

Глава 3. Возраст Земли.

В главе 03 обсуждаются: состав и возраст составных элементов Галактики, возраст Земли, методы его измерения, геохронологическая шкала, палеонтологическая шкала, изотопные методы оценки возраста, палеонтологические методы, геохимические методы.

3. 1. Состав и возраст некоторых типов населения Галактики.

Населения Галактики	Содержание тяжелых хим. элементов, %	Предельный возраст, млрд. лет
Шаровые скопления, звезды-субкарлики, короткопериодические цефеиды	0,1 - 0,5	12 - 15
Долгопериодические переменные, звезды с большими скоростями	1	10 - 12
Звезды Главной Последовательности солнечного типа, красные гиганты, планетарные туманности, новые звезды	2	5 - 7
Звезды спектрального класса А	3 - 4	0,1-5
Звезды классов О и В, сверхгиганты	3 - 4	0,1

Возраст Галактики может быть оценён по времени, необходимому для образования наблюдаемого в ней количества тяжёлых элементов. Их синтез прекратился, очевидно, в нашем районе Галактики с образованием Солнечной системы (т. е. 4,6 млрд. лет назад). Если синтез произошёл внезапно, за сравнительно короткое время, то для образования современного соотношения изотопов тяжёлых элементов он должен был произойти за 4-6 млрд. лет до возникновения Солнечной системы, т. е. 9 - 11 млрд. лет назад. Относительная кратковременность периода интенсивного синтеза подтверждается как анализом относительного состава указанных элементов, так и астрономическими данными - звездообразование в Галактике было особенно интенсивным в начальный период. Т. о., возраст Галактики, определяемый по синтезу элементов, составляет от 9 до 11 млрд. лет.

Возраст доступной для наблюдений части Вселенной (Метагалактики) оценивается по закону расширения Метагалактики. Согласно закону Хаббла, галактики удаляются друг от друга со скоростью 50-100 км/с на Мпк. Если эта скорость мало изменилась с начала расширения, то величина, обратная скорости, даёт оценку максимального возраста Метагалактики: $1/50 \text{ км}^{-1}\cdot\text{с}\cdot\text{Мпк} - 20 \text{ млрд. лет}$, а $1/100 \text{ км}^{-1}\cdot\text{с}\cdot\text{Мпк} - 10 \text{ млрд. лет}$. Однако обычно предполагают, что расширение Метагалактики замедляется со временем, поэтому возраст её должен быть несколько меньше. Оценка возраста в сильной степени зависит от точности определения постоянной расширения и от величины замедления, т.е. от предполагаемой модели мира.

3. 2. Возраст небесных тел.

Возраст Земли и метеоритов, а отсюда косвенно и других тел Солнечной системы наиболее надёжно оценивается методами ядерной космохронологии, например, по количеству изотопов свинца ^{206}Pb и ^{207}Pb , образовавшихся в исследуемых породах в результате радиоактивного распада изотопов урана ^{238}U и ^{235}U . С момента прекращения контакта исследуемого образца породы с возможными источниками ^{238}U и ^{235}U , образование изотопов ^{206}Pb и ^{207}Pb идёт за счёт имеющихся в образце изотопов урана. Поскольку скорость радиоактивного распада постоянна, количество накопившихся

изотопов свинца характеризует время, прошедшее с момента изоляции образца до момента исследования. Практически возраст породы определяется по отношению содержания изотопов ^{206}Pb и ^{207}Pb к содержанию природного изотопа ^{204}Pb , не порождённого радиоактивностью. Этот метод даёт для возраста древнейших пород земной коры оценку до 4,5 млрд. лет. Анализ содержания изотопов свинца в железных метеоритах даёт обычно оценки до 4,6 млрд. лет. Возраст каменных метеоритов, определяемый по радиоактивному превращению в них изотопа калия ^{40}K в изотоп аргона ^{40}Ar , колеблется от 0,5 до 5 млрд. лет. Это указывает на то, что часть метеоритов возникла сравнительно недавно.

Анализ пород, доставленных с Луны на Землю, показал, что количество содержащихся в них инертных газов - продуктов радиоактивного распада - отвечает возрасту пород от 2 до 4,5 млрд. лет. Т. о., возраст лунных пород и древнейших пород земной коры примерно одинаков.

Планеты Солнечной системы, но современным представлениям, возникли из вещества в конденсированной фазе (пылинок или метеоритов). Планеты, следовательно, моложе некоторых метеоритов. В связи с этим возраст Солнечной системы оценивается обычно в 4,6 млрд. лет.

Возраст отдельных звёзд и Солнца оценивают на основе теории строения и эволюции звёзд. Согласно этой теории, звёзды светят за счёт гравитационной энергии и ядерной энергии, выделяемых соответственно при сжатии звезд и в термоядерных реакциях, протекающих в их центральной области (на разных стадиях эволюции преобладающую роль играет то один, то другой из этих источников энергии). Изменение типа термоядерной реакции знаменует переход к новой стадии эволюции. Длительность каждой стадии эволюции тем меньше, чем более массивна звезда, и с учётом зависимости между массой и светимостью для звёзд главной последовательности длительность приблизительно выражается следующими формулами.

Длительность стадии формирования звезды (первоначального сжатия от протозвезды до звезды главной последовательности):

$$t_c \approx 30 M/L \text{ (млн. лет)} \quad (3.1)$$

(масса M и светимость L звезды в данной фазе эволюции выражаются в долях массы и светимости Солнца – M_\odot и L_\odot). Звёзды малых масс, находящиеся на этой стадии, могут иметь весьма большой абсолютный возраст. Так, древнейшие карликовые звёзды с массой менее $0.05 M_\odot$ (переменные типа UV Кита) не завершили ещё этой стадии.

Длительность стадии горения водорода (пребывания звезды на главной последовательности) - самая продолжительная стадия в жизни звезды, когда источником энергии звезды являются термоядерные реакции водородного цикла:

$$t_H \approx 30 M/L \text{ (млн. лет)} \quad (3.2)$$

Сумма $t_c + t_H$ даёт макс. оценку возраста звезды, пребывающей на главной последовательности.

Длительность стадии горения гелия (стадии красных гигантов) t_{He} составляет примерно $0,1 t_H$. Суммой $t_c + t_H + t_{\text{He}}$ оценивается максимальный возраст красного гиганта и сверхгиганта. Последующие стадии эволюции, связанные с "выгоранием" в звёздах углерода и кремния, скоротечны и характерны для массивных звёзд-сверхгигантов (они заканчивают свою эволюцию взрывом). При этом могут образоваться нейтронные звёзды и чёрные дыры. Звёзды с массами $M \leq 1.22 M_\odot$ в процессе эволюции становятся, по-видимому, белыми карликами. Оценок длительности существования звёзд на этих стадиях нет.

Т. о. возможно установить пределы возраста звезды данной массы, находящейся в той или иной стадии эволюции, но находится ли она в начале этой стадии или уже почти прошла её, выяснить значительно сложнее. Прямую оценку возраста звезды можно было бы получить, сравнив процентное содержание водорода и гелия в её ядре (находится расчётом внутреннего строения звезды) и оболочке (находится по спектру звезды). При

условии не перемешивания внешнего и внутреннего слоев, но изменению состава звезды в центре, обусловленного термоядерными процессами, можно было бы определить её возраст. К сожалению, соотношение гелия и водорода в звездах оценивается очень грубо, и то лишь у звезд спектр. классов О и В, в спектрах которых наблюдаются сильные линии гелия. Для Солнца эта оценка очень приближительна - 5 млрд. лет со времени начала стадии горения водорода. Это согласуется с оценками возраста Солнечной системы, но не исключено также, что Солнце старше её на 1-2 млрд. лет. Если возраст Солнца 5 млрд. лет, то, согласно формуле (2), оно будет находиться на главной последовательности ещё около 5 млрд. лет. Пройдёт ли оно затем стадию красного гиганта, или же сразу будет белым карликом, пока неясно, хотя первое вероятнее. В старейших из известных звёздных скоплениях звёзды с массой Солнца или несколько меньшей ещё занимают главную последовательность, и их дальнейшая эволюция пока с достаточной полнотой неизвестна.

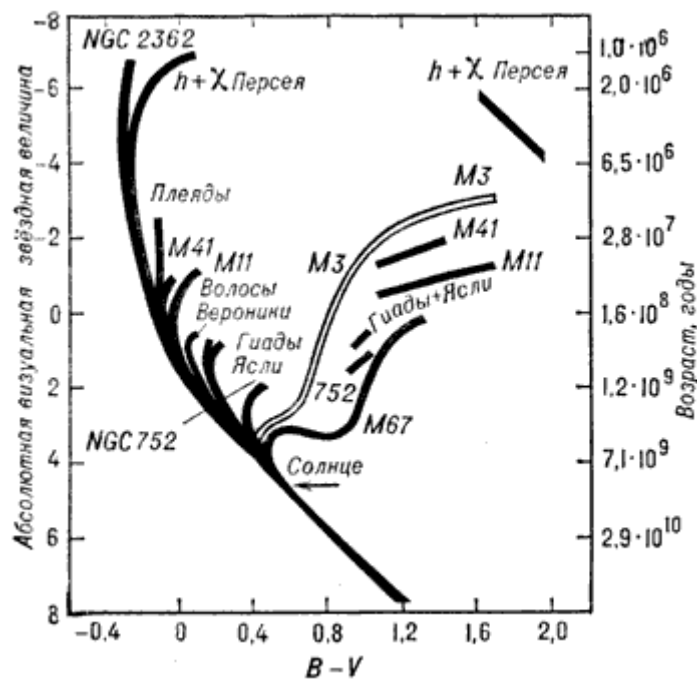


Рис. 3-1. Определение возраста звёздных скоплений по диаграмме цвет - светимость нескольких рассеянных звёздных скоплений и одного шарового скопления МЗ, $B - V$ – показатель цвета. Каждой точке Главной Последовательности соответствует максимальный возраст $t_c + t_H$ звёзд (на рис.3-1 - справа). Точка, где звёзды скопления сворачивают с Главной Последовательности, указывает возраст $(t_c + t_H)$ звёзд скопления. Судя по химическому составу, Солнце не является ровесником Галактики, оно моложе, хотя и относится к старейшим звёздам галактического диска.

Возраст звёздных скоплений и ассоциаций, в которых звёзды возникли почти одновременно, оценивается намного надёжнее, чем возраст отдельных звёзд. Наиболее массивные звёзды рассеянных скоплений быстро продвигаются в своей эволюции, уходят с главной последовательности и становятся красными гигантами или (наиболее массивные) - сверхгигантами. На диаграмме Герцшпрунга - Расселла такого скопления (рис. 3-1) легко отличить те звёзды, которые заканчивают своё пребывание на главной последовательности и готовятся уйти с неё. Формула (3.2) даёт оценку возраста этих звёзд и, следовательно, всего скопления. У самых молодых рассеянных скоплений возраст оценивается в 1 млн. лет, самые старые - имеют возраст 4,5-8 млрд. лет (при различных предположениях о количестве водорода, превратившегося в гелий).

Возраст шаровых звёздных скоплений оценивается аналогичным путём, хотя диаграммы Герцшпрунга - Расселла для шаровых скоплений имеют свои отличия.

Оболочки звёзд в этих скоплениях содержат значительно меньше химических элементов тяжелее гелия, т. к. скопления состоят из древнейших звёзд Галактики (в их состав почти не вошли тяжёлые элементы, синтезированные в др. звёздах, все имеющиеся там тяжёлые элементы синтезированы в них самих). Оценки возраста шаровых скоплений - от 9 до 15 млрд. лет (с погрешностью 2-3 млрд. лет).

Возраст Галактики оценивается в соответствии с теорией её эволюции. Первичное газовое облако (протогалактика) за первый миллиард лет распалось, очевидно, на отдельные сгустки, положившие начало шаровым скоплениям и звёздам сферической подсистемы Галактики. В ходе эволюции взрывающиеся звёзды первого поколения выбрасывали в пространство газ с примесью тяжёлых хим. элементов. Газ концентрировался к галактической плоскости, и из него образовывались звёзды следующего поколения, составляющие более сжатую к плоскости систему (население). Обычно выделяют несколько населений, характеризующихся различием свойств входящих в них звёзд, содержанием в их атмосферах тяжёлых элементов (т. е. всех элементов, кроме H и He), формой занимаемого в Галактике объёма и разным возрастом.

3. 3. Возраст Земли.

Возраст Земли так велик, что его трудно себе вообразить. Но если предположить, что нашей планете всего один год, то человечество просуществовало менее пяти часов.

Человечество веками пыталось определить возраст Земли. В начале XVII века архиепископ Армы Джеймс Ашер вычислил дату сотворения мира по Библии. Он определил ее как 4004 год до н. э., эту хронологию можно найти в старых изданиях Библии.

Геродот, наблюдая за скоростью роста дельты Нила (Кэри У. В поисках закономерностей развития Земли и Вселенной. М.: Мир. 1991. 447 с.), пришел к выводу, что Земля существует очень долго. До Аристотеля Землю считали вечной и неизменной, но во времена мрачного средневековья христианская догма ограничила продолжительность её истории описанием Моисея. Архиепископ Дж. Ашер (1581-1656) утверждал, что Земля была сотворена 26 октября 4004 г. до н.э. в 9 часов утра. Это утверждение было кульминацией в длинной серии подсчетов, основанных на изучении последовательности событий, отраженных в Библии, начало которых берется от Сотворения мира. Например, согласно другому подсчету: от сотворения мира до Потопа прошло 1656 лет, от Потопа до Авраама – 292 года, до исхода евреев из Египта – 503, до возведения Храма – 432, до вавилонского плена – 414 и до Рождества Христова – 614 лет и т.п. Вывод Ашера был результатом длительного изучения первоисточников на языках оригиналов, в том числе генеалогий, систем календарей и затмений, на которых могли основываться точные подсчеты времени и даты. Его оценка возраста земли пользовалась доверием в широких кругах и оставалась признанной долгое время после смерти Ашера.

Лорд Кельвин, выдающийся физик своего поколения, вооруженный формулами точной науки, объявил, что возраст Земли не может превышать 20 млн. лет. Он полагал, что первичным источником энергии во Вселенной может быть только гравитация, поэтому энергия Солнца должна убывать со временем. Аналогичных взглядов придерживались Лейбниц, Бюффон, Гельмгольц и др.

Теперь мы знаем, что Ашер ошибся - более чем в миллион раз! На сегодня принятый учеными возраст Земли составляет 4600 миллионов лет. Он приблизительно такой же, как и возраст Солнца и остальных планет.

В конце XVII века датский врач и естествоиспытатель Николаус Стено (который со временем тоже стал епископом) заключил, что верхние слои осадочных пород, накапливающиеся под водой, моложе, чем нижние. В XIX веке это открытие помогло ученым разработать относительную хронологию пород и, таким образом, частично определить возрастную структуру Земли. Наука о датировании пород известна под

названием геохронология. Однако лишь в начале XX века британские и американские ученые обнаружили, что некоторые радиоактивные элементы можно использовать как "часы" для фиксации огромных периодов времени. Атомы этих элементов со временем разлагаются, образуя другие элементы. Так, например, по истечении довольно длительного периода уран превращается в свинец, излучая при этом радиацию.

Девять тяжелых элементов, встречающихся в естественном виде, включая радий и уран, являются радиоактивными. То же самое касается некоторых изотопов (разновидностей одних и тех же элементов, отличающихся массой атомов) легких элементов, таких как рубидий и стронций.

Ученые открыли часы, но не знали, как определять по ним время. В этом им помогло создание во время и после Второй мировой войны прибора под названием масс-спектрометр. Он разделяет атомы по их массам и электрическим зарядам и позволяет определять ничтожные количества радиоактивных веществ в породах.

Периоды полураспада. Радиоактивные вещества распадаются с определенной скоростью. Единицей ее измерения является период полураспада - время, за которое распадается половина первоначального количества радиоактивного вещества. Второй период полураспада - это половина оставшегося вещества, и так с каждым разом этот период уменьшается.

Наиболее известным методом датирования является датирование по радиоуглероду, с помощью которого можно определить возраст любого органического вещества, дошедшего до нас из прошлого (такого как кости или древесина). Так, например, этот метод применили в 1988 г. для датирования Туринской Плащаницы, в которую, как полагают, в свое время завернули Иисуса Христа. Однако датировать по радиоуглероду неорганические породы невозможно, для этого применяются другие методы. Они включают распад с превращением радиоактивного изотопа калия в радиоактивный аргон, распад радиоактивного изотопа рубидия в радиоактивный стронций, и распад урана и тория с превращением в свинец.

Подтверждение возраста Земли пришло из космоса. Некоторые упавшие на Землю метеориты содержат минерал под названием троилит. В нем мало или совсем нет урана, поэтому полагают, что найденный в нем свинец представляет первоначальное его количество на планетах, включая Землю. Таким образом, удалось проверить правильность уран-свинцового датирования. Были также проанализированы лунные породы, доставленные на Землю американскими астронавтами в 1970-х годах. Из этих пород и образцов метеоритов получены данные о возрасте Луны и метеоритов, подобных тем, по которым определяли возраст Земли.

Следы примитивной жизни обнаружены в породах, которым почти 3,5 миллиарда лет, - самых старых из известных пород на Земле. Жизнь эта представлена бактериями и водорослями, т. е. простейшими одноклеточными организмами.

Вероятно, на протяжении предшествующих 1000 миллионов лет на Земле постепенно образовались океаны из воды мантии, выбрасываемой вулканами на поверхность при извержении. Первоначально атмосфера состояла, очевидно, главным образом из водорода. Кислород в воздухе образовался либо в результате воздействия света на водные пары, либо его выделяли растениевидные морские организмы.

Вспышка жизни. Около 570 миллионов лет тому назад на Земле началось бурное развитие жизни. Около 400 миллионов лет тому назад в атмосфере уже было достаточно кислорода для роста растений на суше. В течение последующих 50 миллионов лет появились, и начали эволюционировать - наземные животные.

Геологи делят историю последних 570 млн. лет на ряд периодов. Самый ранний из них называется кембрийским. Геологическое время с начала кембрия (590 миллионов лет

тому назад) до нынешнего четвертичного периода известно как фанерозойский эон. Остальная часть истории Земли обычно объединяется под общим названием докембрий. Если представить себе, что Земля существует один год, то самые ранние формы жизни появились в начале мая, а кембрийский период начался в ноябре. Первые люди возникли около 7 часов вечера 31 декабря, а современный человек сформировался приблизительно за пять минут до полуночи.

3. 4. Возраст Земли и Солнечной системы. Абсолютный и относительный возраст. Геохронологическая шкала.

Сама по себе постановка вопроса о возрасте Земли была некогда весьма революционной - ибо "возраст" подразумевает наличие "даты рождения". Конечно, в любой из религий соответствующее божество создает Землю с населяющими ее существами из первозданного Хаоса, однако европейская наука унаследовала от античных философов-материалистов принципиально иное видение Мира. Для нее Земля всегда была неотъемлемой частью той самой Вселенной, которая "едина, бесконечна и неподвижна... Она не рождается и не уничтожается... Она не может уменьшаться и увеличиваться" (Джордано Бруно). Но вот в конце Средневековья астрономы открывают существование так называемых новых звезд: оказывается, небеса не абсолютно неизменны, как считалось испокон веков! Следовательно, в принципе возможны и наиболее решительные (с точки зрения Человечества) из всех возможных изменений: начало и конец существования Земли и видимой части Вселенной. А раз так, то не можем ли мы попытаться установить, когда было это начало и каким будет этот конец - не прибегая к помощи мифологии (шести дням творения, Сумеркам богов, и т.д.)?

Необходимо заметить, что людей первоначально заинтересовал возраст не Земли как небесного тела, а именно обитаемой Земли - как сейчас сказали бы, биосферы. Однако ясно, что, определив время возникновения жизни, мы тем самым получим минимальный срок существования и самой планеты. А поскольку источником жизни на Земле вполне справедливо полагали энергию Солнца, то возраст нашего светила, в свою очередь, даст нам максимальный срок существования биосферы.

Установление же времени существования Солнца - после того как были открыты законы сохранения вещества и энергии - казалось физикам довольно простой задачей. Солнце постоянно излучает энергию в пространство, назад ничего не возвращается, так что, по идее, количество энергии в Солнечной системе должно постоянно убывать. Самый энергетически выигрышный процесс (из известных до XX века) - сжигание каменного угля; тепло и свет при этом создаются в результате химической реакции $C+O_2 = CO_2+Q$. А поскольку нам известны и величина Q , и количество энергии, излучаемой Солнцем за единицу времени, и масса Солнца (она была приближенно вычислена еще в XVII веке), то рассчитать суммарное время существования угольного костра таких размеров можно буквально в одно действие. Вот тут-то и выяснилось, что он должен прогореть дотла всего-навсего за полторы тысячи лет. Конечно, существуют вещества более энергоемкие, чем уголь, но это не решает проблему: расчетное время существования Солнца все равно оказывается меньше шести тысяч лет - то есть меньше времени существования человеческой цивилизации; ясно, что это абсурд.

Необходимо было найти источник, питающий своей энергией Солнце - иначе вообще рушился закон сохранения энергии. И вот в 1853 г. Г. Гельмгольцу удалось предложить вполне приемлемую для того времени гипотезу. Он предположил, что Солнце постоянно сжимается - верхние его слои под собственной тяжестью как бы падают на нижние. Их потенциальная энергия при этом убывает (ведь масса слоев постоянна, а высота их "подъема" над центром Солнца уменьшается). Эта "теряющаяся" потенциальная энергия верхних слоев и выделяется в виде тепла и света. Возникает вопрос: какая скорость этого сжатия необходима для того, чтобы обеспечить нынешнюю светимость Солнца? Ответ: очень небольшая - за 250 лет (то есть за все время существования

современной астрономии) - всего-навсего 37 км; для сравнения: нынешний диаметр Солнца - почти 1,5 миллиона км. Очевидно, что такие изменения диаметра никакими измерительными приборами не ловятся.

Гипотеза эта имела и одно следствие, прямо касающееся возраста Земли. Если считать, что светимость Солнца (и, соответственно, скорость его сжатия) в прежние времена была примерно такой же, как сейчас, то, согласно расчетам Гельмгольца, 18 миллионов лет назад диаметр светила должен был превышать нынешний диаметр орбиты Земли. Следовательно, наша планета никак не старше этих самых 18 миллионов лет. Физиков эта цифра вполне удовлетворила, и они сочли вопрос о предельном возрасте Земли исчерпанным, но вот геологи восстали против такой датировки самым решительным образом.

Дело в том, что геология уже накопила к тому времени огромное количество эмпирических (т.е. основанных на непосредственном опыте) данных о строении поверхностных слоев планеты и о происходящих на ней процессах (например, о движении горных ледников, водной эрозии и т.д.). В 1830 году Ч. Лайелль, исходя из того, что геологические процессы (прежде всего осадконакопление) в прошлом должны были протекать примерно с той же скоростью, что и ныне - принцип актуализма - подсчитал, что время, необходимое для образования одних только доступных для прямого изучения осадочных толщ, должно составлять несколько сот миллионов лет. Расчеты Лайелля основывались на гигантском фактическом материале и казались геологам и биологам гораздо более близкими к истине, чем 18 миллионов лет Гельмгольца. Однако логика Гельмгольца казалась неопровержимой - с законом сохранения энергии особо не поспоришь... Для того чтобы возобладала точка зрения геологов (а правильной, как теперь известно, оказалась именно она) необходимо было найти иной, чем гравитационное сжатие, источник энергии для Солнца.

В 1896 году А. Беккерель открыл явление радиоактивности. Радиоактивность оказалась одним из типов ядерных реакций - изменений в комбинациях составляющих атомное ядро протонов и нейтронов; при этих реакциях выделяется неизмеримо больше энергии, чем при любых химических превращениях. В 1905 году А. Эйнштейн установил, что в ядерных реакциях массу можно рассматривать как чрезвычайно концентрированную форму энергии, и вывел свою знаменитую формулу их эквивалентности: $E = mc^2$, где c - скорость света. Величина c^2 чрезвычайно велика, а потому даже небольшое количество массы эквивалентно огромному количеству энергии: 1 г массы = 21,5 млрд. ккал (столько энергии выделится, если сжечь два с половиной миллиона литров бензина). Если предположить, что Солнце черпает энергию за счет ядерных реакций (каких именно - пока неважно, формула Эйнштейна справедлива для них всех), то для обеспечения его нынешней светимости необходимо расходовать 4600 тонн вещества в секунду.

Много ли это? Ничтожно мало: расчеты показывают, что происходящее при этом изменение тяготения Солнца приведет к увеличению времени оборота Земли вокруг светила - т.е. удлинению земного года - всего на 1 секунду за 15 миллионов лет, что, разумеется, нельзя установить никакими измерениями. Таким образом, проблема практически неиссякаемого источника энергии для Солнца была решена, и теперь уже ничто не препятствовало принятию геологической оценки возраста Земли - "не менее нескольких сот миллионов лет".

Однако открытие радиоактивности имело и еще одно следствие: это явление само по себе позволило создать новый метод определения возраста планеты, несравненно более точный, чем все предыдущие. Суть его заключается в следующем. Известно, что атом урана нестабилен: он испускает энергию, потоки частиц, и со временем превращается в атом свинца - устойчивого элемента, не подверженного дальнейшим превращениям. Природа этого типа реакций такова, что скорость ядерного распада абсолютно постоянна, и никакие внешние факторы (температура, давление) на нее не влияют. Значит, если экспериментально определить темп этих изменений за короткий промежуток времени, то

его можно совершенно точно предсказать и для более длительного промежутка. Так вот, было установлено, что в любой порции урана (точнее - изотопа ^{238}U) половина составляющих его атомов превратится в свинец за 4,5 млрд. лет; соответственно, через 9 млрд. лет урана останется $1/2$ от $1/2$, то есть четверть, и т.д. Срок в 4,5 млрд. лет называют периодом полураспада ^{238}U .

Пусть мы имеем горную породу, содержащую соединения урана. Если она остается нераздробленной, то все атомы свинца (в которые постоянно превращаются атомы урана) остаются внутри породы, и в результате уран все более "загрязняется" свинцом. Поскольку, как мы помним, внешние факторы не влияют на скорость этого процесса, степень "загрязнения" будет зависеть только от времени, в течение которого порода оставалась монолитной. Последнее обстоятельство весьма важно: таким способом можно устанавливать время образования изверженных пород, но не осадочных - те всегда разрушены, и уран/свинцовое соотношение в них необратимо нарушено миграцией этих элементов в окружающую среду.

Определять возраст изверженных пород уран-свинцовым методом (впоследствии появились калий-аргоновый, рубидий-стронциевый и некоторые другие) начали в 1907 году, и очень скоро обнаружили граниты с возрастом 1 млрд. лет. По мере дальнейших поисков этот "максимальный известный возраст" быстро увеличивался, пока не достиг 3,5 млрд. лет, после чего, несмотря на все усилия, почти не прирастал; древнейшие же из известных минералов были недавно найдены в Австралии - 4,2 млрд. лет (известный Сибирский "рекорд" - 4,5 млрд. лет - не подтвердился повторными анализами). Значит, Земля никак не моложе 4,2 млрд. лет; но, может быть, она еще старше, и породы с возрастом 7 или, скажем, 20 млрд. лет просто пока не найдены? Судя по всему, нет - и вот почему. Дело в том, что возраст всех изученных на этот предмет метеоритов составляет 4,5-4,6 млрд. лет; возраст всех горных пород, собранных в девяти районах Луны американскими экспедициями "Аполлон" и советскими автоматическими станциями "Луна", также варьирует от 4 до 4,5 млрд. лет. Все это свидетельствует о том, что цифра "4,6 млрд. лет" верно отражает реальный возраст не только Земли, но и всей Солнечной системы.

Итак, физики преподнесли геологам поистине царский подарок: стало возможным достаточно точно определить время существования Земли и протяженности различных периодов ее истории (палеозоя, мезозоя, и т.д.). Как же отнеслись к этому геологи? Спокойно, если не сказать - равнодушно: дело в том, что к собственно геологическим проблемам все это, как ни странно, имеет весьма косвенное отношение.

Физики мыслят в категориях абсолютного времени: для них существенно, когда именно произошло некое событие, а главная проблема, которую они при этом решают - это проблема часов (ведь распадающийся уран - это, по сути дела, песочные часы хитрой конструкции). Однако совершенно очевидно, что время существует вне зависимости от того, есть ли у нас приборы для его измерения. Любая последовательность событий уже сама по себе является временем - относительным временем. Так вот, геологи всегда работали в мире этого самого относительного времени. Точность, с которой мы можем определить положение некоего события на шкале относительного времени, прямо зависит от ее дробности (т.е. числа составляющих шкалу событий) и полноты (события должны распределяться по шкале более или менее равномерно, не оставляя "пустот"). Поэтому геологи видели свою задачу в том, чтобы совершенствовать в указанных направлениях шкалу относительного времени - палеонтологическую летопись (это не художественная метафора, а строгий термин), а не в том, чтобы искать "часы".

Есть два фундаментальных принципа (фактически - это аксиомы, принимаемые без доказательства), которыми пользуются геологи при изучении истории. Во-первых, это принцип Стено, или закон напластования: если один слой (пласт) горных пород лежит на другом, то верхний слой образовался позднее, чем нижний. Во-вторых - принцип Гексли, или закон фаунистических и флористических ассоциаций: слои, содержащие ископаемые

остатки одних и тех же видов животных и растений, образовались в одно и то же время. Первый принцип позволяет установить хронологический порядок образования горных пород в одном месте, второй - синхронизировать между собой пласты, залегающие в разных местах (см. рисунок 3-2, а).

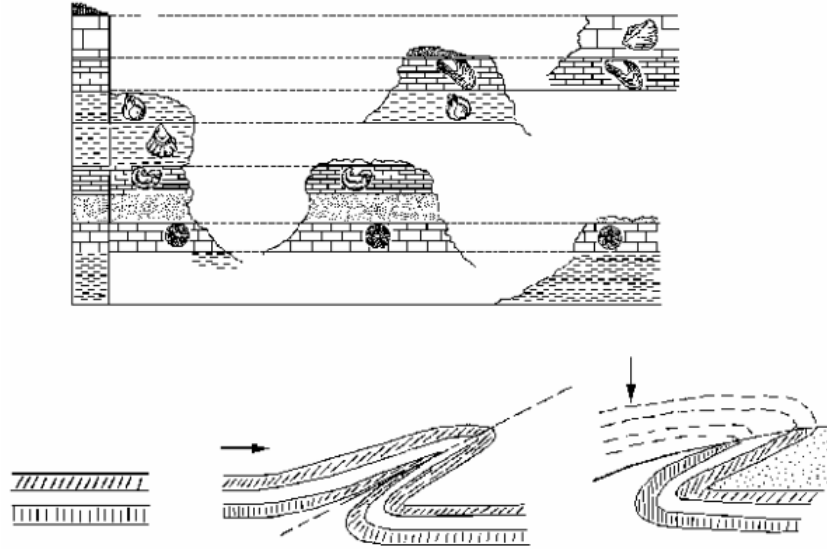


Рис. 3-2. а - составление сводной стратиграфической шкалы на 5 разрезах; б - образование запрокинутого залегания (линия, складка и эрозия "нормальной" половинки).

Принципы эти, казалось бы, предельно просты, однако при их практическом применении нас подстерегает целый ряд ловушек. Так, исходная последовательность слоев в результате тектонических движений зачастую сминается в более или менее горизонтальные складки. Если в дальнейшем вышележащая половинка складки (с "правильной" последовательностью) окажется полностью уничтоженной эрозией, то установить, что в нашем распоряжении осталось лишь искаженное, запрокинутое залегание слоев, будет весьма непросто (см. рисунок 3-2, б). Еще большие проблемы возникают с законом фаунистических ассоциаций. Синхронные, но пространственно удаленные фауны всегда будут отличаться друг от друга; в частности - они будут иметь в своем составе разную долю реликтов, унаследованных от предшествующих эпох. Представьте-ка себе, что вам предложено "вслепую" сопоставить выборки из современных фаун млекопитающих Европы и Австралии (со всеми ее сумчатыми и однопроходными); много ли у вас будет оснований для заключения об их синхронности? Сведение множества региональных последовательностей фаун и флор в единую глобальную шкалу - одна из основных задач специального раздела геологии, стратиграфии (от латинского "стратум" - слой).

Трудности, возникающие на этом пути, велики - но вполне преодолимы. Последовательное применение принципов Стено и Гексли, плюс накопление огромного эмпирического материала, - позволило геологам уже в самом начале XIX века разделить все отложения на первичные, вторичные, третичные и четвертичные. Это деление полностью соответствует современному делению осадочных толщ на палеозойские, мезозойские и кайнозойские (объединяющие два последних подразделения). А к 30-м годам прошлого века в составе этих отложений были выделены и почти все принятые ныне системы (юрская, меловая, каменноугольная и пр.); последняя из них - пермская - была выделена Р. Мурчинсоном в 1841 году.

Так была создана всеобъемлющая шкала относительного времени - геохронологическая шкала - к которой может быть однозначно "привязана" любая содержащая ископаемые осадочная порода. Шкала эта оказалась столь совершенной, что двадцатый век не внес в нее существенных корректив, за исключением чисто формального изменения ранга некоторых ее подразделений. В пятидесятые годы единый третичный

период был разделен на два - палеогеновый и неогеновый. Ордовик, считавшийся частью силура, получил ранг самостоятельного периода. Двадцатый век снабдил ее подразделения абсолютными датировками. Основная проблема, которую с той поры пришлось решать геологам - это создание такой же шкалы для наиболее древних пород, которые считались "немыми".

Самыми крупными подразделениями геохронологической шкалы являются эоны; хорошо известные палеозой, мезозой и кайнозой - это эры, на которые подразделяется последний из эонов - фанерозой (от греческого "фанерос" - видимый, явный, и "зоэ" - жизнь), начавшийся 0,54 млрд. лет назад. Эоны, предшествующие фанерозою, - протерозой (0,54-2,5 млрд. лет) и архей (2,5-4,5 млрд. лет) - часто объединяют под названием криптозой ("криптос" - по гречески скрытый), или докембрий (кембрий - самый первый период фанерозоя). Фундаментальное разделение геохронологической шкалы на фанерозой и докембрий основано на наличии или отсутствии в соответствующих осадочных породах ископаемых остатков организмов, имевших твердый скелет. Первая половина архея, катархей - время, из которого осадочные породы не известны по причине отсутствия тогда гидросферы. Последний отрезок докембрия, венд - время появления бесскелетных многоклеточных животных.

С каждой из единиц, составляющих существующую последовательность осадочных пород, можно однозначное соотносить определенное подразделение временной шкалы - и наоборот; так, все отложения, образовавшиеся на Земле на протяжении юрского периода, образуют юрскую систему, или просто юру. Системы объединяются в группы (юра входит в состав мезозоя), и делятся на отделы (нижняя, средняя и верхняя юра), ярусы (верхняя юра - на келловей, оксфорд, кимеридж и титон) и, далее, на зоны ("Cardioceras cordatum"); временным же эквивалентом группы является эра, отдела - эпоха, яруса - век, зоны - время. Названия подразделений геохронологической шкалы обычно происходят от той местности, откуда были впервые описаны "эталонные" для этого времени осадочные породы (пермский период, оксфордский век); исключение составляет низшая единица шкалы, всегда называемая по так называемому "руководящему ископаемому", характерному для этого момента геологической истории (время *Cardioceras cordatum*).

Итак, например, пермский период следует определить как время, когда на Земле образовывались горные породы такого же типа, что ныне выходят на поверхность в окрестностях уральского города Пермь. Имея дело с геохронологической шкалой, необходимо всегда помнить, что первичен здесь именно определенный тип геологических тел, а время производно, вторично. (Тот же самый принцип используется и в археологии: мезолит или бронзовый век - это время, когда люди делали орудия и украшения определенного типа.) Именно по этой причине геохронология спокойно обходилась и без датировок ее подразделений в миллионах лет, ставших привычными лишь в последние три-четыре десятилетия. Вообще роль абсолютных (радиоизотопных) датировок очень велика для стратиграфии докембрийских толщ, где отсутствуют достаточно сложные ископаемые; радиоуглеродный метод широко применяется для датировки новейших отложений, возрастом менее 40 тысяч лет. В остальном же эти методы играют в стратиграфии сугубо подчиненную роль, и мы в дальнейшем будем в основном обозначать время в терминах не абсолютной, а относительной шкалы.

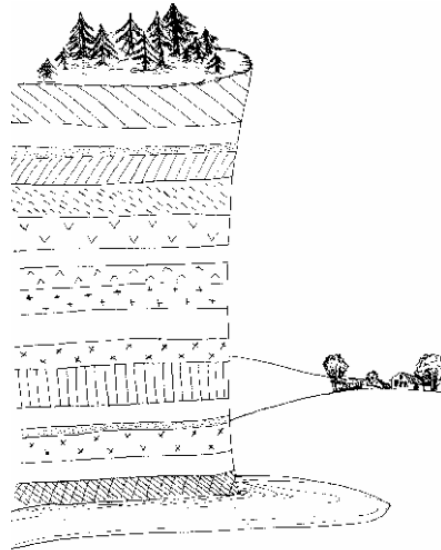


Рис. 3-3. Соответствие стратиграфических и временных подразделений.

Принято считать, что относительная геохронология точна, а абсолютная - нет. Дело в том, что радиоизотопные методы дают нам датировку с точностью до 1-2 %, которая, на первый взгляд, кажется вполне приемлемой. Не забудем, однако, о том, что на отрезках времени в сотни миллионов лет (которыми оперирует геология), эта погрешность измерения тоже будет исчисляться миллионами лет. Пусть мы определили абсолютный возраст некой осадочной толщи как 154 ± 2 млн. лет; в течение этих двух миллионов лет могли накопиться многие сотни метров (или даже километры) осадков. Палеонтологи же способны распознать в этой толще однообразных пород слои толщиной всего в несколько метров, руководствуясь известным им "адресом" - верхняя юра, оксфордский ярус, зона *Cardioceras cordatum*, ибо только в это "мгновение" геологической истории жил на Земле головоногий моллюск *Cardioceras cordatum*. Распознать же столь ничтожный отрезок времени методами абсолютных датировок нельзя ни в каком приближении.

Здесь опять напрашивается аналогия с археологией. Предположим, мы обнаружили древнеегипетский саркофаг. Можно отколупнуть от него щепку и, путем немалых усилий, установить, что дерево из которого он был изготовлен, срублено 4500 ± 300 лет назад. Археолог же поглядит на орнамент саркофага и без колебаний скажет: "Среднее царство, XIII династия... конец, но не самый". Ну, и какая из датировок, на ваш взгляд, более содержательна?

3. 5. Возраст Земли и периодизация геологических событий.

Возраст Земли как планеты по последним данным оценивается $\sim 4,6$ млрд. лет. Изучение метеоритов и лунных пород также подтверждает эту цифру. Однако самые древние породы Земли, доступные непосредственному изучению, имеют возраст около 3,8 млрд. лет. Поэтому весь более древний этап истории Земли носит название до геологической стадии. Объектом же геологического изучения является история Земли за последние 3,8 млрд. лет, которая выделяется в ее геологическую стадию.

Для выяснения закономерностей и условий образования г.п. необходимо знать последовательность их образования и возраст, т.е. установить их геологическую хронологию. Различают **относительный возраст** горных пород (относительная геохронология) и **абсолютный возраст** - (абсолютная геохронология). Установлением возраста горных пород занимается наука **стратиграфия** (лат. Stratum – слой).

Относительный возраст горных пород и методы его определения.

Определение относительного возраста пород – это установление, какие породы образовались раньше, а какие – позже.

Относительный возраст осадочных г.п. устанавливается с помощью геолого-стратиграфических (стратиграфического, литологического, тектонического, геофизических) и биостратиграфических методов.

Стратиграфический метод основан на том, что возраст слоя при нормальном залегании определяется - нижележащие их слои являются более древними, а вышележащие более молодыми. Этот метод может быть использован и при складчатом залегании слоев. Не может быть использован при опрокинутых складках.

Литологический метод основан на изучении и сравнении состава пород в разных обнажениях (естественных- в склонах рек, озер, морей, искусственных – карьерах, котлованах и т.д.). На ограниченной по площади территории, отложения одинакового вещественного состава (т.е. состоят из одинаковых минералов и горных пород) , могут быть разновозрастными. При сопоставлении разрезов различных обнажений используют маркирующие горизонты, которые отчетливо выделяются среди других пород и стратиграфически выдержаны на большой площади.

Тектонический метод основан на том, что мощные процессы деформации г.п. проявляются (как правило) одновременно на больших территориях, поэтому разновозрастные толщи имеют примерно одинаковую степень дислоцированности (смещения). В истории Земли осадконакопления периодически сменялись складчатостью и горообразованием. Возникшие горные области разрушались, а на выровненную территорию вновь наступало море, на дне которого уже несогласно накапливались толщи новых осадочных г.п. в этом случае различные несогласия служат границами, подразделяющими разрезы на отдельные толщи.

Геофизические методы основаны на использовании физических характеристик отложений (удельного сопротивления, природной радиоактивности, остаточной намагниченности горных пород и т.д.) при их расчленении на слои и сопоставлении.

Расчленение пород в буровых скважинах на основании измерений удельного сопротивления г.п. и пористости называется **электрокаротаж**, на основании измерений их радиоактивности - **гамма-каротаж**.

Изучение остаточной намагниченности г.п. называют **палеомагнитным методом**; он основан на том, что магнитные минералы, выпадая в осадок, распластаются в соответствии с магнитным полем Земли той эпохи которая, как известно, постоянно менялась в течении геологического времени. Эта ориентировка сохраняется постоянно, если порода не подвергается нагреванию выше 500 °С (т.н. точка Кюри) или интенсивной деформации и перекристаллизации. Следовательно, в различных слоях направление магнитного поля будет различным. Палеомагнетизм позволяет т.о. сопоставлять отложения значительно удаленные друг от друга (западное побережье Африки и восточное побережье Латинской Америки).

Биостратиграфические или палеонтологические методы состоят в определении возраста г.п. с помощью изучения ископаемых организмов (подробно палеонтологические методы будут рассмотрены в следующей лекции).

Определение относительного возраста магм. Методы для определения возраста осложнены отсутствием палеонтологических остатков. Возраст эффузивных пород, залегающих совместно с осадочными устанавливается по соотношению к осадочным породам. Относительный возраст интрузивных пород определяется по соотношению магматических пород и вмещающих осадочных пород, возраст которых установлен. Определение относительного возраста метаморфических пород аналогично определению относительного возраста магматических пород.

Абсолютный возраст горных пород и методы его определения.

Абсолютная геохронология устанавливает возраст г.п. в единицах времени. Определение абсолютного возраста необходимо для корреляции и сопоставления биостратиграфических подразделений различных участков Земли, а также установления возраста лишенных палеонтологических остатков фанерозойских и докембрийских пород.

К методам определения абсолютного возраста пород относятся методы ядерной (или изотопной геохронологии) и не радиологические методы

Методы ядерной геохронологии в наше время являются наиболее точными для определения абсолютного возраста горной породы, в основе которых лежит явление самопроизвольного превращения радиоактивного изотопа одного элемента в стабильный изотоп другого. Суть методов состоит в определении соотношений между количеством радиоактивных элементов и количеством устойчивых продуктов их распада в горной породе. По скорости распада изотопа, которая для определенного радиоактивного изотопа есть величина постоянная, количеству радиоактивных и образовавшихся стабильных изотопов, рассчитывают время, прошедшее с начала образования минерала.

Разработано большое число радиоактивных методов определения абсолютного возраста: свинцовый, калиево-аргоновый, рубидиево-стронциевый, радиоуглеродный и др. (выше установленный возраст Земли 4,6 млрд. лет не установлен с применением свинцового метода).

Соляной метод был применен для определения возраста Мирового океана. Он основан на предположении, что воды океана были первоначально пресными, то, зная современное количество солей с континентов, можно определить время существования Мирового океана (~ 97 млн. лет).

Седиментационный метод основан на изучении осадочных пород в морях. Зная объем и мощность морских отложений в отдельных системах и объем минерального вещества, ежегодно сносимого в моря с континентов можно вычислить продолжительность их наполнения.

Биологический метод базируется на представлении о сравнительно равномерном развитии орг. мира. Исходный параметр – продолжительность четвертичного периода 1,7 – 2 млн. лет.

Метод подсчета слоев ленточных глин, накапливающихся на периферии тающих ледников. Глинистые осадки откладываются зимой, а песчаные летом и весной, т.о. каждая пара таких слоев результат годичного накопления осадков (последний ледник на Балтийском море прекратил свое движение 12 тысяч лет назад).

геохронологические подразделения	стратиграфические подразделения	вспомогательные подразделения
эон	эонотема	-
эра	эрастема	-
период	система	серия (формация)
эпоха	отдел	свита (толща)
век	ярус	-
время (фаза)	зона (горизонт)	подсвита, пачка, слои, горизонт

Периодизация истории Земли. Геохронологическая шкала.

На основании изменений в развитии органического мира вся история Земли подразделяется на несколько геохронологических этапов (эра период и т.п.), которым соответствуют определенные комплексы отложений (группы, системы и т.п.). В течение этих этапов в различных районах Земли происходили процессы накопления осадков или разрушение ранее образовавшихся отложений. Поэтому полный разрез, включающий все известные системы в каком либо месте не известен ни в одной точке Земли. Общие стратиграфическая и геохронологическая шкала основаны на изучении реально существующих геологических разрезов в различных районах суши Земли лежат особенности состава пород.

Подразделения геохронологической шкалы соответствуют подразделениям стратиграфической шкалы.

Эон	Эра	Период (система)	Эпоха	Завершение, лет назад	Основные события
Фанерозой	Кайнозой	Четвертичный (антропогенный)	Голоцен	Продолжается в наши дни	Конец ледникового периода. Возникновение цивилизаций
			Плейстоцен	11 400	Вымирание многих крупных млекопитающих Появление современного человека
		Неогеновый	Плиоцен	1,81 млн.	
			Миоцен	5,33 млн.	
		Палеогеновый	Олигоцен	23,0 млн.	Появление человекообразных обезьян
			Эоцен	37,2 млн.	Появление "современных" млекопитающих
	Мезозой	Меловой	Палеоцен	55,8 млн.	
			Юрский	146 млн.	Плацентарные млекопитающие. Вымирание динозавров
			Триасовый	200 млн.	Сумчатые млекопитающие и первые птицы. Расцвет динозавров
	Палеозой	Пермский	Динозавры и яйцекладущие млекопитающие	251 млн.	Массовое пермское вымирание. 95% всех существовавших видов
			Каменноугольный	299 млн.	Появление деревьев и пресмыкающихся
			Девонский	359 млн.	Появление земноводных и споровых растений
			Силурийский	416 млн.	Выход жизни на сушу. Скорпионы, первые растения
			Ордовикский	443 млн.	Богатая морская фауна: ракоскорпионы, кальмары
			Кембрийский	488 млн.	Кембрийский взрыв - появление большого количества новых групп организмов
	Докембрий	Неопротерозой	Эдиакарий	542 млн.	Первые многоклеточные животные
Криогений			600 млн.	Одно из самых масштабных оледенений Земли	
Тоний			850 млн.	Начало распада суперконтинента Родиния	
Мезопротерозой		Стений	Суперконтинент Родиния, суперокеан Мировия	1,0 млрд.	
			Эктазий	1,2 млрд.	
			Калимий	1,4 млрд.	
			Статерий	1,6 млрд.	
Палеопротерозой		Орозирий	1,8 млрд.		
			Риасий	2,05 млрд.	
			Сидерий	2,3 млрд.	Кислородная катастрофа
Архей		Неоархей	2,5 млрд.		
			Мезоархей	2,8 млрд.	
			Палеоархей	3,2 млрд.	
	Эоархей		3,6 млрд.	Появление одноклеточных организмов	
Катархей (Гадей)	3,8 млрд.	Формирование Земли - 4,57 млрд. лет назад.			

3. 6. Изотопные методы определения возраста минералов и горных пород.

Многочисленные попытки найти в макромире часы, которые бы позволяли надежно устанавливать возраст горных пород и руд, время проявления и длительность геологических процессов, не увенчались успехом. Такие часы скрывались в микроскопическом мире атомов, и обнаружение их стало возможным только после открытия в 1896 г. французским физиком А. Беккерелем явления радиоактивного распада. Было также установлено, что процесс радиоактивного распада происходит с постоянной скоростью, как на нашей Земле, так и в Солнечной системе. На этом основании П. Кюри (1902) и независимо от него Э. Резерфорд (1902) высказали мысль о возможности использования радиоактивного распада элементов в качестве меры геологического времени. Так наука в начале XX столетия подошла к созданию часов, основанных на радиоактивных природных превращениях, ход которых не зависит от геологических и астрономических явлений.

Первые определения возраста по отношению Pb/U были сделаны в США Б. Болтвудом в 1907 г. Для трех образцов уранинита были получены значения возраста от 410 до 535 млн. лет, которые хорошо согласуются с более поздними датировками. Важным техническим достижением в геохронологии было изобретение Ф.В.Астоном (1927) масс-спектрографа - прибора, предназначенного для измерения масс изотопов. Изотопами называются разновидности атомов, имеющие одно и то же число протонов (Z), а, следовательно, один и тот же атомный номер в Периодической таблице элементов, но разное число нейтронов (N) и, соответственно, разные массовые числа (A), т. к. масса ядра складывается из суммы масс входящих в него протонов и нейтронов, т. е. $A = Z + N$. При указании химического символа изотопа, его массу принято записывать слева вверху, а заряд ядра слева внизу: ${}_{92}^{238}\text{U}$, ${}_{92}^{235}\text{U}$, ${}_{62}^{147}\text{Sm}$, ${}_{6}^{14}\text{C}$ и т. д.

Э.Резерфордом (1899) было установлено, что при радиоактивном распаде испускаются три вида компонентов, которые он обозначил буквами греческого алфавита - α , β и γ . В последующем было установлено, что α - частицы являются быстро движущимися ядрами гелия, β - частицы - быстрыми электронами, γ - компонент представляет собой электромагнитное излучение, подобное рентгеновским X - лучам. По наименованию частиц, испускаемых радиоактивными элементами, названы соответствующие типы радиоактивного распада.

Альфа (α) - распад испытывают только тяжелые химические элементы. Причиной этому служат, по-видимому, высокие содержания в их ядрах положительно заряженных частиц - протонов, создающих высокую энергию кулоновского отталкивания, ослабляющего связь нуклонов (т.е. протонов и нейтронов) в ядре. При достижении некоторого критического значения Z и A , ядру становится энергетически выгоднее переход в состояние с меньшим числом ядерных частиц. Распад ядра сопровождается испусканием α - частицы (иона ${}_{2}^{4}\text{He}$) и образованием нового ядра, в котором нейтронов (N) меньше на 2 и протонов (Z) на 2, т.е. $(A, Z) \rightarrow (A-4, Z-2) + {}_{2}^{4}\text{He}$.

β - распад (или электронный распад), состоит в том, что ядро самопроизвольно испускает β - частицу - электрон, характеризующийся отрицательным зарядом, и нейтральную элементарную частицу - антинейтрино (ν). Для ядра энергетически не выгодно сверхнормативное число нейтронов относительно протонов, и оно будет стремиться избавиться от лишних нейтронов, путем распада одного из них на протон, электрон и антинейтрино. Новообразованный электрон выбрасывается из ядра, а возникшее новое ядро будет обладать зарядом на единицу большим: $(A, Z) \rightarrow (A, Z+1) + e^{-} + \bar{\nu}$. Из других видов радиоактивного распада, отметим К - захват и спонтанное деление.

К - захват (или электронный захват). При этом типе распада, ядро захватывает электрон из ближайшего к нему К - уровня электронного облака. В ядре электрон соединяется с протоном и превращает его в нейтрон. В итоге при К - захвате заряд уменьшается на единицу, а массовое число остается постоянным: $(A, Z) + e^{-} \rightarrow (A, Z-1) + \nu$.

Спонтанное (или самопроизвольное) деление ядра на два, сравнимых по массе осколка, является свойством очень тяжелых ядер. Оно было открыто в СССР К.А.Петржаком и Г.Н. Флеровым в 1940 г. Процесс этот очень медленный. Например, на 2 230 000 α - распадов ${}^{238}\text{U}$ приходится всего один акт спонтанного деления. Возрасты горных пород и минералов обычно выражаются в 10^6 и 10^9 лет, или в значениях Международной системы единиц (СИ): Ма и Га. Эта аббревиатура образована от латинских Mega anna и Giga anna, означающих, соответственно, «млн. лет» и «млрд. лет».

Все типы радиоактивных превращений подчиняются *закону радиоактивного распада*. Этот закон определяет зависимость между числом изотопов в закрытой системе (минерале, породе) в момент ее образования N_0 и числом атомов N_t не распавшихся по прошествии времени t : $N_0 = N_t e^{\lambda t}$ где λ - постоянная распада - доля распавшихся ядер данного изотопа за единицу времени, от общего их количества в закрытой системе (минерале, породе). Размерность этой единицы - год⁻¹; e - основание натуральных логарифмов. Из закона радиоактивного распада, выведено *главное уравнение геохронологии*, по которому вычисляется возраст, отсчитываемый радиоактивными часами: $t = 1/\lambda \ln(N_0/N_t + 1)$, где N_k - число изотопов конечного продукта распада; N_t - число радиоактивных изотопов, не распавшихся по прошествии времени t . Таким образом, чтобы определить возраст минерала или породы (t), достаточно измерить количество материнского радионуклида и продукта его распада - стабильного дочернего изотопа. Численное значение λ для каждого радиоизотопа определяется особо и при обычной работе берется из таблиц. Вместо постоянной распада радиоактивного изотопа на практике часто используется другая его характеристика - период полураспада ($T_{1/2}$) - время, за которое число радиоактивных ядер данного изотопа убывает на половину. Период полураспада связан с постоянной распада следующим отношением: $T_{1/2} = \ln 2/\lambda = 0.693/\lambda$.

Названия изотопно-геохронологических методов обычно образуются из названий радиоактивных изотопов и конечных продуктов их распада. По этому признаку различают: *уран-торий-свинцовый (часто уран-свинцовый), калий-аргоновый, рубидий-стронциевый, рений-осмиевый и др. методы*. Иногда названия даются только по конечному (стабильному) продукту радиоактивного превращения: свинцовый, аргоновый, стронциевый методы и т. д.

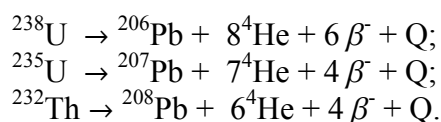
Рассмотрим в качестве примеров некоторые изотопно-геохронологические методы (таб.).

Таблица

Значения констант, принятых в изотопной геохронологии

Радионуклид	Тип распада	Радиогенный изотоп	$\lambda, 10^{-9}/\text{год}$	$T_{1/2}, 10^9 \text{ лет}$
²³⁸ U	α	²⁰⁶ Pb	0,155125	4,4683
²³⁵ U	α	²⁰⁷ Pb	0,98485	0,70391
²³² U	α	²⁰⁸ Pb	0,049475	14,01
⁸⁷ Rb	β^-	⁸⁷ Sr	0,0142	48,8
⁴⁰ K	K-захват	⁴⁰ Ar	0,0581	1,250
¹⁴⁷ Sm	α	¹⁴³ Nd	0,00654	106
¹⁸⁷ Re	β^-	¹⁸⁷ Os	0,0164	42,256

Уран-торий-свинцовый метод. Радиоактивный распад урана и тория в стабильные изотопы свинца долгое время (до появления самарий-неодимового метода) рассматривался в качестве стандарта, с которым сравнивались данные других методов. Вместе с тем это один из наиболее сложных методов в изотопной геохронологии. В уран-ториевой изотопной системе существует три независимых семейства радиоактивного распада:



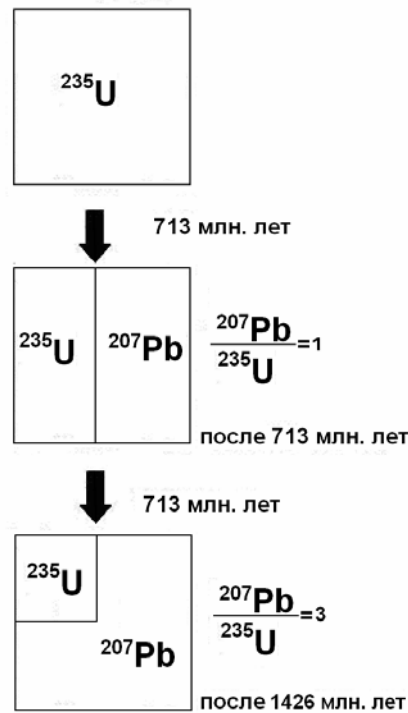


Рис. 3-4. Радиоактивный распад урана 235.

Распад каждого радиоактивного изотопа порождает длинный ряд промежуточных продуктов распада и заканчивается стабильным изотопом свинца. Главное уравнение геохронологии, применительно к данной изотопной системе, имеет следующий вид (на примере отношения $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$):

$$t(^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}) = 1/\lambda \ln[(^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_{\text{ms}} - (^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_{\text{i}} / (^{238}\text{U}/^{204}\text{Pb})_{\text{ms}}] + 1,$$

где $t(^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U})$ - возраст образца по данному отношению; $(^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_{\text{ms}}$ ($^{238}\text{U}/^{204}\text{Pb})_{\text{ms}}$ - измеренные изотопные отношения; $(^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_{\text{i}}$ - первоначальное отношение. Аналогичным образом рассчитывается возраст и по отношениям $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ и $^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$. Кроме того, для уран-свинцовых семейств, принято вычислять возраст еще и по отношениям радиогенных изотопов свинца - $(^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb})_{\text{rad}}$. Если, в итоге, по всем четырем изотопным отношениям получены одинаковые датировки, то можно считать, что возраст определен надежно. Исследуемый минерал на протяжении всего времени существования оставался замкнутой системой относительно U, Th и Pb. Однако нередки случаи, когда по разным изотопным отношениям получаются разные цифры возраста. Чаще всего $t(^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}) > t(^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}) > t(^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}) > t(^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th})$. Такие соотношения свидетельствуют о потере минералом радиогенного свинца. Влияние потери меньше всего сказывается на отношении $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$, в связи с тем, что фракционирования изотопов свинца, при этом процессе, почти не происходит. Поэтому возрастная датировка, по свинцово-свинцовому отношению, принимается обычно в качестве наиболее близкой к действительному возрасту образца.

В последние годы в U-Th-Pb изотопном датировании цирконов удалось достичь значительного прогресса, благодаря применению ионного микрозонда (SHRIMP), сконструированного проф. У. Компстоном в Австралийском национальном университете. Этот прибор сочетает высокую чувствительность и разрешение с локальностью анализа (30 мкм). На этом приборе были проанализированы обломочные зерна циркона, из метаосадочных пород позднеархейского зеленокаменного пояса блока Илгарн (Зап. Австралия), показавшие возраст 4.1 - 4.3 млрд. лет.

Калий-аргоновый метод. Калий состоит из трех изотопов - ^{39}K , ^{40}K и ^{41}K , из которых только ^{40}K обладает естественной радиоактивностью. Немецкий физик Вейцзекер (1937) установил, что ^{40}K претерпевает двойной распад - в ^{40}Ar и ^{40}Ca . В ^{40}Ca путем β^- распада переходит 89,05% ядер ^{40}K , а в ^{40}Ar , посредством К-захвата, - 10,95 %. Двойной распад ^{40}K позволяет определять возраст К- содержащих минералов и пород по двум геохронометрам. Но распад ^{40}K в ^{40}Ca широкого применения в геохронологии не получил, т.к. природный кальций, содержащийся во многих породах и минералах, имеет то же массовое число, что и радиогенный ^{40}Ca , и отличить их очень трудно. Наиболее надежной оказалась К-Аг ветвь распада. Учитывая идеальную длительность периода полураспада К - 1250 млн. лет, и широкое распространение К- содержащих минералов в природе, К - Аг метод оказался пригодным для определения возраста во всех интервалах геологического времени - от архея до антропогена и почти для всех типов горных пород - осадочных, магматических и метаморфических. Следует отметить большую роль К-Аг метода в датировании осадочных пород позднего докембрия по калийсодержащему минералу глаукониту. Частая встречаемость и синхронность образования глауконита с формированием морских осадков, позволила установить большой возрастной диапазон процесса позднекембрийской седиментации - от 1650 до 570 млн. лет, который оказался на много более продолжительным, чем предполагалось.

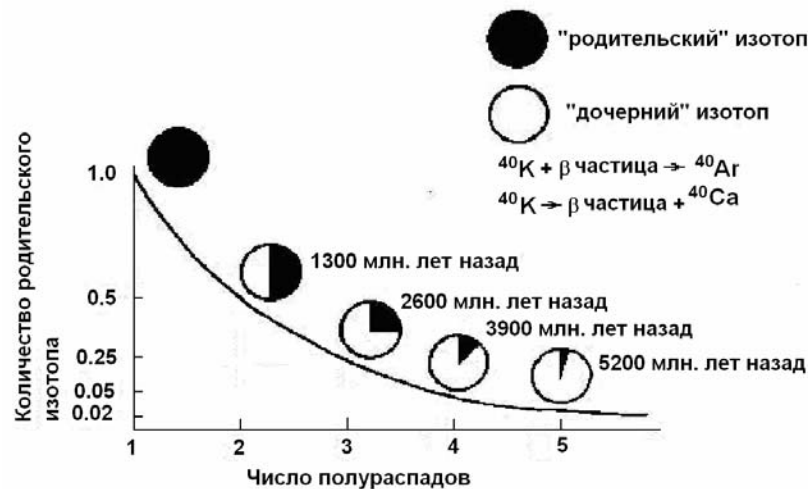


Рис. 3-5. Распад радиоактивного изотопа ^{40}K имеет два пути, превращаясь в ^{40}Ar или в ^{40}Ca .

В последнее время широкое применение получил метод датирования по отношению $^{39}\text{Ar} / ^{40}\text{Ar}$. Этот метод, в отличие от обычного К-Аг, позволяет определять возраст, на который не влияют природные потери ^{40}Ar . Для лунных морских базальтов этим методом был получен возраст 3.78 - 3.84 млрд. лет, а для анортозитовых брекчий и габбро 4,05 и 4,26 млрд. лет, соответственно.

Рубидий-стронциевый метод. Принцип метода основан на β^- распаде изотопа ^{87}Rb и превращении его в стабильный изотоп ^{87}Sr по схеме: $^{87}_{37}\text{Rb} \rightarrow ^{87}_{38}\text{Sr} + \beta^- + \nu + Q$, где ν - антинейтрино, Q - энергия распада. Распространенность рубидия в минералах горных пород определяется, в первую очередь, близостью ионных радиусов Rb^+ ($r = 1.48 \text{ \AA}$) к ионам калия K^+ ($r = 1.33 \text{ \AA}$). Это позволяет иону Rb замещать ион К во всех важнейших породообразующих минералах.

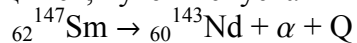
Распространенность стронция контролируется способностью иона Sr^{2+} ($r = 1.13 \text{ \AA}$) замещать ион Ca^{2+} ($r = 1.01 \text{ \AA}$), в кальций - содержащих минералах (главным образом в плагиоклазе и апатите), а так же возможностью его вхождения в решетку калиевых полевых шпатов на место иона K^+ . Вычисление возраста производится по главному

уравнению геохронологии, которое, применительно к Rb-Sr методу, имеет следующий вид:

$$t = 1/\lambda \ln [(^{87}\text{Sr} / ^{86}\text{Sr}) - (^{87}\text{Sr} / ^{86}\text{Sr})_i / (^{87}\text{Rb} / ^{86}\text{Sr})] + 1.$$

Rb-Sr метод успешно используется не только для определения возраста земных пород, но и для лунных и метеоритов. В частности, по дунитам, норитам и другим породам лунных материков, этим методом получены возрасты 4,3 - 4,6 млрд. лет, т.е. сопоставимые с принятым возрастом Земли.

Самарий-неодимовый метод. Самарий и неодим являются редкоземельными элементами. При метаморфизме, гидротермальном изменении и химическом выветривании они менее мобильны, чем щелочные и щелочноземельные элементы, такие, как K, Rb, Sr и др. Поэтому Sm-Nd метод дает более надежные датировки возраста горных пород, чем Rb-Sr. Предложение об использовании Sm-Nd метода в геохронологии впервые сделал Г. Лагмайр (G. Lugmair, 1947), определивший возраст двух эвкритовых ахондритов - Juvinas и Stanner и одного лунного образца. Для метеорита Juvinas он получил Sm-Nd возраст $4,56 \pm 0,08$ млрд. лет и первичное отношение $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0,50677 \pm 0,00010$. Он же показал, что отношение изотопов неодима $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ является индикатором изменений в относительном содержании ^{143}Nd , обусловленного распадом ^{147}Sm . В разработку, внедрению в геологическую практику Sm-Nd метода и интерпретацию получаемых данных, большой вклад внесли американские исследователи Де Паоло и Г.Вассербург. Для самария известны 7 изотопов, но только один из них - ^{147}Sm является радиоактивным, распадающимся, путем испускания α - частицы, в ^{143}Nd по схеме:



Период полураспада ^{147}Sm очень большой - 106 млрд.лет. Лучше всего самарий - неодимовый метод применим для определения возраст основных и ультраосновных пород, в том числе и метаморфических (эклогитов, метадиабазов и др.).

Рений-осмиевый метод. Рений - рассеянный элемент. Наиболее высокие концентрации его содержатся в молибдените (до 1,88 %), особенно когда он находится в ассоциации с сульфидами меди. Рений имеет два изотопа - ^{185}Re и ^{187}Re , последний изотоп радиоактивен. Осмий - металл платиновой группы, обладает ярко выраженными сидерофильными свойствами. Самые высокие его концентрации обнаружены в осмириде - сплаве осмия с иридием и другими металлами платиновой группы. Осмий имеет 7 изотопов и все они стабильны. Изотоп ^{187}Re путем эмиссии β^- частицы распадается в ^{187}Os по схеме: $^{75}_{187}\text{Re} \rightarrow ^{76}_{187}\text{Os} + \beta^- + \text{Q}$. Накопление ^{187}Os в Re - содержащей системе, описывается уравнением:

$$(^{187}\text{Os} / ^{186}\text{Os}) = (^{187}\text{Os} / ^{186}\text{Os})_i + [(^{187}\text{Re} / ^{186}\text{Os}) \cdot (e^{\lambda t} - 1)],$$

где $(^{187}\text{Os} / ^{186}\text{Os})$ и $(^{187}\text{Re} / ^{186}\text{Os})$ - современные планетарные значения отношений, равные, соответственно, 1.06 и 3.3; первичное значение $(^{187}\text{Os} / ^{186}\text{Os})_i = 0.81$.

Re-Os изотопная система получила широкое применение не только в геохронологии, но и в исследовании эволюции мантии Земли и развитии земной коры. Она уникальна по сравнению с U- Pb и Rb-Sr системами в том отношении, что родительские и дочерние элементы последних отторгаются мантийными фазами. В Re-Os системе все обстоит по-другому. Re, например, в большинстве случаев, лишь незначительно перераспределяется между мантийным реститом и расплавом, так что его концентрация в мантии заметно не изменяется при дифференциации. Os то же практически весь остается в мантийном остатке, в расплав его переходит не более сотых долей от исходных концентраций в мантии. Поэтому Re-Os система, в отличие от других изотопных систем, при условии изоляции ее от последующих процессов вещественного обмена, может дать первичный возраст остывания и кристаллизации мантии (ТМА), предшествующий этапу её частичного плавления. При использовании Re-Os изотопной системы, совместно с другими изотопными методами, можно получить комплиментарную

информацию, относящуюся к возрасту, происхождению различных типов пород и эволюции коры и мантии. Кроме того, это один из немногих методов, позволяющий датировать возрасты сульфидных месторождений, он успешно используется так же для изучения метеоритов. С его помощью была построена Re-Os изохрона для метеоритов, включившая все их типы - железные, железокремнистые и металлическую фазу хондритов. Все экспериментальные точки легли строго, в пределах погрешности эксперимента, на изохрону, свидетельствуя об очень коротком интервале времени образования всех типов метеоритов из газовой пылевой облака. Точка, соответствующая изотопному составу $^{187}\text{Os}/^{186}\text{Os}$ и $^{187}\text{Re}/^{186}\text{Os}$ в мантии Земли, так же легла на эту изохрону, подтверждая предположение об одновременности образования Земли и метеоритов из одного и того же источника.

Радиоуглеродный метод датирования основан на естественном распаде космогенного радионуклида ^{14}C , образующегося в верхних слоях атмосферы в результате взаимодействия нейтронов и протонов космического происхождения с ядрами атмосферных газов - N_2 , O_2 , Ar (рис. 3-6).

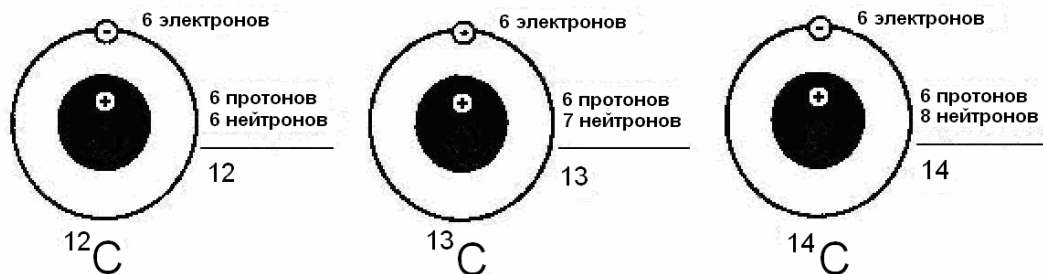
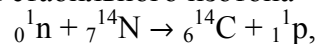


Рис. 3-6. Строение атомов углерода.

Реакции расщепления ядер - мишеней, вызванные частицами высоких энергий первичного космического излучения, сопровождаются образованием вторичных протонов, нейтронов, пионов и других частиц. Многие из вторичных частиц обладают достаточной энергией, чтобы вызвать новые ядерные реакции при взаимодействии со стабильными изотопами N, O, C и создать новые вторичные частицы. В целом этот процесс носит каскадный характер. Наиболее важной в образовании ^{14}C , является реакция вторичных нейтронов с ядрами стабильного изотопа ^{14}N :



где ${}_0^1\text{n}$ — нейтрон; ${}_1^1\text{p}$ - протон, испускаемый новообразованным изотопом. В результате взаимодействия с кислородом воздуха, или CO и CO_2 , атомы ^{14}C переходят в молекулы диоксида углерода. Поскольку процесс перемешивания в атмосфере происходит достаточно быстро, то концентрация $^{14}\text{CO}_2$ повсеместно выравнивается - в атмосфере, гидросфере и биосфере. В биосферу ^{14}C попадает сначала в результате фотосинтеза зеленых растений и путем всасывания корнями из почвы, а потом по пищевой цепочке передается животным организмам. В гидросферу ^{14}C попадает в результате молекулярного обмена между CO_2 атмосферы и поверхностью вод. Отсюда он попадает в карбонатные скелеты и раковины водных организмов.

Атомы ^{14}C не стабильны и путем β^- распада превращаются в стабильные изотопы ^{14}N , согласно схеме: ${}_6^{14}\text{C} \rightarrow {}_7^{14}\text{N} + \beta^- + \nu + Q$.

Постоянная распада $\lambda^{14}\text{C} = 1.209 \cdot 10^{-4} \text{ год}^{-1}$, период полураспада $T_{1/2} = 5730 \pm 40$ лет. Когда концентрация ^{14}C становится всюду одинаковой, это означает, что распад ^{14}C уравнивается его образованием в атмосфере. Для живой ткани равновесное состояние определяется так называемой удельной активностью ^{14}C , которая принимается равной 13.56 ± 0.07 распадов / (мин. г углерода). Если организм умирает, то прекращается поступление ^{14}C и в результате радиоактивного распада удельная активность ^{14}C уменьшается. Измерив значение активности в образце и зная ее величину в живой ткани

(= 13,56 расп. / мин. на 1 г С), можно рассчитать время прекращения углеродного обмена организмом. Радиоактивность организма, прекратившего жизнедеятельность t лет назад, определяется по уравнению радиоактивного распада: $N = N_0 e^{-\lambda t}$, где N - измеренная активность ^{14}C (т.е. число распадов в 1 мин. в 1 г углерода); N_0 - активность ткани живого организма.

Углеродный возраст образца организма, прекратившего жизнедеятельность t лет назад, определяется по следующему уравнению: $T = 1/\lambda \ln(N_0/N)$.

Объектами радиоуглеродного датирования могут быть любые образцы, содержащие углерод, возрастом не более 70 тыс. лет - древесина, древесный уголь, торф, раковины, кости, пергамент, волосы и другие материалы.

Метод основан на допущении, что образующееся количество ^{14}C в атмосфере постоянно. Однако, имеются данные о значительном изменении атмосферного содержания радиоуглерода в прошлом (до 10 %). Причинами изменения содержания ^{14}C в атмосфере могут быть: - вариации в интенсивности космического излучения, - загрязнения атмосферы за счет сжигания ископаемого топлива (понижение $^{14}\text{C} / ^{12}\text{C}$), - за счет ядерных взрывов в атмосфере и под землей, - работы ядерных реакторов, аварий на атомных электростанциях (увеличение $^{14}\text{C} / ^{12}\text{C}$) и др. Радиоуглеродный метод находит широкое применение для датирования событий позднего плейстоцена и четвертичного периода. С его помощью был установлен возраст последнего прорыва босфорских вод в Черное море, вызвавших его сероводородное заражение - около 7500 - 8000 лет назад (А.П.Виноградов, 1967); производилось изучение четвертичного вулканизма, по обугленным древесным остаткам; датирование морских террас, по раковинам моллюсков; определение возрастов этапов оледенений; времени вымирания некоторых групп животных и т. д. Особенно эффективно он используется в археологических исследованиях.

3. 7. Возраст самых древних пород земной коры - 4,28 млрд. лет.

Геологи оценили возраст пород недавно открытого зеленокаменного пояса на севере Канады. Их расчеты основывались на соотношении самария и разных изотопов неодима. Этот метод используется для оценок возраста пород старше 4 млрд. лет, например метеоритов. Оказалось, что некоторые составляющие этого зеленокаменного пояса имеют возраст 4,28 млрд. лет. Это всего на 300 млн. лет позже рождения самой Земли.

Возраст Земли сейчас оценивают в 4,5–4,6 млрд. лет. Этот возраст расчетный, так как никаких пород от тех времен не сохранилось (или неизвестно, где и как их искать). Древнейшие найденные породы имеют возраст 4,03 млрд. лет (северо-западные территории Канады) и 4,27 млрд. лет (в Западной Австралии). Для расчетов возраста этих пород обычно используют радиоизотопный метод датирования (см. также Radiometric dating) по цирконовым гранулам. Но главное ограничение циркониевого метода в том, что циркон — это редкий минерал, и в наиболее распространенных магматических породах он не встречается.

Геологи из Монреаля (Университет Мак-Гилла и Квебекский университет) и Вашингтона (Институт Карнеги) решили использовать другой метод для определения абсолютного возраста древних пород — по соотношению неодим–самарий.

Изотоп самария с атомным весом 146 (^{146}Sm) распадается с образованием изотопа неодима ^{142}Nd , период полураспада ^{146}Sm составляет 103 миллиона лет. Соотношение этих двух изотопов говорит о возрасте пород — но это если известно изначальное содержание изотопа самария ^{146}Sm в породе. А поскольку оно неизвестно, геологи отталкиваются от другого соотношения — двух стабильных изотопов неодима $^{144}\text{Nd}/^{142}\text{Nd}$. Это соотношение меняется из-за распада самария — то есть чем древнее порода, тем больше в ней должно быть относительное содержание изотопа ^{142}Nd . Измерив в породе содержание изотопа

самария-146 и соотношение $^{144}\text{Nd}/^{142}\text{Nd}$ и учтя период полураспада самария, а также «фоновое» соотношение $^{144}\text{Nd}/^{142}\text{Nd}$, геологи и оценивают возраст древних пород.

Сланцы, которые изучали геологи, были доставлены в лабораторию из зеленокаменного пояса (Greenstone belt), расположенного у инуитского (эскимосского) поселка Нуввуагиттук (Nuvvuagittuq) в Квебеке. Этот зеленокаменный пояс был обнаружен исследователями несколько лет назад, и его древний возраст был определен сразу же, в том же году. Остальные годы специалисты перепроверяли результаты и описывали строение формации и минералогию. Этот пояс составлен вулканическими породами и окружен массивом тоналитов, сложенных кварцем, натриевым плагиоклазом, амфиболом, биотитом. В тоналитах были найдены вкрапления циркона и по этим вкраплениям определен возраст тоналитов — 3,66 млрд лет. А вот основные породы самого пояса — это своеобразные по химическому составу амфиболы, называемые куммингтонитом. Так как эти породы отличаются от основной массы амфиболов, с которыми привыкли иметь дело канадские геологи, то авторы статьи в *Science* даже назвали куммингтонит лжеамфиболом. И самое важное было для них — определить возраст этих лжеамфиболов. Он оказался 4,28 млрд лет.

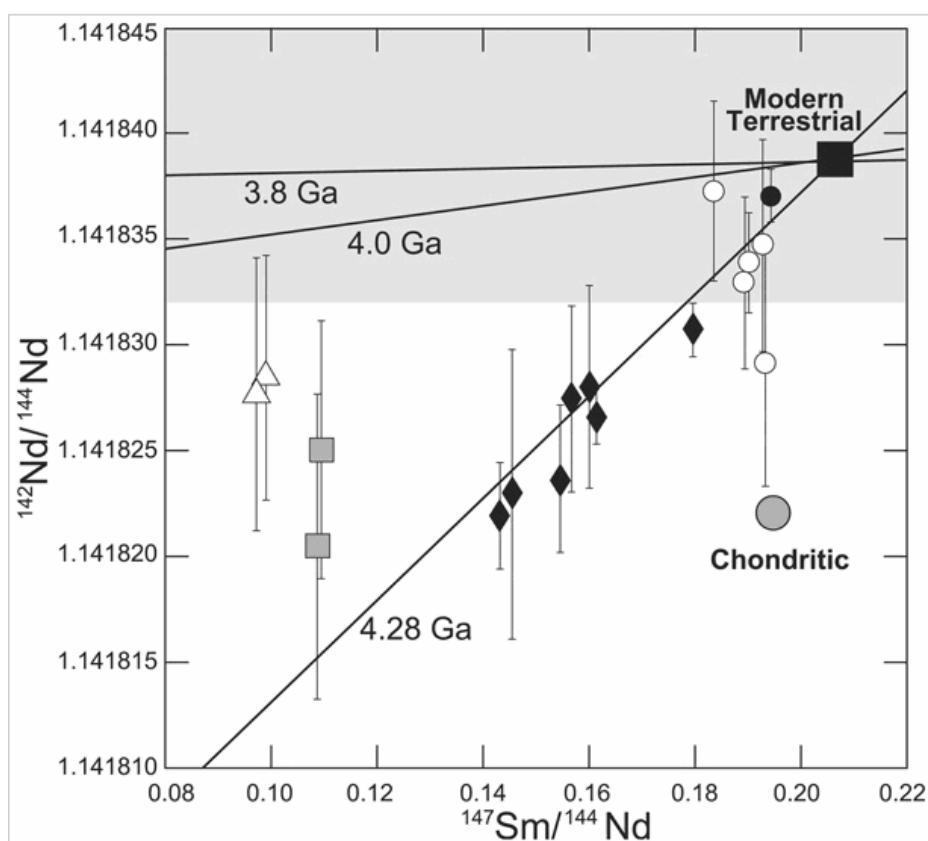


Рис. 3-7. Isochronы по изотопам неодима и самария. Стандартные для современных земных пород значения показаны *большим квадратом и серой полосой* вверху. *Черные ромбы* - это данные по семи изученным образцам. По ним и построена изохрона, соответствующая возрасту 4,28 млрд лет. *Кружки, квадраты и треугольники* показывают изотопные соотношения других геологических структур, окружающие лжеамфиболы. *Большой серый кружок* указывает соответствующие значения изотопных соотношений для метеоритов (хондритов). График из статьи (O'Neil J., et al., Neodymium-142 Evidence for Hadean Mafic Crust // *Science*. 2008. V. 321. P. 1828–1831.).

Если считать, что эти оценки относятся к моменту образования пород, то получается, что земная кора формировалась уже через 300 млн. лет после рождения Солнечной системы и самой Земли, чей возраст оценивается в 4,5-4,6 млрд. лет. В интервью для *Canadian Press* Джонатан О'Нил высказал несколько предположений, которые косвенно следуют из приведенных изотопных соотношений и содержания других элементов в породах этого древнейшего зеленокаменного пояса: «Эти данные дают ученым новые возможности для исследования процесса отделения земной коры от мантии. Помимо этого, некоторые детали указывают на возможное присутствие воды при формировании этих пород. Значит, океаны уже существовали тогда, 4,28 млрд. лет назад. Условия в том океане, конечно, отличались от теперешних, но не катастрофическим образом. И в принципе, условия были таковы, что там могла быть жизнь. Пока никаких следов ее не нашли. Однако в исследованных породах очень высокое содержание железа, а обогащение пород железом может происходить при участии бактерий. Тогда (но это только предположение!) — перед нами первое свидетельство жизни».