

Геохимия ИЗОТОПОВ

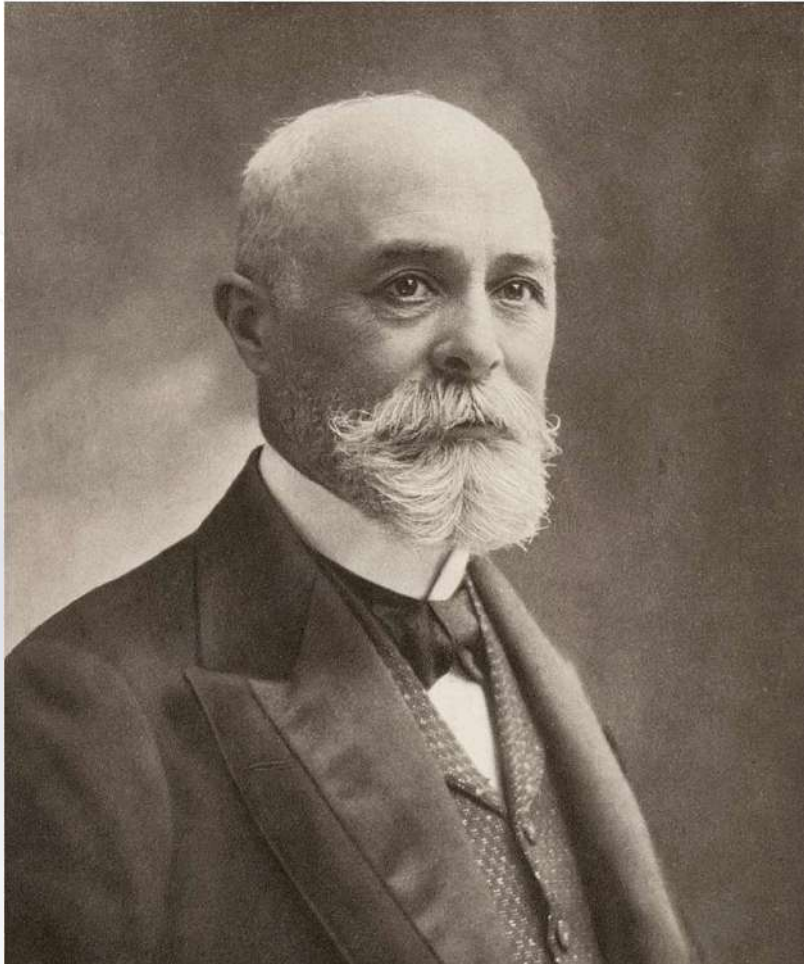
Изотопы – атомы одного химического элемента, имеющие одинаковое число протонов и разное число нейтронов

- В природе изотопы элементов плохо разделяются.**
- Изотопы с разными массами могут быть стабильными и радиоактивными.**

Основные направления

- **Радиогеоология (изучает поведение радиоактивных изотопов в природе)**
- **Изотопная геохронология (занимается изотопными методами измерения возраста геологических объектов)**
- **Геохимия стабильных изотопов**

Радиоактивность



Антуан Анри Беккерель
(1852-1908)

самопроизвольное превращение (или цепочка превращений) ядер родительских нестабильных атомов в нестабильные или стабильные ядра новообразованных дочерних атомов других элементов, сопровождающееся эмиссией частиц и/или излучением энергии (открыта в 1896 г)

Радиоактивные изотопы

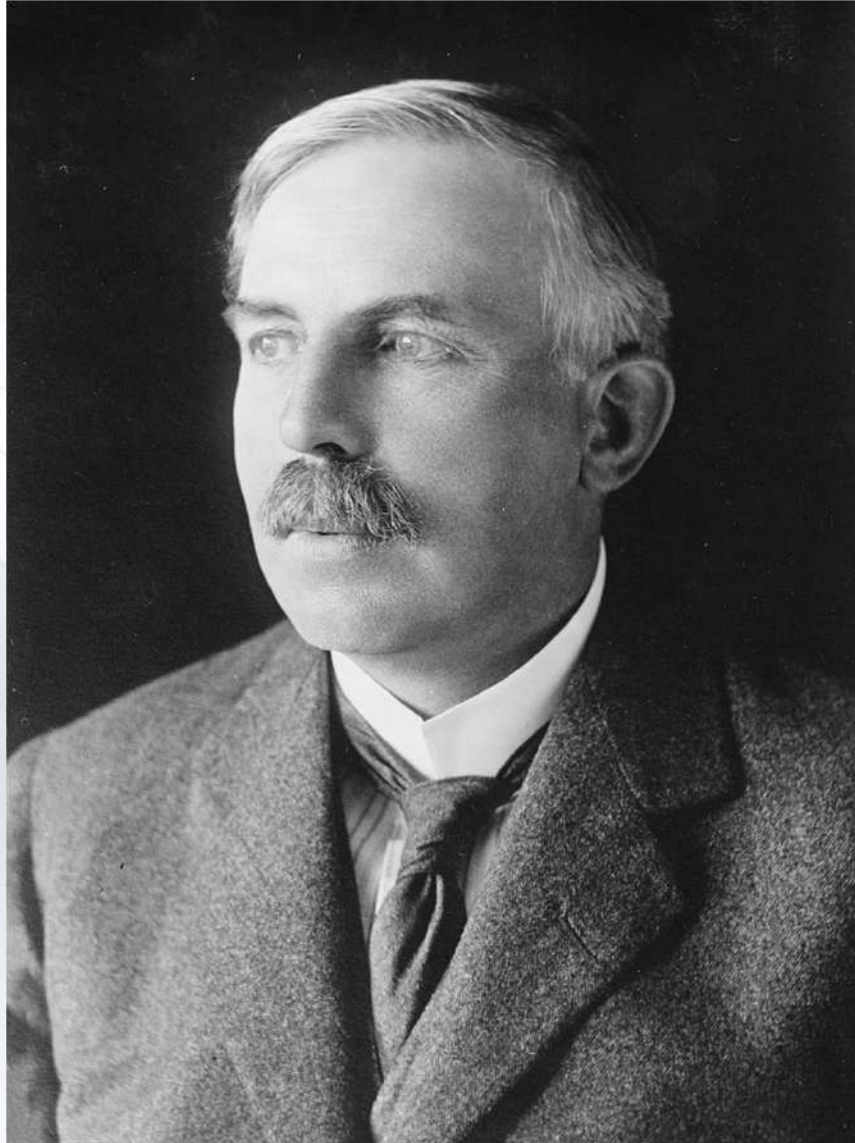
```
graph TD; A[Радиоактивные изотопы] --> B[естественные]; A --> C[искусственные];
```

естественные

присутствуют в горных породах, водах, атмосфере, растительных и живых организмах, что обуславливает их природную радиоактивность

искусственные

получают в ядерных реакторах

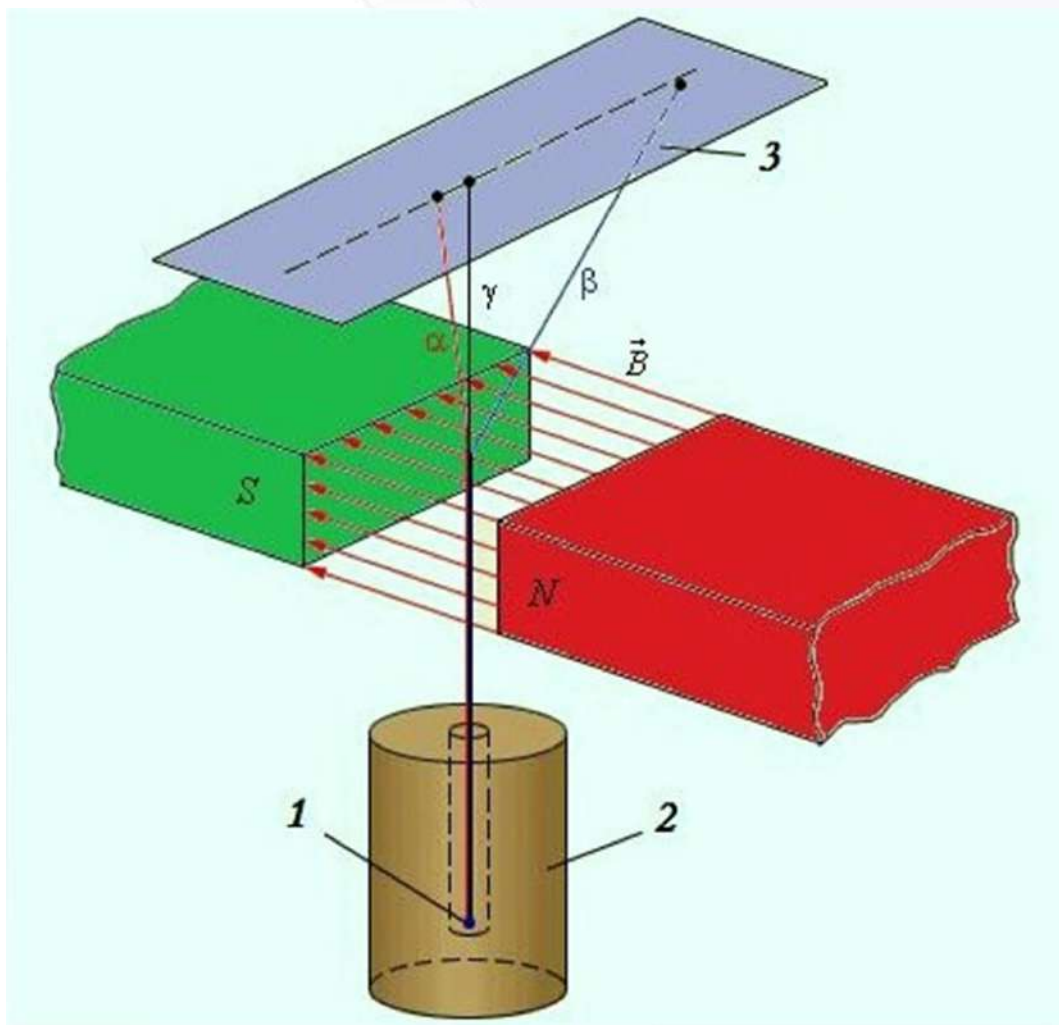


Эрнест Резерфорд
(1871-1937)

Опытным путем обнаружил сложный состав радиоактивного излучения.

В 1911 году своим знаменитым опытом рассеяния альфа-частиц доказал существование в атомах положительно заряженного ядра и отрицательно заряженных электронов вокруг него. На основе результатов опыта создал планетарную модель атома.

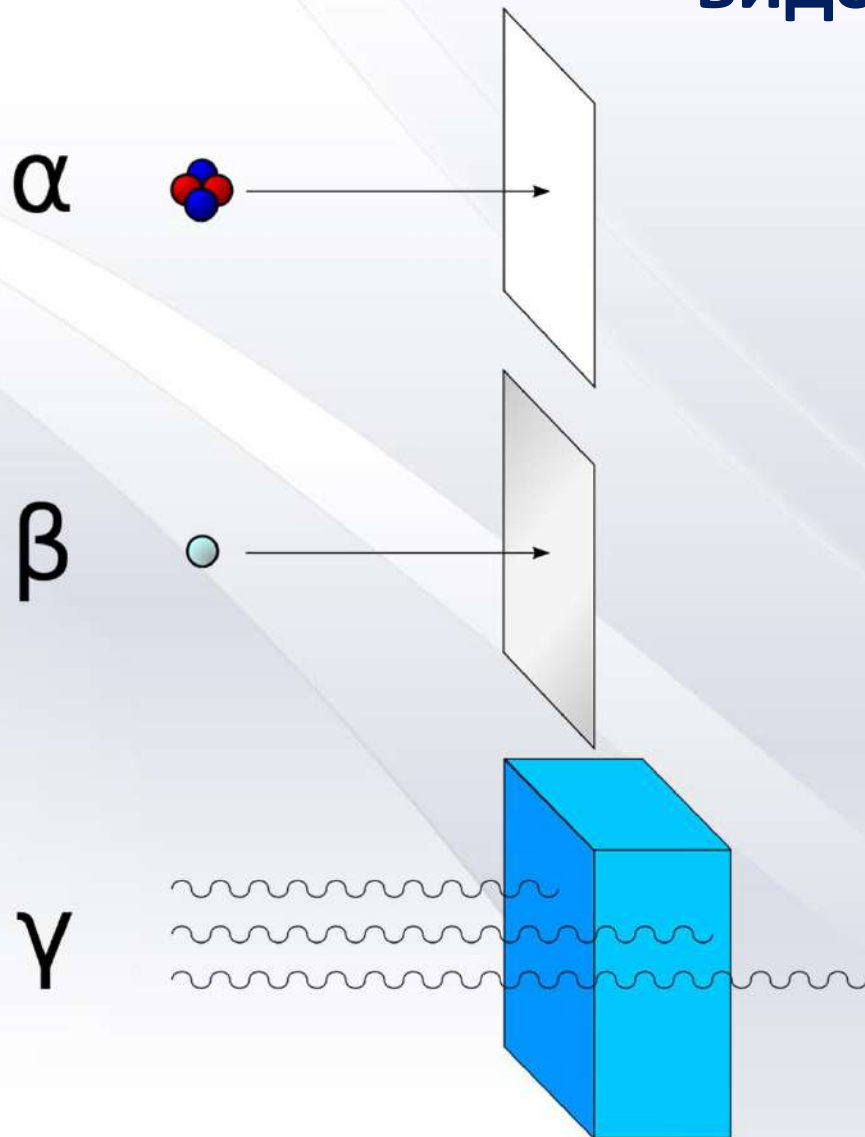
Схема опыта по обнаружению сложного состава радиоактивного излучения



Две составляющие первичного излучения отклонялись в противоположные стороны, что указывало на наличие у них зарядов противоположных знаков. Третья составляющая сохраняла прямолинейность распространения. Излучение, обладающее положительным зарядом, получило название альфа-лучи, отрицательным — бета-лучи, нейтральным — гамма-лучи

1 — радиоактивный препарат, 2 — свинцовый цилиндр, 3 — фотопластинка.

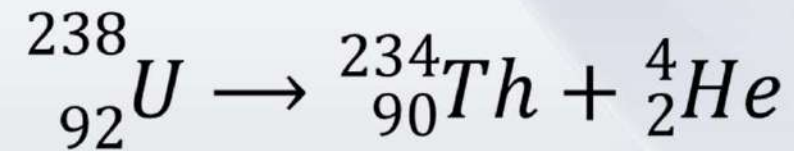
Проникающая способность различных видов излучения



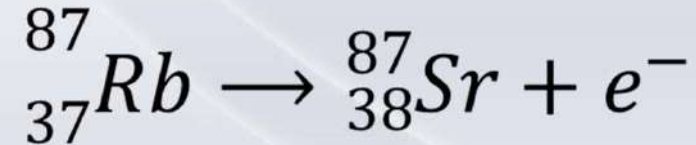
- α – частицы могут быть легко остановлены листом бумаги
- для защиты от β -частиц энергией до 1 МэВ достаточно алюминиевой пластины толщиной в несколько миллиметров
- для защиты от γ – излучения эффективны тяжёлые элементы (свинец и т. д.), поглощающие МэВ-ные фотоны в слое толщиной несколько см (поскольку оно обладает гораздо большей проникающей способностью)

Типы распада

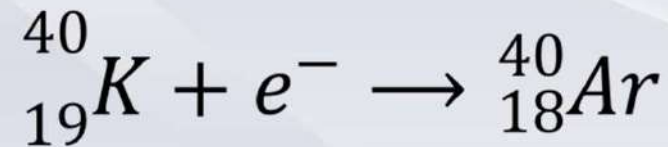
α-распад



β-распад

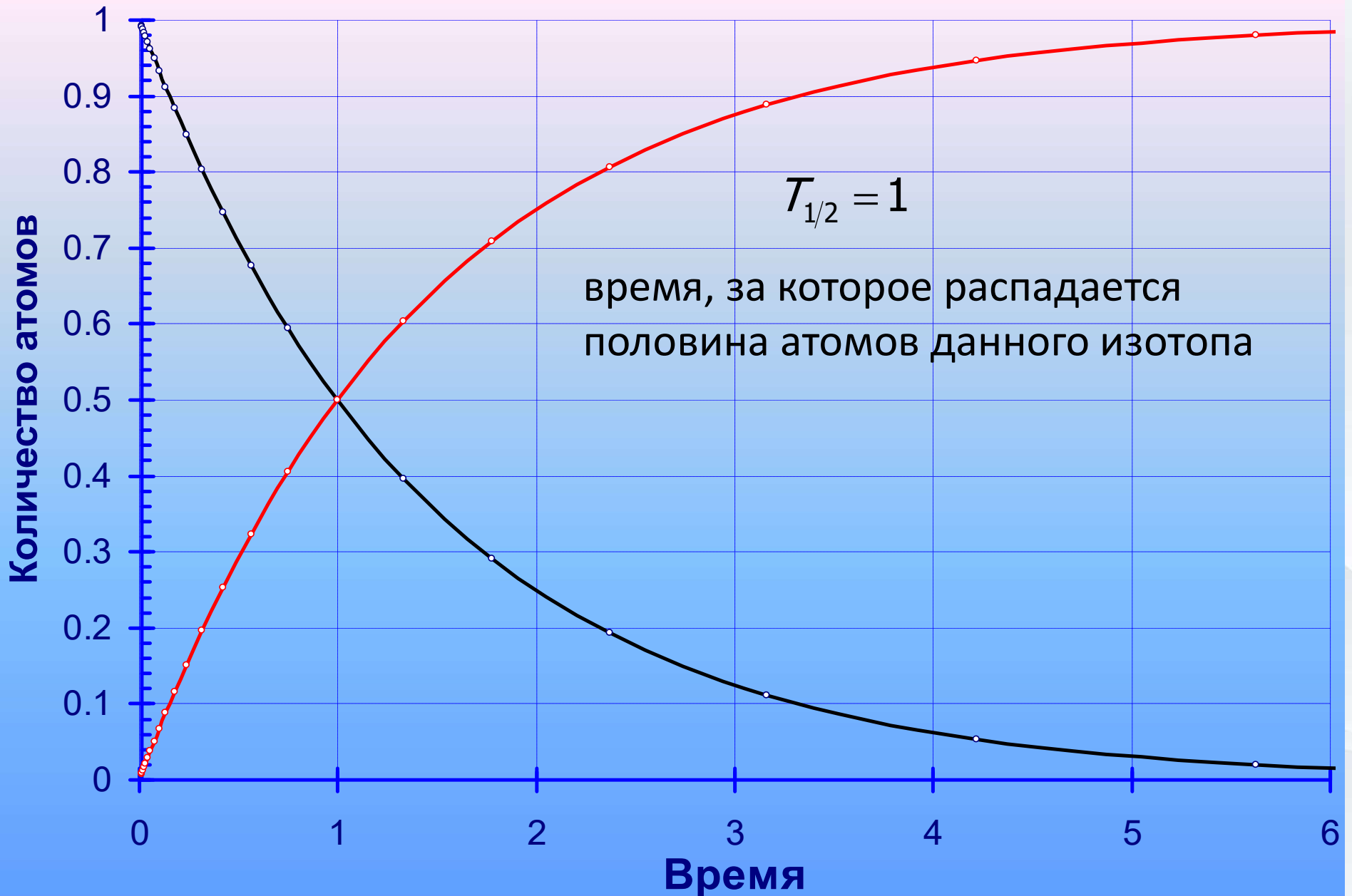


κ-захват



Изотопная геохронология

Период полураспада



Основные уравнения геохронологии

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

M – количество материнских изотопов

λ – константа распада

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

Период полураспада – время, за которое распадается половина атомов данного изотопа

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

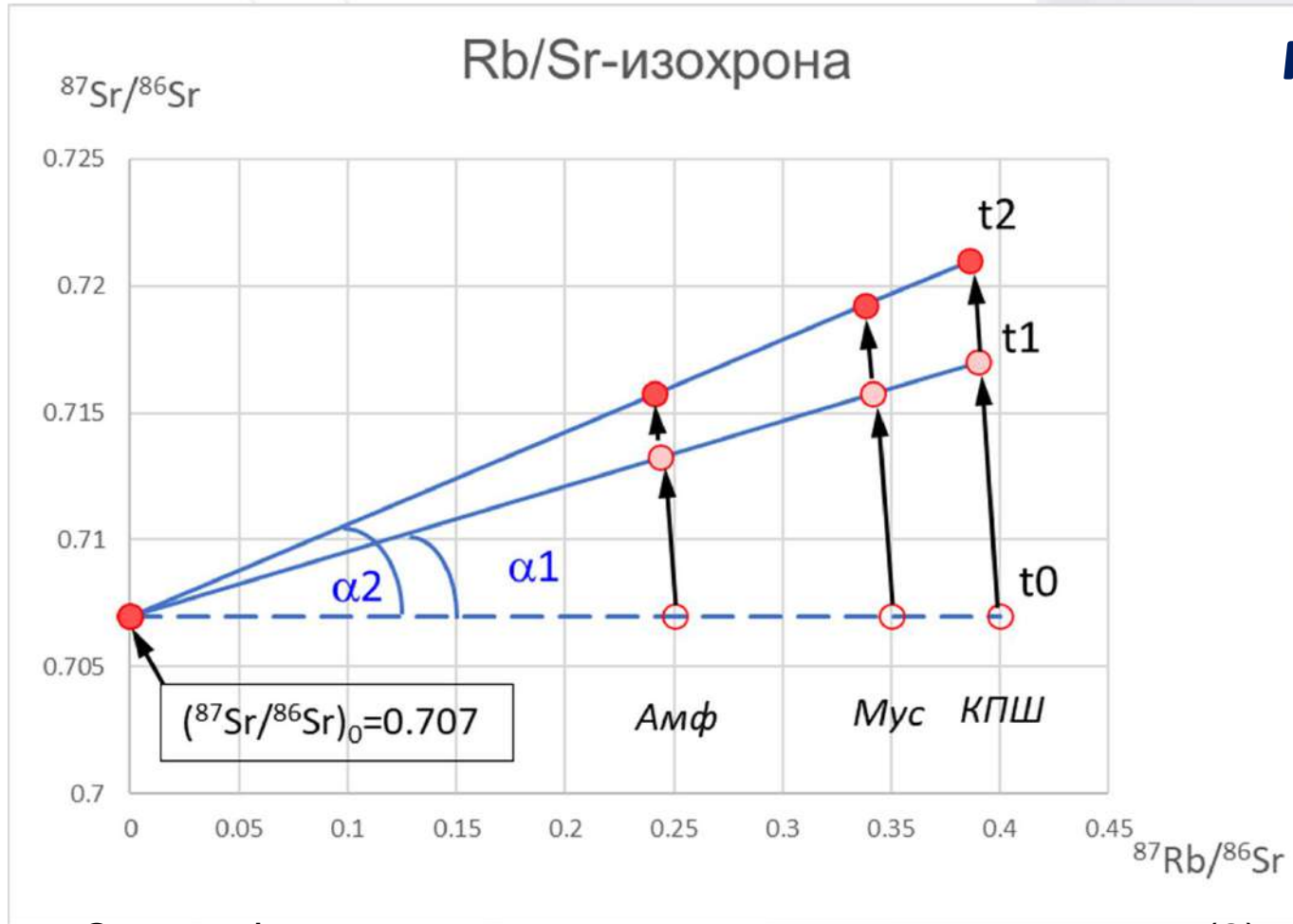
$$M_0 + D_0 = M + D$$

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

Методы изотопного датирования

Название метода	M	Тип	D	τ	Объект датирования	Интервал времени	Ур
Тритиевый	^3T	β	^3He	12,26	Вода	Современные	1
Радиоуглеродный	^{14}C	β	^{14}N	5730	Древесина	<70 тыс.лет	1
Калий-аргоновый	^{40}K	k-захват	^{40}Ar	1,25 млрд	Слюдь, КПШ, глауконит	Фанерозой (<550 млн.л)	2
Рубидий-стронциевый (Изохронный)	^{87}Rb	β	^{87}Sr	48,9 млрд	Слюдь, КПШ, глауконит	>200 млн.л	2
Уран-торий-свинцовый	^{238}U ^{235}U ^{232}Th	Цепь распада	^{206}Pb ^{207}Pb ^{208}Pb	4,463 млрд 0,707 млрд 14,01 млрд	Цирконы	>10млн.л	2

Рубидий-стронциевый метод



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

Возраст вычисляют по формуле:

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

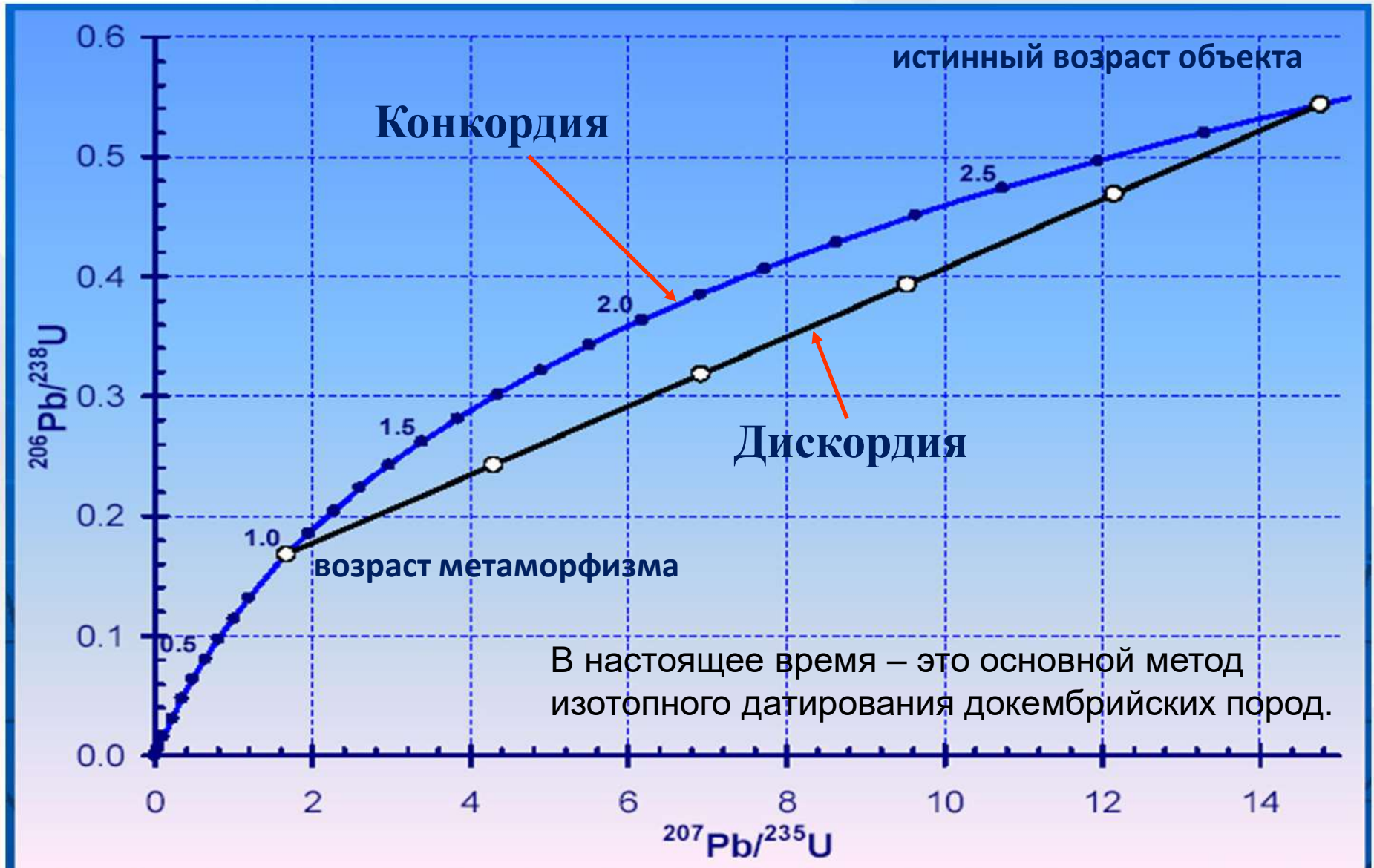
Это графическое решение системы уравнений вида (2), записанных для каждой мономинеральной фракции.

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-свинцовый метод

Метод конкордии (Wetherill, 1956)

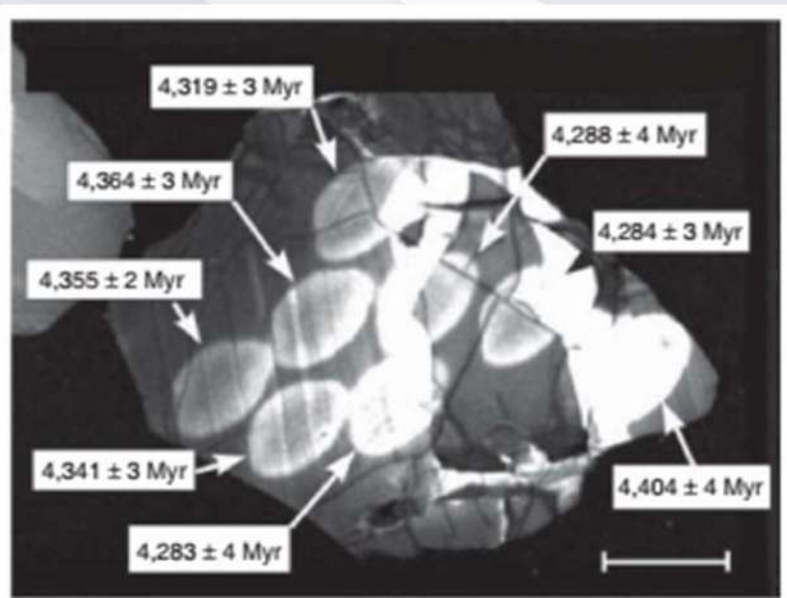


Конкордия графическое представление двух независимых геохронометров

Дискордия (в римской мифологии богиня раздора) – линия, соединяющая несогласующиеся (расходящиеся) значения возраста, получаемые U-Pb методом при отсутствии изотопного равновесия.

Причины применения цирконов в уран-торий-свинцовом методе

- Циркон изначально содержит много урана и тория, т.к. они входят в него изоморфно замещая атомы циркония;
- Дочерний продукт – свинец – плохо входит в цирконы, изначально его там мало;
- Кристаллы циркона очень прочные и слабо подвержены метаморфизму, выветриванию и прочим преобразованиям.



Микрофотография самого древнего известного зерна циркона. Светлые участки – кратеры микрозондового анализа, показаны возраста, определенные в этих участках зерна. Гнейсовый комплекс Jeck Hills (Зап. Австралия) [по Wilde et al., 2001]

Геохимия стабильных ИЗОТОПОВ

Стабильные изотопы

Состояние изученности

H, C, O, S

Огромный объем информации
Детально исследована изотопная систематика в природных процессах
Широко применяются для решения геологических задач

N, Li, B, Si, Cl

Определены основные черты изотопной систематики
Есть решения отдельных задач практической геологии

**Fe, Ni, Cu, Zn,
Se, Mo, Hg**

Накопление информации

Способ выражения изотопного состава веществ

Изотопный состав вещества характеризуют относительным отклонением изотопного отношения от некоторой стандартной величины.

Измеряется в промилле.

$$\delta^{34}\text{S} = \left(\frac{\left(\frac{^{34}\text{S}}{^{32}\text{S}} \right)_{\text{образец}}}{\left(\frac{^{34}\text{S}}{^{32}\text{S}} \right)_{\text{стандарт}}} - 1 \right) * 1000\text{‰}$$

$\delta^{34}\text{S}$ – считают по более тяжелому изотопу

Используемые стандарты

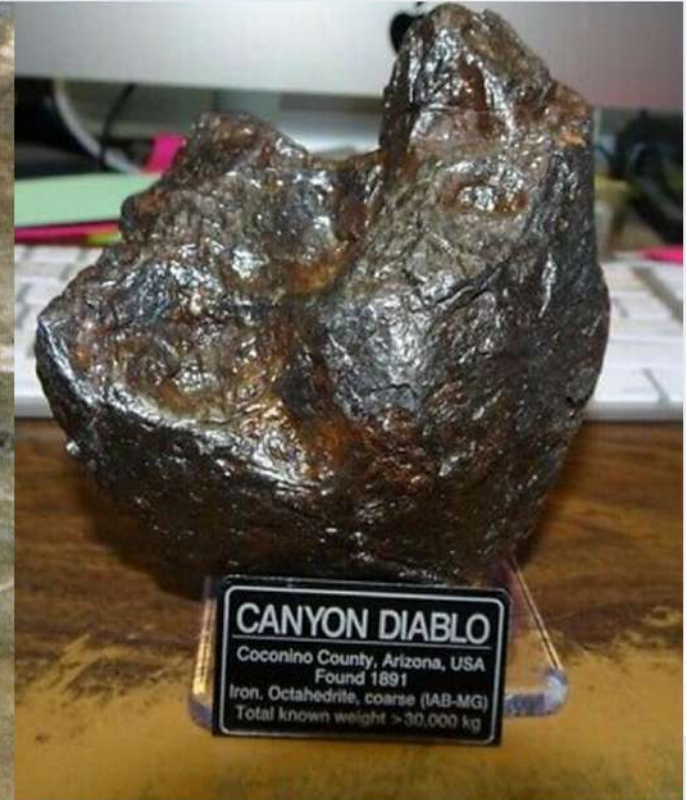
Элемент	Главные изотопы, доля в %		Стандарт и отношение в нем	Состав мантии (‰)	Пределы вариаций на Земле (‰)	
H	¹ H	99,9885	Стандартная средняя морская вода - SMOW	D/H=0,00015576	-80	-500 ÷ +50
	² D	0,0115				
C	¹² C	98,93	Белемнит - PDB	¹³ C/ ¹² C=0,0112372	-6	-100 ÷ +20
	¹³ C	1,07				
O	¹⁶ O	99,757	Стандартная средняя морская вода - SMOW	¹⁸ O/ ¹⁶ O=0,0020671	+5	-50 ÷ +40
	¹⁸ O	0,205				
S	³² S	95,04	Троилит из метеорита Каньон Дьябло - CD	³⁴ S/ ³² S=0,0450045	0	-65 ÷ +120
	³⁴ S	4,20				

SMOW - Standard of Mid-Ocean Water
(155 мг/л дейтерия)

SLAP - Standard Light Antarctic Precipitations
(89 мг/л дейтерия)

Стандарт CD

Аризонский кратер
диаметром 1200 метров



значение изотопного отношения $^{34}\text{S}/^{32}\text{S}$ в троилите (FeS) из железных метеоритов, упавших около 40 тыс. лет назад недалеко от каньона Дьявола (Canyon Diablo), Аризона, США.

Стандарт PDB

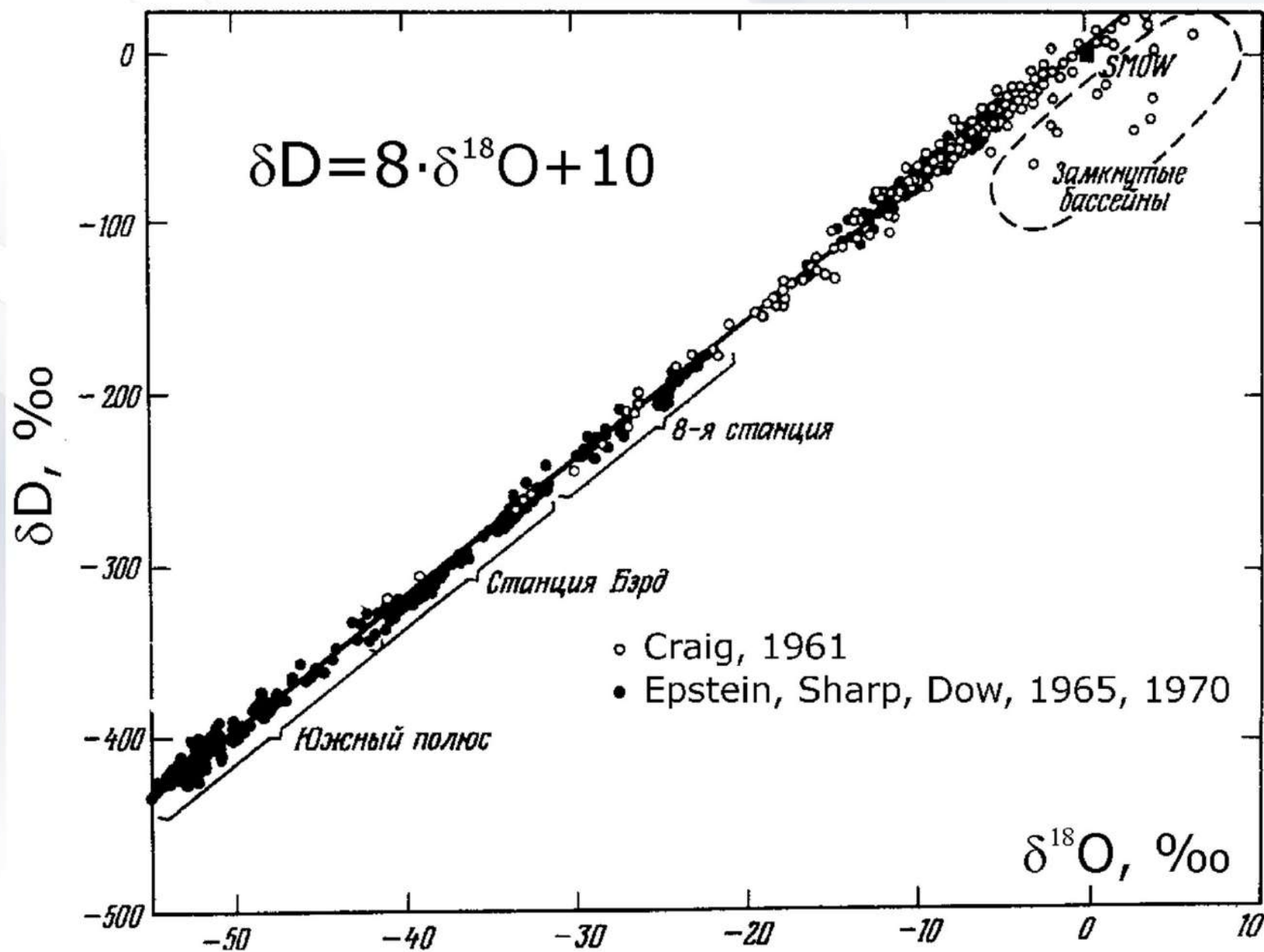


значение изотопного отношения $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ в углероде кальцита ископаемого моллюска *Velimnitella Americana* из меловой формации PeeDee, Южная Каролина, США.

Типы задач

- Выявление источника вещества (изотопный состав используется в качестве метки)
- Определение палеотемператур (чем выше температура, тем хуже протекает фракционирование)
- Выявление специфических процессов (сульфатредукция; бактериальное образование метана)

Изотопный состав атмосферных осадков



Выявление источника раствора

линия метеорных вод («линия Крейга»)
 $\delta D = 8 * \delta^{18}O + 10$

Диаграмма Тэйлора

