

И. Е. СТАРИК

# Возраст горных пород и земли

ИЗДАТЕЛЬСТВО  
**ЗНАНИЕ**

ГЕОЛОГИЯ И ГЕОГРАФИЯ

1961

СЕРИЯ XII

6

ВСЕСОЮЗНОЕ ОБЩЕСТВО  
ПО РАСПРОСТРАНЕНИЮ ПОЛИТИЧЕСКИХ И НАУЧНЫХ ЗНАНИЙ

---

Член-корреспондент АН СССР  
И. Е. СТАРИК

ВОЗРАСТ ГОРНЫХ ПОРОД  
И ЗЕМЛИ  
(ПО РАДИОАКТИВНЫМ ДАННЫМ)

ИЗДАТЕЛЬСТВО «ЗНАНИЕ»

---

Москва

1961

Сколько лет Земле? Как узнали ее возраст? Какими для этого пользовались методами? Что рассказывают горные породы? На все эти интересные вопросы читатель найдет ответ в данной брошюре.

## СОДЕРЖАНИЕ

Стр.

Введение . . . . .	3
Геологические методы определения возраста . . . . .	4
Сущность радиоактивных методов определения возраста . . . . .	9
Свинцовый метод определения возраста . . . . .	16
Гелиевый метод определения возраста . . . . .	19
Аргоновый и стронциевый метод определения возраста . . . . .	19
Советская шкала геологического времени . . . . .	21
Возраст Земли и метеоритов . . . . .	22
Возраст относительно молодых природных образований . . . . .	27
Заключение . . . . .	30

Автор  
Иосиф Евсеевич Старик

Редактор Н. П. Смирнова  
Техн. редактор А. С. Назарова

Корректор Н. Н. Огородникова  
Обложка художника И. А. Родионова

A02816. Подписано к печати 3/IV 1961 г. Тираж 17 000 экз. Изд. № 70.  
Бумага 60×92<sup>1</sup>/<sub>16</sub> — 1,0 бум. л. = 2,0 печ. л. Учетно-изд. 1,95 л. Зак. 870.  
Цена 6 коп.

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

---

---

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время мысли всех советских людей, в том числе и ученых, направлены на решение вопросов, связанных с построением коммунистического общества. В результате выполнения семилетнего плана будет сделан решающий шаг в создании материально-сырьевой базы коммунизма.

Развитие народного хозяйства требует создания мощной сырьевой базы, а для успешных поисков полезных ископаемых прежде всего необходимо иметь правильное представление о времени ранее происходивших геологических процессов, требуется знать возраст пород. Поэтому не удивительно, что с ранних периодов развития человечества существовали попытки найти методы, позволяющие оценить время существования земли в целом и составляющих земную кору отдельных пород.

Конец XIX века ознаменовался великим событием — открытием радиоактивности. Это явление, сущность которого состоит в «самопроизвольном» превращении одних атомов в другие, сопровождающееся выделением большого количества энергии в виде различного рода излучений, играет в настоящее время чрезвычайно важную роль в нашей жизни.

Обычно открытие радиоактивности мы связываем главным образом с использованием энергии атомного ядра. Но значение радиоактивности не исчерпывается возможностью использования атомной энергии. Не меньшее значение имеет открытие радиоактивности в связи с появившимся новым методом «меченых» атомов, с успехом приложимого при решении многих важных вопросов науки и техники, решение которых ранее было недоступно никаким другим методам. В этом отношении значение радиоактивности трудно переоценить.

Есть целый ряд областей биологии и медицины, физики и химии, сельского хозяйства, в которых только теперь мы

---

<sup>1</sup> Превращение без внешнего воздействия.

впервые можем найти путь к решению чрезвычайно существенных и важных теоретических и практических вопросов. К числу таких вопросов относится и проблема определения возраста горных пород и Земли.

Вся наша жизнь, все явления и процессы живой и неживой природы происходят во времени. Не удивительно, что вопрос времени интересовал человечество с древнейших времен, на самых ранних этапах развития сознания у человека. С одной стороны, этот интерес возник из необходимости производить измерения времени в повседневной практической деятельности. С другой стороны, этот интерес возник из попытки объяснить окружающий мир. Человека всегда интересовал вопрос о том, как возник окружающий нас мир, было ли его начало и будет ли его конец, когда и как была создана Земля, сколько времени светит Солнце и как долго будет существовать окружающая нас природа. Для нас же вопрос установления времени существования Земли представляет не только познавательный интерес. Проблемы определения возраста Земли, установления абсолютного возраста горных пород приобрели в настоящее время большое практическое значение.

Для развития теоретической и практической геологии необходимо знание истинных масштабов времени, всей истории Земли и отдельных геологических событий, таких, как внедрение интрузий, образование рудных месторождений и осадочных пород, явление метаморфизма руд и пород и т. д.

Геологам при поисках различных полезных ископаемых важно знать возраст тех или иных пород, так как только при установлении истории образования горных пород мы можем правильно подойти к оценке возможности нахождения месторождений полезных ископаемых. Для всех геологических построений геолог прежде всего должен знать возраст тех пород, которые он исследует, он должен хорошо знать геологическую историю Земли.

Для развития теории происхождения Земли и для установления связи нашей планеты с другими космическими телами знание возраста Земли имеет также решающее значение.

Как же развивались наши представления о возрасте Земли и горных пород, какие методы позволяют решить эти вопросы?

## ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВОЗРАСТА

Первые сведения о возрасте Земли связаны с религиозными представлениями, согласно которым мир был создан по божественной воле в очень короткий срок. В библии указывается, что мир был сотворен в шесть дней и с того времени прошло 7469 лет. Все эти религиозные представления не имеют

ничего общего с научным подходом к разрешению вопроса о происхождении и возрасте Земли. Несмотря на это, они существовали долгое время. Это и понятно, жестокий религиозный гнет, преследования за всякое мнение, идущее в разрез с религиозным учением, — все это надолго задержало развитие науки о Земле. Лишь в XVIII веке были сделаны первые научные попытки установить возраст Земли. Для определения возраста потребовалось найти такой процесс, который в течение длительного времени существования Земли протекал бы с постоянной скоростью.

Действительно, чтобы измерять промежутки времени, человек должен наблюдать какой-либо процесс, протекающий с постоянной скоростью. В наших часах для измерения времени мы используем равномерное колебание маятника. До изобретения пружинных и маятниковых часов люди пользовались водяными и песочными часами, в которых для измерения времени использовалось равномерное пересыпание песка или переливание воды из верхнего сосуда в нижний. И в солнечных часах для измерения времени также используется процесс, идущий с постоянной скоростью, — процесс равномерного вращения Земли вокруг своей оси. Очевидно, что чем более равномерно протекает процесс, чем меньше он зависит от воздействия внешних условий, тем с большей точностью можно произвести определение времени.

В качестве такого процесса, протекающего с постоянной скоростью, по которому можно произвести вычисление возраста Земли, известный французский естествоиспытатель Бюффон предложил использовать процесс остывания Земли. В своей «Естественной истории» Бюффон выдвинул гипотезу происхождения Земли в результате столкновения какого-то космического тела с Солнцем. При столкновении от Солнца отделилась какая-то часть, которая, распавшись на куски, дала начало всем планетам солнечной системы. Если принять, что остывание Земли происходило с постоянной скоростью, то можно вычислить, сколько потребовалось времени, чтобы земной шар остыл до современной температуры. Для вычисления времени Бюффон производил опыты с раскаленными шарами, наблюдая за скоростью их остывания и проводя аналогию между скоростью их остывания и скоростью остывания Земли. Вычисленный им возраст оказался равным 82 тыс. лет. Хотя теперь мы видим ошибочность представлений Бюффона и недостатки расчета, сделанного им, его подход к решению вопроса о происхождении и возрасте Земли сыграл свою положительную роль, так как явился одной из первых попыток объяснения происхождения Земли на научной основе. Полученная Бюффоном величина возраста противоречила религиозным представлениям, и его выводы, идущие в разрез с этими представлениями, были осуждены реак-

ционной частью Парижского университета, а он сам был вынужден отречься от своих взглядов.

Вскоре в Англии аналогичные исследования провел лорд Кельвин, который получил величины возраста порядка 20 млн. лет. Возраст Земли, вычисленный на основании рассмотренных представлений, не может считаться правильным, так как неправильно был выбран процесс, на основании которого производилось вычисление времени. Действительно, в настоящее время мы знаем, что в земной коре присутствуют радиоактивные элементы. Хотя их количество в Земле очень незначительно, расчеты показывают, что количество тепла, выделяемого при их распаде, очень велико. Особенно значительным было влияние распада радиоэлементов на тепловой баланс Земли в начальной стадии ее развития, так как тогда была во много раз больше концентрация радиоэлементов с относительно малой продолжительностью жизни. В настоящее время большая часть этих радиоэлементов распалась, и поэтому количество тепла, выделяемого благодаря радиоактивному распаду, значительно уменьшилось. В далеком прошлом, вероятно, происходило разогревание Земли, а не остывание.

Был применен и другой способ вычисления возраста Земли.

Современник Ньютона, английский астроном Галлей в 1715 году сделал попытку определить возраст Земли по содержанию солей в океане. Подземные и поверхностные воды, питающие реки, частично растворяют и выщелачивают почвы и горные породы. Благодаря круговороту воды содержание солей в океане со временем должно увеличиваться. Если процесс приноса солей в океан равномерный, то, установив общее содержание солей в океанической воде и количество солей, ежегодно выносимое речными водами, можно произвести вычисление возраста Земли.

Однако этот процесс протекает не с постоянной скоростью и, кроме того, он не может быть положен в основу вычисления возраста Земли, так как сами океаны образовались после формирования Земли. Кроме того, за длительное время существования Земли неоднократно менялся климат, а вместе с климатическими изменениями менялась скорость круговорота воды и количество солей, ежегодно поступающих в океан. Часть вносимых с речными водами солей уносилась на дно вместе с донными отложениями, из которых в дальнейшем образовались осадочные породы. После отступления моря эти породы обнажаются и снова подвергаются действию природных вод. Поэтому содержание солей в океане отражает не столько время, прошедшее с момента возникновения океанов, сколько те физико-химические процессы, которые происходят на поверхности Земли при участии природных вод.

Более близкие к величинам возраста, принимаемым в настоящее время, данные были получены при определении возраста по скорости образования морских отложений. Речные воды, помимо солей, вносят в океан большие количества взвешенных частиц песка, глины, которые отлагаются на океаническое дно. Оказалось, что общая толщина осадочных пород, образовавшихся за время существования Земли, составляет около 100 км. Если скорость образования осадков постоянна, то на основании темпов седиментации можно вычислить время образования всей толщи осадочных пород и тем самым определить время образования Земли. Для этого достаточно разделить величину мощности слоя осадков на скорость их образования, выраженную в сантиметрах за год. Произведенные различными исследованиями вычисления дали величины возраста от 100 до 1000 млн. лет. Большинство исследователей склонялось к 100 млн. лет.

Главная неопределенность этого метода состоит в том, что мы не можем быть уверенными в постоянстве скорости образования осадков в давние времена. Кроме того, трудно предположить, что скорость процесса накопления осадков в прошедшие времена была та же самая, что и в современных условиях. Мы знаем, что плавное накопление осадков сменялось более бурным, обусловленным резким изменением вулканической деятельности, в значительной степени менялся снос эрозионного материала. Уже образованные осадочные породы подвергались переплавлению и снова размывались природными водами. Все это указывает на значительные изменения скорости осадкообразования в прошлом. Следовательно, и этот процесс не может быть положен в основу вычисления возраста Земли.

Определение возраста Земли в значительной степени зависит от принятой гипотезы ее происхождения и развития.

Не вдаваясь в рассмотрение различных гипотез образования Земли, отметим лишь, что в настоящее время большинство ученых придерживается той точки зрения, что планеты образовались из газопылевого облака, находившегося в космическом пространстве, и были первоначально холодными. Нагревание осуществлялось за счет выделения тепла при распаде радиоактивных элементов, которых в период образования Земли было несравненно больше, чем сейчас. Началось перераспределение вещества, слагающего Землю, и разделение его по удельному весу. Это привело к расслаиванию земного шара и образованию так называемых геосфер. Средняя плотность земного шара равна  $5,5 \text{ г/см}^3$ , а средняя плотность верхней части земной коры, доступной нашему непосредственному изучению, не превышает  $3,0 \text{ г/см}^3$ . Плотность же ядра Земли составляет  $9\text{—}10 \text{ г/см}^3$ .

Предполагается, что в результате громадных давлений в



глубинных сферах Земли вещество также находится в особом пластическом состоянии. Атомы различных элементов расположены там гораздо ближе друг к другу, чем в той же совокупности элементов, наблюдаемых нами на поверхности Земли. Это происходит за счет сжатия электронной оболочки атомов, потери части электронов и превращения всей массы самых различных элементов в особое «металлизированное» состояние.

Обычно принимается, что независимо от того, как образовалась Земля, она была в какое-то время целиком или частично расплавлена и затем происходило ее затвердевание.

Прошло несколько миллиардов лет, и на Земле появилась жизнь. Появление жизни представляется пока также неразрешенной загадкой. Однако в настоящее время известно, что жизнь зародилась более миллиарда лет назад.

Геологи могут судить о различных формах жизни по находимым остаткам (окаменелостям). Эти растительные и животные остатки были погребены в толщах осадочных пород, и по ним можно судить о различных эпохах жизни Земли. Создана целая наука о последовательности смен форм жизни на Земле, названная палеонтологией. Осадочные породы, в которых хотя не содержатся окаменелости живых организмов, а есть только толщи графита и известняков, позволяют думать о том, что это является доказательством появления жизни. Эти времена, когда образовывались такие породы, называются археозойскими, т. е. время первоначальной жизни. Следующие по времени породы, содержащие уже остатки растений и животных, называют породами протерозойской эры, т. е. эры зари жизни. Следующая по времени палеозойская эра (эра древней жизни), затем мезозойская эра (эра средней жизни) и, наконец, кайнозойская эра (эра новой жизни), в конце которой появляется человек. Каждая эра подразделяется на периоды (см. табл. 1), для каждого периода характерны свои особые формы жизни.

Т а б л и ц а 1

Э р а	Период
1. Архейская	Кембрийский Ордовикский Силурийский Девонский Каменноугольный Пермский
2. Протерозойская	
3. Палеозойская	
4. Мезозойская	Триасовый Юрский Меловой
5. Кайнозойская	Третичный Четвертичный

Такая хронологическая таблица дает понятие только о последовательности отдельных промежутков времени (например, за девонским периодом следует каменноугольный, затем пермский и т. д.), но не дает представления о времени, выраженном в годах.

Процессы горообразования также происходили на Земле неодновременно. Была установлена последовательность образования различных горных районов, так называемые эпохи горообразования. Эти эпохи складчатости связываются с эрами и периодами формирования жизни на Земле. Самая древняя эпоха горообразования нижнеархейская, самая молодая — альпийская.

В дальнейшем мы вернемся к эрам и эпохам и покажем, как в настоящее время наука может решить вопрос о времени, к которому относятся та или иная эра или эпоха, и о продолжительности этих событий, выраженных в годах.

Кроме рассмотренных методов, было сделано еще немало попыток определить возраст Земли геологическими и геохимическими методами. Однако все они не привели к точным данным и не разрешили проблему установления возраста Земли. Только открытие радиоактивности дало в руки ученых действительно надежный метод определения возраста различных природных образований, в том числе возраста Земли.

### СУЩНОСТЬ РАДИОАКТИВНЫХ МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВОЗРАСТА

Когда мы утверждаем при рассмотрении радиоактивных методов определения возраста пород, что процесс радиоактивного распада протекает с постоянной скоростью, т. е. в единицу времени распадается всегда строго постоянная часть наличных атомов, то это означает, что в условиях существования Земли скорость радиоактивного распада практически не зависела от изменения этих условий. Это было показано рядом специально поставленных опытов, в которых производилось выяснение влияния различных факторов на скорость радиоактивного распада. В этих опытах температура изменялась от  $-190^{\circ}$  до  $+2500^{\circ}$ , давление доводилось до нескольких тысяч атмосфер, в 20 000 раз увеличивалось ускорение силы тяжести, изучалось влияние очень сильных электрических и магнитных полей, влияние интенсивных источников излучения. Все полученные результаты с несомненностью говорят о том, что скорость радиоактивного распада остается при этом постоянной, и, следовательно, по радиоактивному распаду можно производить определение времени. Возможно, что при высоких температурах порядка миллионов градусов скорость распада может измениться, но в истории Земли таких температур не могло быть.

Впервые в 1896 году французский физик Анри Беккерель обнаружил, что фотографическая пластинка чернеет от солей урана, даже в том случае, когда соли урана находились на пластинке, завернутой в бумагу. Этот факт Беккерель объяснил тем, что соли урана испускают ранее неизвестные лучи, способные проникать через бумагу и воздействовать на фотографическую пластинку. Так зародилось учение о радиоактивности.

Впоследствии выяснилось, что некоторые урановые минералы, особенно урановая смолка, во много раз активнее, чем уран. Эти необычайные явления привлекли внимание ученых во многих странах и толкнули их на поиски новых радиоактивных элементов, на тщательное изучение самого явления радиоактивности и на изучение нахождения радиоактивных элементов в природе.

Выяснилось, что распад радиоактивных элементов, т. е. превращение одних атомов в другие сопровождается выделением большого количества энергии в виде различного рода излучений. Существует три вида лучей:  $\alpha$ -лучи, представляющие собой поток положительно заряженных ядер гелия,  $\beta$ -лучи, представляющие собой поток электронов, масса которых почти в 2000 раз меньше массы атома водорода, и  $\gamma$ -лучи — излучение, подобное рентгеновскому, но имеющие еще более короткую длину волны и потому еще более проникающие.

Детальные исследования показали, что скорость радиоактивного распада, а вместе с тем и средняя продолжительность существования каждого радиоактивного элемента является постоянной величиной. Каждому радиоактивному элементу присуща своя средняя продолжительность жизни, подобно тому, как мы говорим о средней продолжительности жизни человека, но с тем отличием, что средняя продолжительность жизни человека в большей степени зависит от условий жизни, а средняя продолжительность жизни радиоэлементов, как мы уже указывали выше, не зависит от изменения условий.

Большей частью скорость распада радиоэлементов выражают через период полураспада, т. е. через то время, которое необходимо, чтобы число первоначально присутствовавших атомов какого-либо радиоэлемента уменьшилось наполовину.

В природе были найдены радиоэлементы с чрезвычайно большими периодами полураспада, измеряемыми миллиардами лет, и наряду с ними очень малыми, у которых период полураспада измеряется тысячными и миллионными долями секунды. Объяснение существования радиоэлементов, время жизни которых чрезвычайно мало по сравнению со временем существования Земли, было дано Резерфордом и Содди, которые предположили, что эти короткоживущие элементы при-

Большинство встречающихся в природе радиоактивных элементов принадлежит к членам трех радиоактивных семейств (см. рис. 1, 2, 3).

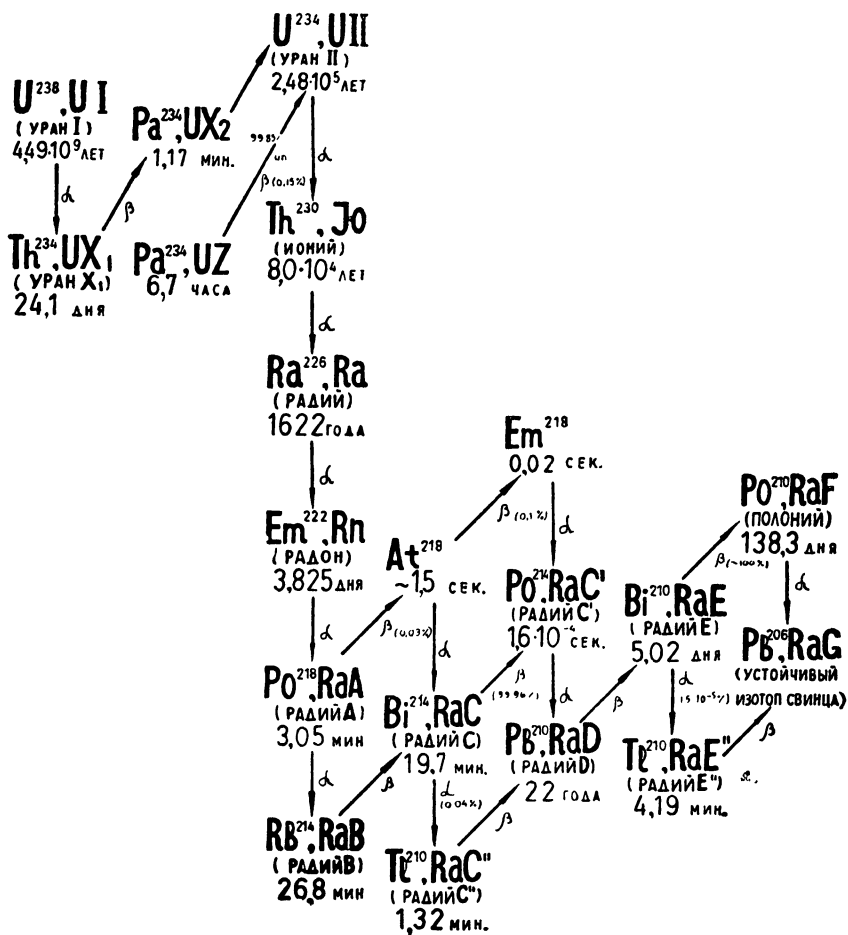


Рис. 1. Радиоактивное семейство урана.

Известно, что природный уран состоит из двух радиоактивных, долгоживущих изотопов — урана 238 и урана 235. Изотопами мы называем группы атомов, отличающиеся друг от друга только массами, но имеющими совершенно одинаковые химические свойства. Каждый из изотопов урана имеет свои цепочки распада. Так, уран 238 при распаде образует сначала изотоп тория с массой 234, который в свою очередь

также распадается. Пройдя длинную цепь превращений, атом урана 238 постепенно превращается в свинец с массой 206. На рисунке 1 представлен этот ряд распада урана. При распаде урана 238 выделяются  $\alpha$ -частицы. При последовательном распаде ядер урана 238 до стабильного ядра свинца выделяется 8 альфа-частиц. Мы ранее указывали, что альфа-частицы это положительно заряженные ядра гелия. Таким образом, схематически процесс радиоактивного распада урана 238 можно представить следующим образом:  $U^{238} \rightarrow Pb^{206} + 8\alpha$ .

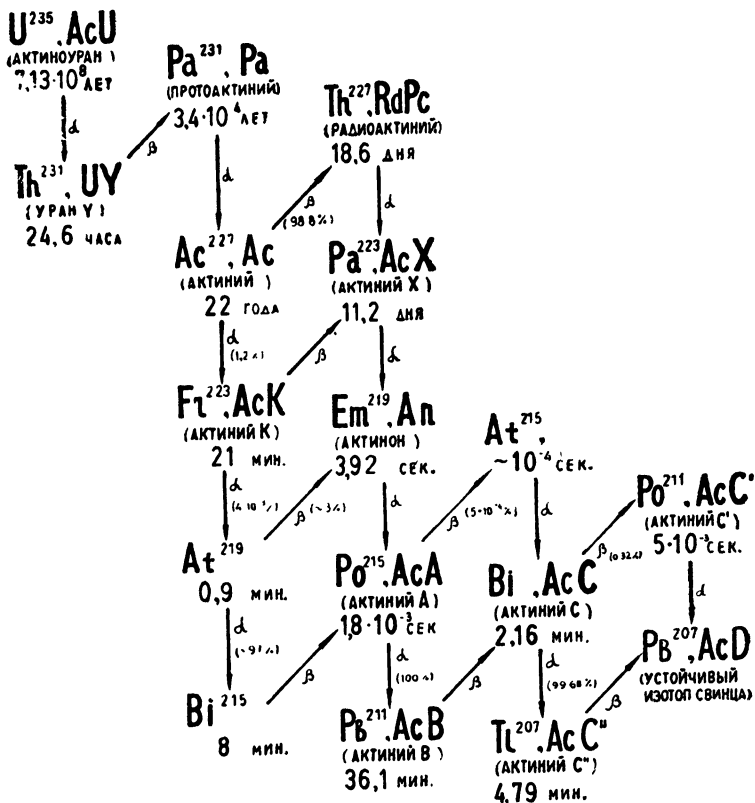


Рис. 2. Радиоактивное семейство актиноурана.

Аналогично происходит распад урана 235, который часто называется актиноураном. Отличие заключается в том, что скорость распада урана 235 больше, чем урана 238, и при распаде образуется другая цепочка изотопов. Конечным продуктом распада урана 235 является также изотоп свинца, но с массой 207. При распаде урана 235 образуется 7 альфа-частиц.

Природный торий состоит практически из одного изотопа

с массой 232. Торий образует ториевое семейство, конечным продуктом распада которого является свинец с массой 208; при распаде атома тория до конечного продукта распада выделяется 6 альфа-частиц. Таким образом, мы видим, что при радиоактивном распаде урана, актиноурана и тория образуются различные изотопы свинца, а также некоторое количество гелия.

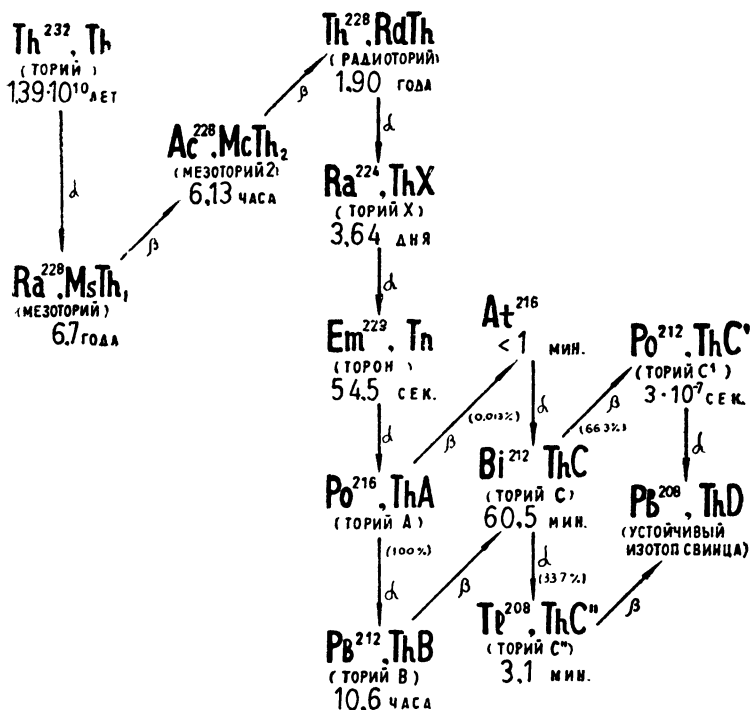


Рис 3 Радиоактивное семейство тория

Кроме радиоактивных семейств, в природе встречаются одиночные радиоактивные изотопы, которые при своем распаде сразу же переходят в стабильные, конечные продукты (табл. 2). Мы укажем на некоторые из таких одиночных изотопов, которые будут нас интересовать с точки зрения возможности установления по их распаду возраста различных природных образований. При распаде атомов калия 40 образуются атомы стабильного продукта — аргона с массой 40. В результате распада рубидия 87 возникают атомы стронция 87, в результате распада рения 187 образуются атомы осмия 187.

С момента открытия радиоактивности были начаты широкие исследования по определению содержания радиоэлементов во всей живой и неживой природе.

Изучение распространенности радиоэлементов в земных образованиях представляет самостоятельный интерес и, кроме того, важно для целей абсолютной геохронологии.

Т а б л и ц а 2

Естественные радиоактивные изотопы

Изотопы	Тип распада	Конечный продукт	Период полураспада (лет)
K <sup>40</sup>	β	Ca <sup>40</sup>	1,3 · 10 <sup>9</sup>
Rb <sup>87</sup>	к	A <sup>40</sup>	
Sm <sup>147</sup>	β	Sr <sup>87</sup>	6,1 · 10 <sup>10</sup>
Lu <sup>176</sup>	α	Nd <sup>143</sup>	1,4 · 10 <sup>11</sup>
Re <sup>187</sup>	β	Hf <sup>176</sup>	7,3 · 10 <sup>10</sup>
Th <sup>232</sup>	β	Os <sup>187</sup>	~ 10 <sup>11</sup>
U <sup>235</sup>	α и ряд	Pb <sup>208</sup>	1,4 · 10 <sup>10</sup>
U <sup>238</sup>	α и ряд	Pb <sup>207</sup>	7,1 · 10 <sup>8</sup>
	α и ряд	Pb <sup>206</sup>	4,5 · 10 <sup>9</sup>

За более чем полувековую историю исследований был накоплен огромный фактический материал по выяснению закономерностей распределения радиоактивных элементов в окружающей нас природе. Оказалось, что все вещества живой и неживой природы в какой-то мере обладают радиоактивностью (табл. 3), которая обусловлена присутствием в них тех или иных радиоактивных элементов.

Как установлено в настоящее время, горные породы имеют неодинаковое содержание радиоактивных элементов. Наиболее высокие концентрации наблюдаются в кислых изверженных породах, наименьшие — в основных и ультраосновных.

Но и в горных породах радиоактивные элементы распределены неравномерно.

В природе встречаются сильно радиоактивные минералы, содержащие значительные количества урана и тория и малоактивные. В таблице 4 приведены некоторые, наиболее типичные из высокордиоактивных минералов.

Однако следует отметить, что скопления таких минералов встречаются довольно редко.

Но как же произвести определение времени по радиоактивному распаду?

Допустим, что у нас имеется минерал, содержащий уран, и в этом минерале в момент его образования отсутствовали продукты его распада. С течением времени из урана начинают накапливаться продукты распада — изотопы свинца и гелий. Скорость распада урана и, следовательно, скорость накопления свинца нам хорошо известны, она неоднократно

определялась экспериментально. Значит, мы хорошо знаем, сколько атомов свинца образуется из одного грамма урана в год. Если определить содержание свинца и урана в минерале в настоящий момент, то легко можно узнать, сколько прошло времени с момента образования минерала. Для этого достаточно поделить содержание свинца на скорость его образования из урана, т. е. на количество атомов свинца, образующихся в течение года. Так, без прямого счета числа распадов атомов урана можно производить определение времени жизни минерала.

Таблица 3

	Ra $\text{г/г}$	U $\text{г/г}$	Th $\text{г/г}$	K $\text{г/г}$
Почва	$n \cdot 10^{-13}$	$n \cdot 10^{-7}$	$n \cdot 10^{-6}$	
Воды океанов	$1 \cdot 10^{-13} \text{ г/л}$	$3 \cdot 10^{-6} \text{ г/л}$	$2 \cdot 10^{-9} \text{ г/л}$	
Кислые породы	$1 \cdot 10^{-12}$	$3 \cdot 10^{-6}$	$12 \cdot 10^{-6}$	0,03
Средние »	$5 \cdot 10^{-13}$	$1,5 \cdot 10^{-6}$	$4,4 \cdot 10^{-6}$	0,011
Основные »	$2 \cdot 10^{-13}$	$0,6 \cdot 10^{-6}$	$3 \cdot 10^{-6}$	0,009
Ультраосновные	$0,1 \cdot 10^{-13}$	$0,03 \cdot 10^{-6}$		
Каменные метеориты		$1 \cdot 10^{-7}$	$2 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-5}$
Железные метеориты		$1 \cdot 10^{-9}$	$1 \cdot 10^{-8}$	$3 \cdot 10^{-6}$

Горные породы представляют собой совокупность минералов. При определении возраста минерала, входящего в состав породы, мы можем установить возраст этой породы, так как включенный в нее минерал был образован одновременно с ней.

Таблица 4  
Распространенность урана и тория в минералах

Минералы	U %	Th %
Уранинит	60—88	0—3
Смолка	70—85	0—2
Торианит	4—13	70—80
Браннерит	37	4
Торит	1	63
Монацит	0,7	до 17—20

Этот метод, используемый для определения возраста накопление свинца в минералах, получил название свинцового метода. Первые определения этим методом были сделаны уже через 5 лет после предложения Пьера Кюри и Резерфорда использовать процесс радиоактивного распада для целей геохронологии.



## Свинцовый метод определения возраста

**В** 1907 году Болтвуд опубликовал первую таблицу геологических возрастов, основанную на измерении отношения свинца к урану и торию в радиоактивных минералах.

Полученные Болтвудом данные были недостаточно точны, но они показали, что отношение свинца к урану и торию действительно характеризует возраст исследованных минералов. Вместе с тем эти первые определения были скептически встречены большинством геологов, так как цифры возраста от 250 до 1320 млн. лет, полученные при анализе, противоречили существующим в то время геологическим представлениям.

С тех пор метод был детально разработан. Уточнялись константы и схемы распада, были развиты новые методы анализа, позволяющие с большой точностью определить ничтожные количества элементов. Теперь уже ни у кого не вызывает сомнения правильность получаемых величин возраста, так как выяснились условия и возможности применения радиоактивных методов определения возраста.

Было установлено, что для определения возраста минералов свинцовым методом подходят не все минералы, содержащие уран и торий. Оказалось, что необходимо подбирать такие минералы, в которые не входил свинец из расплава, из которого образовался данный минерал. Этот свинец, попадающий в минерал в момент его образования, называют обыкновенным свинцом. Кроме того, дальнейшие исследования показали, что долю этого свинца в минерале можно учесть. Оказалось, что для введения поправки на присутствующий в минерале при его образовании обыкновенный свинец необходимо знать изотопный состав свинца, выделенный из минерала. Определение изотопного состава свинца проводится на специальном приборе — масспектрометре, позволяющем с большой точностью изучить изотопный состав свинца.

Но не только присутствие обыкновенного свинца, если его не учесть, может приводить к неправильным результатам. Выяснилось, что исследуемый образец должен иметь хорошую сохранность, ибо все вторичные процессы, приводящие к приносу и выносу свинца или урана, могут исказить величину возраста.

Каждый минерал может подвергаться действию природных вод, которые могут частично приносить или выносить уран или свинец и тем самым нарушать отношение свинца к урану, обусловленное только временем жизни минерала. В таком случае вычисленный возраст оказывается неправильным: при потере свинца вычисленный возраст будет меньше истинного, а при потере урана или тория возраст будет больше истинного.

Вопросы привноса и выноса урана и его продуктов распада были детально изучены, и в настоящее время мы умеем правильно определять степень сохранности минералов. Существенно то, что, если мы исследуем образец минерала, имеющего хорошую сохранность, то имеется полная гарантия, что цифры возраста получаются правильными и никакие вторичные процессы не происходили. Но чтобы убедиться в этом, необходима проверка, которая может быть осуществлена следующим образом. В минералах обычно присутствуют одновременно уран, актино-уран и торий. За время существования минерала из этих радиоэлементов образуются продукты распада — изотопы свинца с различной массой. Из урана 238 образуется свинец 206, из урана 235 — свинец 207, а из тория — свинец 208. Возраст минералов можно вычислить по любому отношению: либо по отношению свинца 206 к урану 238, или по отношению свинца 207 к урану 235, или по отношению свинца 208 к торию. Кроме того, возраст минералов можно вычислять также по отношению изотопов свинца 207 к свинцу 206, так как скорость образования свинца 207 и свинца 206 различна и отношение свинца 206 к свинцу 207 зависит от времени.

Если полученные величины возраста довольно близко совпадают, то это может явиться хорошим доказательством того, что не имели место никакие вторичные процессы, которые могли исказить истинную величину вычисленного возраста. Действительно, скорости распада урана 235 и урана 238 различны, поэтому все вторичные процессы различным образом будут влиять на величину возраста, вычисленную по приведенным выше соотношениям. Если же цифры возраста, полученные по этим соотношениям, довольно близки, то это означает, что вторичные процессы отсутствовали.

Мы не случайно употребили выражение «довольно близки». Обычно на практике при определении возраста по различным отношениям изотопов свинца к урану и торию всегда наблюдается небольшое расхождение в полученных значениях. Рассмотрим в качестве примера некоторые данные по возрасту монацитов (ториевых минералов), вычисленные по различным отношениям и приведенные в таблице 5. Мы видим, что схождение значений возраста в некоторых случаях лучше, в других несколько хуже, но все они близки к вполне определенным величинам. Для монацитов, содержащих преимущественно торий и его продукты распада, наиболее точные результаты получаются по отношению ториевого свинца к торию ( $\text{Pb}^{208}/\text{Th}^{232}$ ).

При определении возраста древних минералов, имеющих возраст около 2 млрд. лет, при хорошей точности расхождение в результатах может составлять 5%, и нас не должно смущать, что эти 5% соответствуют 200 млн. лет.

Если возраст горной породы установлен определениями по нескольким минералам и при этом получились близкие значения, то в этом случае у нас может быть полная уверенность в правильности полученных величин.

Таблица 5

Радиохимические данные, изотопный состав свинца и возраст монацитов

Содержание (%)			Изотопный состав свинца				Возраст (млн. лет)			
Pb	U	Th	204	206	207	208	$\frac{207}{206}$	$\frac{206}{238}$	$\frac{207}{235}$	$\frac{208}{232}$
0,78	0,132	6,02	0,26	11,57	5,52	100	2920	2500	2720	2120
0,805	0,134	8,64	0,036	6,44	1,12	100	1640	2130	1880	1830
0,97	0,63	6,97	0,24	33,1	8,97	100	2620	2240	2450	2050
0,80	0,62	6,88	0,16	34,4	5,92	100	1800	1950	1860	1680
0,75	0,26	7,28	0,01	11,38	1,79	100	2450	1900	2100	1950
0,42	0,202	3,66	0,15	18,00	3,70	100	1470	1780	1635	1900

Выше упоминалась возможность захвата обыкновенного свинца урановыми или ториевыми минералами в момент их образования из магматического расплава. В некоторых случаях минерал может захватить настолько большое количество обыкновенного свинца, что для вычисления возраста необходимо вводить поправку на этот свинец. Поправка обычно вводится по изотопу свинца  $Pb^{204}$ , не являющегося членом ни одного из радиоактивных рядов и, следовательно, не накапливающегося в радиоактивном минерале. Присутствие этого изотопа свинца в урановом или ториевом минерале говорит о загрязненности данного минерала обыкновенным свинцом. Обыкновенный земной свинец состоит из смеси изотопов  $Pb^{204}$ ,  $Pb^{206}$ ,  $Pb^{207}$  и  $Pb^{208}$ , причем  $Pb^{204}$  не образуется в земных условиях.

Распространенность этого изотопа для обыкновенного земного свинца в смеси их изотопов составляет 1,2—1,5%. Такое колебание обусловлено различным возрастом исследуемых рудных свинцов. Чем раньше свинцовая руда отделилась от своей материнской породы, тем больше доля  $Pb^{204}$  в смеси изотопов. Это объясняется тем, что изотопы свинца с массой 206, 207 и 208 постоянно образуются в земных условиях за счет распада урана и тория. Если свинцовая руда, в которой не содержится уран и торий, выделилась в какое-то время, то она запечатлела свинец с таким изотопным составом, который был характерен для ее материнской магмы. Для сопоставления и сравнения между собой анализов изотопного состава свинца полученные данные выражают в виде отношений  $Pb^{206}/Pb^{204}$ ,  $Pb^{207}/Pb^{204}$ ,  $Pb^{208}/Pb^{204}$ . Понятно, что чем выше это отношение, тем больше добавка радиогенного свинца и меньше возраст руды.

## Гелиевый метод определения возраста

Выше мы упоминали о том, что при радиоактивном распаде ядер урана и тория образуются ядра гелия. Оказалось, что в некоторых минералах с плотной кристаллической структурой весь гелий, накопившийся в результате распада урана и тория, хорошо сохраняется и за время существования минерала практически не теряется. Возраст таких минералов может быть установлен по его накоплению. Мы знаем количество гелия, образующегося при распаде одного грамма урана в год. Поэтому путем определения содержания урана и гелия в минерале мы можем вычислить возраст этого минерала. Для этого достаточно поделить величину количества гелия, накопившегося за время жизни минерала, на скорость его образования из урана. Этот метод получил название гелиевого. В настоящее время определение возраста гелиевым методом проводится в редких случаях в силу ограниченного количества минералов, хорошо сохраняющих гелий. Гораздо большее распространение получил так называемый калий-аргоновый метод, разработанный учеными Советского Союза.

## Аргоновый и стронциевый метод определения возраста

Ранее мы уже упоминали, что в природе помимо радиоэлементов, принадлежащих к радиоактивным семействам, существуют также так называемые одиночные радиоэлементы (см. табл. 2). В калиевых минералах в результате распада изотопа калия 40 образуется радиогенный аргон, накапливающийся за время жизни минерала в количествах, достаточных для его точного измерения. Если определить содержание калия и аргона в минерале и знать скорость образования аргона из калия, то можно вычислить возраст минерала и тем самым установить возраст породы, в которую входит исследуемый минерал.

Особый интерес представляет этот метод в связи с тем, что калиевые минералы более распространены в природе, чем минералы, содержащие уран и торий. В этом отношении калий-аргоновый метод имеет преимущества. При определении возраста по калий-аргоновому отношению необходимо также быть уверенным в правильности получаемых результатов. Естественно возник вопрос, будет ли удерживаться аргон, образующийся в результате распада калия в минерале в течение длительного времени, прошедшего с момента образования минерала. Экспериментальная проверка и проведенные опыты показали, что в слюдах аргон прочно удерживается и весь аргон накапливается в минерале так же, как свинец в урановых минералах. Хорошим доказательством применимости данного метода является следующее определение возраста. Были взяты два минерала из группы слюд — биотит и

мусковит из одного района, возраст которых был установлен свинцовым методом и показал величину 1800—1900 млн. лет. Пробы этих минералов были переданы в различные лаборатории по определению возраста для анализа. Результаты сделанных определений приведены в таблице 6.

Таблица 6

Результаты определения возраста эталонных проб в различных лабораториях СССР

Лаборатории	Биотит н.мм <sup>3</sup> /г	Мусковит н.мм <sup>3</sup> /г
1	1805	1820
2	1800	1800
3	1800	1800
4	1810	1795
5	1840	1840
Пределы возраста	1800—1840	1795—1840

Мы видим, что во всех лабораториях были получены величины, показывающие превосходное схождение результатов. Кроме того, возраст этих же пород был определен свинцовым методом и были получены одинаковые цифры возраста. Это с несомненностью доказало правильность применяемых методов.

Кроме аргонового метода, в последние годы был разработан также рубидиево-стронциевый метод, использующий накопление стронция из радиоактивного изотопа рубидия 87. Если знать скорость распада рубидия и определить содержание рубидия и стронция в минерале, можно вычислить время, необходимое для накопления найденного количества стронция. Для определения возраста рубидиево-стронциевым методом в большинстве случаев пригодны те же калиевые минералы, возраст которых можно установить по соотношению аргона и калия. Это обстоятельство оказывается очень удобным, так как дает возможность производить определения возраста минералов двумя независимыми методами. Сопоставление результатов, полученных по тому и другому методу, помогает судить о правильности полученных цифр, на что указывает схождение или расхождение полученных значений возраста.

Совсем недавно были получены первые результаты определения возраста минералов ренийевым методом. Для определения возраста минералов этим методом используется накопление осмия 187 в минералах, содержащих рений. Однако этот метод не получил большого распространения, так как в природе редко встречаются минералы, богатые рением.

В результате больших работ по определению возраста различных горных пород радиоактивными методами были получены многочисленные данные по абсолютной геохронологии горных пород различных геологических эпох.

### СОВЕТСКАЯ ШКАЛА ГЕОЛОГИЧЕСКОГО ВРЕМЕНИ

Как мы уже говорили, по ископаемым остаткам была составлена шкала относительного времени. Однако с помощью этой шкалы нельзя установить абсолютное время, прошедшее с момента образования породы, нельзя установить длительность геологических эпох. Изучение возраста пород по радиоактивным данным позволяет существенно дополнить стратиграфическое построение.

Если вернуться к истории вопроса о возрасте Земли, то можно заметить, что в середине XIX века начался новый этап развития геологии, период постепенного осознания громадной продолжительности геологического времени. Однако правильное понимание несоизмеримости привычных для человека интервалов времени сравнительно с длительностью геологических процессов далеко еще не означало хотя бы приближенной количественной оценки времени существования Земли или отдельных отрезков этого времени. Только после появления радиоактивных методов определения возраста минералов и горных пород стало возможным выразить эры и периоды в годах.

Английский ученый Холмс в 1911 году начал свои многолетние исследования по конструированию геологической шкалы. В то время определение возраста пород и минералов проводилось в основном с помощью гелиевого метода. Этот метод не дает, как уже указывалось, достоверных результатов, поэтому первые попытки Холмса были малоудачными. В конце 30-х годов началось бурное развитие других радиоактивных методов определения возраста и в 1948 году удалось составить шкалу, которая легла в основу всех дальнейших работ геологов и радиологов в этом направлении. Комиссия АН СССР по определению абсолютного возраста геологических формаций провела большую работу в течение последних 10 лет по внесению опорных геологических точек и определению их возраста. Весной 1960 года была предложена шкала геологического времени, выраженная в миллионах лет на основе данных, полученных 20 лабораториями Советского Союза (табл. 7).

Это крупное достижение стало возможным благодаря тесному сотрудничеству радиологов и геологов, работающих в самых различных областях своих наук.

Радиоактивные методы, позволившие составить эту шкалу геологического времени, дали в наши руки возможность из-

Т а б л и ц а 7

**Геохронологическая шкала, принятая в СССР**

	Время начала периода (в млн. лет)	Длительность периода (в млн. лет)
Плейстоцен	1	1
Плиоцен	10	10
Миоцен	25	15
Оligоцен	40	15
Эоцен	70	30
Верхний мел	100	30
Нижний мел	130	30
Юра	175	45
Триас	215	40
Пермь	260	45
Карбон	310	50
Девон	390	80
Силур	410	20
Ордовик	470	60
Кембрий	560	90
Докембрий IV	1100—1200	600—700
Докембрий III	1200—1800	100—700
Докембрий II	2600—2700	800—1500
Докембрий I	3400—3500	700—900

мерять промежутки времени в далеком прошлом. Это означает, что в настоящее время мы можем количественно изучить геологические процессы, имевшие место в давно прошедшие эпохи. Мы можем узнать, в какое время происходили процессы горообразования и в какое время бурно развивалась вулканическая деятельность, узнать и те скорости, с какими происходили изменения в прошлом, можем узнать скорости образования осадков и темпы эволюционного развития органического мира.

### ВОЗРАСТ ЗЕМЛИ И МЕТЕОРИТОВ

С помощью радиоактивных методов удастся установить возраст древнейших пород суши, а это позволяет судить о нижнем пределе возраста Земли. Поиски этих древнейших пород показали, что они наблюдаются в различных частях земной поверхности. Оказалось, что наиболее древние участки земной коры имеют возраст 3,5 млрд. лет. Они были найдены у нас в Союзе на Украине, в Северной Карелии, по-видимому, такой же возраст может быть обнаружен в Сибири. В Канаде (Манитоба) возраст древних пород составляет 3,4 млрд. лет, в Южной Африке — 3,2 млрд. лет. Очевидно, что эта величина возраста наиболее древних участков поверхности Земли может рассматриваться как минимальный возраст Земли, истинный же возраст будет несколько больше. Вопрос определе-

ния времени образования Земли до сих пор остается сложным и трудным.

Непосредственному изучению доступны лишь верхние части земной коры. О строении и вещественном составе глубинных слоев Земли можно лишь догадываться с большим или меньшим приближением к истине. Формирование и развитие Земли происходило длительное время. Процессы, изменяющие лик Земли, происходят и поныне. Поэтому на Земле не осталось в неизменном виде того первоначального материала, из которого слагалась наша планета, и историю Земли можно проследить на доступных изучению образцах только до определенного предела.

Если мы имеем нижний предел возраста, то естественно попытаться найти верхний предел этой же величины. Ответ на этот вопрос может дать возраст элементов.

Действительно, прежде чем возникла Земля, образовались элементы. Очень грубо возраст радиоактивных элементов можно оценить, если допустить, что в момент их образования не было продуктов их распада. С момента образования Земли начали накапливаться продукты распада: из урана и тория начал накапливаться свинец, из калия—аргон, а из рубидия — стронций. Если не происходило потерь продуктов распада после образования Земли, то определение содержания радиоэлементов и их продуктов распада на Земле позволяет произвести примерное вычисление времени образования элементов.

По накоплению свинца 206 возраст Земли оказался равным 7 млрд. лет, по накоплению свинца из тория с момента образования элементов прошло 15 млрд. лет, по накоплению аргона из калия получается величина 3,5 млрд. лет, а по накоплению рубидия из стронция — 30 млрд. лет. Такой разброс цифр вполне понятен. При вычислении мы принимали, что в момент образования элементов не существовали продукты распада, но, по-видимому, часть продуктов распада была образована одновременно с образованием всех элементов. Следовательно, полученные цифры говорят только о верхнем пределе возраста Земли. Таким образом мы получили две величины — верхний и нижний предел.

Для оценки времени образования Земли был предложен метод, основанный на изучении распространенности изотопов свинца 207 и 206.

Мы уже указывали, что при распаде урана и актиноурана образуются два различных изотопа свинца. Так как периоды полураспада урана и актиноурана различны, то различны и скорости образования свинца 206 и свинца 207. Если допустить, что в момент образования Земли изотопы свинца с этими массами отсутствовали и образовались только потом вследствие радиоактивного распада урана и актиноурана, то по их



отношению в Земле можно вычислить величину возраста Земли. Полученная при вычислении величина оказывается равной 5,2 млрд. лет. Следует отметить, что при оценке возраста Земли по соотношению радиоэлементов и их конечных продуктов распада мы не располагаем данными о составе всего земного вещества, что вносит неопределенность в получаемые результаты. По-видимому, возраст 5,2 млрд. лет несколько завышен, так как в момент образования Земли, вероятно, уже существовали эти изотопы свинца в том веществе, из которого была образована Земля. Строгая математическая обработка нескольких изотопных анализов свинца различного типа позволяет учесть это количество первоначально присутствующего свинца и ввести на нее соответствующую поправку. Произведенные таким образом вычисления дают цифру 4,5 млрд. лет.

Очень интересно сопоставить полученный возраст Земли с возрастом метеоритов. Мы знаем, что метеориты это единственные космические тела, попадающие к нам на Землю из межпланетного пространства. Одно время ученые полагали, что метеориты попадают к нам на поверхность Земли не только из межпланетного пространства, но и из других далеких звездных миров, из других галактик. Потом начали предполагать, что все метеориты принадлежат только к телам солнечной системы. Как же установить, какое из этих предположений истинное? Для решения этого вопроса производилось детальное изучение химического и изотопного состава метеоритов. Единообразие изотопного состава земных пород и метеоритов является в значительной мере положительным ответом на вопрос о единстве происхождения Земли и метеоритов. Но для установления этого единства очень показательным может быть также возраст этих космических тел. Сопоставление времени образования Земли и метеоритов позволяет судить об одновременности или разновременности их происхождения. Но как определить возраст метеоритов?

Оказалось, что в этом нам могут помочь все те же испытанные и надежные свинцовый, стронциевый и аргоновый методы. Однако определение возраста метеоритов наталкивается на значительные трудности методического характера. При определении возраста минералов мы анализируем образцы, содержащие относительно большие количества урана, тория и продуктов распада. Содержание же этих элементов в метеоритах, особенно в железных, так мало, что необходима разработка специальных методов выделения и определения этих элементов. При исследовании содержания свинца в метеоритах нам необходимо специально очищать реактивы от находящегося в них свинца, так как его содержание во много раз превышает исследуемое количество в образце. Однако такая очистка не всегда приводит к желаемым результатам, по-

этому был разработан специальный метод выделения свинца из метеоритов возгонкой при высокой температуре, который исключает возможность загрязнения пробы свинцом из реактивов.

Железные метеориты содержат ничтожные количества урана, тория ( $10^{-10}$ — $10^{-13}$  г/г) и свинца ( $10^{-7}$ — $10^{-8}$  г/г). Абсолютное количество свинца, образующегося из урана и тория, ничтожно мало по сравнению с первоначально содержащимся в железном метеорите, поэтому было высказано предположение, что в этих космических телах должен быть запечатлен тот изотопный состав свинца, который был в газовой-пылевом облаке к моменту формирования родительских тел метеоритов. Был проанализирован изотопный состав свинца, выделенного из метеорита «Каньон Дьявола», который действительно оказался совершенно не похожим на свинец земного происхождения благодаря значительному содержанию  $Pb^{204}$ , а именно:  $Pb^{206}/Pb^{204} = 9,4$ ,  $Pb^{207}/Pb^{204} = 10,3$  и  $Pb^{208}/Pb^{204} = 29,2$ , в то время как изотопный состав современного земного свинца следующий:  $Pb^{206}/Pb^{204} = 19,0$ ,  $Pb^{207}/Pb^{204} = 15,8$  и  $Pb^{208}/Pb^{204} = 38,9$ .

Эта работа в значительной степени подтверждала существовавшие космогонические представления о одновременном происхождении метеоритов и Земли, так как теоретически вычисленный изотопный состав первоначального земного свинца оказался очень близок к экспериментально найденному в некоторых железных метеоритах.

На основании найденного содержания свинца и урана, а также изотопного состава свинца в метеоритах оказалось возможным произвести вычисление возраста метеоритов свинцовым методом. Некоторые результаты исследования приведены в таблице 8.

Таблица 8

Название метеорита	Изотопный состав $Pb^{204} = 1$			Возраст (в млрд. лет)		
	206	207	208	$Pb^{206}$	$Pb^{207}$	$Pb^{207}$
				238	235	$Pb^{206}$
Нуово Ларедо	50,28	34,86	67,97	6,3	5,1	4,4
Форест Сити	19,27	15,95	39,05	10	6,2	4,3
Модок	19,48	15,76	38,21	10	7,0	4,3
Саратов	19,53	16,70	40,25	3,2	4,1	4,5
Кунашак	19,64	16,24	40,04	3,8	4,3	4,4
Еленовка	21,54	16,94	39,86	3,7	4,2	4,5
Нортон Каунти	22,75	15,87	37,70	4,5	4,2	3,9

Мы видим, что в некоторых случаях величины возраста не очень хорошо совпадают, но для современного уровня возможной точности определений трудно ожидать лучших ре-

зультатов. Во всяком случае, величины возраста получаются очень близкие к величине возраста Земли, т. е. к 4,5 млрд. лет. Мы знаем, что при вычислении возраста Земли наиболее достоверные результаты получаются по соотношению изотопов свинца с массами 206 и 207, поэтому величина 4,5 млрд. лет, полученная на основании этого отношения (см. табл. 8), является наиболее показательной.

Определение возраста метеоритов аргоновым методом привело к той же величине — 4,5 млрд. лет. Все это позволяет утверждать, что исследованные метеориты и Земля одного происхождения и возраст Земли возможно принять в 4,5 млрд. лет. В таблице 9 приведены результаты оценки возраста Земли разными методами; в левой части указаны методы, справа — получаемые величины.

Т а б л и ц а 9

Возраст Земли по данным радиоактивных методов

Методы оценки возраста Земли	Возраст (в млрд. лет)
Свинцовый	
Наиболее древние радиоактивные минералы	3,5
По соотношению изотопов рудных свинцов	3,0—5,0
По соотношению изотопов свинца из пород	3,6—3,9
Отношение кларков изотопов урана и свинца	2,8—4,0
По возрасту метеоритов	4,0—4,5
Стронциевый	
Наиболее древние минералы	3,8
По возрасту метеоритов	4,5
Аргоновый	
Наиболее древние минералы	3,5
По возрасту атмосферы по кларкам изотопов $K^{40}$ и $A^{40}$	3,1—4,5
По возрасту метеоритов	4,0—4,5

Мы не случайно говорим об «оценке» возраста и не указываем точную цифру. Дело в том, что если мы определяем возраст горных пород радиоактивными методами, то полученные цифры имеют точность химического определения элементов, по которым производится вычисление возраста данной породы, тогда как точность оценки возраста Земли в какой-то степени зависит от сделанных допущений.

Точно так же вопрос о возрасте метеоритов оказался гораздо более сложным, чем он представлялся вначале, после появления первых работ в этом направлении. Например, на основании многочисленных исследований еще совсем недавно существовало представление о едином метеорном рое, в котором представлены все типы метеоритов. Однако в настоящее время это представление следует поставить под сомнение.

Не исключается возможность существования нескольких метеорных роев. Каждый рой может происходить из своих родительских тел, причем время его образования может не совпадать со временем образования другого роя.

В настоящее время установлено, что метеориты в виде самостоятельных тел существуют сравнительно недолго.

Каждый этап жизни родительских тел, а затем метеоритов можно оценить во времени с помощью радиоактивных методов. Возраст индивидуальных осколков метеоритов устанавливают по накоплению определенных радиоактивных и стабильных изотопов, образующихся в теле метеоритов под действием космической радиации. Этот возраст назван «космическим»; он отражает время, в течение которого не защищенные большой массой метеориты подвергались космическому облучению. Экспериментально установлено, что космический возраст метеоритов от образца к образцу колеблется от десятков миллионов до миллиарда лет.

Таким образом, говорить о возрасте метеоритов «вообще» мы не можем. Мы можем лишь твердо установить возраст метеоритного вещества, точнее — время дифференциации родительского тела (с помощью свинцового и стронциевого методов), время охлаждения тела (с помощью гелиевого и аргонного методов) и космический возраст каждого отдельного метеорита.

Возраст наиболее древних родительских тел метеоритов, в которых дифференциация вещества прошла 4,5 млрд. лет назад, можно отождествить с возрастом Земли.

Минимальный возраст Земли однозначно устанавливается по возрасту наиболее древних участков суши, а именно 3,5 млрд. лет, а максимальный по возрасту элементов — в 5—6 млрд. лет. Время дифференциации Земли на оболочки оценивается с помощью свинцового метода в 4,0—4,5 млрд. лет. Именно эти пределы в настоящее время принимаются для возраста Земли.

## ВОЗРАСТ ОТНОСИТЕЛЬНО МОЛОДЫХ ПРИРОДНЫХ ОБРАЗОВАНИЙ

До сих пор мы рассматривали методы определения возраста древних природных образований, время существования которых исчисляется миллионами и миллиардами лет. Но оказывается, в природе существуют и такие радиоактивные элементы, при помощи которых можно определять возраст более молодых природных образований. К таким радиоактивным методам относятся радиоуглеродный, иониевый и др.

В верхних слоях атмосферы в результате ядерных реакций, вызываемых космическими лучами, постоянно образуются ядра радиоактивных изотопов:  $C^{14}$ ,  $H^3$ ,  $Be^7$ ,  $Be^{10}$ ,  $P^{32}$  и др.

Наибольшее распространение получил радиоуглеродный метод. Этим методом можно определять и скорость образования современных донных отложений, и скорость смешивания глубинных и поверхностных вод, и возраст различных археологических образований. Радиоактивный углерод  $C^{14}$ , период полураспада которого 5550 лет, образуется при взаимодействии нейтронов космического излучения с ядрами азота атмосферы.

В атмосфере атомы радиоуглерода смешиваются с атомами нерадиоактивного углерода. Если допустить, что интенсивность космического излучения за последние несколько десятков тысяч лет оставалась постоянной, то концентрация радиоактивного углерода в атмосфере и в океане также должна быть постоянной. Животные и растительные организмы усваивают при жизни углерод атмосферы, и потому концентрация  $C^{14}$  в их организме также постоянна, а удельная активность углерода организма равна удельной активности углерода атмосферы. Под удельной активностью углерода понимается радиоактивность 1 г его, она выражается в распадах  $C^{14}$  на 1 г. Удельная активность современного углерода равна 16 распадам в минуту.

После смерти организма прекращается усвоение углерода атмосферы и радиоактивность углерода организма уменьшается по закону радиоактивного распада.

Через 5500 лет радиоактивность углерода уменьшается наполовину, а через 11 тыс. лет радиоактивность составляет только четверть от первоначальной. Определяя удельную активность углерода ископаемых остатков и сравнивая ее с удельной активностью углерода подобных же современных образцов, можно вычислить время, прошедшее с момента прекращения обмена углерода, т. е. с момента его смерти. Например, мы исследовали образец ископаемого дерева и нашли, что удельная активность выделенного из него углерода составляет 8 распадов в минуту. Так как удельная активность современных деревьев равна 16 распадам в минуту, то возраст исследованного дерева равен 5550 лет. Такие определения проводятся на специально сконструированных установках для измерения активности углерода.

Для определения возраста углеродным методом пригодны древесный уголь, обугленное вещество, древесина, травы, ткани, торф, рога, зубы, раковины, кости. Несмотря на то, что углеродный метод появился всего 10 лет назад, он позволил уже к настоящему времени получить много ценных данных, важных для изучения прошлого Земли и человечества. С его помощью удалось провести сопоставление последовательности событий позднечетвертичного периода. Так была доказана одновременность оледенений Северной Европы и Северной Америки.

В археологии этот метод является наиболее надежным мерилем времени. При определении возраста хорошо датированных исторически археологических образцов наблюдается хорошее согласие между данными углеродного метода и археологическими данными (табл. 10).

Таблица 10

Возраст исторических объектов, определенный радиоуглеродным методом

№ п/п.	Образец, местонахождение	Абсолютный возраст образца (лет)	Источники данных об абсолютном возрасте	Абсолютный возраст по $C^{14}$ (лет)
1.	Акация, гробница Джосера (Египет)	$4690 \pm 75$	Письменные источники	$3889 \pm 350$
2.	Кипарис, гробница Снофру (Египет)	$4615 \pm 75$	То же	$4812 \pm 210$
3.	Кедр, гробница Сезостриса III (Египет)	3790	»	$3631 \pm 180$
4.	Сердцевина секвойи, Калифорния (США)	2968	Дендрологический	2720
5.	Кусок дерева от пола, Сирийско-Хетский дворец (Сирия)	$2665 \pm 50$	Письменные источники	$2541 \pm 150$
6.	Лиственница, П. Пазырский курган (Горный Алтай)	IV—VI в. до н. э. $1880 \pm 2$	Археологические данные	$2350 \pm 140$
7.	Лиственница, Туэктинский курган (Горный Алтай)			$2450 \pm 120$
8.	Береза из Грабительского лаза, Туэктинский курган (Горный Алтай)			$2450 \pm 120$
9.	Лиственница, Катандинский курган (Горный Алтай)			$2420 \pm 130$
10.	Кусок дерева от гробницы эпохи Птолемеев (Египет)	2320	Письменные источники	$2200 \pm 450$
11.	Обугленный хлеб, Помпея (Италия)	$1880 \pm 2$	То же	$1895 \pm 40$
12.	Древесина (Гватемала)	$1503 \pm 10$	»	$1500 \pm 60$
13.	Годичные кольца красной ели, Нью-Мексико (США)	1412	Дендрологический	1050
14.	Секвойя, Калифорния (США)	$1385 \pm 5$	»	$1610 \pm 60$
15.	Секвойя, Калифорния (США)	$887 \pm 5$	»	$890 \pm 50$
16.	Годичные кольца канадской ели (западное побережье США)	$325 \pm 5$	»	$200 \pm 50$

Углеродный метод пригоден также для определения возраста слоев отложений морского и океанического дна. В этом случае производится сравнение удельной активности углерода

из различных слоев осадков с удельной активностью современного слоя.

Изучение скорости образования донных осадков океана можно также производить иониевым методом. Иониевый метод основан на том, что изотопы уранового ряда (уран, ионий и радий) осаждаются на океаническое дно различно. Это объясняется различной устойчивостью соединений урана, тория и радия в океанической воде, что зависит от химических свойств этих элементов. Уран образует устойчивые растворимые соединения и преимущественно удерживается в морской воде. Образующийся из урана изотоп тория — ионий в силу своих химических свойств переходит в соединения, неустойчивые в морской воде, и осаждается на морское дно. Если мы возьмем слой осадка определенной толщины, то, начиная от верха этого слоя к низу (при условии, что во время образования этого осадка скорость поступления иония в осадок оставалась примерно постоянной), содержание иония уменьшается. Это происходит потому, что за время, прошедшее с начала отложений, часть иония успевает распасться (период полураспада иония равен 80 тыс. лет). Чем древнее осадок, тем меньше в нем остается иония. По степени уменьшения концентрации иония в осадках определяют скорость их образования. Равновесие между ионием и ураном устанавливается в течение 4—5 периодов полураспада иония, т. е. в течение 300—400 тыс. лет. Следовательно, с помощью иониевого метода возможно датирование слоев осадков, образовавшихся не более 300—400 тыс. лет назад. Ценность иониевого метода состоит в том, что из всех методов датирования четвертичных образований только с его помощью удастся определять отрезки времени от 50 тыс. до 300 тыс. лет (вспомним, что до 50 тыс. лет возможно датирование углеродным методом).

Кроме иониевого метода, существует ряд других, так называемых неравновесных методов. Среди них следует отметить актиниевый, радиевый и т. д. Эти методы имеют очень ограниченную сферу применения.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Мы рассмотрели основные радиоактивные методы определения возраста геологических формаций Земли и метеоритов. В настоящее время мы имеем методы, позволяющие определять время от 1000 до миллиардов лет. Следует отметить, что с помощью радиоактивных методов можно также определять время, измеряемое годами, днями и часами. Такие методы были разработаны в применении к природным водам и отдельным минералам, которые образуются в результате испарения вод источников и существуют в течение нескольких

дней. Вполне вероятно, что очень большую роль суждено сыграть радиоактивным методам в измерении чрезвычайно малых промежутков времени, исчисляемых миллионными и миллиардными долями секунды, и что радиоактивные часы будут превосходить по точности все до сих пор существующие.

Самым существенным для геологии пока является определение возраста осадочных и изверженных пород, так как месторождения полезных ископаемых обычно связаны либо с определенными периодами органической жизни на Земле, либо с периодами горообразования, так называемыми тектоническими циклами. Определение возраста указанных пород в основном производится аргоновым и свинцовым методами.

Свинцовый метод на всем протяжении своей истории был и остается основным методом, по которому можно проверять надежность всех остальных методов определения возраста.

Еще недавно многие исследователи считали, что радиоактивные методы определения времени страдают принципиальными ошибками, которые и обуславливают расхождения в получаемых результатах, но развитие радиоактивных методов определения возраста доказало несостоятельность этих взглядов.

В Советском Союзе впервые начал развивать идеи о необходимости применения радиоактивных методов для определения геологического возраста один из основателей геохимии В. И. Вернадский. Он руководил этими исследованиями до конца своих дней. Среди геологов, борющихся за развитие этих методов, необходимо отметить ныне покойного А. Н. Герасимова.

Первыми работами по определению возраста в Советском Союзе явилось определение возраста Беломорской свиты (Карелия) свинцовым (1924 г.) и гелиевым (1925 г.) методами. В 1931 году под председательством В. И. Вернадского была создана междуведомственная комиссия по определению геологического возраста. В 1937 году на XVII Международном геологическом конгрессе избрали международную комиссию по определению возраста, заместителем председателя которой был избран В. И. Вернадский. Работа этой комиссии прервалась начавшейся второй мировой войной.

В настоящее время вопросам определения геологического времени различных природных образований радиоактивными методами уделяется в Советском Союзе исключительное внимание. Достаточно сказать, что у нас организовано более 20 лабораторий по определению абсолютного геологического возраста, которые проводят всевозможные исследования, посвященные этому вопросу. Все исследования в этом направлении планируются специальной комиссией АН СССР по



определению абсолютного возраста геологических образований, созданной в 1950 году.

Таким образом, наши геологи и геохимики имеют точный и надежный метод установления возраста различных геологических образований, что имеет большое практическое значение. Этот новый метод существенно расширяет наши возможности в познании истории возникновения и развития Земли.

---



**САМОЛЕТ ИЛИ ПОЕЗД?  
ВЫБОР ВЫ СДЕЛАЕТЕ САМИ  
МЫ СОВЕТУЕМ САМОЛЕТ!  
СОПОСТАВЬТЕ ЭТИ ЦИФРЫ:**

<b>САМОЛЕТОМ</b>		<b>из Москвы</b>		<b>СКОРЫМ ПОЕЗДОМ</b>
2 часа	—	в Симферополь	—	26 часов
5 часов	—	в Новосибирск	—	63 часа
55 минут	—	в Ленинград	—	11 часов
11 часов	—	в Хабаровск	—	177 часов
70 минут	—	в Киев	—	16 часов
6 часов	—	в Иркутск	—	100 часов
2 часа	—	в Тбилиси	—	48 часов

**МЫ УВЕРЕНЫ — ВЫ ВОСПОЛЬЗУЕТЕСЬ**

**САМОЛЕТОМ**

**СЧАСТЛИВОГО ПОЛЕТА!**

В МОСКВЕ билеты можно приобрести в агентстве Аэрофлота — пл. Дзержинского, в агентстве «Главмосавто-транс» — пл. Революции, а также в диспетчерских пунктах такси на Курском, Киевском и Ленинградском вокзалах.

Справки о наличии мест, стоимости билетов, расписании движения самолетов можно получить по телефону К 5-25-28.

*Московское агентство  
воздушных сообщений*