

И.Е. Старик

**Радиоактивные методы
определения геологического
времени**

**Москва
«Книга по Требованию»**

УДК 55
ББК 26.3
И11

И11 **И.Е. Старик**
Радиоактивные методы определения геологического времени / И.Е. Старик –
М.: Книга по Требованию, 2021. – 178 с.

ISBN 978-5-458-59731-9

ISBN 978-5-458-59731-9

© Издание на русском языке, оформление
«YOYO Media», 2021

© Издание на русском языке, оцифровка,
«Книга по Требованию», 2021

Эта книга является репринтом оригинала, который мы создали специально для Вас, используя запатентованные технологии производства репринтных книг и печати по требованию.

Сначала мы отсканировали каждую страницу оригинала этой редкой книги на профессиональном оборудовании. Затем с помощью специально разработанных программ мы произвели очистку изображения от пятен, клякс, перегибов и попытались отбелить и выровнять каждую страницу книги. К сожалению, некоторые страницы нельзя вернуть в изначальное состояние, и если их было трудно читать в оригинале, то даже при цифровой реставрации их невозможно улучшить.

Разумеется, автоматизированная программная обработка репринтных книг – не самое лучшее решение для восстановления текста в его первозданном виде, однако, наша цель – вернуть читателю точную копию книги, которой может быть несколько веков.

Поэтому мы предупреждаем о возможных погрешностях восстановленного репринтного издания. В издании могут отсутствовать одна или несколько страниц текста, могут встретиться невыводимые пятна и кляксы, надписи на полях или подчеркивания в тексте, нечитаемые фрагменты текста или загибы страниц. Покупать или не покупать подобные издания – решать Вам, мы же делаем все возможное, чтобы редкие и ценные книги, еще недавно утраченные и несправедливо забытые, вновь стали доступными для всех читателей.



Серия Книжный Ренессанс

www.samizday.ru/reprint

ОТ АВТОРА

В последнее время проявляется большой интерес к проблеме определения возраста пород радиоактивным методом. На последнем геологическом конгрессе, состоявшемся в 1937 г. в Москве, создана Международная комиссия по определению возраста пород. Можно ожидать, что работы в этом направлении у нас в Союзе получат развитие в ближайшее время. В связи с этим я надеюсь, что появление этой книги своевременно.

По данной проблеме имеются лишь две обстоятельные, но, к сожалению, уже несколько устаревшие иностранные книги: G. Kirsch, *Radioaktivität und Geologie* (1928); *The Age of the Earth*, Bull. of the Nat. Research Council, № 80 (1931).

В настоящей монографии я поставил себе целью наново систематизировать имеющийся материал и представить его в критическом освещении. Для этого потребовалось проработать многочисленные иностранные и русские литературные источники. Проводившиеся мною в ЦНИГРИ в течение последних лет совместно с сотрудниками Н. М. Сегель, О. С. Меликовой, А. С. Смагиной-Старик и В. В. Верещагиным экспериментальные работы в значительной мере облегчили поставленную задачу.

Составленные впервые по моему предложению А. М. Баниным номограммы для вычисления возраста значительно сократили время, тратившееся на расчеты, и это позволило мне вновь произвести большое количество вычислений. В настоящей книге номограммы представлены в значительно уменьшенном виде лишь для иллюстрации их характера. Приложение номограмм надлежащего размера, пригодных для расчетов, значительно удорожало бы книгу. Отдельное издание номограмм осуществляется в ЦНИГРИ.*

Результаты определений возраста я излагаю с чисто методической, а не геологической точки зрения.

Кроме приведенной в конце каждой главы специальной журнальной литературы следует указать по вопросам, связанным с учением о радиоактивности, следующие общие курсы:

E. Rutherford, J. Chadwick and C. Ellis. *Radiations from Radioactive Substances*. Cambridge (1930).

Marie Curie. *Radioactivité*. Paris (1935).

St. Meyer u. E. Schweidler. *Radioaktivität* (1927).

K. W. Kohlrausch, *Radioaktivität*. Leipzig (1928).

Г. Гевеши и Ф. Панет. *Радиоактивность*. НХТИ. Ленинград, 1925 г. (перевод с немецкого).

* Центральный Научно-Исследовательский Геолого-Разведочный Институт, Ленинград, В. О., Средний пр., 72.

Д. Чедвик. Радиоактивность и радиоактивные вещества. Химтеорет, Ленинград (1935).

Считаю своим долгом выразить искреннюю благодарность проф. В. Г. Хлопину, давшему ряд ценных советов и указаний, и большую признательность проф. В. А. Тартаковскому за помощь при выработке нового способа вычисления возраста, а также В. В. Верещагину, М. Л. Яценко и Ф. Е. Старик, оказавшим мне техническую помощь

Отсутствие аналогичных работ в мировой литературе в особенности затруднило составление этой монографии; в ней, несомненно, могут быть упущения, и я с большой признательностью приму все указания на необходимость исправлений и дополнений.

И. Старик

ВВЕДЕНИЕ

Прошло сравнительно немного времени с момента открытия радиоактивности, а несмотря на это мы являемся свидетелями проникновения идей, связанных с радиоактивным распадом, почти во все смежные научные дисциплины. Это явление не случайное и не является результатом преувеличения значения радиоактивности в системе наших знаний. В дальнейшем идеи радиоактивности несомненно проникнут еще глубже в основы наших представлений.

Обычно значение радиоактивности связывают, главным образом, с развитием вопроса о строении атома. Не меньшее значение приобретают радиоэлементы в качестве „индикаторов“ при исследовании самых разнообразных явлений в природе. С открытием радиоактивности мы получили новый мощный метод изучения природных процессов, который позволил проникнуть в бывшие ранее мало доступными для изучения области „бесконечно малых“ количеств вещества и „бесконечно больших“ отрезков времени. Присущее атомам радиоэлементов свойство распадаться ограничивает время их существования и позволяет изучать процессы во времени; мертвая природа приобретает свою историю. Чувствительность же радиоактивных методов дает возможность определять количества вещества до 10^{-20} г и, следовательно, охватить совершенно новую область явлений. В этом заключается исключительное значение открытия радиоактивности.

Применение радиоактивного метода исследований в смежных областях знания ранее встречало некоторые возражения. Радиоактивность потребовала перестроить мышление — заменить статические представления динамическими. Необычным также было представление о „невесомом“ веществе, так как количества исследуемых радиоэлементов бывают столь малыми, что не представляется возможным их определить привычным для нас способом — взвешиванием. К тому же, при первых попытках применения радиоэлементов в качестве „индикаторов“, встречались трудности, и лишь благодаря длительной работе наиболее смелых и упорных исследователей была установлена точность и надежность получаемых результатов. Такова история и вопроса об определении возраста пород радиоактивными методами. Мысль гениального П. Кюри о процессе радиоактивного распада как эталоне времени, независимо высказанная Рёзерфордом, была экспериментально подтверждена Болтвудом, который предложил „свинцовый метод“. Вскоре Стрёт установил зависимость количества гелия в минералах от возраста последних и положил начало развитию „гелиевого метода“. Впоследствии появился еще ряд методов, позволяющих определять геологическое время. Первые же полученные результаты показали правильность радиоактивного

метода, но последующее накопление данных встретило препятствие. С одной стороны, были сделаны принципиальные возражения против радиоактивного метода, с другой — получалось несогласие между данными, полученными радиоактивными и геологическими методами. Необходимо отметить, что появившиеся в течение этого времени работы большей частью не ставили своей специальной целью определение возраста пород. Большинство работ было чисто аналитических, с вполне достаточной для этих целей точностью, но недостаточной для определения возраста. Дальнейшие успехи в развитии этого вопроса зависели от усовершенствования методов работы и уточнения значений радиоактивных констант. Большие достижения в развитии этой проблемы можно отметить, начиная с 1931 года. К этому времени повысилась чувствительность методов определения малых количеств урана, тория, свинца и гелия, а также уточнились представления о природе радиоэлементов. Значительное внимание исследователей было уделено выбору критериев степени пригодности исследуемых образцов для целей определения их возраста. Большую роль в успешном развитии этой проблемы сыграли из иностранных авторов Лен, Стрёт, Джоли Холмс, Кирш, Панет, Урри, Гевеши, Лаусон, Эльсворт, Коваржик, Гехт, Феннер, Марбл, Астон, Демпстер, Бакстер, Генигшмит, Розе и др., а в СССР — Вернадский, Хлопин, Герлинг. Систематическое изучение этого вопроса дало уже свои плодотворные результаты. В настоящее время достоинства радиоактивных методов определения возраста пород не вызывают сомнений. В дальнейшем мы увидим, что каждый из имеющихся радиоактивных методов, обладает различной достоверностью, но все получаемые результаты являются единственно надежными в разрешении вопросов геохронологии.

Систематическим изучением вопроса определения возраста пород радиоактивным методом у нас в Союзе начали заниматься сравнительно недавно. Лишь в 1932 году организовалась под председательством В. И. Вернадского*, живо интересовавшегося этой проблемой, специальная междуведомственная комиссия по определению возраста, одним из инициаторов которой являлся автор. В состав этой комиссии вошли представители Академии Наук СССР, Государственного Радиового Института (ГРИ) и Центрального Научно-исследовательского Геолого-Разведочного Института (ЦНИГРИ). Для дальнейшего успешного развития работ по определению возраста пород необходимо было вооружиться более совершенными методами. В этом направлении и велась работа. В настоящее время подготовительную работу можно считать почти законченной и представляется возможным приступить к систематическому получению данных о возрасте пород территории нашего Союза

* W. Vernadsky, Les problèmes de la radiogéologie, Exposés de Géologie, Paris (1935); W. Vernadsky, Die Radioaktivität und die neuen Probleme der Geologie, Zeitschr. f. Elektrochemie №8a, 519 (1932)

НЕКОТОРЫЕ СВЕДЕНИЯ ПО РАДИОАКТИВНОСТИ И РАСПРОСТРАНЕННОСТИ РАДИОЭЛЕМЕНТОВ В ЗЕМНОЙ КОРЕ

Под радиоактивностью мы понимаем способность атомов некоторых элементов самопроизвольно распадаться с образованием атомов новых элементов. В настоящее время следует различать искусственную и естественную радиоактивность. Естественная радиоактивность является свойством, присущим некоторым элементам. Искусственная же радиоактивность возбуждается у большинства обычных элементов, но лишь при воздействии на них теми или иными лучами. Искусственная радиоактивность была открыта Ирен Кюри-Жолио и Ф. Жолио¹ (1934 г.). В дальнейшем при изложении вопросов, связанных с естественной радиоактивностью, мы будем обозначать ее просто как радиоактивность. Термин „искусственная радиоактивность“ в отличие от „естественной радиоактивности“ мы сохраним полностью.

Всякий радиоактивный распад сопровождается выделением какого-либо рода лучей. При естественном радиоактивном распаде до сего времени обнаружены лучи альфа (α), бета (β) и гамма (γ), а также и вторично образованные ими лучи. При искусственном распаде появился новый вид лучей — позитроны, обнаруженные в природе лишь при изучении космических лучей (Андерсон²) и являющиеся, согласно существующим представлениям, вторично образованными. Природа космических лучей нам до сего времени неизвестна. Имеющиеся наблюдения показывают, что космические лучи возникают далеко за пределами земной атмосферы. Из большого числа гипотез об их происхождении, как указывает Комптон, ни одна не получила достаточно экспериментального подтверждения для ее общего признания³.

При рассмотрении радиоактивного метода определения возраста пород нас могут интересовать, главным образом, излучения, происходящие при естественном радиоактивном распаде. Влияние искусственной радиоактивности и космических лучей на распад радиоэлементов в природе в настоящее время рисуется незначительным. Воздействие позитронов и нейтронов на природные процессы не обнаружены. Основным типом лучей, с которым приходится иметь дело при рассмотрении проблемы возраста пород, являются α -лучи.

Альфа-лучи являются положительно заряженными ядрами гелия. Дальность пробега α -частиц в воздухе колеблется от 8,62 см (ThC') до 1,2 см (Sm) при 15°С и нормальном давлении. Дальностью пробега называется максимальное расстояние, которое α -частица способна пролететь в газообразной, жидкой, или твердой средах. Величина пробега α -лучей в жидкостях и твердых телах весьма незначительна и уменьшается с увеличением плотности вещества. По сравнению с α -лучами энергия β - и γ -лучей незначительна.

β -Лучи являются электронами и обладают массой, равной $1/1834$ массы атома водорода. Скорость различных β -лучей колеблется от $0,3$ до $0,98$ скорости света. Проникающая способность β -лучей значительно больше, чем у α -лучей, и зависит от их скорости. β -Лучи подразделяются на „жесткие“ с большой проникающей способностью и „мягкие“ — легко поглощаемые.

Испускание γ -лучей не вызывает превращения элементов, а лишь сопровождает этот процесс. По своим свойствам γ -лучи очень близки к рентгеновским лучам. Чем короче длина волны, тем больше способность проникновения их через материю. γ -Лучи аналогично β -лучам подразделяются на жесткие и мягкие лучи.

При прохождении через вещество β -лучи образуют вторичные лучи. Точно также известны вторичные α -лучи, образующиеся под действием α -лучей; последние носят название δ -лучей. Следует еще упомянуть про атомы отдачи. Когда α -частица вылетает из атома, то последний испытывает отдачу и летит в обратном направлении с некоторой кинетической энергией. Атомы отдачи образуются также при вылете β -лучей, но кинетическая энергия их очень мала.

Все перечисленные выше виды лучей обладают способностью ионизировать воздух, воздействовать на фотографическую пластинку и производить химическое действие. Кроме того, всякое выделение лучей сопровождается тепловым эффектом. Преимущественно изучалась ионизационная способность, так как на этом свойстве лучей основаны все определения радиоактивности. Действие лучей на фотографическую пластинку изучалось, главным образом, с точки зрения выяснения природы α - и β -лучей. Химическому действию радиоактивных лучей посвящено большое число работ⁴, главным образом, Линда, Мунда и Кайлана.

В настоящее время собран значительный материал по действию α - и β -лучей на органические и неорганические препараты. В результате исследований, Линдом дана теория протекающих при этом процессов. К сожалению, до сего времени почти не изучена роль химического действия радиоактивных лучей в природных явлениях. Представляют интерес лишь экспериментально изученные газовые реакции и разложение воды под действием радиоактивных лучей, имеющие существенное значение в природе:

- 1) $2\text{H}_2 + \text{O}_2 \rightleftharpoons (2\text{H}_2\text{O})$
- 2) $2\text{CO} + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{CO}_2$
- 3) $\text{N}_2 + \text{O}_2 \rightarrow \text{NO} + \text{O}_3 + \text{NO}_2 + \text{N}_2\text{O}$
- 4) $3\text{O}_2 \rightarrow 2\text{O}_3$
- 5) $\text{CO}_2 + 2\text{H}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O} + (\text{H}_2\text{CO}) (?)$
- 6) $\text{N}_2 + 3\text{H}_2 \rightleftharpoons 2\text{NH}_3$

Влияние радиоактивных излучений на химические процессы в природе, вероятно, значительное. Достаточно указать на воздействие радиоактивных лучей на воду, при котором происходит выделение кислорода, сопровождающее все окислительные процессы. Воздействия радиоактивных веществ на природные обра-

зования легко обнаруживаются по плеохроическим ореолам, которые часто наблюдаются в слюдах.

На тепловое действие радиоактивных лучей впервые указали Пьер Кюри и Лабอร์ด (1903 г.). Они определили калориметром Бунзена тепловой эффект, производимый 1 г радия. Впоследствии Рёзерфорд и Робинзон⁵ показали, что тепловой эффект обусловлен, главным образом, потерей энергии α -лучами. По данным Рёзерфорда и Робинзона энергия излучения радия и продуктов его распада, находящихся с ним в равновесии, распределяется следующим образом: 92,1% энергии приходится на α -лучи, 3,2% на β -лучи и 4,7% — на γ -лучи. Если мы имеем несколько α -излучателей, то тепловые эффекты, производимые каждым из них, суммируются. Количество тепла, выделяемое 1 атомом урана при превращении его в свинец, составляет $7,1 \times 10^{-5}$ эргов. Если учесть, что в 1 г урана находится $6,06 \times 10^{23}$ атомов, то 1 г урана при полном своем превращении выделяет энергию, равную $4,3 \times 10^{19}$ эргов или 10^{12} калорий. Эти данные показывают, насколько большой запас энергии сосредоточен в радиоактивных веществах. Совершенно очевидно, что выделяющаяся энергия при радиоактивном распаде играет весьма существенную роль в энергетическом балансе нашей планеты.

Правило сдвига и изотопы. Выделение α - и β -лучей происходит в результате атомного распада и сопровождается изменением заряда ядра атома. При вылете α -частицы происходит потеря 2 положительных зарядов и, следовательно, уменьшение порядкового номера на 2 единицы. Кроме того, при выделении α -частицы масса атома уменьшается на 4 единицы (приблизенно), так как α -частица является положительно заряженным ядром гелия, атомный вес которого равен 4,002. Масса β -лучей очень мала, и при их вылете мы можем заметить лишь изменение заряда атома и увеличение порядкового номера на 1 единицу. Указанные 2 типа распада полностью охватывают все наблюдаемые до сего времени случаи естественных радиоактивных превращений.

Отмеченная закономерность — „правило сдвига“ — одно из основных обобщений в учении о радиоактивности привела к учению об изотопии. Действительно, если распад атома сопровождается вылетом одной α -частицы и двух β -частиц, то атомы как распавшийся, так и в конечном итоге образующийся имеют одинаковые порядковые номера и, следовательно, обладают одинаковыми химическими свойствами, но отличаются по массе и радиоактивным свойствам.

Открытие изотопии дало возможность объяснить нецелые атомные веса элементов существованием смеси изотопов, находящихся не в равных количествах. Но дальнейшее углубленное изучение изотопического состава ряда элементов показало все же, что атомные веса в действительности не являются целыми числами. В 1927 г. Астон объяснил это тем, что при образовании сложного атома происходит потеря энергии, а параллельно уменьшается его масса. Согласно теории относительности энергия E

ческих элементов. Кроме указанных 42 радиоэлементов установлена радиоактивность трех одиночностоящих элементов — калия, рубидия и самария. Природа радиоактивности этих элементов еще не выяснена. Несколько необычным представляется радиоактивность калия и рубидия, если принять во внимание их положение в периодической системе элементов, так как мы связываем радиоактивные свойства с тяжелыми элементами. Согласно Гевеши⁶, радиоактивность калия объясняется присутствием изотопа ^{40}K , который испускает β -лучи, и, таким образом, при распаде образуется изотоп кальция — ^{40}Ca . Окончательное экспериментальное подтверждение этого сделано Смитом и Геммендингером^{6а}. Объяснение радиоактивности одиночностоящих элементов с β -распадом до сего времени встречало ряд трудностей. В настоящее время, после открытия искусственной радиоактивности, появились новые факты, позволяющие объяснить радиоактивность калия и рубидия. Гевеши считает, что в периоды, предшествовавшие образованию земли, элементы подвергались действию нейтронов и поэтому образовались все изотопы элементов, которые мы можем теперь искусственно получить. После прекращения действия нейтронов все неустойчивые изотопы исчезли и остались лишь изотопы ^{40}K и ^{86}Rb , которые не успели распасться и являются причиной радиоактивности калия и рубидия.*

Теория распада. Предложенная Резерфордом и Содди теория радиоактивного распада позволяет установить связь между отдельными радиоэлементами в ряду распада и закономерность их образования. На основании теории распада мы имеем возможность делать заключение о количественных соотношениях между числами атомов образующихся радиоэлементов. В основе теории распада лежит доказанное всеми работами по радиоактивности положение, число распадающихся в данный момент атомов какого-либо радиоэлемента пропорционально наличному количеству его атомов. Фактор пропорциональности является постоянной величиной, характерной для каждого радиоэлемента, не зависящей от внешних условий и называется константой распада — λ . Обратная величина константы распада называется средней продолжительностью жизни — τ . Наиболее употребительной константой является T — период полураспада — время, в течение которого распадается половина имеющихся в наличии атомов. Между константами λ , T и τ существует зависимость, которая позволяет, зная одну из них, найти остальные:

$$\lambda = \frac{1}{\tau} = \frac{\ln 2}{T} = 0,693147 \cdot \frac{1}{T}$$

$$\tau = \frac{1}{\lambda} = \frac{T}{\ln 2} = 1,44269 \cdot T$$

$$T = \frac{\ln 2}{\lambda} = 0,693147 \cdot \frac{1}{\lambda} = 0,693147 \cdot \tau$$

* В настоящее время установлено, что радиоактивным изотопом рубидия является ^{87}Rb , [W. Smythe and A. Hemmendinger Phys. Rev., 51, 1052 (1937)]

Т а б л и ц а Iа
Радиоактивные константы

Элемент	Символ	Ат. вес	Ат. ном	Протоп. число	Ряд излучен.	Период полураспада T	Константа распада λ	Средняя продолжительность жизни τ
Р а д у р а н а								
Уран I	UI	238,07	92	238	α	$4,4 \times 10^9$ г. ($1,4 \times 10^{17}$ сек)	$1,6 \times 10^{-10}$ г. ⁻¹ ($5,0 \times 10^{-18}$ сек ⁻¹)	$6,3 \times 10^9$ г. ($2,0 \times 10^{17}$ сек)
Уран X ₁	UX ₁	—	90	234	β	24,5 дн ($2,12 \times 10^6$ сек)	$2,83 \times 10^{-2}$ дн. ⁻¹ ($3,28 \times 10^{-7}$ сек ⁻¹)	35,4 дн. ($3,05 \times 10^6$ сек)
Уран X ₂ ок. 99,65 ₀ .	UX ₂	—	91	234	β	1,14 мин (68,4 сек)	0,61 мин. ⁻¹ ($1,01 \times 10^{-2}$ сек ⁻¹)	1,64 мин (98,7 сек)
Уран Z ок. 0,3 ₀ . . .	UZ	—	91	234	β	6,7 ч ($2,4 \times 10^4$ сек)	0,103 ч. ⁻¹ ($2,87 \times 10^{-5}$ сек ⁻¹)	9,7 ч. ($3,5 \times 10^4$ сек)
Уран II	UII	—	92	234	α	3×10^5 г. ($9,4 \times 10^{12}$ сек)	$2,3 \times 10^{-6}$ г. ⁻¹ ($7,4 \times 10^{-14}$ сек ⁻¹)	$4,3 \times 10^5$ г. ($1,4 \times 10^{13}$ сек)
Ионий	Jo	—	90	230	α	$8,3 \times 10^4$ г. ($2,6 \times 10^{13}$ сек)	$8,3 \times 10^{-6}$ г. ⁻¹ ($2,6 \times 10^{-13}$ сек ⁻¹)	$1,2 \times 10^5$ г. ($3,8 \times 10^{12}$ сек)
Радий	Ra	226,05	88	226	α	1590 л ($5,02 \times 10^{10}$ сек)	$4,36 \times 10^{-4}$ г. ⁻¹ ($1,38 \times 10^{-11}$ сек ⁻¹)	2295 г. ($7,24 \times 10^{10}$ сек)
Радон	Rn	—	86	222	α	3,825 дн. ($3,305 \times 10^5$ сек)	0,1812 дн. ⁻¹ ($2,097 \times 10^{-6}$ сек ⁻¹)	5,518 дн. ($4,768 \times 10^5$ сек)
Радий А	RaA	—	84	218	α	3,05 мин (183 сек)	0,227 мин. ⁻¹ ($3,78 \times 10^{-3}$ сек ⁻¹)	4,40 мин (264 сек)
Радий В	RaB	—	82	214	β	26,8 мин ($1,61 \times 10^3$ сек)	$2,59 \times 10^{-2}$ мин. ⁻¹ ($4,31 \times 10^{-4}$ сек ⁻¹)	38,7 мин ($2,32 \times 10^3$ сек)
Радий С	RaC	—	83	214	α, β	19,7 мин ($1,18 \times 10^3$ сек)	$3,51 \times 10^{-2}$ мин. ⁻¹ ($5,86 \times 10^{-4}$ сек ⁻¹)	28,5 мин ($1,71 \times 10^3$ сек)
Радий С'	RaC'	—	84	214	α	ок. 10^{-6} сек	10^{-6} сек ⁻¹	10^{-6} сек
Радий С''	RaC''	—	81	210	β	1,32 мин (79,2 сек)	0,525 мин. ⁻¹ ($8,7 \times 10^{-3}$ сек ⁻¹)	1,9 мин (115 сек)