

# **Геохимия ИЗОТОПОВ**

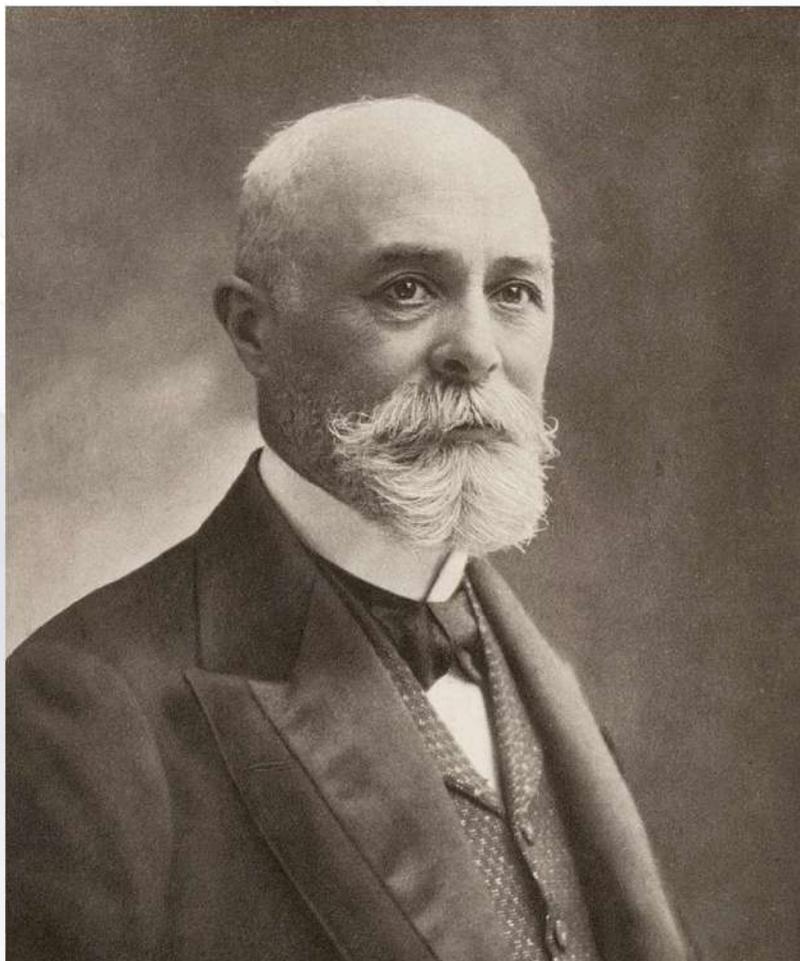
# **Изотопы – атомы одного химического элемента, имеющие одинаковое число протонов и разное число нейтронов**

- **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

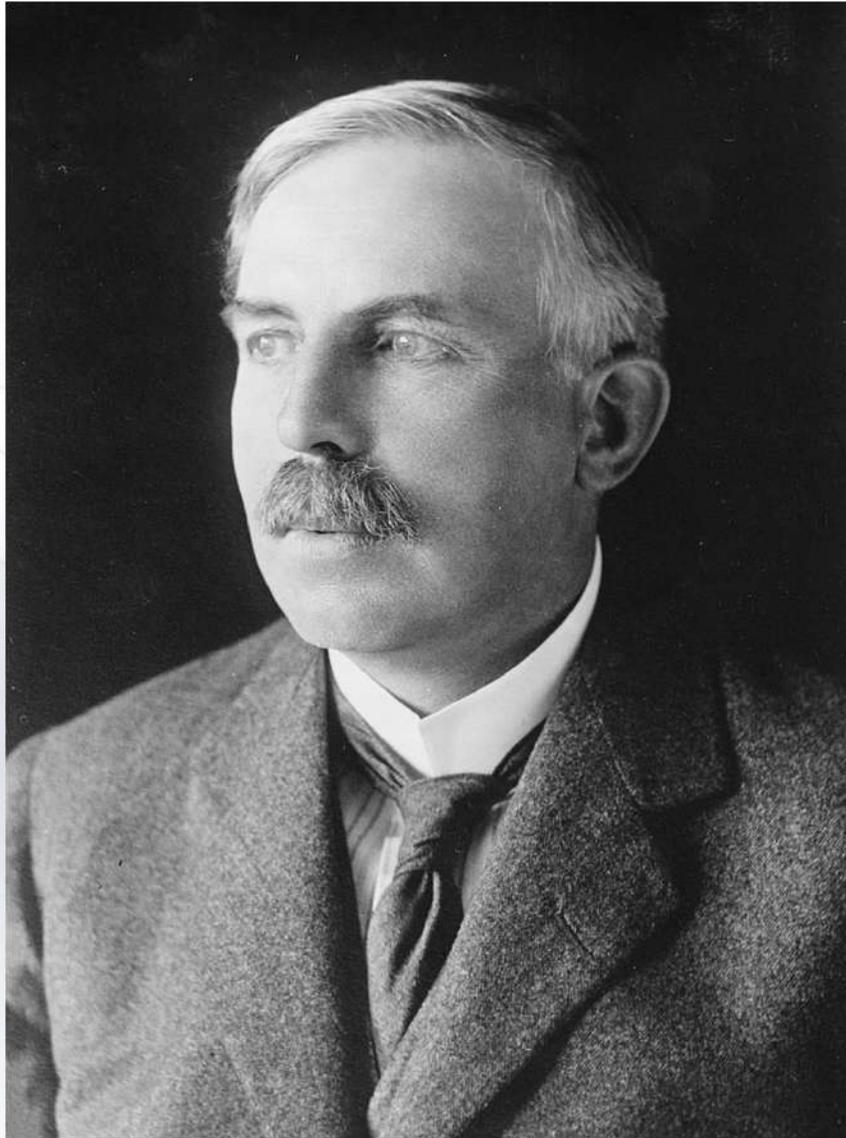
```
graph TD; A[Радиоактивные изотопы] --> B[естественные]; A --> C[искусственные];
```

## естественные

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

## искусственные

получают в ядерных реакторах

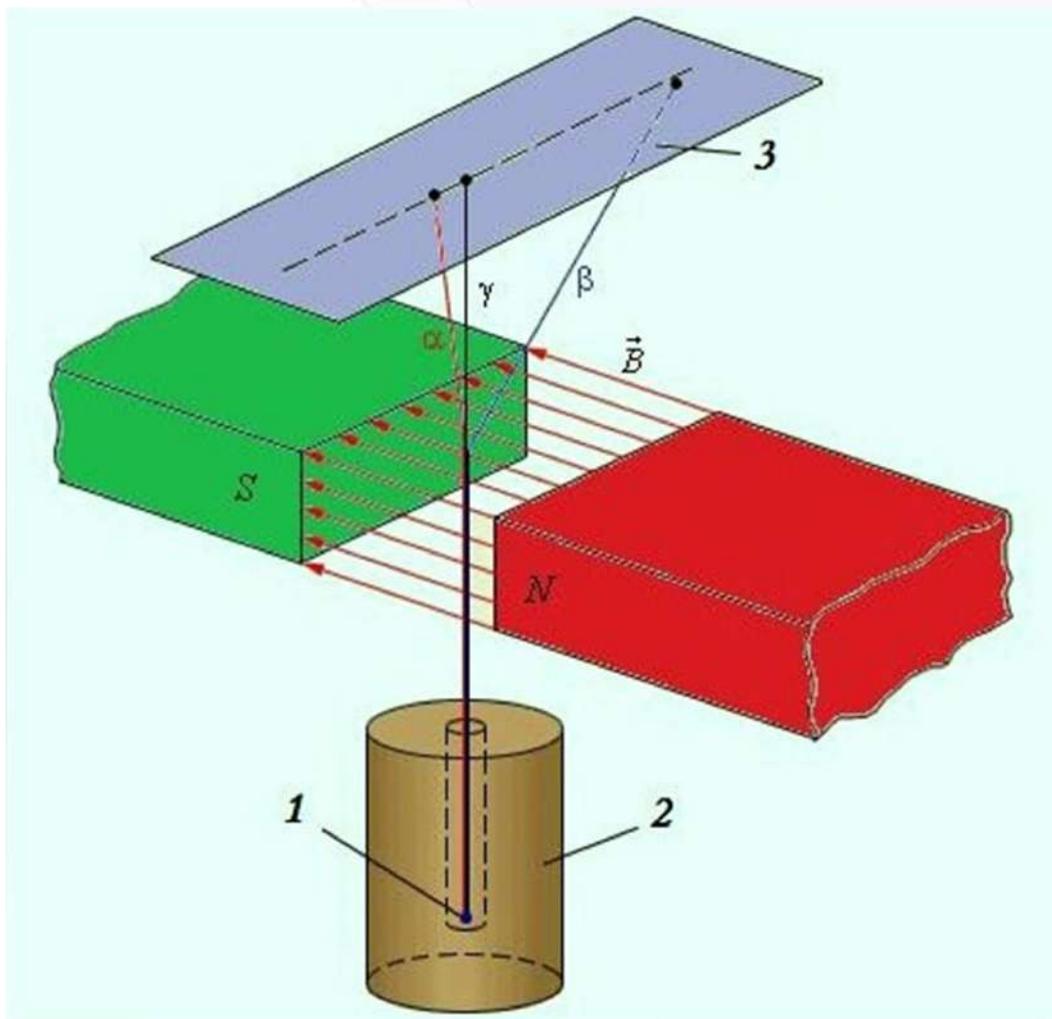


Эрнест Резерфорд  
(1871-1937)

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.

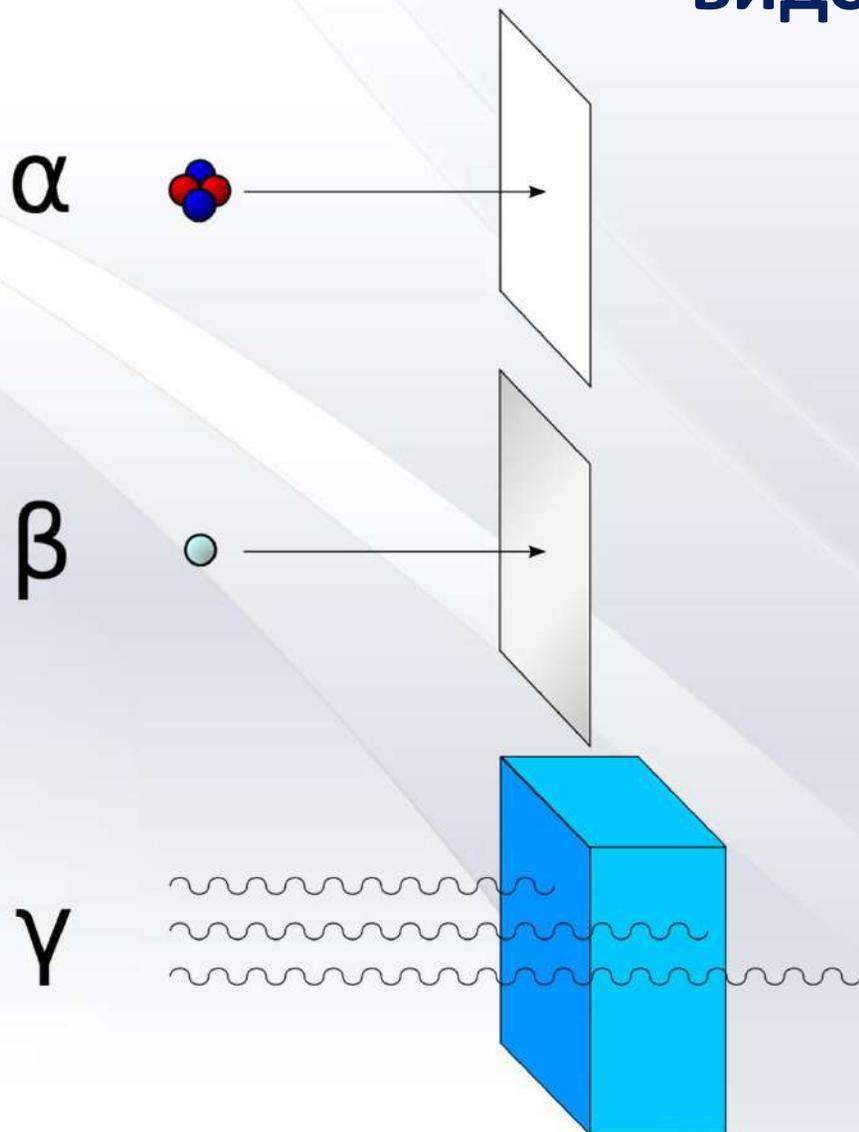
# Схема опыта по обнаружению сложного состава радиоактивного излучения



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.

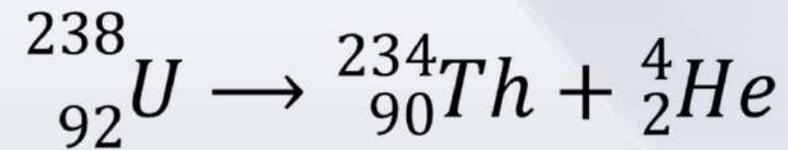
# Проникающая способность различных видов излучения



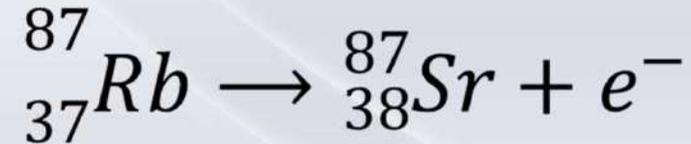
- $\alpha$  – частицы могут быть легко остановлены листом бумаги
- для защиты от  $\beta$ -частиц энергией до 1 МэВ достаточно алюминиевой пластины толщиной в несколько миллиметров
- для защиты от  $\gamma$  – излучения эффективны тяжёлые элементы (свинец и т. д.), поглощающие МэВ-ные фотоны в слое толщиной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

# Типы распада

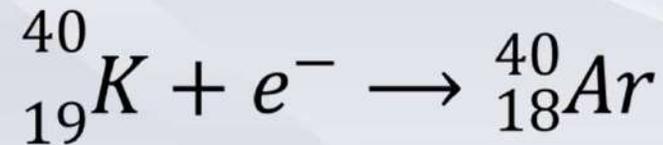
α-распад



β-распад

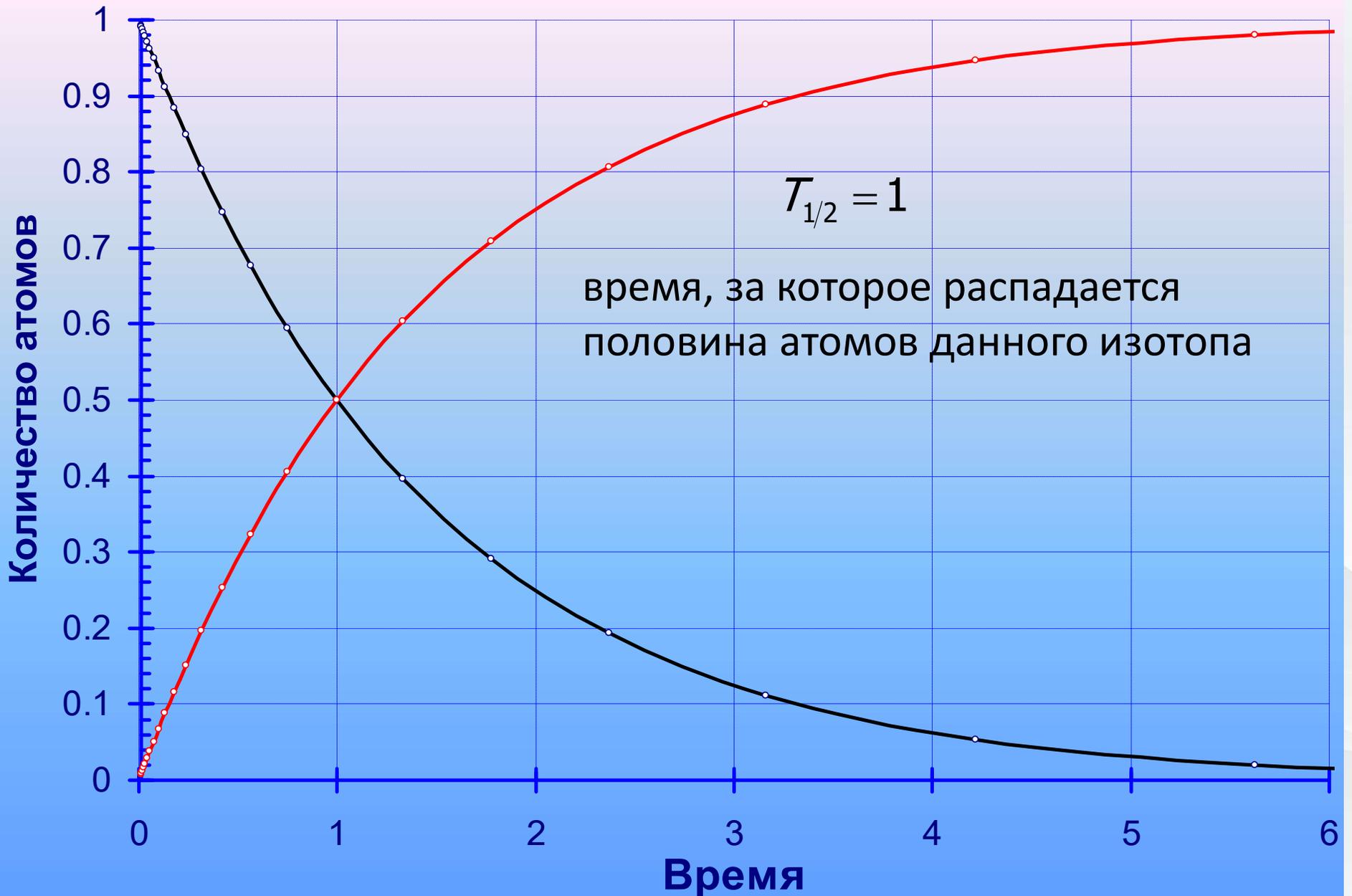


κ-захват



# **Изотопная геохронология**

# Период полураспада



# Основные уравнения геохронологии

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

$M$  – количество материнских изотопов

$\lambda$  – константа распада

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

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

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

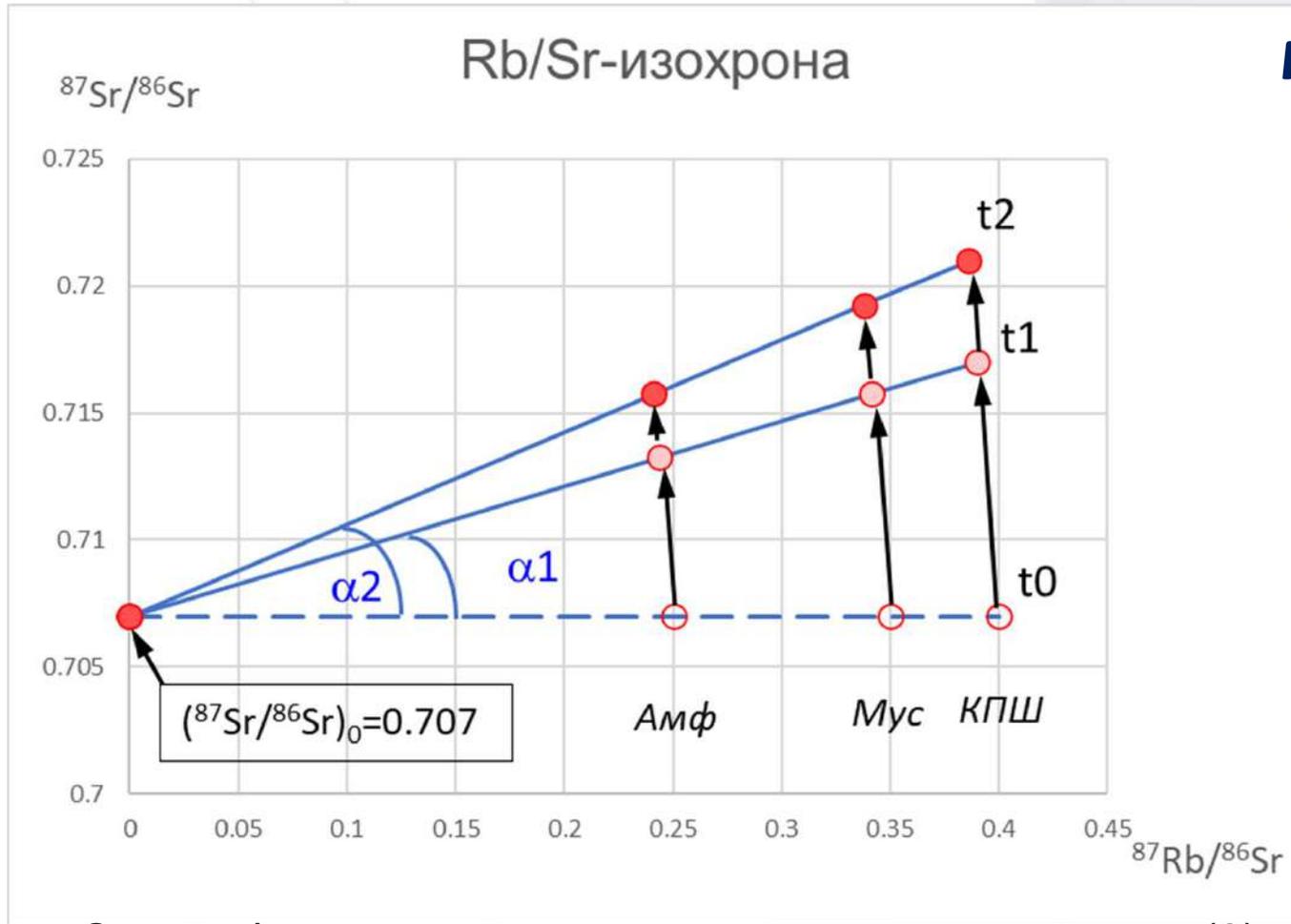
$$M_0 + D_0 = M + D$$

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

## Методы изотопного датирования

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

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

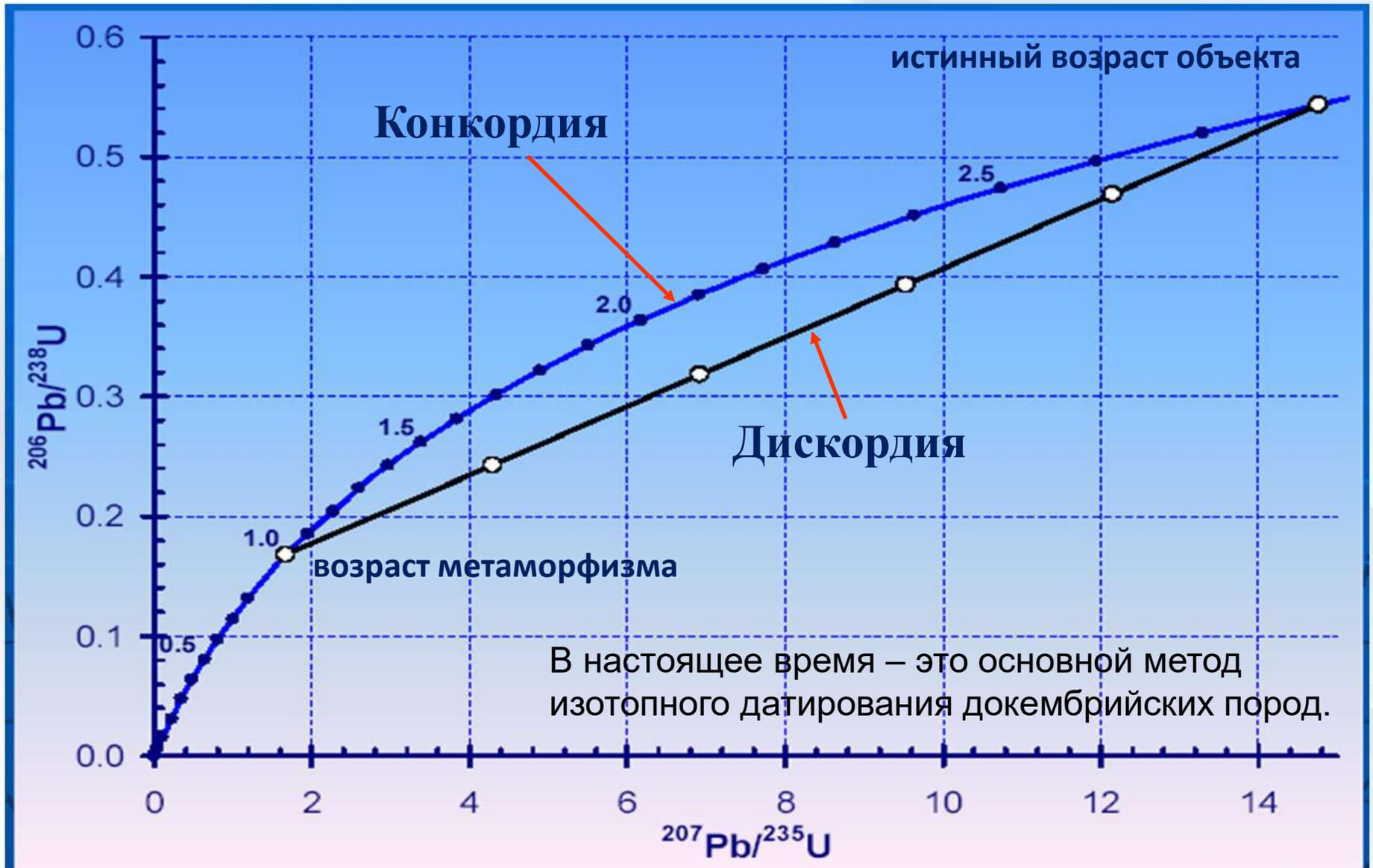
Это графическое решение системы уравнений вида (2), записанных для каждой мономинеральной фракции.

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)

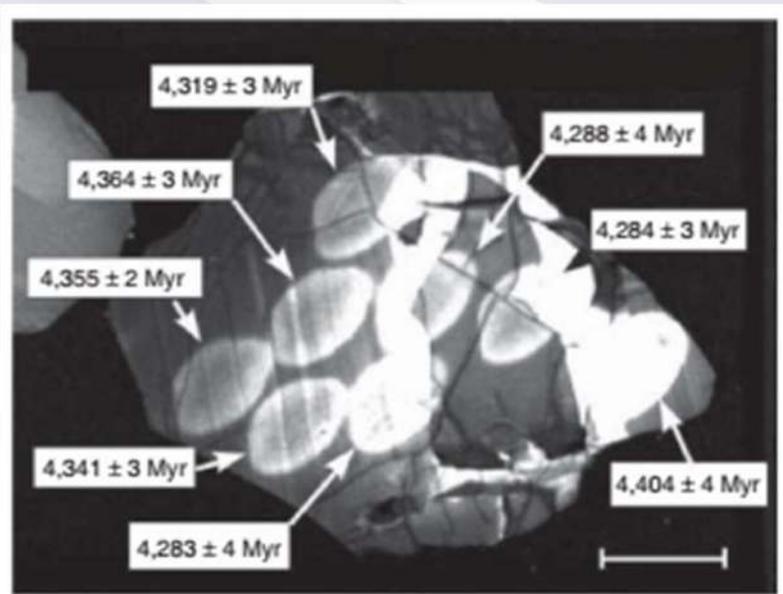


**Конкордия** графическое представление двух независимых геохронометров

**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

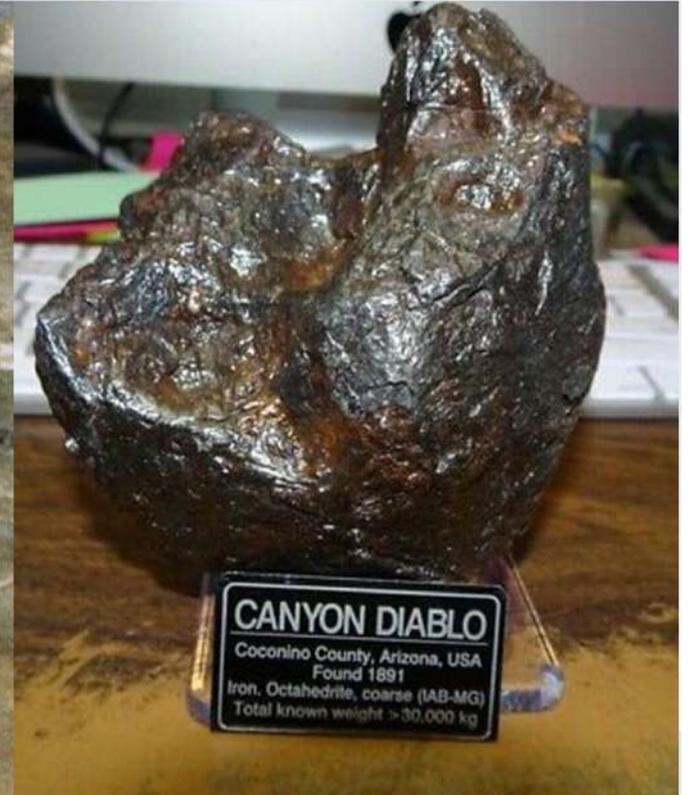
Элемент	Главные изотопы, доля в %		Стандарт и отношение в нем	Состав мантии (‰)	Пределы вариаций на Земле (‰)	
H	<sup>1</sup> H	99,9885	Стандартная средняя морская вода - SMOW	D/H=0,00015576	-80	-500 ÷ +50
	<sup>2</sup> D	0,0115				
C	<sup>12</sup> C	98,93	Белемнит - PDB	<sup>13</sup> C/ <sup>12</sup> C=0,0112372	-6	-100 ÷ +20
	<sup>13</sup> C	1,07				
O	<sup>16</sup> O	99,757	Стандартная средняя морская вода - SMOW	<sup>18</sup> O/ <sup>16</sup> O=0,0020671	+5	-50 ÷ +40
	<sup>18</sup> O	0,205				
S	<sup>32</sup> S	95,04	Троилит из метеорита Каньон Дьябло - CD	<sup>34</sup> S/ <sup>32</sup> S=0,0450045	0	-65 ÷ +120
	<sup>34</sup> 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 ( $\text{FeS}$ ) из железных метеоритов, упавших около 40 тыс. лет назад недалеко от каньона Дьявола (Canyon Diablo), Аризона, США.

# Стандарт PDB

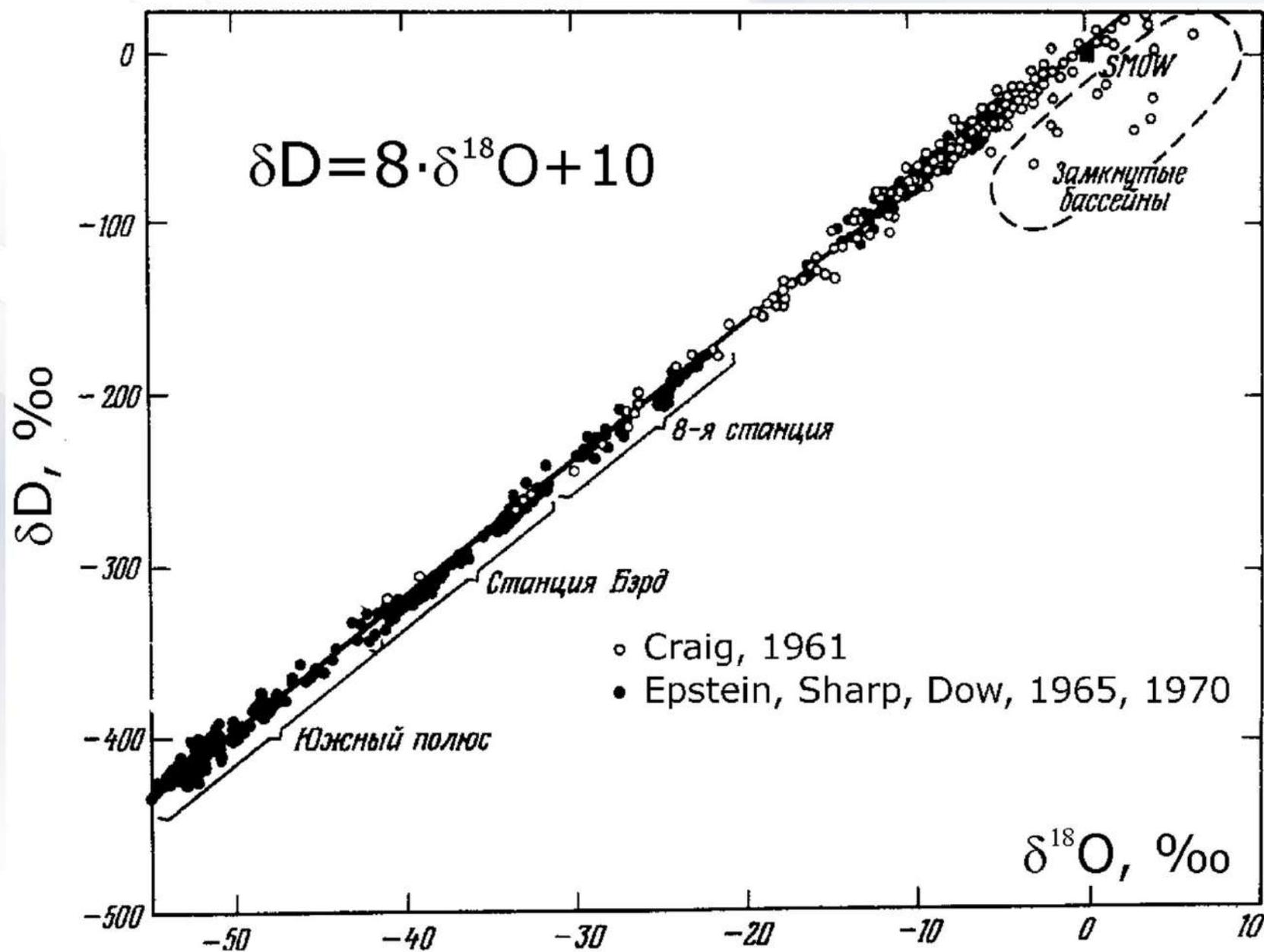


значение изотопного отношения  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  в углероде кальцита ископаемого моллюска *Velimnitella Americana* из меловой формации PeeDee, Южная Каролина, США.

# 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

