

# Радиогенные изотопы в геологии

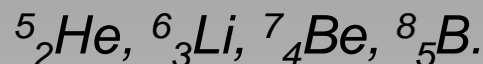


# Систематика атомов

- **Изотопы** - разновидности атомов *одного химического элемента* с разным количеством нейтронов в ядре



- **Изотоны** - атомы разных элементов, имеющие *одинаковое количество нейтронов* в ядре

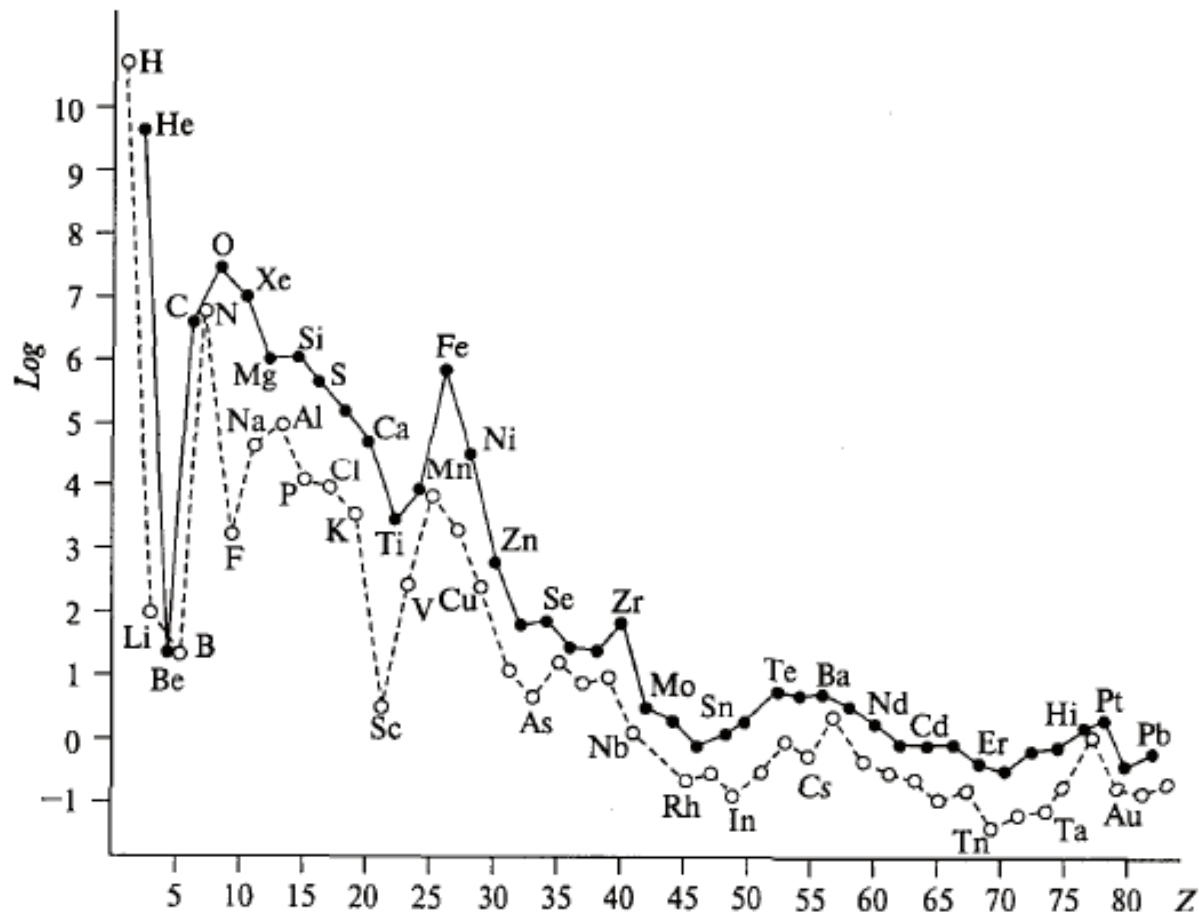


- **Изобары** — атомы элементов, имеющие *одинаковое массовое число*



# Правило Оддо-Гаркинса

Относительная распространенность химических элементов в Солнечной системе в зависимости от порядкового номера



# Радиоактивный распад



The diagram illustrates the process of radioactive decay. It features a yellow circle on the left representing the parent isotope, a green arrow in the center representing the decay process, and a blue circle on the right representing the daughter isotope. The background is a gradient from grey at the top to blue at the bottom, with a brown mountain range silhouette at the very bottom.

**Радиоактивный  
(материнский) изотоп**

р/а распад

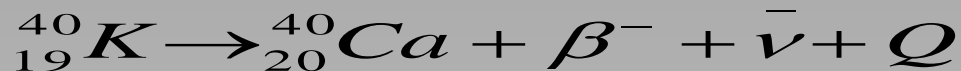
**Радиогенный  
(дочерний) изотоп**

# Радиоактивный распад

- Альфа-распад



- Бета-распад



+позитронный распад, электронный захват



# Радиоактивный распад

$$-\frac{dN}{dt} \approx \lambda \times N \longrightarrow t = \frac{1}{\lambda} \ln\left(\frac{D - D_0}{N} + 1\right)$$

- $N$ - число атомов в данный момент времени
- $\lambda$  – постоянная распада



# Направления использования радиоактивных изотопов

- **Геохронология** - определение абсолютного возраста пород и минералов.
- **Изотопная геохимия** – идентификация источников пород
- **Изотопная геология**- идентификация палеотектонических обстановок формирования пород



# Изотопные методы исследований

- U-Pb, Sm-Nd, Rb-Sr, Re-Os, K-Ar, Pb-Pb, Lu-Hf...





# Способы оценки возраста

- По уравнению, изохронный, расчет модельных возрастов



# Что датируем?

Какие процессы?

1. Время кристаллизации минерала
2. Время кристаллизации породы
3. Время метаморфизма
4. Время осадконакопления
5. Время отделения первичного расплава от мантийного резервуара (модельные возраста)



# Пробоподготовка

## Минералы:

- дробление породы
- извлечение нужного минерала

## Породы:

- дробление
- истирание в пудру



# Пробоподготовка

## Возможные ошибки

### Минералы:

- дробление породы
- извлечение нужного минерала

### Породы:

- дробление
- истирание в пудру

Невыветрелые образцы, во что заворачиваем,  
чем дробим..



# Пробоподготовка

- Химическое разделение, спайкирование, разложение проб, выделение нужных элементов, нанесение (?)

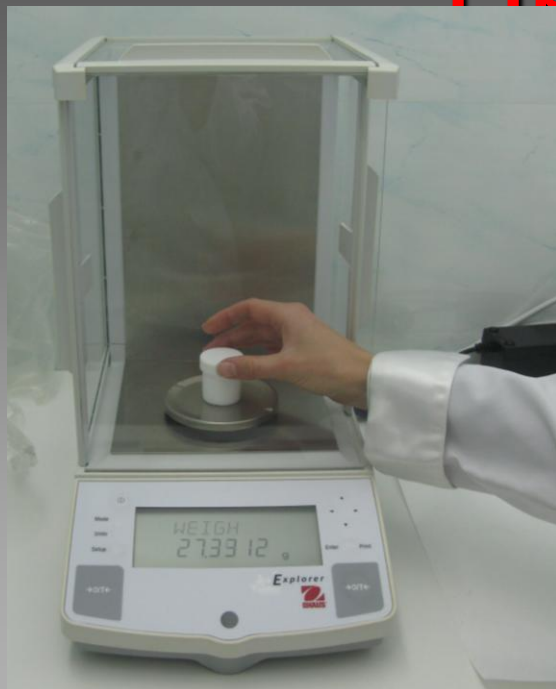
Чистота лаборатории, тщательно вымытая посуда, верные калибровки растворов, хорошие холостые...



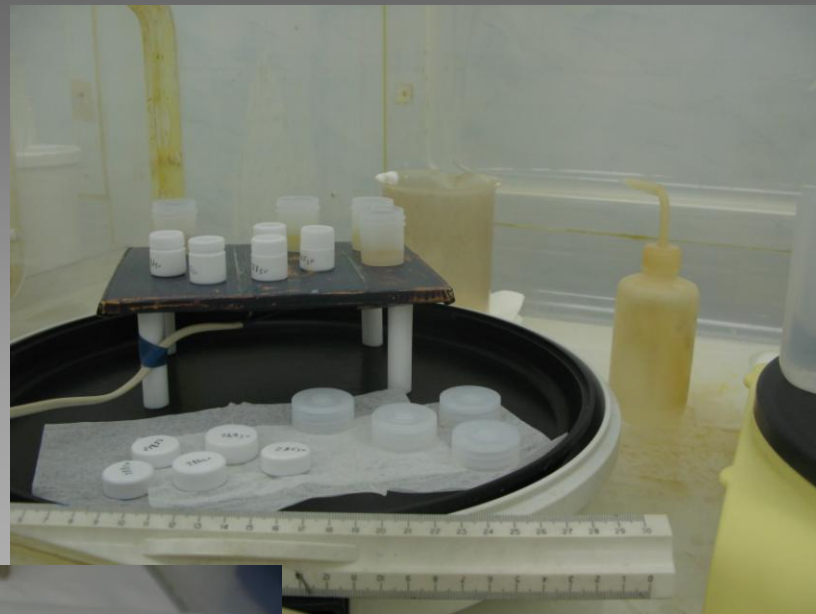
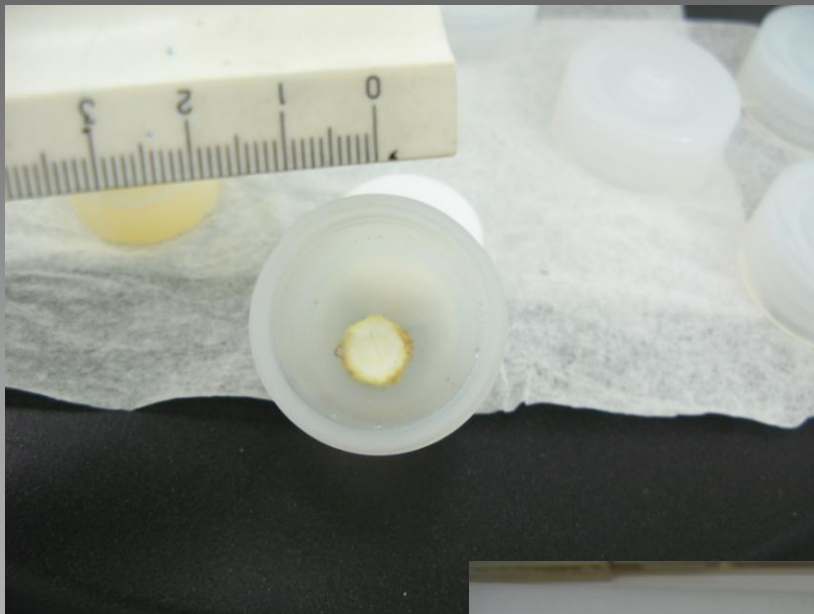
# Пробоподготовка



# Пробоподготовка

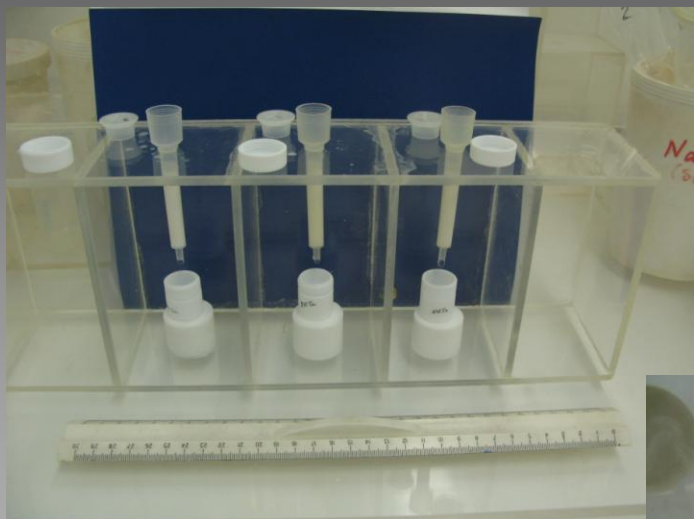


# Пробоподготовка





# Пробоподготовка

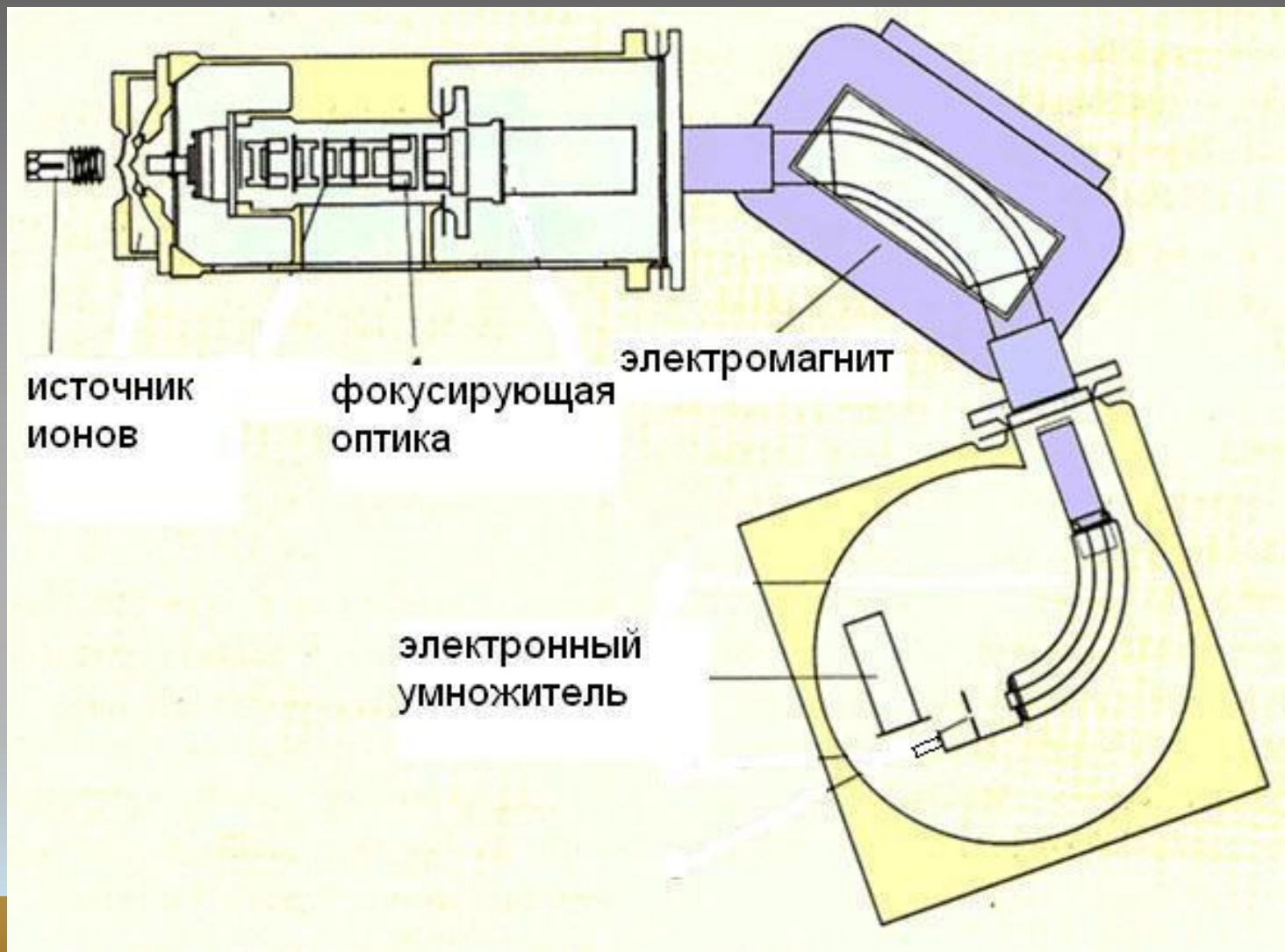


# Масс-спектрометрия

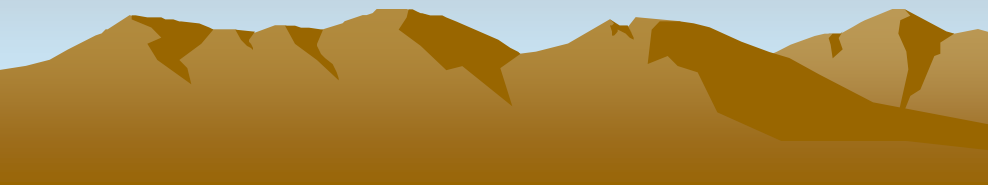
- Принцип работы, схема масс-спектрометра



# Схема масс-спектрометра



# Масс-спектрометрия



# Масс-спектрометрия



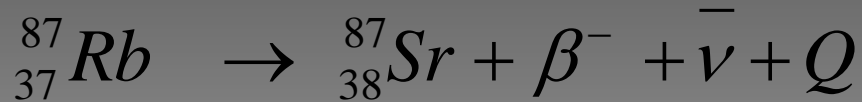
# Аналитические исследования

## Возможные ошибки

Уровень холостых измерений, метод расчета,  
первичные отношения...



# K-Ar



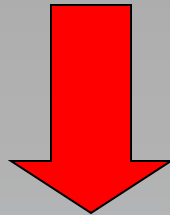
$$T_{1/2} = 4,88 \cdot 10^{10} \text{ лет}$$

- Уравнение распада (три)
- Для каких минералов
- Какие задачи решать (магматические (вулканические!), осадки)
- Источники ошибок



# K-Ar

Минерал	Температура закрытия, °C
Роговая обманка	525-450
Мусковит	375-325
Биотит	350-260
Полевой шпат	350-125



Оцениваем не время кристаллизации минерала, а время его охлаждения до температуры закрытия!





# K-Ar

## Нарушение изотопной системы вследствие:

1. Ar проникает в минерал по трещинам из атмосферы, грунтовых вод
2. Ar был потерян вследствие повторного нагревания минерала выше температуры закрытия (потерян весь или частично)



Содержания K и Ar определяются разными методами

$^{40}\text{K}$  – исходя из общего содержания K, полученного рентгенофлуоресцентными и др. методами

$^{40}\text{Ar}$ - на масс-спектрометре



# Ar-Ar

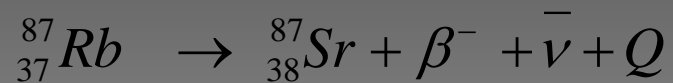
Предварительное выжигание аргона



# K-Ar

	Тип пород			
	Вулканические	Плутонические	Метаморфические	Осадочные
<b>Полевые шпаты</b>				
Санидин	++			
Ортоклаз	++			
Плагиоклаз	++			
<b>Фельдшпатоиды</b>				
Лейцит	+			
Нефелин	+	+		
<b>Слюды</b>				
Биотит	++	++	++	
Флогопит			++	
Мусковит		++	++	
Лепидолит		+		
Глауконий				+
<b>Амфиболы</b>	++	++	++	
<b>Пироксены</b>	+	+	+	
<b>Порода в целом</b>	++			

# Rb-Sr



$$T_{1/2} = 4,88 \cdot 10^{10} \text{ лет}$$

Пригодные минералы для датирования:  
Полевой шпат, мусковит, биотит, амфиболы  
+  
происхождение гранитов!

- Источники ошибок



# Rb-Sr

Пригодные минералы для датирования:  
Полевой шпат, мусковит, биотит, амфиболы  
+  
происхождение гранитов!

- Источники ошибок



# Rb-Sr

Источники некорректных данных



# Re-Os



$$T_{1/2} = 4,56 \cdot 10^{10} \text{ лет}$$



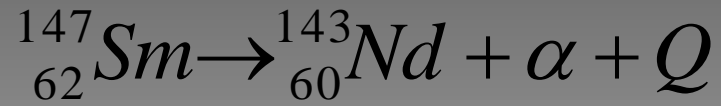
# Re-Os

Источники некорректных данных





# Sm-Nd



$$T_{1/2} = 1.06 \cdot 10^{10} \text{ лет}$$

+ эписилон Nd, модельные возраста..



# Sm-Nd

Минералы:

Гранаты

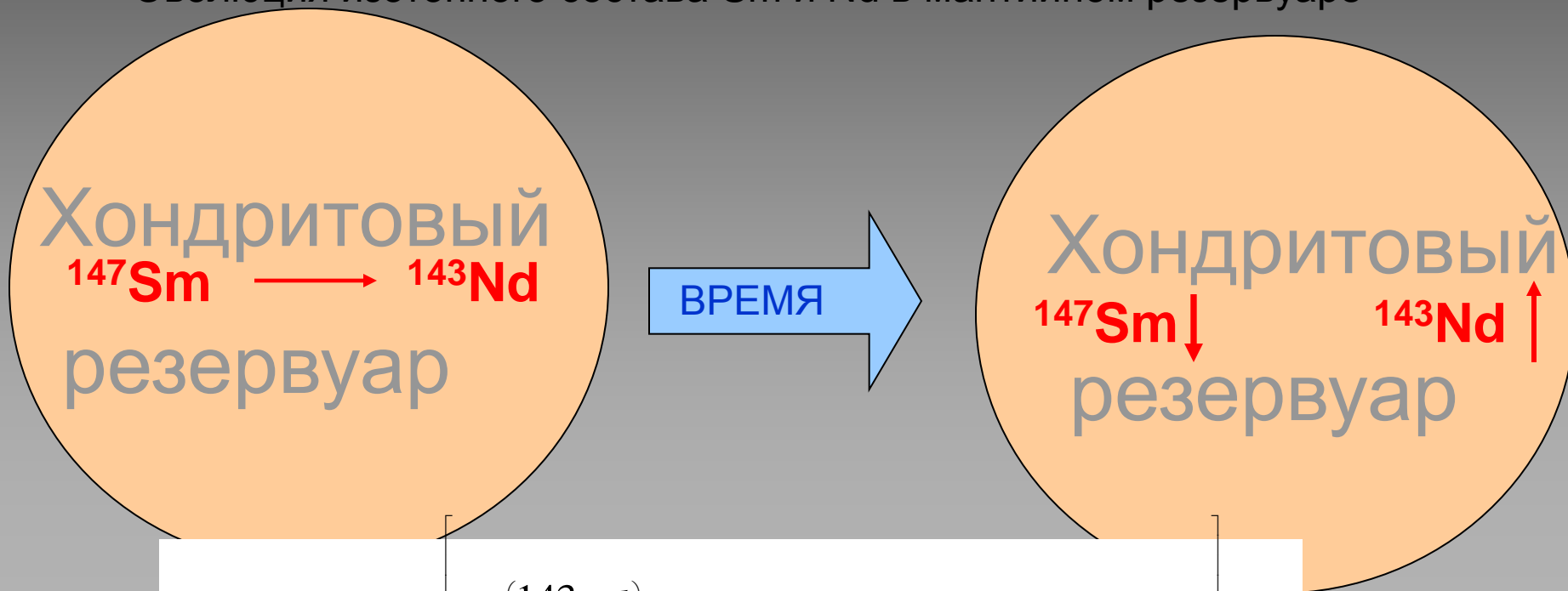
Породы:

На модельные возраста – магматические, осадочные, метаморфические



# Sm-Nd

Эволюция изотопного состава Sm и Nd в мантийном резервуаре



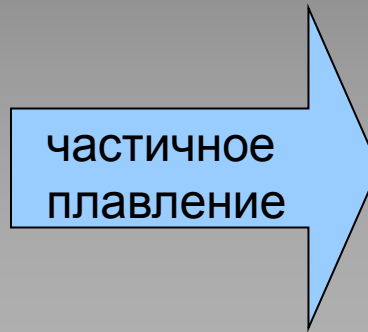
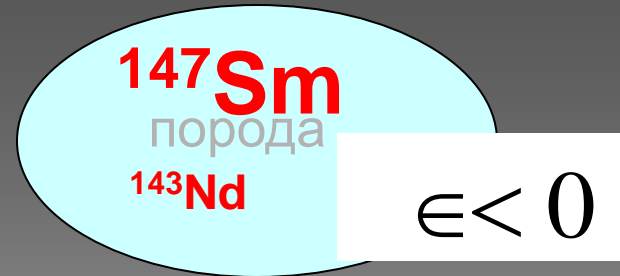
$$t_{CHUR,DM} = \frac{1}{\lambda} \left[ \frac{\left( \frac{^{143}\text{Nd}}{^{144}\text{Nd}} \right)_{\text{изм. в породе}} - \left( \frac{^{143}\text{Nd}}{^{144}\text{Nd}} \right)_{CHUR;DM}^0}{\left( \frac{^{147}\text{Sm}}{^{144}\text{Nd}} \right)_{\text{изм. в породе}} - \left( \frac{^{147}\text{Sm}}{^{144}\text{Nd}} \right)_{CHUR;DM}^0} - 1 \right]$$

CHUR – chondritic uniform reservoir; DM – depleted mantle

# Sm-Nd

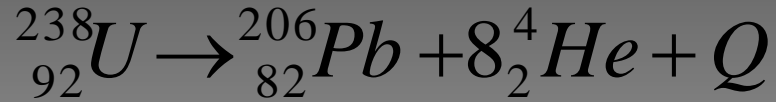
Nd – остается в расплаве

Sm – входит в состав минералов

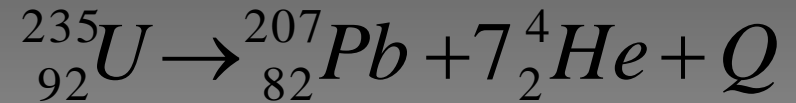


$$\epsilon_{CHUR}^t = \left[ \frac{\left( {}^{143}\text{Nd} / {}^{144}\text{Nd} \right)_i}{I_{CHUR}^t} - 1 \right] \cdot 10^4$$

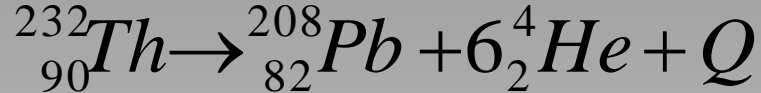
# U-Pb, Th-Pb



$$T_{1/2} = 1.06 \cdot 10^{10} \text{ лет}$$



$$T_{1/2} = 1.06 \cdot 10^{10} \text{ лет}$$



$$T_{1/2} = 1.06 \cdot 10^{10} \text{ лет}$$



# U-Pb метод датирования по цирконам

Минерал должен:

1. Содержать U, Th
2. Сохранять U, Th и дочерние изотопы
3. Широко встречаться в различных породах

Это циркон!

+ уранинит, монацит, титанит, апатит....



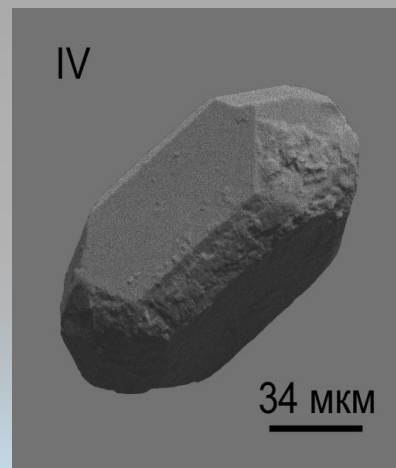
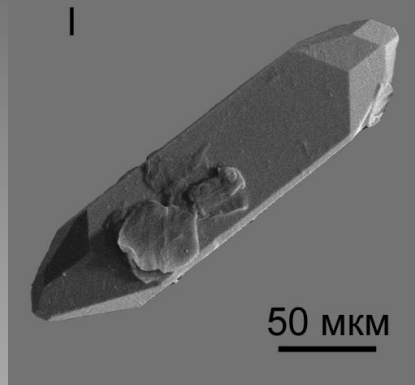
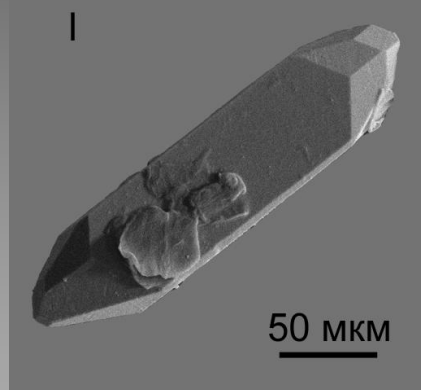
# U-Pb метод датирования по цирконам

## «Классика»

Измерение изотопного состава нескольких циркона (микронавески) с последующим построением конкордии (или дискордии)



# U-Pb метод датирования по цирконам



Микрофотографии кристаллов циркона, выполненные на сканирующем электронном микроскопе в режиме вторичных электронов



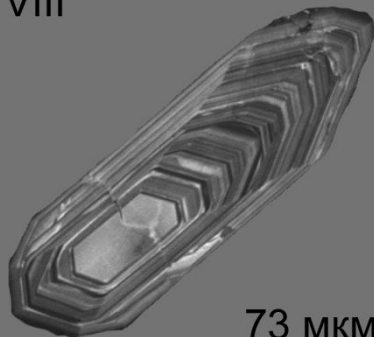
# U-Pb метод датирования по цирконам

XIII



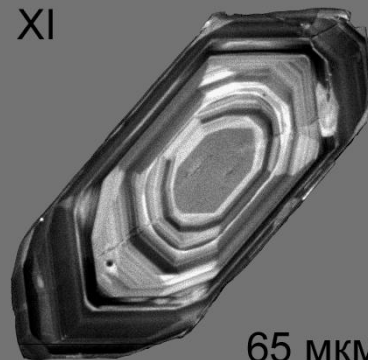
48 мкм

VIII



73 мкм

XI



65 мкм

XII



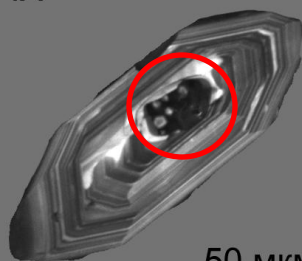
56 мкм

XII



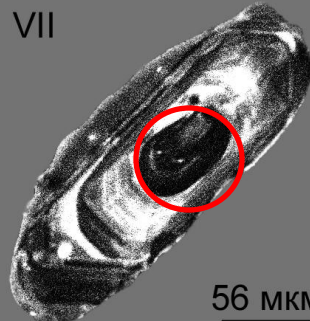
48 мкм

IX



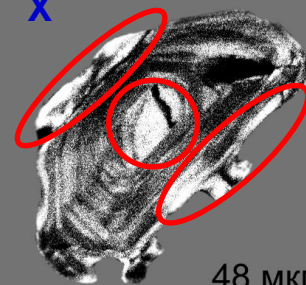
50 мкм

VII



56 мкм

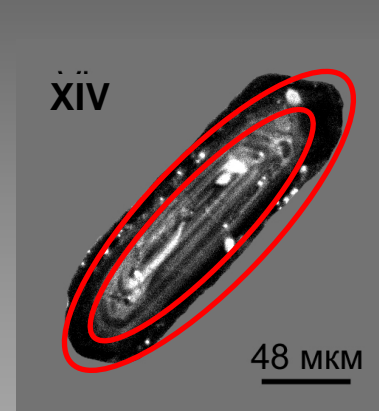
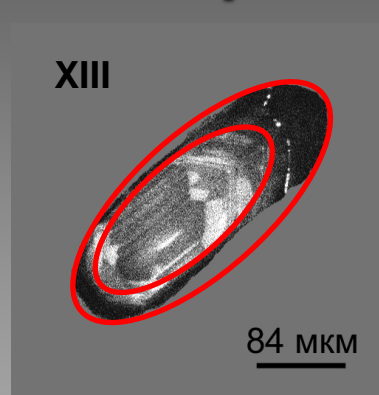
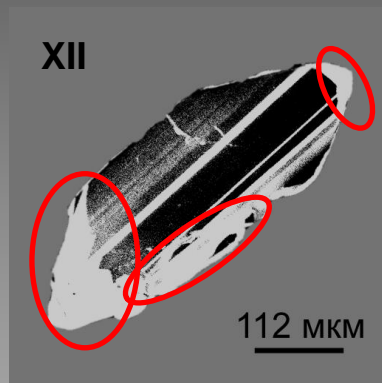
X



48 мкм

Микрофотографии кристаллов циркона, выполненные на сканирующем электронном микроскопе в режиме катодolumинесценции

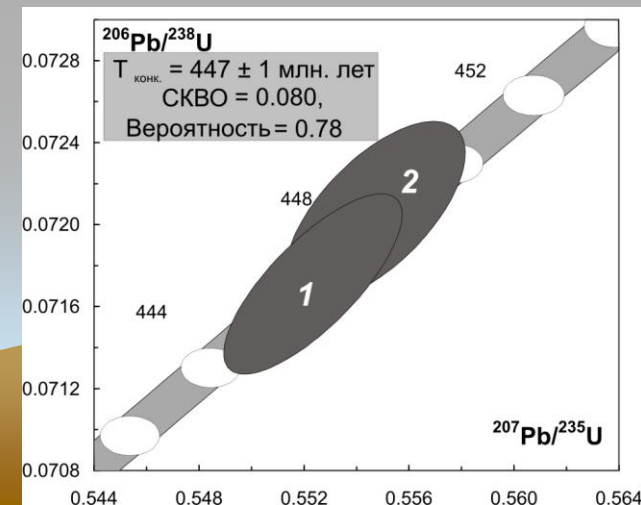
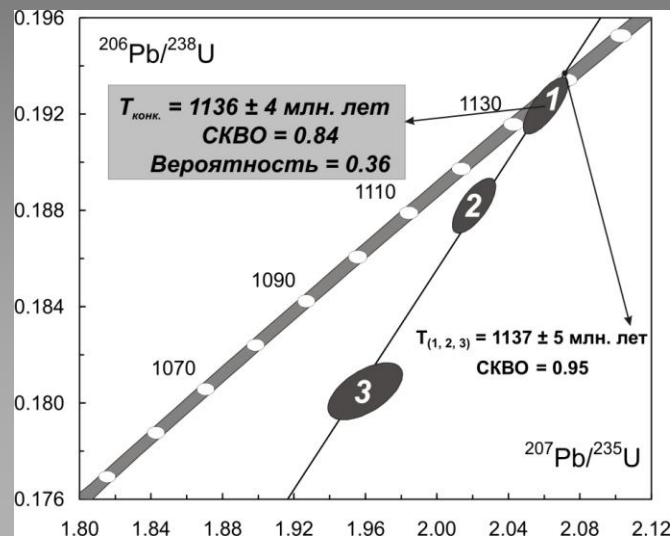
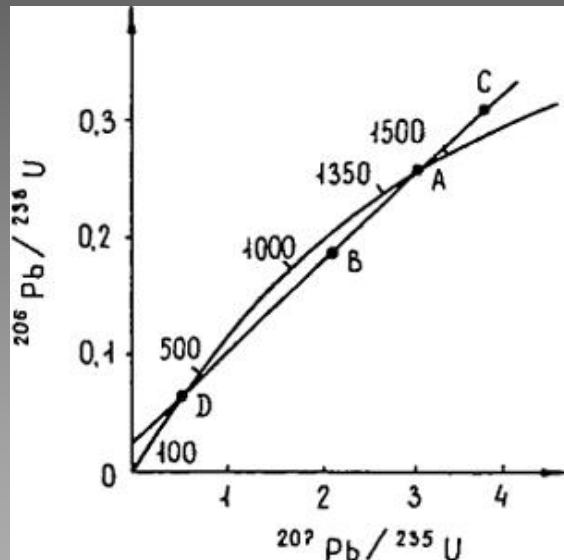
# U-Pb метод датирования по цирконам



XV

Микрофотографии кристаллов циркона, выполненные на сканирующем электронном микроскопе в режиме катодolumинесценции

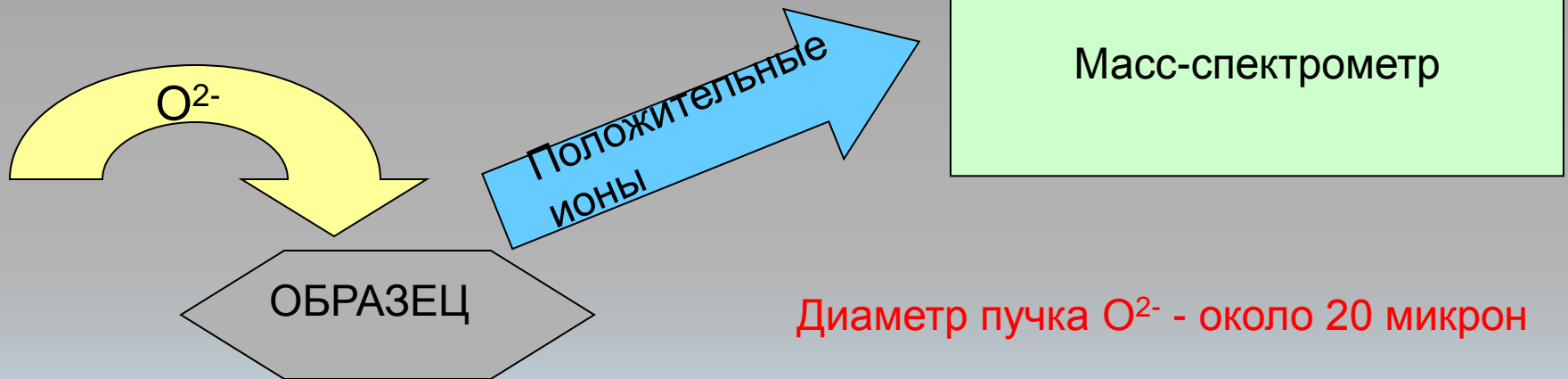
# U-Pb метод датирования по цирконам



# U-Pb метод датирования по цирконам

**SHRIMP** (*Sensitive High Resolution Ion MicroProbe*)

Получаем данные об изотопном составе в «точке».



# U-Pb метод датирования по цирконам

**SHRIMP** (*Sensitive High Resolution Ion MicroProbe*)



# U-Pb метод датирования по циркононам, SHRIMP



# Датирование минералов

## Возможные ошибки

Необходимы условия:

- ✓ Минерал оставался замкнутым относительно материнских и радиогенных изотопов
- ✓ Выбраны правильные значения для первичных отношений изотопов
- ✓ Аналитические результаты не содержат систематических погрешностей



# Датирование минералов

## Возможные ошибки

Метод, минерал	Температура закрытия
Sm-Nd, гранат	600
U-Pb, циркон	>700
U-Pb, титанит	500-600
Ar-Ar, роговая обманка	525-450
Ar-Ar, мусковит	375-325
Ar-Ar, биотит	350-260
Ar-Ar, полевой шпат	350-125



# Датирование пород

## Возможные ошибки



# Применение изотопных методов для оценки возраста пород

## Магматические

## Осадочные

## Метаморфические

✓K-Ar – минералы,  
если не было потерь Ar,  
породы

✓U-Pb – по цирконам,  
классика

✓K-Ar – минералы, в  
зависимости от степени  
метаморфизма  
(температуры  
закрытия!)

✓U-Pb – по цирконам,  
соответствующие зоны  
- SHRIMP

