

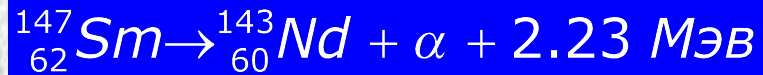
Методы абсолютной геохронологии

Явление радиоактивности - первый ядерный процесс, обнаруженный человеком. Сущность его состоит в самопроизвольном распаде ядер с испусканием одной или нескольких частиц. Атомные ядра, подверженные такому распаду, называются радиоактивными; ядра, не поддающиеся радиоактивному распаду, называются стабильными.

К радиоактивным относят ядра, время жизни которых лежит в интервале от 10^{-9} до 10^{22} лет.

Виды радиоактивного распада:

- α -распад.



- β^- -распад.

Нейтрон распадается на протон и электрон.



- β^+ -распад.

Протон распадается на нейтрон и позитрон.



Общее уравнение радиоактивного распада имеет вид:

$$N = N_0 e^{-\lambda t},$$

где N_0 - число радиоактивных ядер в начальный момент $t = 0$;

λ - вероятность распада ядра за единицу времени;

N - число одинаковых нестабильных ядер.

Для геохронологических целей, в уравнении $N = N_0 e^{-\lambda t}$ заменим N числом материнских атомов, содержащихся в исследуемом минерале - P , и N_0 - числом материнских атомов, присутствовавших первоначально при образовании исследуемого минерала - P_0 .

Число имеющихся дочерних атомов, присутствовавших первоначально при образовании минерала D равно разности P_0 и P , так как при распаде одного атома P образуется один атом D .

При $P_0 = P + D$ уравнение распада принимает вид

$$D = P(e^{\lambda t} - 1)$$

Преобразуя и решая эти уравнения для t , получаем:

$$P/(P + D) = e^{-\lambda t}$$

$$e^{\lambda t} = (P + D)/P$$

$$\lambda t = \ln(1 + D/P)$$

в результате получается уравнение:

$$t = 1/\lambda \ln(1 + D/P)$$

Заменив величины D/P и λ , конкретными элементами можно решить уравнение для t - времени образования (возраста) образца.

Радиоактивные системы, используемые в геохронологии

Отношение материнского изотопа к дочернему	Тип распада	λ (лет ⁻¹)	Период полураспада, лет	Эффективный интервал, лет (T_0 – возраст Земли)	Типичные датированные объекты
²³⁸ U/ ²⁰⁶ Pb	8 α +6 β	1,5369x10 ⁻¹⁰ (1,55125x10 ⁻¹⁰)	4,50x10 ⁹	10 ⁷ -T ₀	Циркон, уранинит, монацит, свинецсодержащие минералы.
²³⁵ U/ ²⁰⁷ Pb	7 α +4 β	9,7216x10 ⁻¹⁰ (9,8485x10 ⁻¹⁰)	0,71x10 ⁹	10 ⁷ -T ₀	«
²³² Th/ ²⁰⁸ Pb	6 α +4 β	4,987x10 ⁻¹¹ (4,9475x10 ⁻¹¹)	1,39x10 ¹⁰	10 ⁷ -T ₀	«
⁸⁷ Rb/ ⁸⁷ Sr	β	1,39x10 ⁻¹¹ (1,42x10 ⁻¹¹)	5,0x10 ¹⁰	10 ⁷ -T ₀	Биотит, мусковит, микроклин, порода в целом
⁴⁰ K/ ⁴⁰ Ar	Электронный захват	0,584x10 ⁻¹⁰ (0,581x10 ⁻¹⁰)			Биотит, мусковит, роговая обманка, порода в целом
⁴⁰ K/ ⁴⁰ Ca	β	4,72x10 ⁻¹⁰ (4,962x10 ⁻¹⁰)	1,30x10 ⁹ (общий)	5000-T ₀	порода в целом
¹⁴ C/ ¹⁴ N	β	1,21x10 ⁻⁴	5730	0-70000	Древесный уголь, древесина, торф

Примечание. Приведенные численные значения констант распада – традиционные, используемые в течение многих лет. В последние годы были сделаны попытки достичь соглашения по уточненным значениям этих констант. По-видимому, величины, показанные в круглых скобках, будут приняты официально для использования в будущем. Применение новых констант вызовет некоторые осложнения, так как все значения возраста, полученные по новым константам, нельзя непосредственно сопоставлять с ранее опубликованными данными. Однако максимальное расхождение не превышает 2,6 % от значения возраста.

Методы датирования, основанные на принципе изохронных построений (Rb-Sr, Sm-Nd, Re-Os)

Методика датирования рассмотрена на примере Rb-Sr изотопной системы.

Рубидий-стронциевая система формируется в результате простого радиоактивного распада $^{87}\text{Rb} \rightarrow ^{87}\text{Sr}$.

Уравнение распада ^{87}Rb выводится из уравнения радиоактивного распада:

$$^{87}\text{Sr} = ^{87}\text{Rb}(e^{\lambda t} - 1).$$

Следовательно, общее число атомов ^{87}Sr в образце составит

$$^{87}\text{Sr}_{\text{измер}} = ^{87}\text{Sr}_{\text{первонач}} + ^{87}\text{Rb}(e^{\lambda t} - 1)$$

где $^{87}\text{Sr}_{\text{первоначальное}}$ - это атомы, присутствовавшие в образце в момент образования.

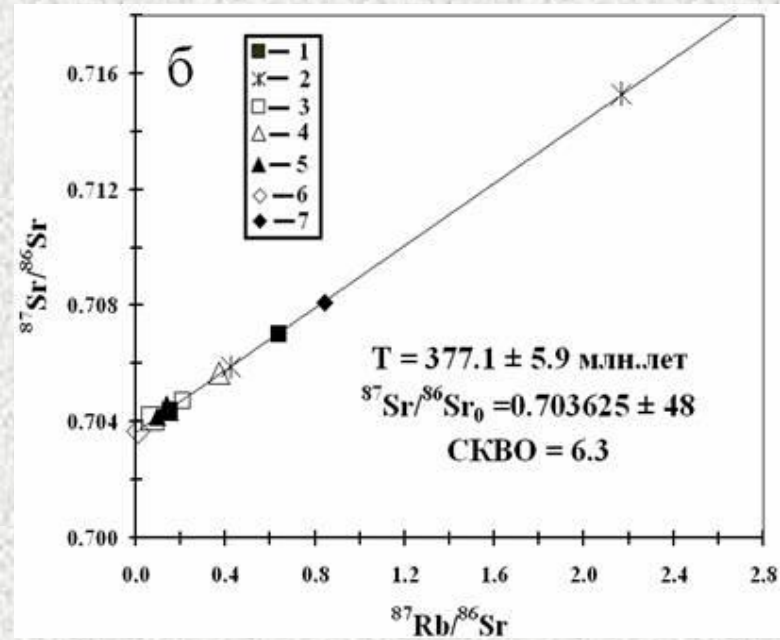
Поскольку атомные отношения можно измерить проще и точнее, чем абсолютные содержания, запишем уравнение в форме

$$\left(\frac{^{87}\text{Sr}}{^{86}\text{Sr}}\right)_{\text{измер}} = \left(\frac{^{87}\text{Sr}}{^{86}\text{Sr}}\right)_{\text{первонач}} + \frac{^{87}\text{Rb}}{^{86}\text{Sr}} (e^{\lambda t} - 1)$$

Для того, чтобы получить возраст образца минерала, надо изотопным анализом определить отношения $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ и $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$. Кроме этого, необходимо оценить первоначальное $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ (по сосуществующим минералам, не содержащим Rb) и выбрать величину константы распада (определяется экспериментально). Затем, по формуле вычисляется возраст.

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

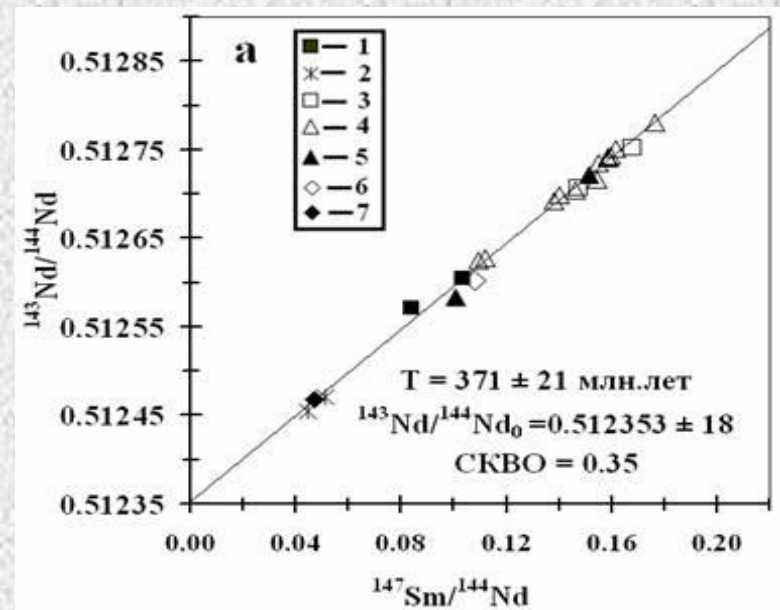
Используя изохронные диаграммы можно выяснить и время кристаллизации и первоначальное $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$.



Пересечение изохроны с осью ординат соответствует $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ при $t = 0$, наклон линии - $e^{\lambda t} - 1$.

При построении **минеральной изохроны** (по составам минералов) необходимо четко обосновать парагенность минеральной ассоциации. Для контроля ненарушенности изотопных отношений, одной из точек на изохроне желательно иметь валовый состав породы.

Также возможно датировать время внедрения магматических пород по серии валовых составов когенетичных одновозрастных лав или интрузивов различного состава. Изохрона, полученная в результате такого датирования, называется **валовой или внешней**.



Метод основан на распаде Re с образованием радиогенного Os:

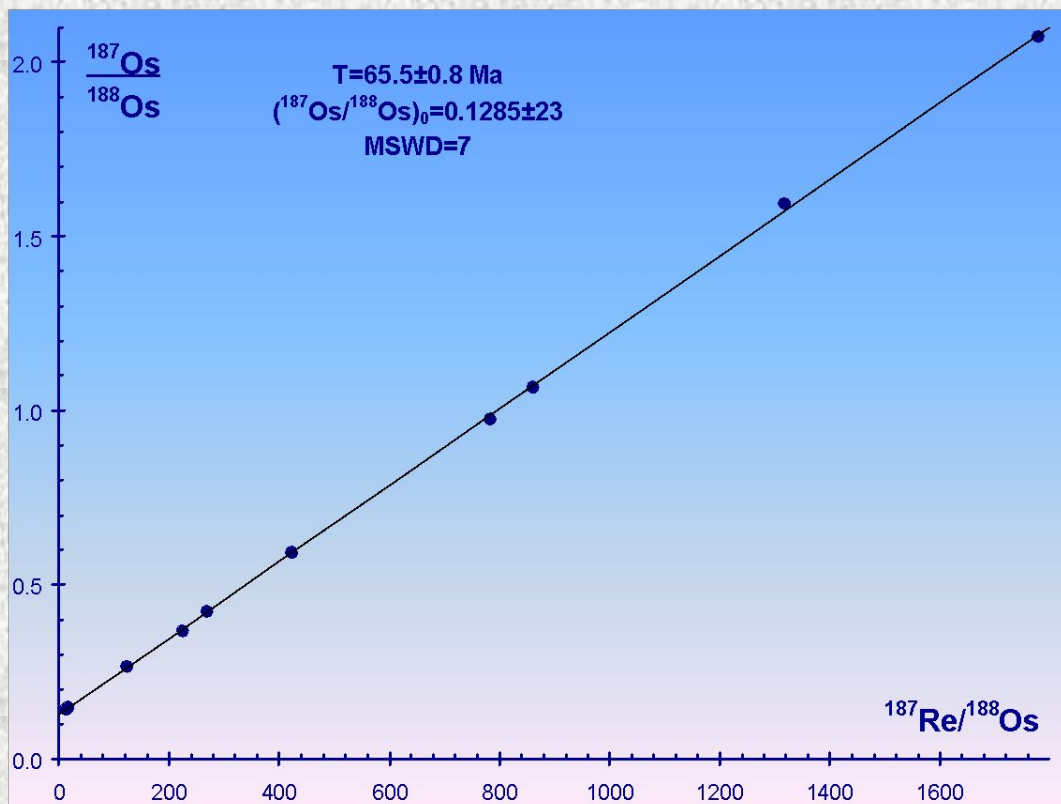


Re-Os метод датирования это практически единственный метод, позволяющий напрямую датировать рудные месторождения.

Рений находится в большом количестве в молибдените, который не содержит начального осмия, поэтому основное уравнение для датирования молибденита может быть упрощено и записано в виде:

$$({}^{187}\text{Os}/{}^{187}\text{Re}) = \exp(1.666 \cdot 10^{-11} \cdot t) - 1.$$

где $1.666 \cdot 10^{-11}$ – константа радиоактивного распада Re.



Уран-торий-свинцовая система считается самой сложной из применяемых в геохронологии по двум причинам: 1) она включает три материнских изотопа, 2) каждый из изотопов дает обширную серию распада до образования стабильных изотопов свинца.

Уравнения распада имеют вид:

$$^{206}\text{Pb} = ^{238}\text{U} (e^{\lambda^{238}t} - 1)$$

$$^{207}\text{Pb} = ^{235}\text{U} (e^{\lambda^{235}t} - 1)$$

$$^{208}\text{Pb} = ^{232}\text{Th} (e^{\lambda^{232}t} - 1)$$

Следовательно:

$$^{206}\text{Pb}_{\text{измер}} = ^{206}\text{Pb}_{\text{первонач}} + ^{238}\text{U}(e^{\lambda^{238}t} - 1)$$

$$^{207}\text{Pb}_{\text{измер}} = ^{207}\text{Pb}_{\text{первонач}} + ^{235}\text{U}(e^{\lambda^{235}t} - 1)$$

$$^{208}\text{Pb}_{\text{измер}} = ^{208}\text{Pb}_{\text{первонач}} + ^{232}\text{U}(e^{\lambda^{232}t} - 1)$$

Так как нерадиоогенный изотоп свинца ^{204}Pb встречается совместно с остальными изотопами, то для того, чтобы получить основные уравнения для определения возраста с помощью уран-торий-свинцовой системы, предыдущие уравнения надо поделить на содержание этого изотопа:

$$\left(\frac{^{206}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}}\right)_{\text{измер}} = \left(\frac{^{206}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}}\right)_{\text{первонач}} + \left(\frac{^{238}\text{U}}{^{204}\text{Pb}}\right) * (e^{\lambda^{238}t} - 1);$$

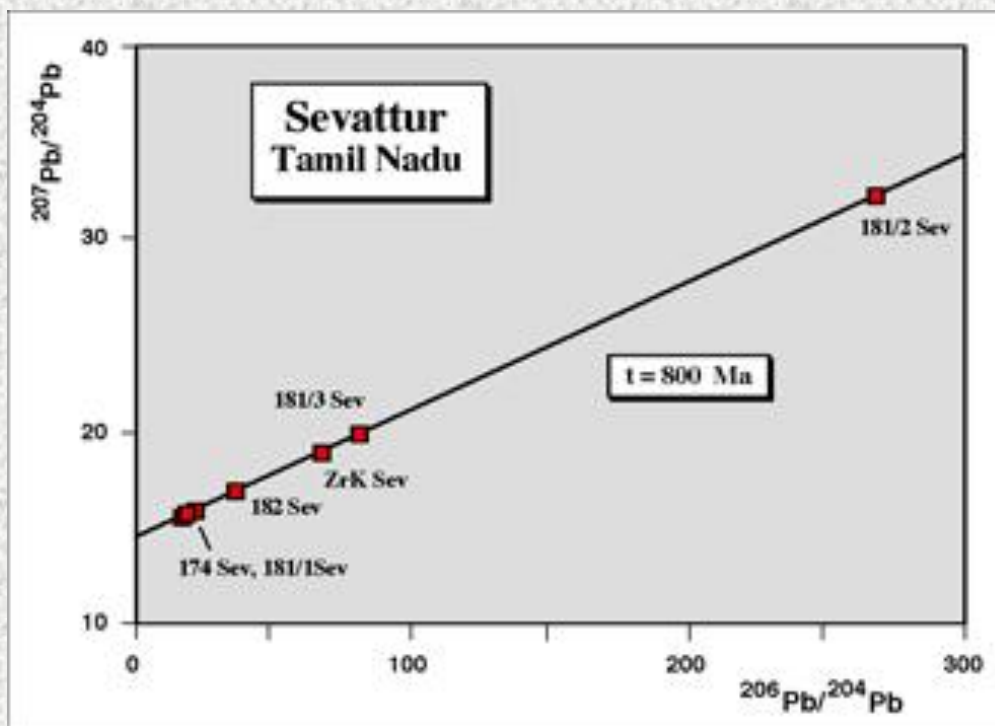
$$\left(\frac{^{207}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}}\right)_{\text{измер}} = \left(\frac{^{207}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}}\right)_{\text{первонач}} + \left(\frac{^{235}\text{U}}{^{204}\text{Pb}}\right) * (e^{\lambda^{235}t} - 1);$$

$$\left(\frac{^{208}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}}\right)_{\text{измер}} = \left(\frac{^{208}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}}\right)_{\text{первонач}} + \left(\frac{^{232}\text{Th}}{^{204}\text{Pb}}\right) * (e^{\lambda^{232}t} - 1).$$

Так как скорость распада для ^{238}U и ^{235}U различна, из уравнений распада U можно вывести четвертое уравнение для определения возраста:

$$\frac{(^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_{\text{измер}} - (^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_{\text{первич}}}{(^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_{\text{измер}} - (^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_{\text{первич}}} = (^{235}\text{U}/^{238}\text{U})_{\text{измер}} (e^{\lambda^{235}t} - 1) / (e^{\lambda^{238}t} - 1).$$

Метод определения возраста, основанный на этом уравнении, называется **свинец-свинцовым** (207-206) методом. Современная величина $^{235}\text{U}/^{238}\text{U}$ составляет 1/137,88 и не зависит от возраста и геологической истории источника вещества, из которого поступал уран. Для вычисления возраста по этому уравнению требуются определения только изотопов свинца. Возраст формирования минеральных ассоциаций определяется методом изохрон.



Для метода U-Pb датирования обычно используются такие урансодержащие минералы как циркон, бадделеит, монацит, реже сфен и апатит, из которых наибольшее применение получил циркон. Этот минерал практически не содержит начального свинца, следовательно, уравнения для определения возраста могут быть упрощены подобно Re-Os методу:

$$\left(\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}\right)_{\text{изм.}} = \text{exp}\lambda_{238}t - 1$$

$$\left(\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}\right)_{\text{изм.}} = \text{exp}\lambda_{235}t - 1$$

Поскольку современная величина $^{235}\text{U}/^{238}\text{U}$ составляет 1/137,88, то эти уравнения могут быть переписаны для определения возраста $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$:

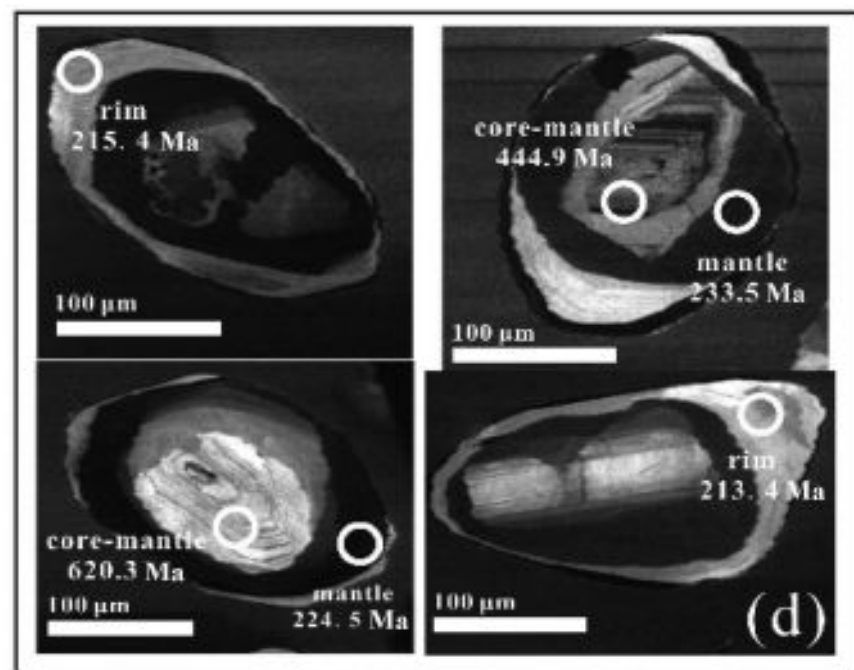
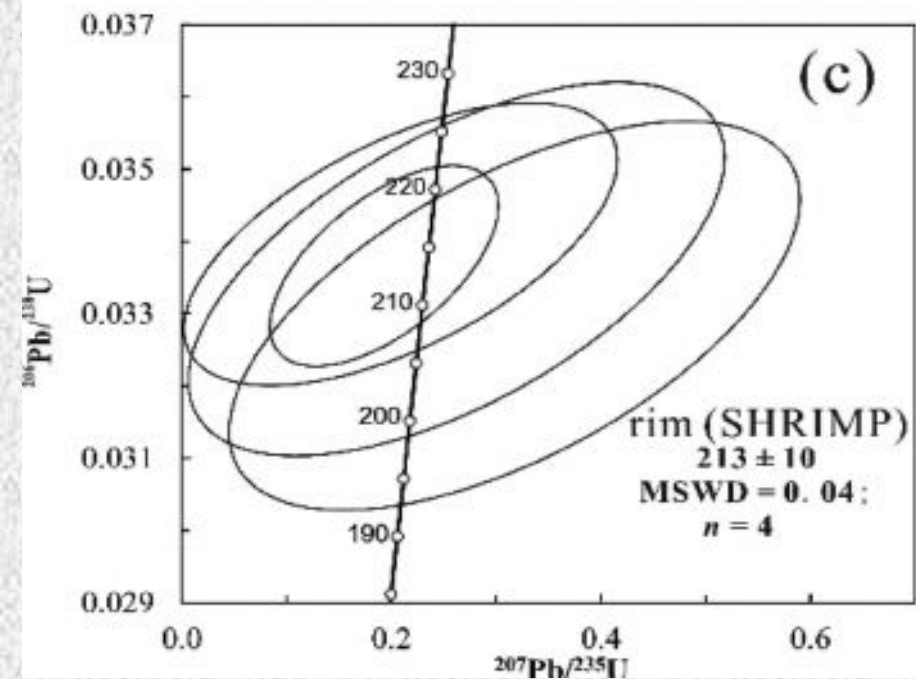
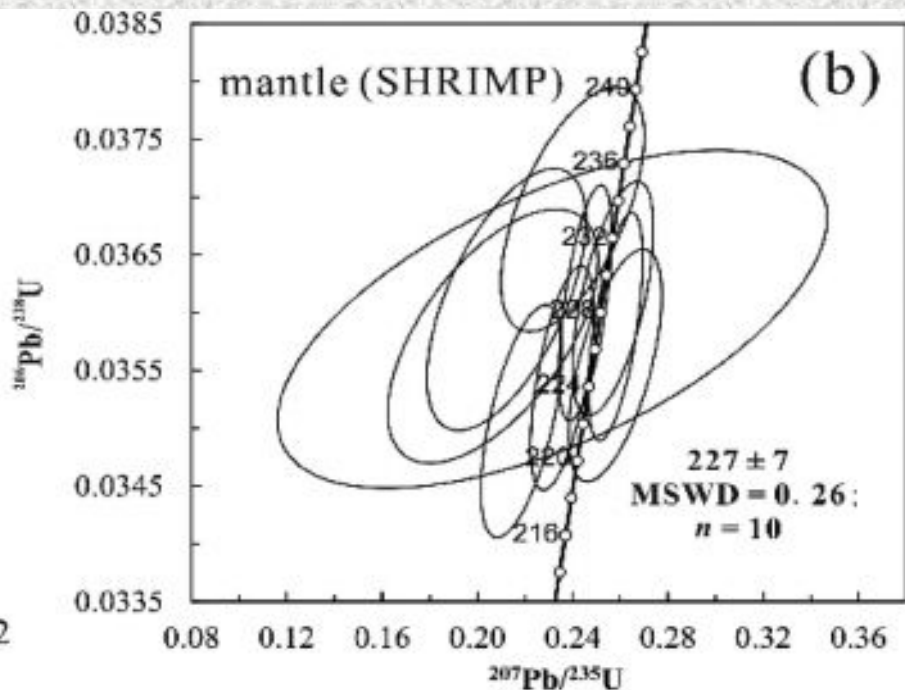
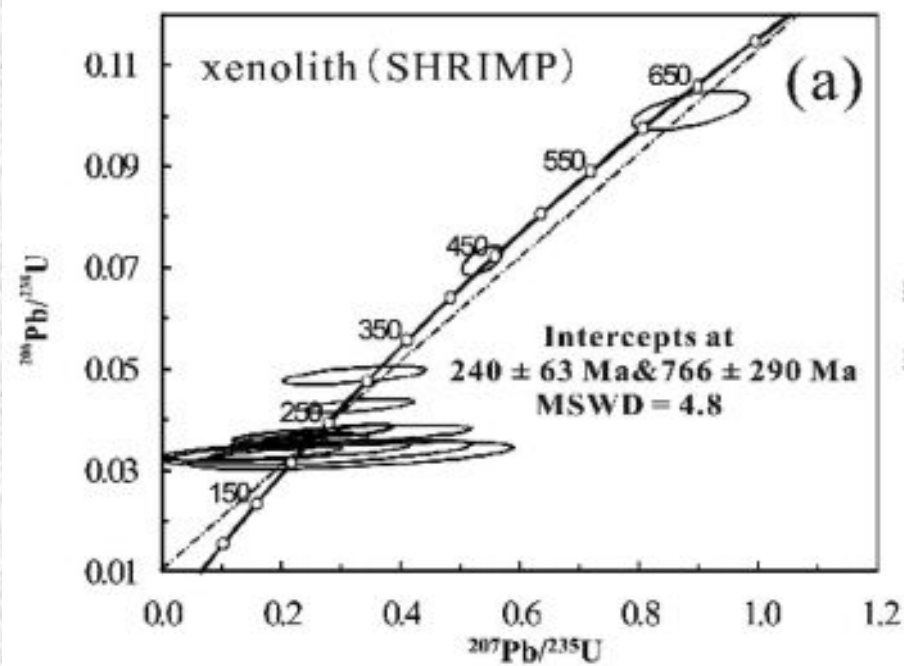
$$\left(\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}\right)_{\text{изм.}} = (1/137,88) * [(\text{exp}\lambda_{235}t - 1) / (\text{exp}\lambda_{238}t - 1)]$$

Результаты определения возраста U-Pb методом обычно рассматривают графически относительно кривой согласованных значений возраста – *конкордии*, предложенной [Дж. Везериллом](#). Конкордия криволинейна из-за различных периодов полураспада ^{238}U и ^{235}U .

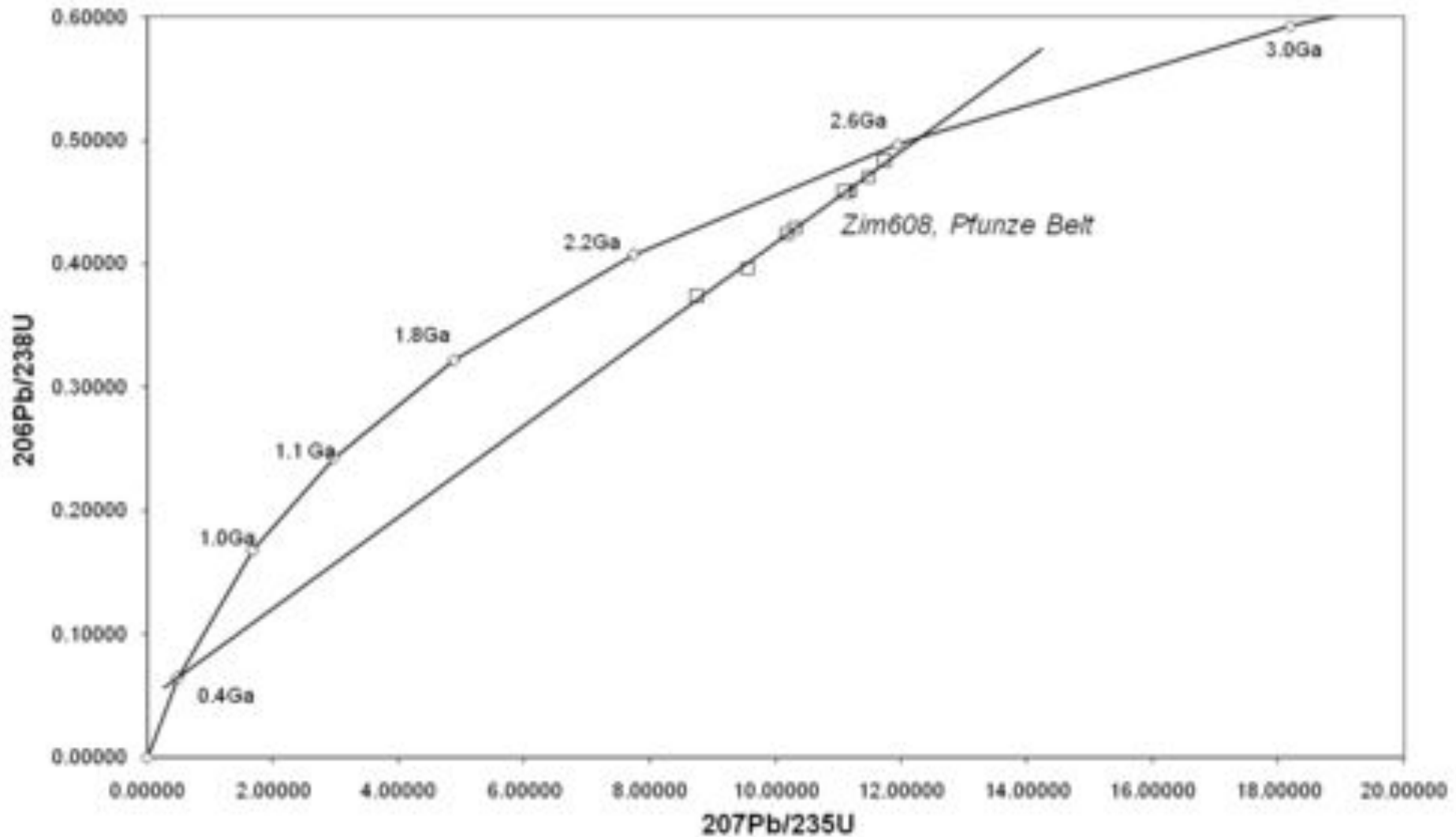
Диаграмма строится в координатах изотопных отношений $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ – $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$. Подобную диаграмму можно также построить для отношений $^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$ и $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$.

В случае, если система U-Pb в цирконе оставалась ненарушенной, то все три уравнения должны давать конкордантные значения возраста.

Это последнее условие, однако, не всегда выполняется.



Concordia Diagram



Точки изотопных составов цирконов иногда находятся, на одной прямой, называемой *дискордией*. Дискордия имеет два пересечения с конкордией, которые могут отражать два разных термических события.

Калий-аргоновая система

При радиоактивном распаде ^{40}K образуются два продукта: ^{40}Ca – в результате нормального β -распада и ^{40}Ar – при электронном захвате. Каждый из этих процессов имеет свою константу (λ_{β} и λ_{κ}), общая константа распада ^{40}K состоит из их суммы. Так как аргон инертен, маловероятно связывание его при образовании минералов, поэтому большая часть (если не весь аргон в минерале) представляет собой продукт радиоактивного распада.

Уравнение К-распада имеет вид:

$$^{40}\text{Ar} = ^{40}\text{K} \frac{\lambda_{\kappa}}{\lambda_{\kappa} + \lambda_{\beta}} \left[e^{(\lambda_{\kappa} + \lambda_{\beta})t} - 1 \right]$$

Решение предыдущего уравнения для t (в годах) дает уравнение определения возраста по К-Аг методу:

$$t = \frac{1}{\lambda_{\kappa} + \lambda_{\beta}} \ln \left[1 + \left(\frac{\lambda_{\kappa} + \lambda_{\beta}}{\lambda_{\kappa}} \right) \frac{^{40}\text{Ar}}{^{40}\text{K}} \right]$$

Принятые значения (измеренные в лабораторных условиях) для λ_{κ} и λ_{β} составляют соответственно $0,584 \cdot 10^{-10}$ и $4,72 \cdot 10^{-10}$, и в итоге уравнение принимает следующий вид:

$$T t = 1,88 \cdot 10^9 \ln (1 + 9,07 \cdot ^{40}\text{Ar}/^{40}\text{K})$$

Главным источником ошибок К-Аг метода определения возраста может служить утечка аргона из образца, которая происходит достаточно легко, так как аргон – газ и не связан химически в минерале.

Ar-Ar метод

Определенную часть ^{39}K в исследуемом образце превращают в ^{39}Ar путем облучения быстрыми нейтронами в ядерном реакторе. Количество новообразованного ^{39}Ar пропорционально количеству ^{39}K с коэффициентом, называемым *J-фактор*. Для расчета возраста достаточно измерить отношение $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ в датированном образце.

Затем аргон выделяют из образца ступенчатым нагреванием. Подсчет возраста основан на отношениях $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ для каждой порции высвобождающегося газа, а потому и определяемый Ar-Ar возраст один и тот же в идеальном случае.

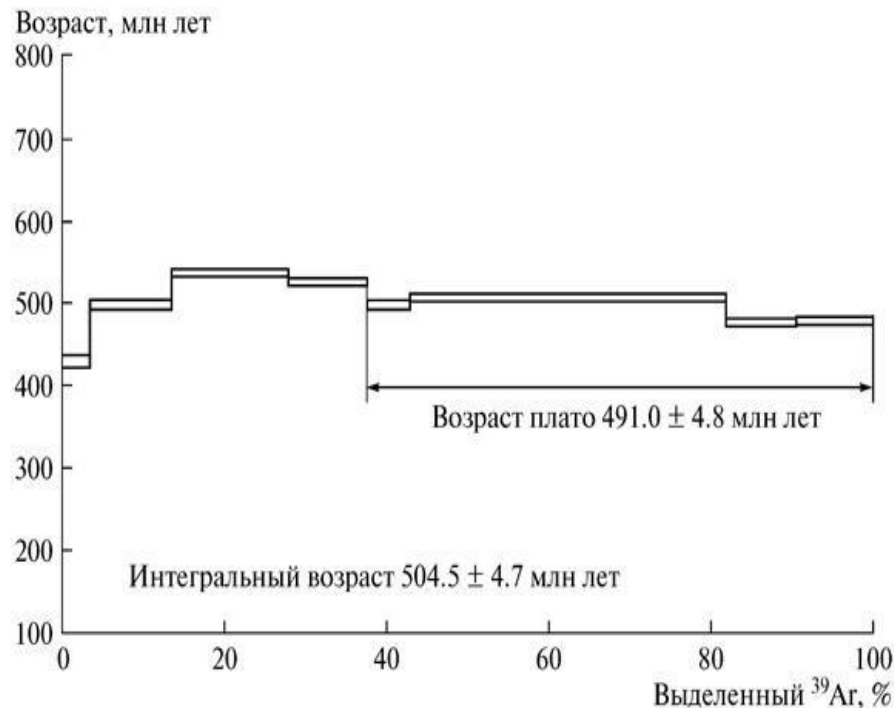
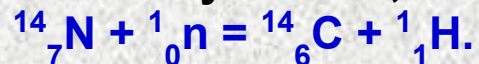


Рис. 3. Возрастной ^{40}Ar – ^{39}Ar -спектр для плагиоклаза из монцодиоритового порфирита (обр. 13-KE) о. Генриетты.

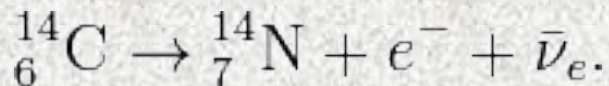
Истинный возраст может быть оценен, если выделившийся аргон формирует *плато*. Под термином «*плато*» обычно понимают несколько последовательных температурных ступеней, на которых выделилось не менее 50% аргона и возраст которых согласуется друг с другом в пределах ошибки измерения.

Радиоуглеродная система

Атомы ^{14}C образуются в верхних слоях атмосферы при реакции нейтронов, образованных космическим излучением, с ^{14}N :



Атомы ^{14}C нестабильны и превращаются в ^{14}N путем β -распада



Период полураспада радиоуглерода ($T_{1/2}$) = 5730 ± 40 лет, поэтому его применение ограничивается возрастом менее 70000 лет.

Радиоуглерод, соединяясь с кислородом, образует диоксид углерода, который участвует в процессе фотосинтеза. Живущие растения сохраняют $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$, равное атмосферному. После отмирания организма радиоактивный распад уменьшает содержание ^{14}C со временем и нарушается постоянство $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$. Определение концентрации ^{14}C в остатках организма позволяет установить время гибели растения или животного.

Уравнение радиоактивного распада $N = N_0 e^{-\lambda t}$ можно записать следующим образом:

$$\ln N/N_0 = -\lambda t$$

Константа распада связана с периодом полураспада $t_{1/2} = \ln 2/\lambda$, поэтому

$$t = (-t_{1/2}/\ln 2)(\ln C/C_0)$$

где t – возраст образца (время гибели), N/N_0 – отношение концентраций ^{14}C в образце (число атомов) и в атмосфере (первоначальное содержание ^{14}C в образце). Число N/N_0 дробное, его натуральный логарифм имеет отрицательный знак, который компенсирует минус в уравнении. Опубликованные данные по методу ^{14}C основаны на уравнении

$$t = -8,035 \ln C/C_0$$