

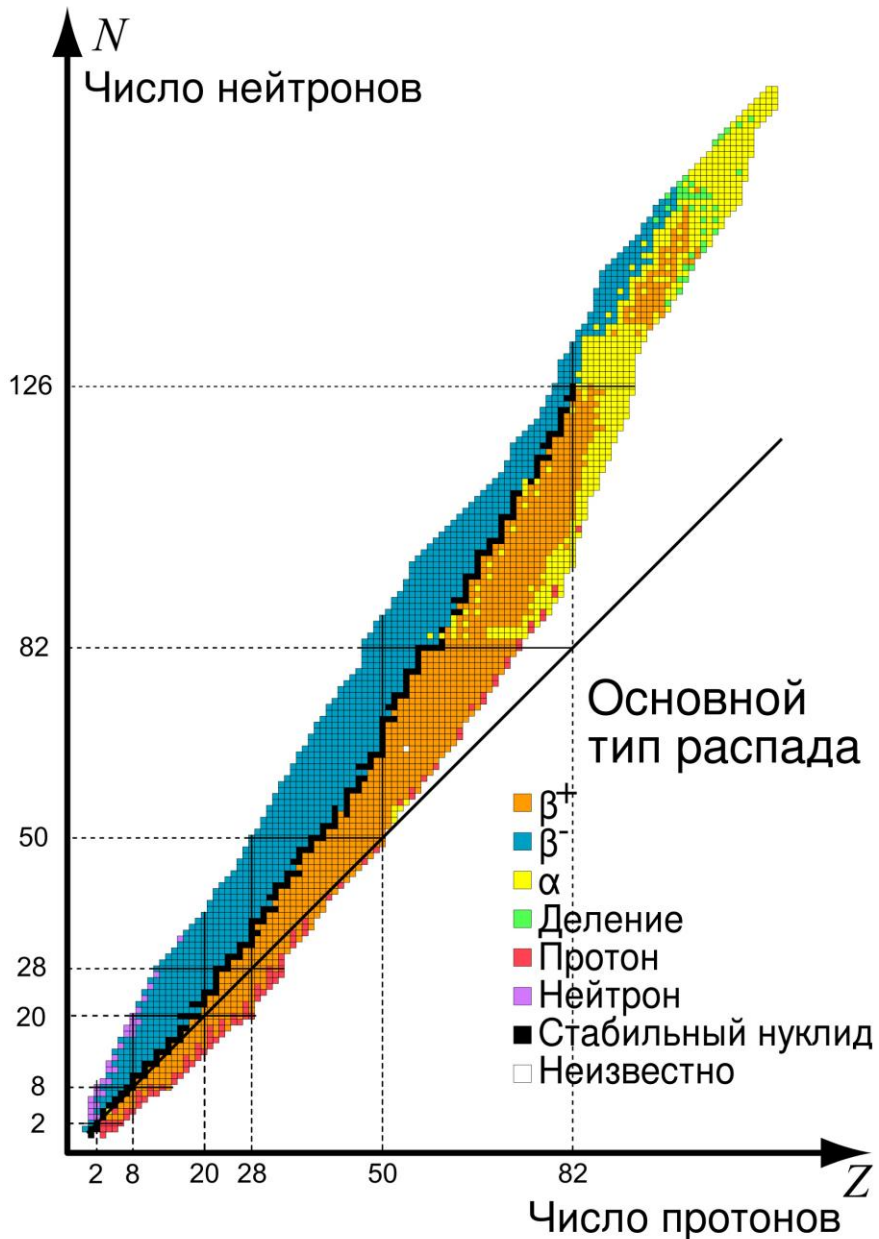
Тема 13. Геохимия изотопов.

Ч. 1. Изотопная геохронология

Изотопы – атомы элемента, различающиеся атомным весом. Поскольку химические свойства атомов определяются электронными оболочками, и атомный номер элемента равен числу электронов в оболочках и числу протонов в ядре, изотопы отличаются числом нейтронов в ядре.

Вследствие этого химические свойства разных изотопов одного элемента почти не различаются, что определяет почти одинаковое поведение изотопов в природных процессах. Однако имеющиеся различия в некоторых случаях приводят к небольшому разделению изотопов элемента – фракционированию, что может быть зафиксировано достаточно чувствительными методами. Обнаружение следов изотопного фракционирования может быть использовано в интересах геологии.

Еще большие различия возникают в случаях, когда изотоп радиоактивен. Распад радиоактивных элементов изменяет пропорции изотопов с течением времени. Кроме того, продукт распада – «дочерний» изотоп другого элемента также изменяет изотопные отношения. Это явление может послужить измерению геологического возраста объектов, в которых присутствуют радиоактивный изотоп и продукт его распада – изотопной геохронологии.

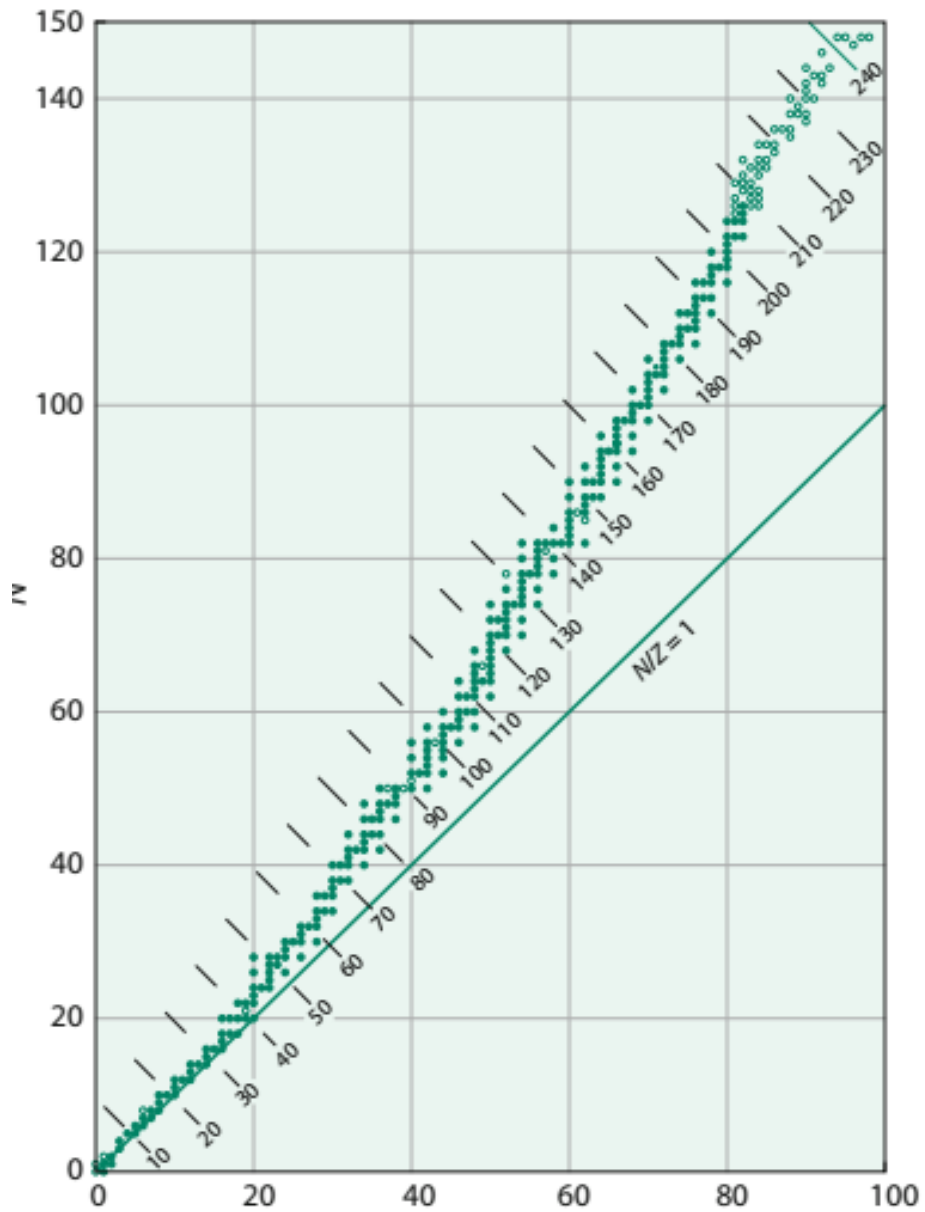


В настоящее время известно около 3500 изотопов, из которых 252 – стабильные, остальные – радиоактивные.

Большинство радиоактивных изотопов – короткоживущие, они отсутствуют в природе и получены искусственно. Лишь около 60 радиоактивных изотопов зафиксированы в природе, и немногим более десятка удается эффективно использовать для определения геологического возраста природных объектов.

На рисунке видно, что у стабильных изотопов отношение нейтрон/протон для легких элементов близко к 1, а для тяжелых – стремится к 2:1. Нейтрон-избыточные и нейтрон-дефицитные ядра неустойчивы.

Протон-нейтронная диаграмма известных изотопов.

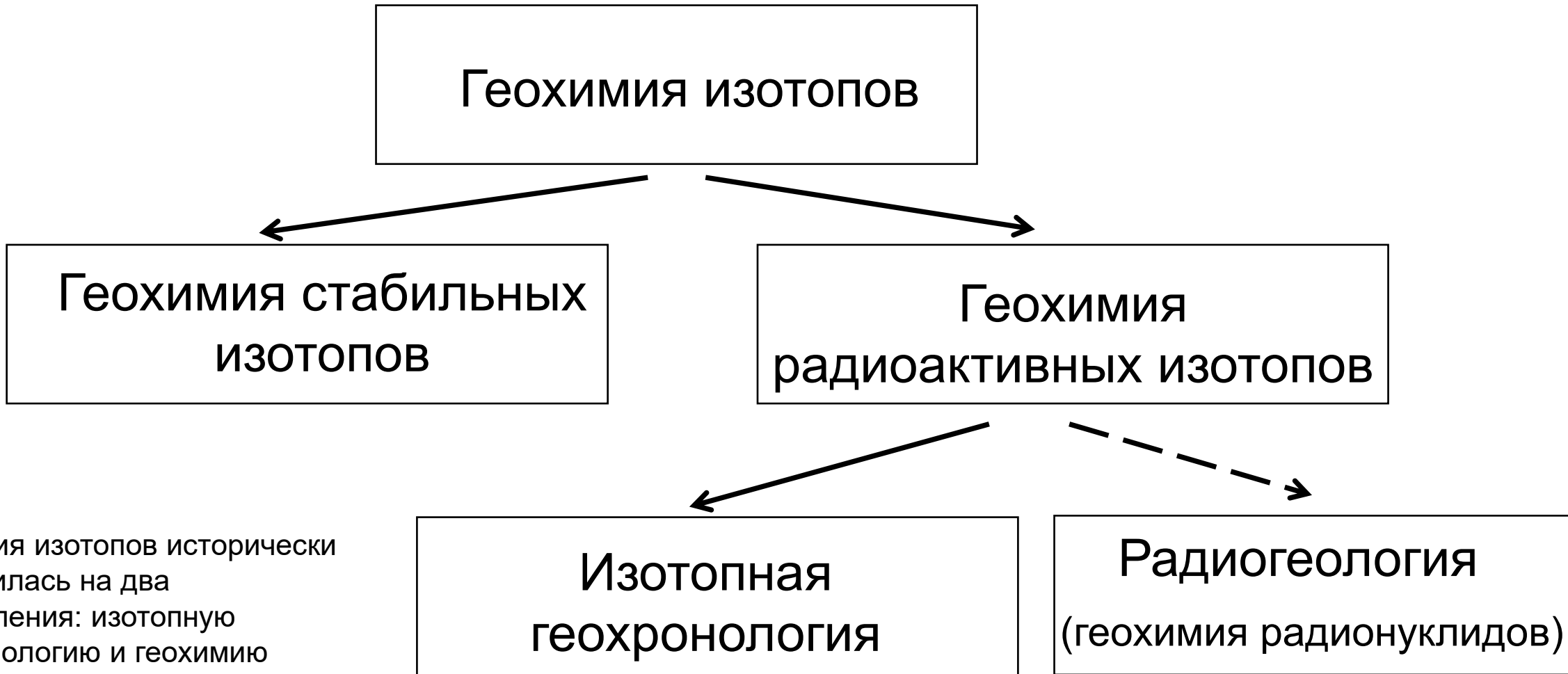


Протон-нейтронная диаграмма изотопов, обнаруженных в геологических объектах.

Самый тяжелый стабильный изотоп найденный в природе – $^{208}_{82}\text{Pb}$. Большинство химических элементов имеют по несколько изотопов, «рекордсмен» - Sn имеет 10 стабильных изотопов. 21 элемент – моноизотопные (в т.ч., P), два элемента легче свинца не имеют стабильных изотопов (Pm, Tc).

Все элементы тяжелее свинца – радиоактивные. Из них выделяются ^{90}Th и ^{92}U , имеющие долгоживущие изотопы (т.е. период полураспада которых сопоставим с возрастом Земли). Элементы между Pb и Th обнаружены в природе только потому, что являются продуктом распада радиоактивных предшественников.

Число известных долгоживущих радиоактивных изотопов невелико, и большинство из них используется для изотопного датирования в геологии.



Геохимия изотопов исторически разделилась на два направления: изотопную геохронологию и геохимию стабильных изотопов из-за различия геологических задач, которые могут быть в них решены, и различий используемой аналитической аппаратуры.

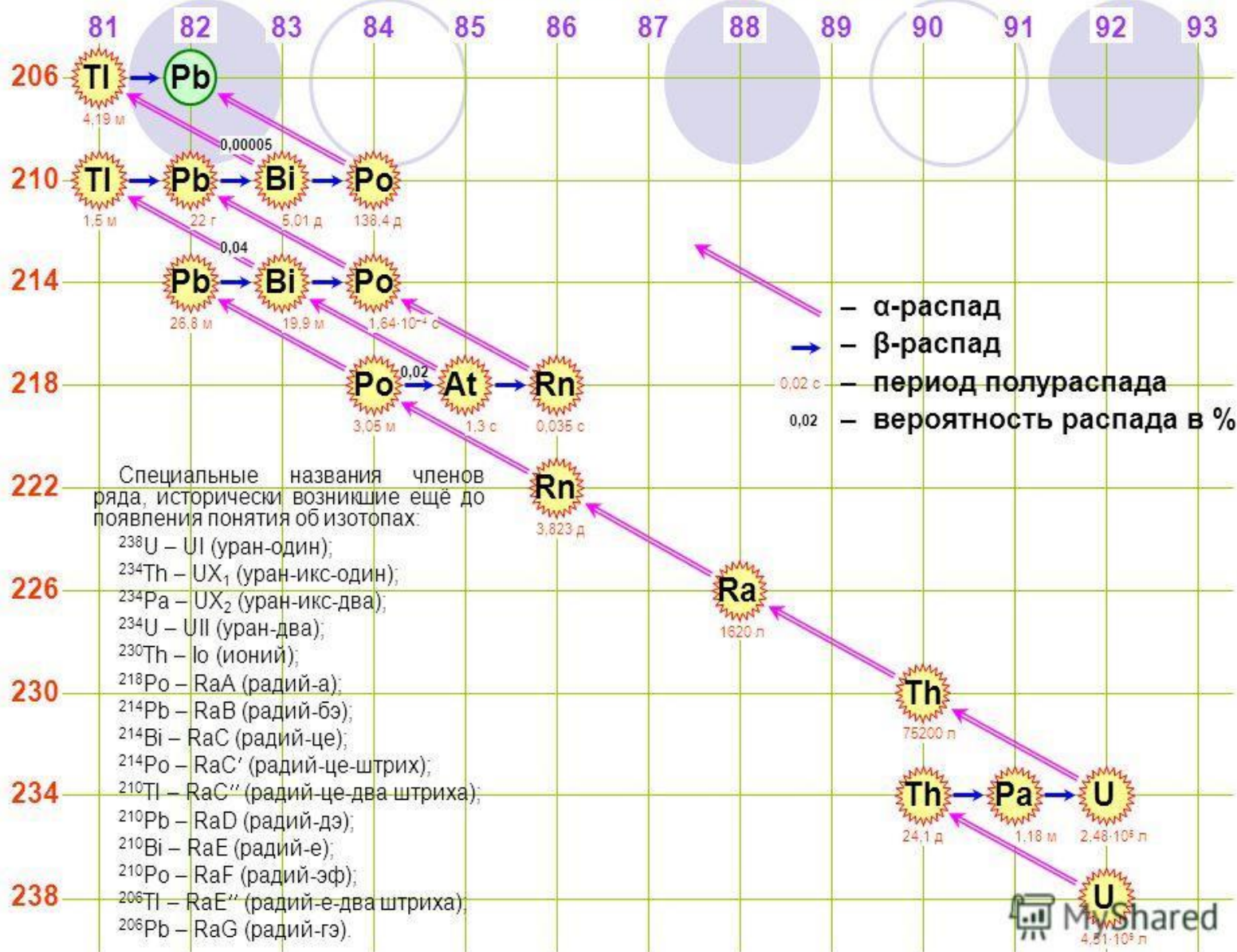
Только в последние десятилетия появились геохимические методы, синтезирующие подходы обоих направлений.

Изотопная геохронология

Типы радиоактивного распада

Тип распада	Продукты распада	Примеры изотопов
α -распад	α (ядро ${}^4\text{He}$), γ	${}^{238}\text{U}$, ${}^{235}\text{U}$, ${}^{232}\text{Th}$
β -распад	β^- (электрон), γ	${}^{87}\text{Rb}$
K-захват	$-\beta^-$, γ	${}^{40}\text{K}$
...		
Цепи распада:	α , β , γ	${}^{232}\text{Th} \rightarrow \rightarrow {}^{208}\text{Pb}$ ${}^{235}\text{U} \rightarrow \rightarrow {}^{207}\text{Pb}$ ${}^{238}\text{U} \rightarrow \rightarrow {}^{206}\text{Pb}$
Ядерное деление	D1 + D2, n	${}^{235}\text{U}$, ${}^{238}\text{U}$ (${}^{239}\text{Pu}$, ${}^{233}\text{U}$)

Радиоактивный ряд урана ^{238}U



Цепь распада ^{238}U (тип $4n+2$)

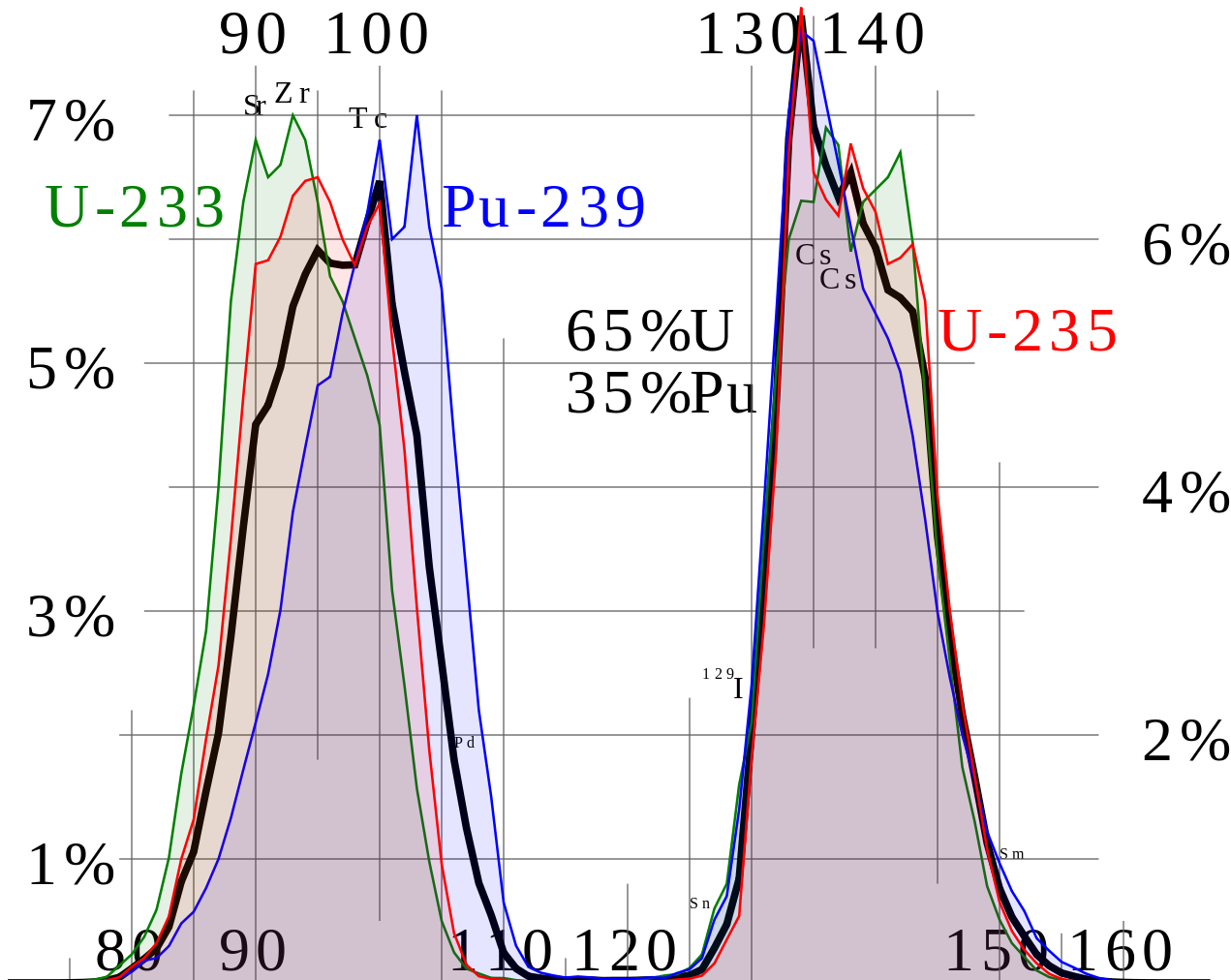
Включает 8 α-распадов и 6 β-распадов, конечный продукт ^{206}Pb .

Материнский изотоп ^{238}U имеет период полураспада 4,468 млрд. лет.

В ряду присутствуют элементы – хорошие мигранты Ra и Rn, представляющие существенную экологическую опасность.

В природе есть цепи распада ^{232}Th (тип $4n$), ^{238}U (тип $4n+2$) и ^{235}U (тип $4n+3$). Имеются признаки существования вымершей цепи ^{237}Np (тип $4n+1$), материнский изотоп которой имеет небольшой период полураспада (2,14 млн. лет).

Ядерное деление



При делении материнское ядро раскалывается на 2 дочерних с отношением масс примерно 2 : 3, при этом выделяются несколько нейтронов и большое количество энергии.

Из присутствующих в природе спонтанное деление наблюдается у только у изотопов U и относительно очень редкое событие.

Индукированное деление вызывается захватом теплового нейтрона. Этот физический эффект лежит в основе ядерного взрыва и работы ядерных реакторов.

На рисунке показано распределение изотопов– продуктов ядерного деления ^{233}U , ^{235}U и ^{239}Pu тепловыми нейтронами. Большое разнообразие элементов – продуктов деления – главная причина проблем при захоронении отходов ядерной энергетики.

Уравнения радиоактивного распада

$$\frac{dM}{dt} = -\lambda M$$

$$M = M_0 e^{-\lambda t} \quad (1)$$

Период полураспада:

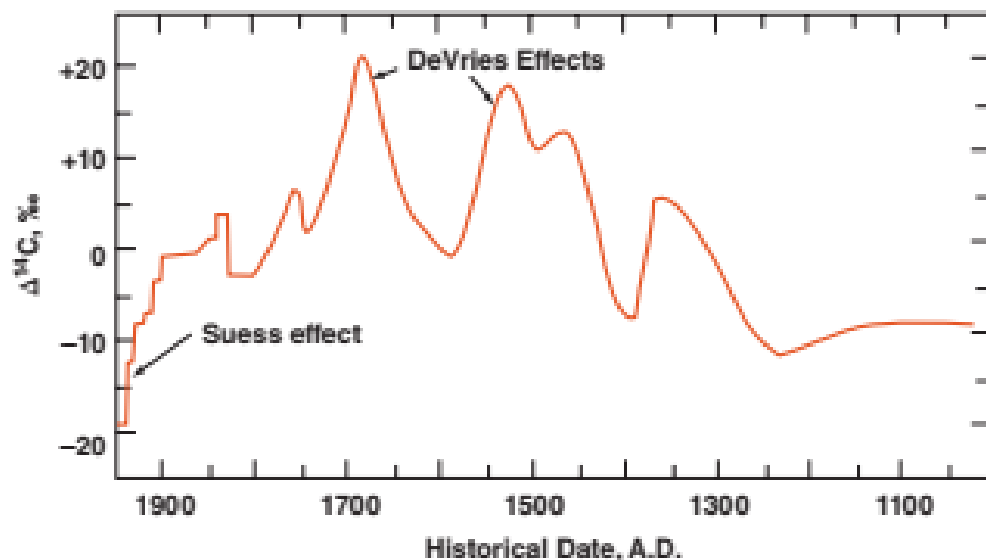
$$\tau = \frac{\ln 2}{\lambda}$$

Если в конкретном методе M_0 не поддается оценке, можно привлечь данные по продукту распада D . Уравнение материального баланса: $M_0 + D_0 = M + D$

$$t = \frac{1}{\lambda} \ln \left(1 + \frac{D - D_0}{M} \right) \quad (2)$$

Радиоуглеродный метод

M	Тип распада	D	τ (лет)	Объекты датирования	Интервал времени	Ур-ние
^{14}C	β	^{14}N	5730	древесина	< 70 тыс.	(1)



^{14}C – космогенный изотоп, получается при облучении воздуха космическими лучами. Поэтому источник – верхние слои атмосферы.

Углекислый газ с ^{14}C захватывается при фотосинтезе зелеными растениями и прочно фиксируется в органическом веществе.

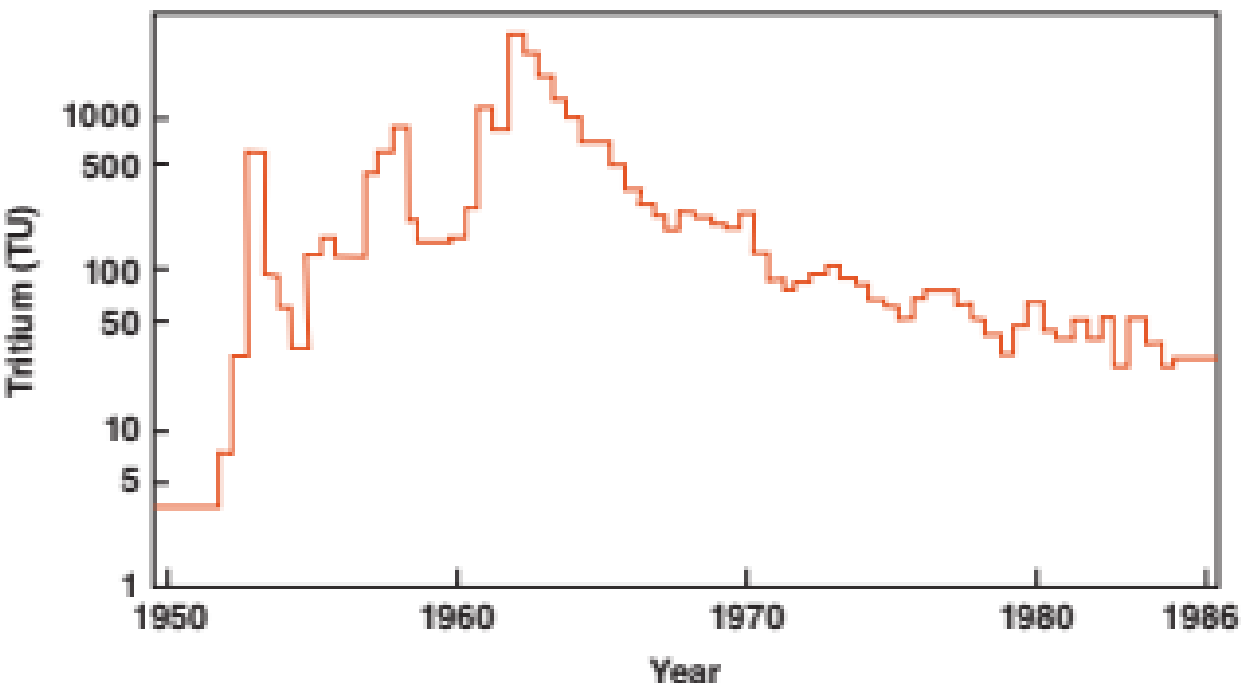
Метод используется в четвертичной геологии и археологии для датирования молодых объектов.

В методе существует проблема постоянства фона ^{14}C во времени. На рисунке показана проверка предположения, что $M_0 = \text{Const}$, по исторически датированным объектам (Faure, 1986).

Эффект Зюсса – следствие разбавления CO_2 атмосферы древним углеродом при сжигании твердых горючих ископаемых. Причины возникновения эффекта де Вриеса неизвестны.

Тритиевый метод

M	Тип распада	D	τ (лет)	Объекты датирования	Интервал времени	Ур-ние
^3T	β	^3He	12.26	вода	совр.	(1)



^3T – космогенный изотоп, источник его – верхние слои атмосферы.

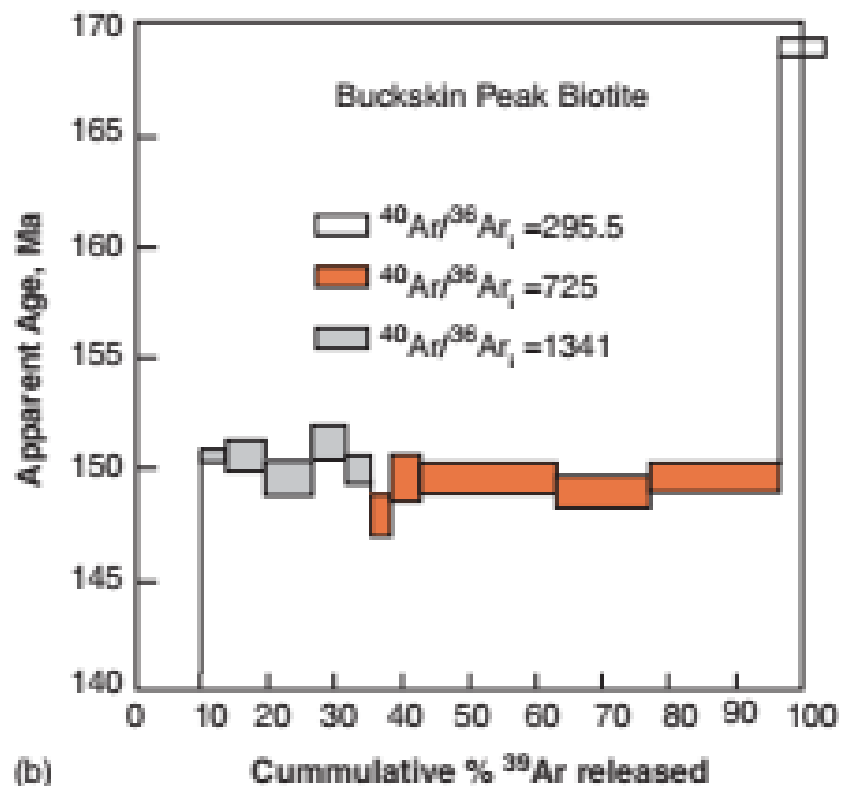
Атмосферные осадки с ^3T попадают на поверхность суши, просачиваясь в грунт, они теряют связь с атмосферой, после чего содержание трития в них убывает.

Метод используется в гидрогеологии для определения возраста воды и расчета эксплуатационных запасов воды.

Существенная проблема в применении – большой выброс трития в атмосферу при испытаниях водородных бомб в 1953-1967 гг.

Калий-аргоновый метод

M	Тип распада	D	τ (лет)	Объекты датирования	Интервал времени	Ур-ние
^{40}K	К-захват	^{40}Ar	1.28 млрд.	КПШ, слюды, глауконит	1 – 550 млн.	(2) $D_0=0$



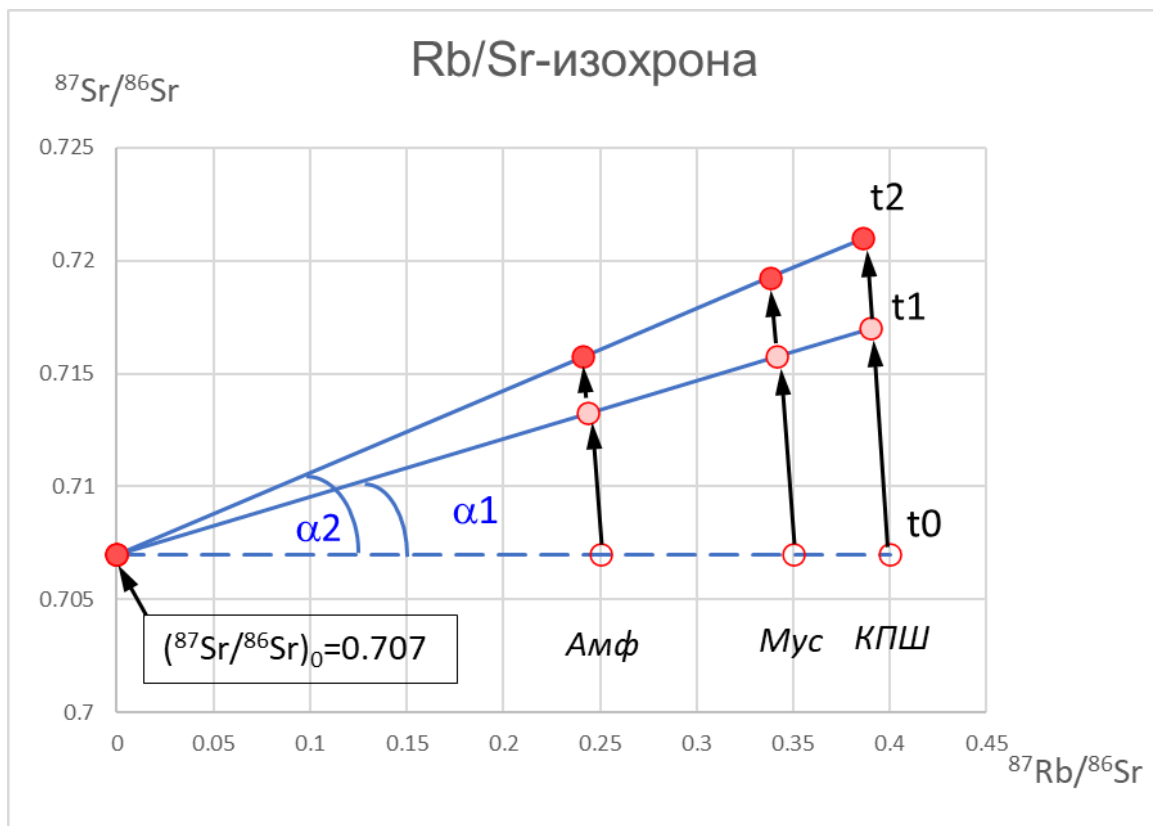
В К-Аг-методе применение упрощенного уравнения 2 ($D_0=0$) оправдано тем, что при кристаллизации из расплава зерна минералов практически не содержат аргона.

«Оборотная сторона медали» - получающийся при распаде калия радиогенный аргон плохо удерживается в минералах, и даже при небольшом нагреве теряется путем диффузии. Это приводит к занижению расчетного возраста.

Проблему удалось частично решить, применив методику «ступенчатого отжига» (рисунок), позволяющую отделить самую прочно связанную фракцию аргона в центре зерен.

Рубидий-стронциевый метод

M	Тип распада	D	τ (лет)	Объекты датирования	Интервал времени	Ур-ние
^{87}Rb	β	^{87}Sr	48.8 млрд.	КПШ, слюды, амфиболы	> 200 млн.	(2) изохрона



Изохрона строится по анализам нескольких **мономинеральных фракций** (обычно 5-6).

Вычисление возраста:

$$t = \frac{1}{\lambda} (1 + \text{tg}\alpha)$$

Это графическое решение системы уравнений вида (2), записанных для каждой мономинеральной фракции.

Параметр $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_0$ – важный геохронологический и петрогенетический индикатор, широко используемый в настоящее время для решения геотектонических задач.

При метаморфизме изохрона разрушается.

Уран-торий-свинцовые методы

М	Тип распада	D	τ (лет)	Объекты датирования	Интервал времени	Ур-ние
^{238}U	Цепи распада	^{206}Pb	4,468 млрд.	Циркон, ортит	> 10 млн.	(2)
^{235}U		^{207}Pb	704 млн.			поправки,
^{232}Th		^{208}Pb	14 млрд.			конкордия

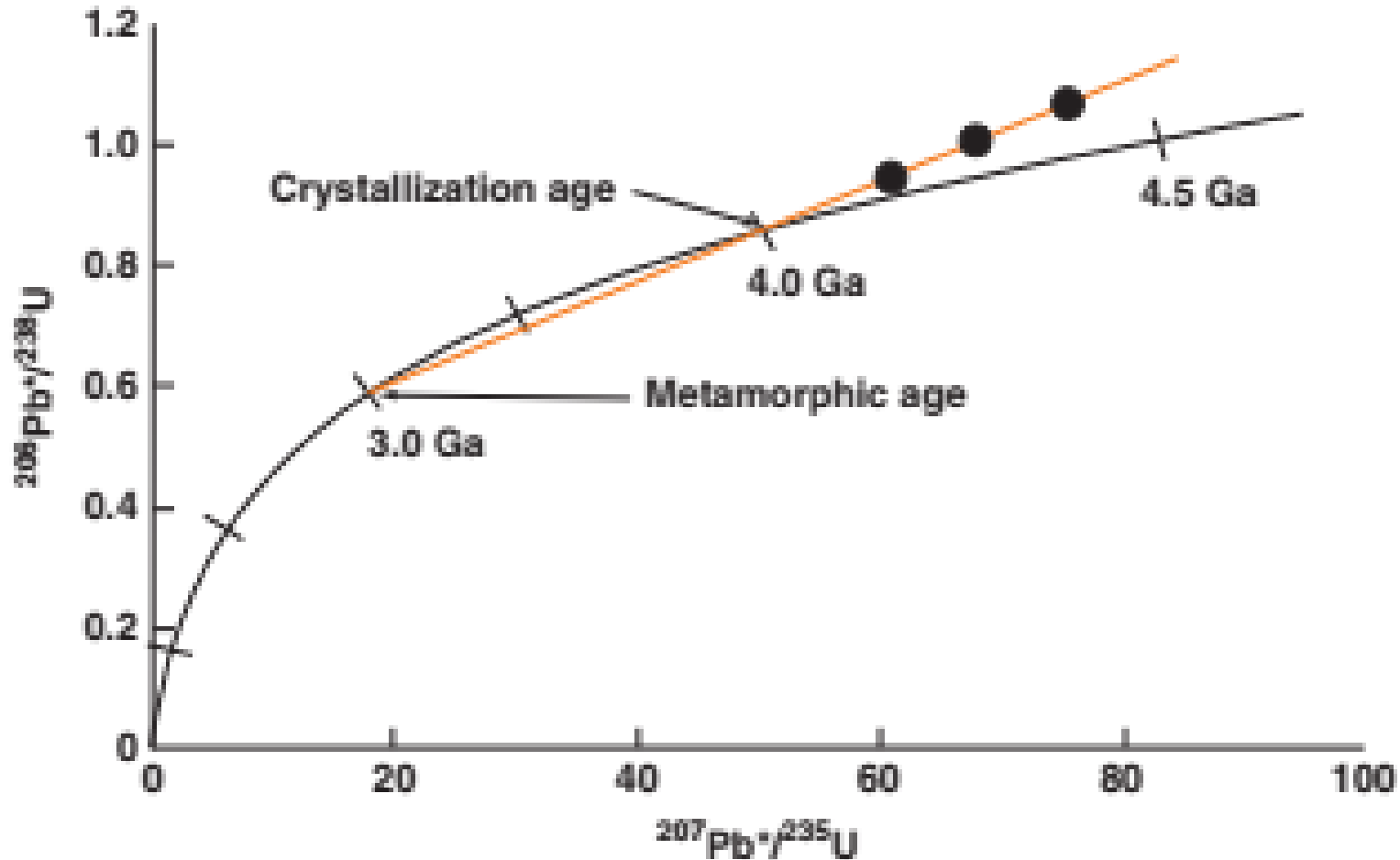
Метод поправки по «рудному» свинцу:

$$t = \frac{1}{\lambda^{238}} \left(1 + \frac{\frac{^{206}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}} - \frac{^{206}\text{Pb}_0}{^{204}\text{Pb}_0}}{\frac{^{238}\text{U}}{^{204}\text{Pb}}} \right)$$

поправка: $\frac{^{206}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}}_{\text{0 циркон}} = \frac{^{206}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}}_{\text{галенит}}$

Метод основан на том, что в галените (PbS) соотношение изотопов свинца практически не меняется со временем, и запечатлело отношение изотопов Pb в цирконе в момент кристаллизации расплава. Метод не работает для метаморфизованных образцов, что можно выявить, определяя возраст по независимым распадам ^{238}U , ^{235}U и ^{232}Th («дискордантные возрасты»).

Метод конкордии (Wetherill, 1956)

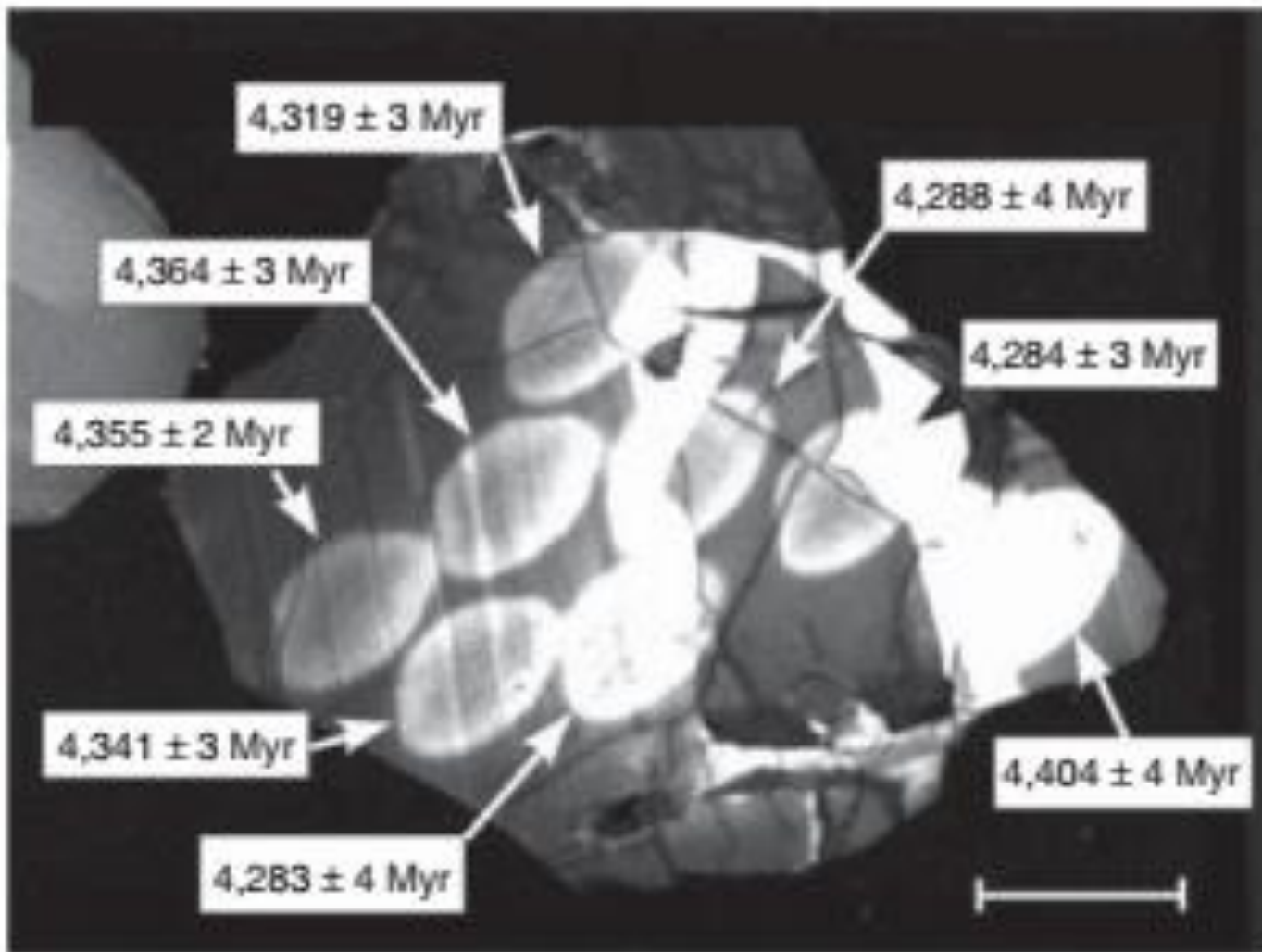


Метод конкордии позволяет работать с метаморфизованными образцами.

Верхнее пересечение конкордии с дискордией дает истинный возраст объекта, нижнее возраст метаморфизма.

В настоящее время – это основной метод изотопного датирования докембрийских пород.

«Детритные» хадейские цирконы



Микрофотография самого древнего известного зерна циркона.

Светлые участки – кратеры микронзондового анализа, показаны возраста, определенные в этих участках зерна.

Гнейсовый комплекс Jeck Hills (Зап. Австралия).

По (Wilde et al., 2001).

