение для строительства портов, гаваней, защиты прибрежного строительства от разрушающего действия волн и, наконец, судоходства. Изучая этот вопрос, особенно важно проследить движения гальки и песка во время штормов и небольших волнений моря. Перенос и отложение

этого материала в основном и формирует прибрежную отмель

Для того чтобы изучить движение гальки, используют изотоп бария — Ba^{140} с периодом полураспада 12 дней. Гальки, меченные этим изотопом, подбрасываются в зону прибоя. За их передвижением следят с катера или с лодки, используя для этой цели обычные радиометры или счетчики излучений. Исследования показывают, как напряженно живет побережье, как активно в этой зоне передвигаются вдоль берега даже при легком волнении целые «реки» из гальки и песка. Некоторые частицы породы при волнении в 4 балла передвигаются вдоль побережья на 700 м в сутки, щебенка диаметром 5—6 см — на 100 м.

Исследование геологической деятельности рек связано прежде всего с анализом движения речных осадков — ила, песка, гравия, гальки, которые откладываются на современных террасах и в руслах рек. Когда мы изучим законы переноса и отложения речных осадков, то сможем найти и законы образования россыпных месторождений золота, платины, алмазов и т. д. Ведь известно, что вода размывает породы, в которых заключены драгоценные металлы и минералы, выносит их вместе с измельченной породой в реки, и они образуют в речных песках россыпи. Для выяснения законов транспортировки аллювия (речных отложений) сейчас также используется метод меченых атомов. Любопытен пример такого анализа движения речных наносов в устье Темзы. Там на дно реки было опущено 845 г тонко измельченного стекла, содержащего радиоактивный изотоп скандия (Sc^{46}) с периодом полураспада 85 дней. Через 10 дней меченые атомы были обнаружены на 10 км ниже по реке и на 15 км выше того места, где порошок был опущен на дно.

С помощью меченых атомов изучают взаимодействие организмов со средой, активность их обмена с внешним миром и скорость движения вещества в тех или иных условиях местообитания. Так, на одном из канадских озер на поверхность воды был разлит раствор фосфорнокислой соли, содержащий радиоактивный фосфор (P^{32}) с периодом полураспада 14,3 дня. В первые же часы изотоп фосфора оказался поглощенным планктонными организмами, а через две недели был обнаружен в теле лягушек и рыб. Часть радиоактивного фосфора оказалась на дне водоема в илистом его осадке, куда фосфор проник вместе с отмершим и осевшим на дно планктоном. Кстати, благодаря этому и подобным ему опытам разработаны способы очистки водоемов от загрязняющих их радиоактивных изотопов, часто в больших количествах сбрасываемых в воду. Некоторые организмы планктона активно поглощают радиоактивный цезий, радиоактивный стронций и другие смертоносные изотопы и, отмирая, накап-

ливают их в илистых осадках. Вода же при этом оказывается чистой, годной для питья и промышленных целей.

Особый раздел геологии составляет учение о древних оледенениях и особенно последнем четвертичном оледенении. Обычно наступление льда вызывалось изменениями климата. Материковые льды, двигаясь по поверхности Земли, совершали колоссальную геологическую работу. Выяснение количества, периодичности и интенсивности оледенений очень важно для изучения истории Земли.

Недавно советский ученый Г. Ф. Лунгерсгаузен опубликовал сводку об оледенениях Земли в связи с периодическими изменениями климата. Выводы о возрасте оледенений ученый сделал на основании исследования многочисленных фактов и явлений. Им были применены методы ряда разделов геологической науки, однако основную роль здесь сыграли урано-свинцовый, калий-аргоновый и другие методы определения абсолютного возраста пород.

По данным Г. Ф. Лунгерсгаузена, конец оледенения, покрывавшего еще не так давно почти всю Русскую равнину и значительные пространства Западной Европы и Северной Америки, отстоит от нас примерно на 40 тысяч лет, а начало его было 900 000—1 000 000 лет назад.

Второй (если следовать в глубь веков) ледниковый цикл был в верхнем палеозое (см. геохронологическую табл.). Он отделен от нашей эпохи временем в 190—210 миллионов лет. Следы этого оледенения известны в Австралии; у нас — на р. Урал, р. Сакмаре и в ряде других пунктов.

Третий цикл приходится на ордовик (свыше 420 миллионов лет назад). Следы его отчетливо прослеживаются в бассейне реки Св. Лаврентия (Северная Америка), в Боливийских Андах (Южная Америка), в Южной Африке; в СССР в бассейне р. Вишеры, по р. Подкаменной Тунгуске.

Четвертый цикл, верхнепротерозойский, был примерно 600 миллионов лет назад. Это оледенение, иногда называемое Липалийским, оставило свои следы в протерозойских породах Шпицбергена, Восточной Гренландии, Норвегии, Южного Урала, Патомского нагорья, Китая, Капской провинции (Южная Африка) и пр.

Еще несколько ледниковых циклов намечается в нижнем протерозое и в архее. Все они, так же как и те четыре цикла, о которых мы говорили выше, возникали с интервалами в 200 миллионов лет. Эту периодичность Лунгерсгаузен объясняет тем, что Земля попадает в области «космических зим», холодные области нашей Галактики. И как раз время обращения звезд в нашей галактической системе подчинено периоду в 200 миллионов лет. Другие ученые связывают ледниковые циклы Земли со взрывами сверхновых звезд в Галактике.

Некоторые ученые пытаются связать современные изменения климата с космической радиацией, а также с засоренностью атмосферы пылью, возникшей при взрывах термоядерных бомб. Подсчитано, что для изменения климата Земли достаточно рассеять атмосфере около 8 миллионов т пепла. В этом случае космическая и солнечная радиация уменьшилась бы примерно на 20%. Резкое сокращение тепла привело бы к возникновению нового оледенения.

Весной 1954 года при испытании пяти термоядерных бомб в штате Невада в США были подняты в воздух сотни миллионов тонн породы. Если всего лишь 1% этой взвеси останется в атмосфере, то сразу же резко изменится погода. Американцы, оценивая проникновение тончайшей пыли и пепла в атмосферу, говорят, что именно этим объясняется уменьшение осадков в центральной части континентов и увеличение их у побережий океанов. Это, по их мнению, уже привело к катастрофическим наводнениям в районах Северной Индии, Среднего Востока, Китая, Средиземноморья.

Влияние последствий атомных взрывов и радиации на климат — вопрос пока не изученный. По-видимому, уже сейчас испытание термоядерного оружия может привести к некоторым колебаниям погоды, однако до сих пор, как считает большинство ученых-метеорологов, изменения климата были связаны с активностью Солнца.

Учение о строении атома заставляет по-новому рассматривать многие эндогенные процессы. Некоторые процессы, протекающие в глубинных слоях Земли, удалось воссоздать в лабораторных условиях, например, сверхвысокие давления. Так, в лабораториях, руководимых профессором Л. Ф. Верещагиным, было выяснено, что при сверхвысоких давлениях в 50 000—100 000 и более атмосфер происходит перестройка верхней электронной оболочки атомов и возможен переход электронов с наружной орбиты на внутренние, а вместе с этим и качественное изменение вещества. В недрах Земли на глубине 2900 км при гигантских давлениях свыше миллиона атмосфер происходит качественный скачок, перестройка вещества и возникает своеобразная электронная плазма. Она-то и образует вещество Земли на так называемых внешнем и внутреннем ее ядре. Не исключена возможность существования таких плазменных очагов в отдельных участках мантии, которая лежит над твердой корой Земли. Именно над этими очагами плазменного вещества, как считают некоторые ученые, происходят землетрясения. Здесь мы стоим у границ разгадки одной из важнейших тайн — тайны землетрясений.

Современные исследования вулканических областей показывают связь вулканических извержений с процессами радиоактивного распада вещества. Японский ученый Камада приводит сведения о том, что во многих районах Японии об-

наружены радиоактивные вулканические газы. В составе этих газов были обнаружены: радон, радий-А, торий, торий-В, радий-В и др.

Изучение действующих вулканов приводит к выводу, что очаги, питающие вулканы, изолированы. Японский геофизик Икояма, изучавший вулкан Михара на острове Оошима, произвел магнитные исследования вулкана в то время, когда он пробудился и действовал. Обнаружена небольшая магнитная аномалия, связанная, несомненно, с вулканическим очагом, располагающаяся на глубине 2—3 км. Исследования Икоямы лишний раз убеждают нас в отсутствии под поверхностью Земли сплошных «океанов» магмы и приводят к мысли о небольших очагах, питающих вулканы.

Чрезвычайно важно использование изотопных методов для определения абсолютного возраста горных пород.

Эпохи горообразования всегда сопровождалась бурной вулканической деятельностью, землетрясениями, извержениями магмы. В эти периоды, кроме того, шло интенсивное рудообразование. Ценнейшие руды связаны с изверженными породами или возникли в результате колоссальных температур, давлений и т. д.

Сейчас в основном датированы важнейшие горо- и рудообразовательные циклы в истории развития Земли (табл. 2).

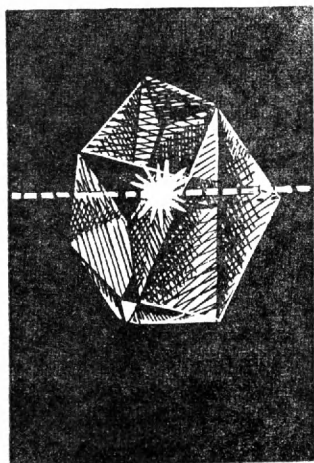
Таблица 2

Важнейшие эпохи горо- и рудообразования в истории Земли

Эры	Начало и конец (в млн. лет)	Эпохи рудо- и горообразования в время их максимального проявления (в млн. лет)	
Кайнозой Мезозой	0—70 70—225	Альпийская	50—100
Палеозой	225—570	Герцинская Каледонская	225—270 320—480
Докембрий	570—3500?	Катангинская	600—700
		Гренвилльская	1000—1100
		Медвежьеозер- ская	1400—1500
		Беломорская	1800—2000
		Родезийская	2500—2600
		Сиерра-Леоний- ская	Около 3000

Интересна Беломорская эпоха. В каком бы районе земного шара породы ее ни выходили на поверхность, везде с ними связаны ценнейшие полезные ископаемые, в том числе урановые руды.

ИЗОТОПЫ В ПЕТРОГРАФИИ И МИНЕРАЛОГИИ



Петрография — наука о происхождении и свойствах горных пород. Горные породы бывают осадочными, метаморфическими и магматическими. Осадочными породами мы называем те, что образовались в результате переотложения уже разрушенных горных пород или возникли в результате накопления остатков отмерших организмов.

Метаморфические породы формируются эндогенными процессами. Они возникают при колоссальных давлениях и температурах внутри Земли, однако во время превращений сохраняют твердое состояние. Так, некоторые известняки, подвергшиеся метаморфизму, перекристаллизовываются и образуются в мрамор.

И, наконец, магматические породы образуются при застывании магмы. К ним относятся граниты, габбро, диабазы и т. п.

Минералогию интересуют минералы — тела, возникшие в результате разнообразных физико-химических процессов.

Изучение горных пород и минералов с помощью изотопов становится одним из важнейших методов познания этих природных образований. Изотопные методы помогают решению важнейших вопросов в петрографии и минералогии, среди

которых главным является вопрос о происхождении магматических горных пород.

Проблема происхождения магматических пород рассматривается учеными по-разному. Здесь наметились два основных направления: магматистов и трансформистов. Магматисты считают, что все эти породы возникли при застывании некогда расплавленной огненно-жидкой магмы. Трансформисты представляют процесс образования пород, имеющих магматический облик, в результате сложных физико-химических и термохимических природных процессов. Причем они полагают, что эти породы далеко не обязательно сформировались из расплава.

Для решения проблемы были применены нерадиогенные изотопы.

Самое главное в вопросе о формировании магматических пород — выяснение температурного режима их образования. Здесь-то как раз и может помочь исследование таких изотопов, как сера-32, сера-34; кислород-16, кислород-18 и некоторых других. Так, изучая соотношение S^{32} и S^{34} в сернистых минералах, удалось установить, что при биологических процессах количество S^{32} возрастает и что при отношении S^{32}/S^{34} большем 22,30 минерал имеет биогенное происхождение, то есть возник в результате жизнедеятельности организмов, если же это соотношение меньше 22,18, то абиогенное — гидротермальное (в результате контакта горячих растворов с теми или иными породами) или магматическое.

Замечены также некоторые различия в изотопном соотношении O^{16} и O^{18} . Так, в некоторых кальцитах осадочного происхождения количество O^{18} по сравнению с кальцитами магматического происхождения заметно увеличивается.

Все эти примеры свидетельствуют о том, что путь решения вопроса о происхождении пород и минералов магматического облика намечен, но нужно еще и еще раз экспериментировать, чтобы найти изотопы-индикаторы для разнообразных геологических процессов образования горных пород. Несомненно, что выводы, полученные при этом, будут широко использованы при исследовании термохимии и физико-химии природных процессов.

Один из важных разделов минералогии изучает минералы, содержащие радиоактивные элементы, и в первую очередь минералы семейства урана. Сейчас открыто свыше 150 минералов урана. Минералы урана принадлежат к окислам, карбонатам, сульфатам, силикатам, фосфатам, арсенатам, ванадатам. Встречаются они и среди органических соединений. Наибольшее промышленное значение из них имеют окислы и фосфаты.

К специфическим методам исследования урансодержащих минералов относится люминесцентный метод.

В лабораторных условиях при люминесцентных исследованиях для того, чтобы активизировать соли урана, их сначала сплавляют с фтористым натрием, а потом уже наблюдают. В полевых условиях определение урановых соединений ведется не количественное, а качественное, то есть обнаруживается не количество, а лишь наличие урана. Это делается путем просмотра образцов в полевом люминескопе. Здесь урановые соединения дают характерную яркую расцветку при облучении их ртутно-кварцевой газоразрядной лампой.

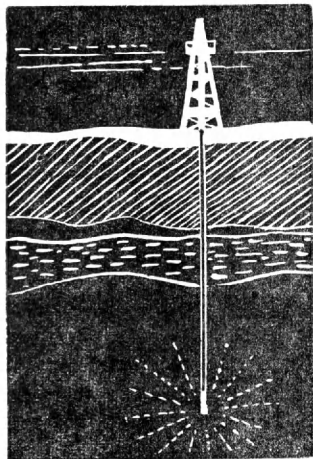
Изотопные методы нашли применение в ряде разделов технической минералогии и кристаллографии. Наибольший интерес представляют люминофоры — искусственно изготовленные кристаллы из органического или неорганического вещества, а также жидкие и твердые растворы, в которых под воздействием бомбардировки ядерными частицами возникают сцинтилляции — световые вспышки.

Люминофоры, соединенные в сцинтилляционных установках с фотоэлектронными умножителями, позволяют изучать радиоактивные альфа-, бета-, гамма и другие излучения, испускаемые некоторыми минералами или породами.

Сцинтилляционные аппараты нашли широкое применение в радиометрии, при разведке полезных ископаемых.

Примером разнообразного использования ядерных свойств вещества может служить искусственная окраска алмазов под воздействием нейтронного и рентгеновского облучения. Алмазы при этом приобретают устойчивую зеленую или коричневую окраску.

ИЗОТОПЫ ПРИ ИЗУЧЕНИИ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ



Сейчас при поисках и исследовании почти всех видов минерального сырья нашли применение изотопные методы исследований.

Большое значение в наши дни получил крупный раздел учения о полезных ископаемых — геология атомного сырья. В этот раздел входят все вопросы, связанные с поисками и разведкой не только радиоактивных руд, но и всех тех полезных ископаемых, которые необходимы при технологическом использовании атомного сырья.

Один из основных видов атомного сырья — урановые руды. Промышленные залежи этих руд встречаются в различной геологической обстановке. Они могут быть связаны с магматическими, осадочными, метаморфическими породами, а также с зонами выветривания.

Так, некоторые осадочные месторождения содержат большие запасы урана; однако концентрация урановых руд в них очень незначительна. Например, в США, в штате Флорида, открыто свыше 5 миллиардов т фосфоритов, в которых содержится до 600 тысяч т урана, но концентрация урана в них ничтожная, всего около 115 г на тонну.

Другие типы промышленных урановых месторождений могут быть собственно урановыми, ураново-полиметаллическими, ураново-никель-кобальт-висмут-серебряными, ураново-

молибденовыми и т. п. В Канаде, например, в районе Большого Медвежьего озера, располагается крупное месторождение урановых руд, принадлежащее к группе урано-никель-кобальт-серебряных месторождений. Руды этого ценнейшего металла приурочены к зонам тектонических разломов, гигантским древним трещинам, теперь почти невидимым, которые возникли в результате горообразовательных движений земной коры. Разломы протягиваются на целые километры. Оруденение прослеживается на глубину до 500 м. В рудных жилах, состоящих из кварца, доломита, родохрозита, содержатся, кроме урана, халькопирит, арсениды никеля и кобальта, самородное серебро и другие металлы и минералы.

Важнейшие месторождения урана в капиталистическом мире располагаются в США, Канаде, республике Конго, Южно-Африканской республике, Австралии и Франции.

В промышленности, кроме урановых руд, используются, но в значительно меньших количествах, руды тория и радия. Месторождения руд тория встречаются главным образом среди пегматитов, некоторых видов известняков и в древних и современных россыпях. Месторождения радия связаны главным образом с гидротермальными жилами. Промышленные концентрации радия встречаются иногда в водах, сопутствующих нефтяным месторождениям. Но это уже относится к ведению гидрогеологии.

Изотопы применяются в гидрогеологии для изучения месторождений полезных ископаемых, выявления радиоактивных источников для лечебных целей, наблюдения за движением подземных вод с помощью меченых атомов.

Радиогидрогеологические методы поисков месторождений радиоактивных руд находят все большее и большее применение. Вокруг месторождений урана, тория, радия образуются зоны подземных вод, обогащенные продуктами распада этих элементов. Ореолы (зоны) радиоактивности имеют различные размеры — от нескольких сот метров до нескольких километров в диаметре. Одновременно с радиоактивными металлами в подземных водах встречается молибден, никель, кобальт, цинк, свинец, медь, мышьяк. Эти ценные металлы обычно сопутствуют зонам повышенной радиоактивности. Наоборот, по элементам-спутникам могут быть обнаружены месторождения урана.

Подземные воды, в которых встречается повышенное содержание радия и радона, могут служить или для добычи радия, или для лечебных целей.

Примером первой группы являются воды некоторых нефтяных месторождений; ко второй группе можно отнести воды курортов Белокурихи (Алтай), Славяновского (Кавказ) и др.

В СССР принято делить лечебные радиоактивные воды на три группы:

слаборadioактивные — 35—100 эман¹;
среднерadioактивные — 100—300 эман;
сильнорadioактивные — более 300 эман.

При учете лечебных свойств исследуется «radioактивная мощность» источника, то есть количество радия, способное дать за единицу времени определенное количество радона. Исследуются также качество воды, ее лечебный эффект и пр.

Radioактивные методы используются в гидрогеологии и при опытных работах по определению скорости движения подземных вод. Для этой цели применяются короткоживущие изотопы (меченые атомы). Наблюдение за ними весьма не сложно. Оно ведется с помощью контрольных скважин. Вместе с обычными методами исследований (картирование, поиски, съемка, разведка, бурение) при поисках месторождений урановых, ториевых и радиевых руд применяют специальные методы: радиометрические, радиогеологические и геоботанические.

При радиометрических методах исследований применяются высокочувствительные приборы — радиометры, регистрирующие альфа-, бета-, гамма- или нейтронное излучения. Широкое применение получила аэрорадиометрия и автогамма-радиометрия, то есть регистрация гамма-излучения с самолета или автомобиля. Данные, полученные с самолета или автомобиля, обязательно проверяются в пешеходных маршрутах. Кроме того, проводится проверочное бурение.

Геоботанические методы изучения месторождений радиоактивных руд в последнее время приобретают все большее значение. Растения очень чувствительны к присутствию в почве радиоактивных элементов. Существуют так называемые положительные признаки, наблюдаемые у растений под влиянием радиоактивности. Сюда относятся уродливые формы растений, изменение их окраски, осветление стеблей и листьев. Отрицательные геоботанические признаки указывают зоны, где нет достаточных концентраций радиоактивных руд. Так, некоторые растения произрастают только там, где нет урановых руд.

Изотопные методы исследований применяются также при изучении нефтяных и газовых месторождений.

Одним из современных приемов поисков нефтяных и газовых месторождений стали аэро-, радио- и автогаммасъемка. Во многих районах в местах концентрации нефти и газа обнаружена пониженная интенсивность гамма-излучений. Некоторые исследователи объясняют эту зависимость тем, что из поверхностных зон выщелачиваются и вымываются соли ра-

¹ Эман — единица измерения слабой радиоактивности. Эман равен 10^{-10} кюри на 1 л жидкости или газа (или 10^{-13} кюри на 1 см³).

диоактивных элементов. Нефтяные пласты препятствуют передвижению солей радиоактивных элементов из глубины к поверхности. Это и приводит к тому, что на таких участках фон радиоактивности понижен. Возможны, однако, и другие истолкования этого явления.

Другим важным приемом является радиокаротаж скважин. Каротажем скважин обычно называют изучение пород, которые проходятся скважиной, без извлечения пород (керн) на поверхность. Этот метод основан на физических свойствах пород. Поэтому существуют электрокаротаж, магнитный каротаж и, наконец, радиокаротаж.

Пожалуй, нигде так полно не применяется радиоактивный каротаж, как при изучении нефтяных месторождений. Ведь самое большое количество глубоких скважин бурится именно при поисках и добыче нефти и газа, а поднимать керн из глубоких скважин долго, хлопотно и дорого. Так, в США в течение только 1957 года было пробурено свыше 200 скважин глубиной более 4600 м. Все эти скважины бурились без отбора керн. Разрез изучался методами различного вида каротажа, и в том числе радиоактивного.

При проведении радиоактивного каротажа применяются нейтронный каротаж, гамма-каротаж, гамма-гамма-каротаж, нейтронный гамма-каротаж и др. В скважину, закрепленную обсадными трубами, опускаются малогабаритные генераторы нейтронов или возбудители гамма-излучения. Гамма-излучение по-разному реагирует на различные породы, которые проходит возбудитель излучения вслед за буром, и полученные сведения передают на поверхность земли. А так как показания этих приборов для той или иной породы уже известны геологам, то им остается только расшифровать показания механического счетчика при возбудителе гамма-излучений. При проведении нейтронного каротажа измеряются вторичные гамма-излучения, которые возникают при опускании в скважину источника нейтронного излучения. Источник соединен с ионизационной камерой. Нейтроны, идущие от источника, проникают внутрь ядер атомов проходимых скважиной пород и вызывают распад ядер, сопровождаемый гамма-излучением, регистрируемым ионизационной камерой и счетчиком. Таким образом, при радиокаротаже изучается геологический разрез скважин без извлечения на поверхность горных пород, что значительно удешевляет и ускоряет процесс разведки месторождений.

Для изучения скважин методами радиоактивного каротажа сейчас применяется свыше 25 различных изотопов: кобальт-60, иридий-192, йод-131 и многие другие.

Большое значение имеют изотопные методы при исследованиях нефтяных и газовых месторождений. При разработке этих месторождений особенно важно знать о степени пори-

стости пород. Оказывается, пористость в ряде случаев лучше всего изучать изотопными методами. Не менее важно выяснить, на каком участке пористые породы насыщены нефтью, а на каком водой, где они контактируют и как и куда передвигается вода. Для этой цели используются нейтронные методы, с помощью которых по контрольным свкажинам следят за продвижением воды.

Сущность метода сводится к измерению гамма-излучения, искусственно вызываемого бомбардировкой пород нейтронами. Так как водород является замедлителем нейтронов, то наличие воды и нефти легко регистрируется прибором, опускаемым в скважину. Пористые водоносные пласты будут отмечаться максимумом гамма-излучения. Когда прибор будет проходить зону пористых нефтеносных пород, то характер гамма-излучения становится иным.

При исследовании других полезных ископаемых (металлических и неметаллических) применяются более или менее однотипные способы изотопных исследований. Здесь надо различать методы, которыми геологи пользуются при полевых работах, и методы, применяемые при исследованиях вещества в камеральный период, когда, возвратившись с поля, геологи обрабатывают собранный материал, пишут отчеты, ведут лабораторные исследования.

Профессором Института геофизики Уральского филиала Академии наук СССР Ю. И. Булашевичем совместно со старшим научным сотрудником этого же института Воскобойниковым разработан эффективный метод гамма-гамма-каротажа для изучения угольных месторождений. При каротировании скважин обычными методами электрокаротажа многие угольные пласты не улавливались. Булашевич и Воскобойников, применив гамма-гамма-каротаж параллельно с электрокаротажем, добились полной характеристики разреза и таким образом уловили те пласты угля, которые пропускались при обычных методах электрокаротажа.

В настоящее время этими же учеными разработаны методы применения радиоактивного каротажа при изучении полиметаллических месторождений. Опыты, проведенные ими в Казахстане, дали положительные результаты, особенно при исследованиях медных, медно-цинковых, медно-свинцовых и других полиметаллических месторождений.

К камеральным методам изучения полезных ископаемых следует отнести и автораддиографию.

Автораддиография — это исследование веществ с помощью фотометодов. На фотопластинках радиоактивные минералы оставляют свой след, что позволяет вести количественный учет этих минералов.

Недавно в печати сообщалось, что некоторые элементы, трудно поддающиеся изучению (такие, как рубидий, цезий

и пр.), хорошо определяются с помощью нейтронноактивационных методов, по количеству радиоактивных продуктов, возникающих при нейтронном облучении вещества. Точность определения при этом достигается иногда более высокая, чем при спектральном анализе.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Мы проследили в общих чертах современные пути развития новой науки — ядерной геологии. Родившись в недрах геохимии, эта наука оказалась в состоянии с помощью новых методов решать многие теоретические вопросы и производственные задачи современной геологии. В числе важнейших проблем в ядерной геологии можно назвать: выявление новых свойств геосфер Земли, выяснение возраста Земли и космических тел, проблемы зарождения и эволюции жизни на Земле, происхождения планет и звездных миров, изучение динамики геологических процессов, поиски и исследование разнообразных полезных ископаемых. И хотя все эти проблемы изучались различными разделами геологии, ядерная геология поставила их по-новому и наметила пути решения кардинальных вопросов современной геологии. Этому способствовало овладение новой группой специфических методов, свойственных только этой науке.

На очереди много новых тем, связанных и с разработкой новых методов и с постановкой новых научно-практических тем.

Методы ядерной геологии помогут наметить пути разрешения новых научных проблем из многочисленных разделов геологии, не затронутых в данной очерке. По самым скромным подсчетам, современная геологическая наука включает более ста двадцати самостоятельных дисциплин. В каждой из этих дисциплин есть свой специфический круг вопросов, ответить на которые в кратком очерке было невозможно.

ЛИТЕРАТУРА

- Аладьев И. И. (ред.). Применение атомной энергии в мирных целях. Изд-во АН СССР, 1956.
- Бурксер Е. С. Как определяется возраст горных пород и Земли. АН УССР, 1954.
- Войткевич Г. В. Проблемы радиогеологии М., Госгеолтехиздат, 1962.
- Греевский Э. Я. и Шапиро Н. М. Современные вопросы радиобиологии. М., АН СССР, 1957.
- Дирак П. Электроны и вакуум. Изд-во «Знание», 1957, серия VIII, № 37.
- Красовский В. И. Исследования верхней атмосферы с помощью искусственных спутников и ракет. Изд-во «Знание», 1958, серия VIII, выпуск II.
- Малахов А. А. Каменные документы. Свердловск, 1957.
- Малахов А. А. Новеллы о камне. Свердловск, 1960.
- Ратников Е. Ф. Семь источников энергии. Свердловск, 1960.
- Ржонсницкий Б. Н. и Гендельман Е. И. Атомная энергия и ее применение в мирных целях. Л., 1955.
- Федоров Е. К. Научные исследования с помощью ракет и искусственных спутников Земли. Изд-во «Знание», 1958, серия IV, № 21.
- Шкловский И. С. Новое в радиоастрономии. Изд-во «Знание», 1957, серия VIII, № 44.
- Юнг Р. Ярче тысячи солнц. М., Госатомиздат, 1961.

7 қол.