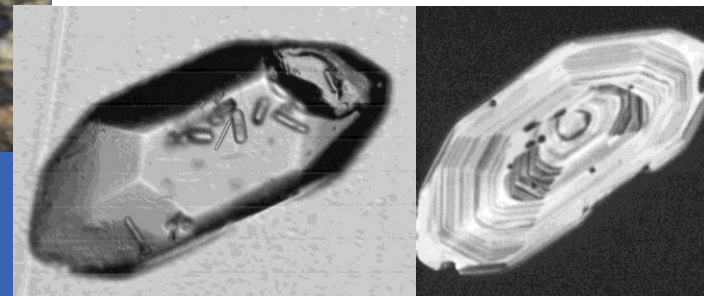
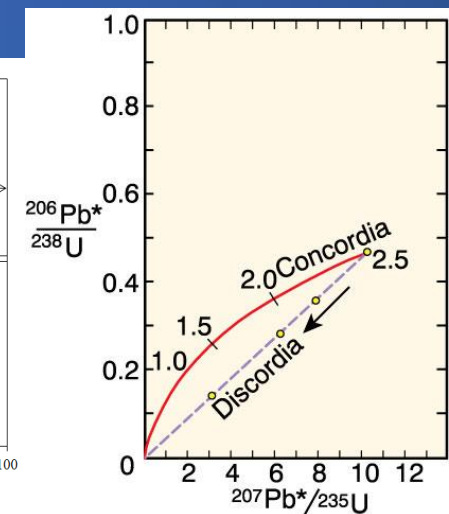
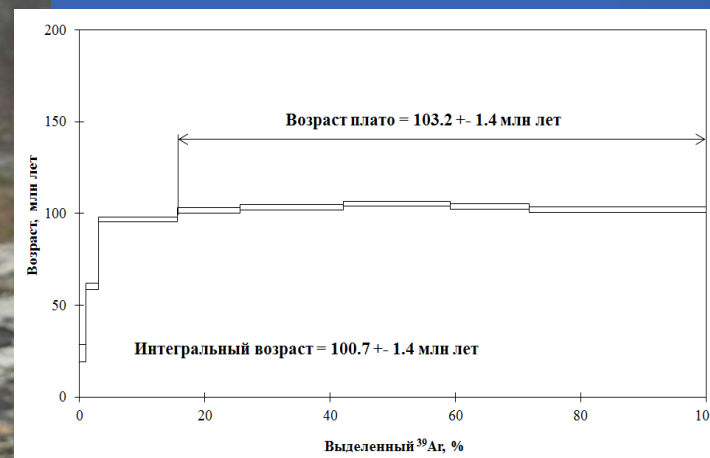
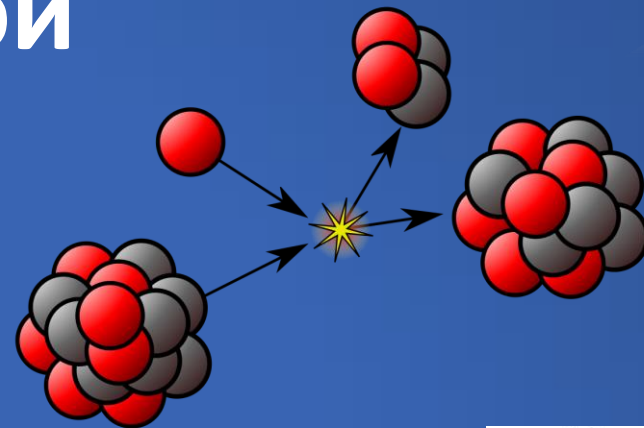


# Основы изотопной геохронологии



Лектор: П.Л. Тихомиров

Уровень сложности: для студентов-геологов 1-3 курса бакалавриата

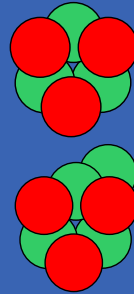
# План лекции

- общие сведения о радиоактивных изотопах
- обзор методов изотопного датирования:
  - K-Ar ( $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ )
  - Rb-Sr
  - Sm-Nd
  - U-Pb
- геохимия радиогенных изотопов в изучении магматических образований

# Изотопы

ПЕРИОДЫ	A	I	В	A	II
1	(H)				
2	<b>Li</b> Lithium Литий	6.941		<b>Be</b> Beryllium Бериллий	9.01
3	<b>Na</b> Sodium Натрий	22.99		<b>Mg</b> Magnesium Магний	24.3

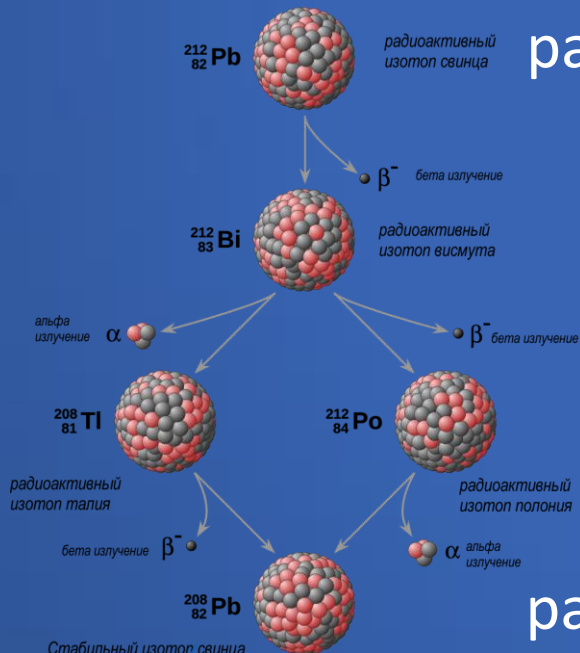
${}^6\text{Li}$  |  
 ${}^7\text{Li}$  | стабильные



${}^4\text{Li} \dots {}^{12}\text{Li}$  радиоактивные (7 изотопов)

## Радиоактивный распад

Распад радиоактивного изотопа свинца



радиоактивный (материнский) изотоп

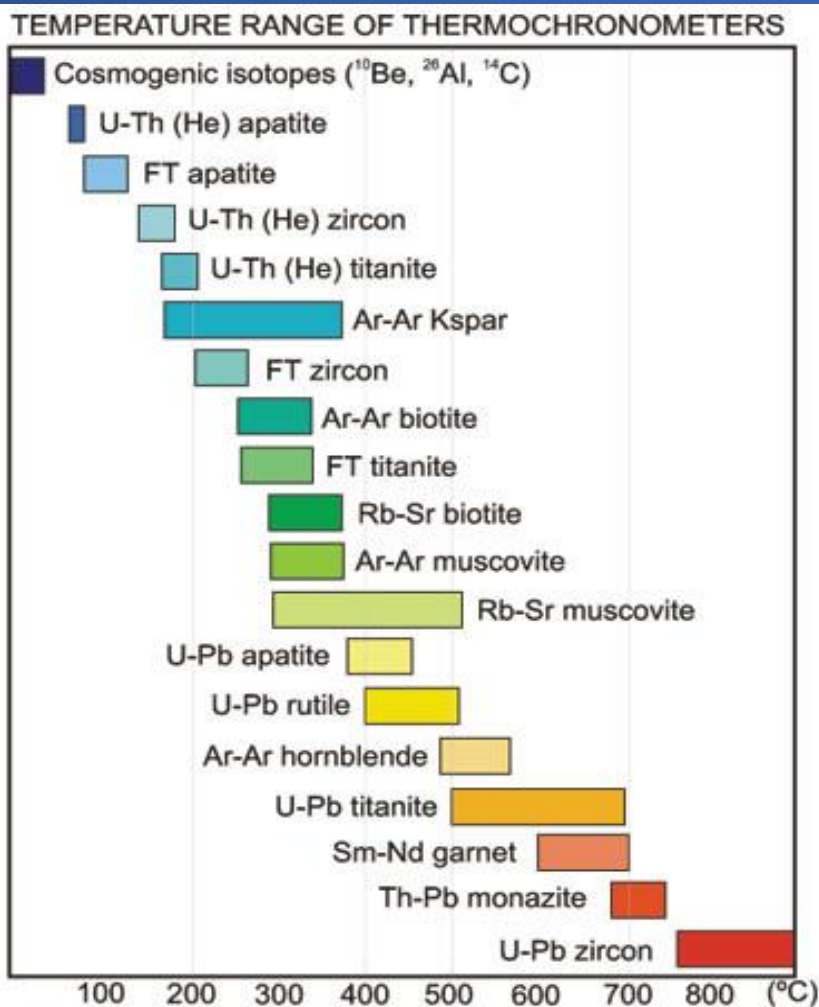
промежуточные продукты распада  
(радиоактивные + радиогенные)

радиогенный (дочерний) изотоп

главный показатель скорости распада  
- **период полураспада**  
( $T_{1/2}$ )

В применении к геохронологии высокотемпературных процессов:

«изотопные часы» показывают не время геологического события, а время, прошедшее с момента **закрытия изотопной системы**



Температура закрытия системы определяется способностью структуры минерала удерживать элементы – продукты радиоактивного распада

# Системы изотопов, наиболее часто используемые для оценки возраста магматических / метаморфических пород

период полураспада, млрд лет



# K – Ar метод



Преимущество – относительная простота и дешевизна

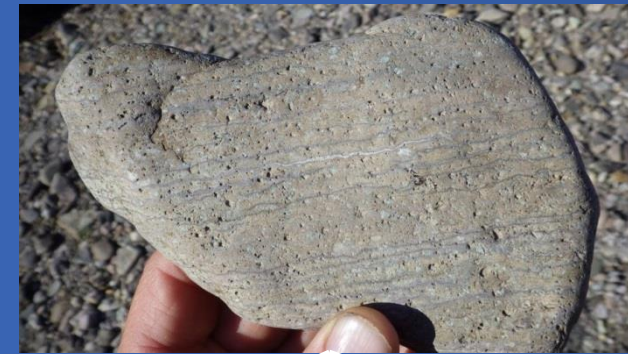
Недостатки:

- 1) Разные методы определения K и  $^{40}Ar$
- 2) Нарушения K-Ar изотопной системы
- 3) Невозможность локального анализа

Как следствие – низкая точность и надежность

Позволяет с приемлемым качеством оценить возраст кайнотипных базальтов и неметаморфизованных молодых магматических пород (особенно при анализе **мономинеральных фракций** - амфибол, пироксен, санидин, мусковит)

образец



навеска на  $^{40}Ar$



поправка на  
присутствие  
атмосферного  
 $^{40}Ar$



расчет возраста  
закрытия системы

навеска на K



допущение  
о постоянстве  
 $^{39}K/^{40}K$



# $^{40}\text{Ar} / ^{39}\text{Ar}$ модификация К – Ar метода (Ar-Ar метод)

Преимущества (в сравнении с K-Ar):

- 1) Одна навеска – ниже погрешность  
(для мезозоя – до сотен тыс. лет)
- 2) Возможность локального анализа
- 3) Возможность внесения поправки на потерю или захват  $^{40}\text{Ar}$



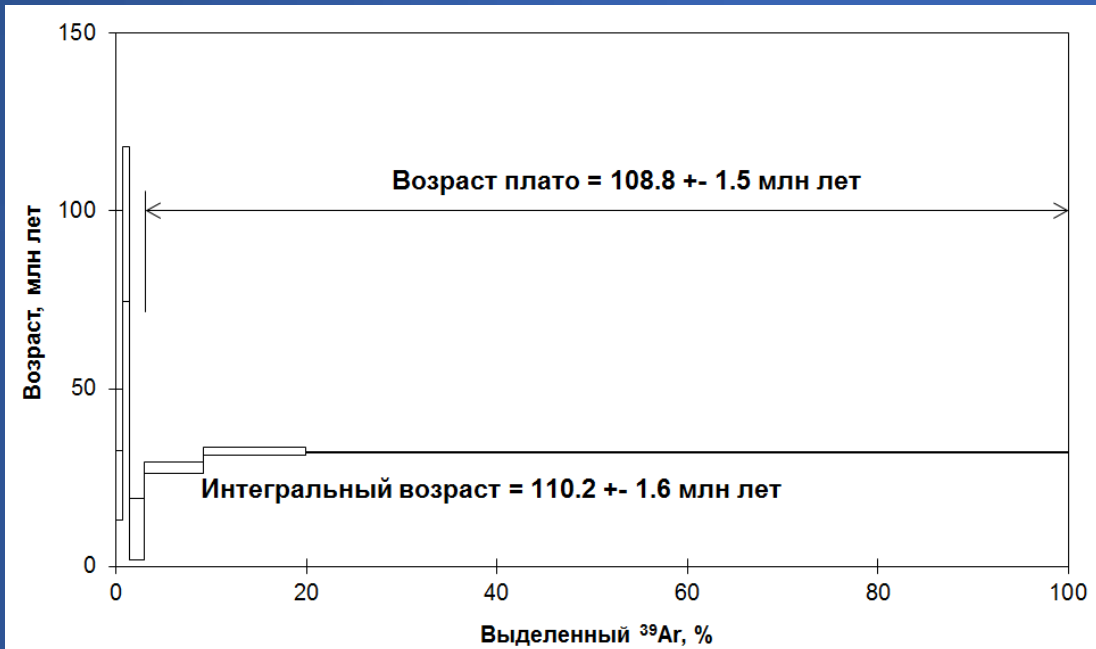
↓  
облучение  
быстрыми нейтронами  
( $^{39}\text{K} \rightarrow ^{39}\text{Ar}$ )

↓  
навеска на  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$

⋮  
↓  
расчет возраста  
закрытия системы

# $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ метод ступенчатый нагрев (step heating)

Возможность внесения поправки на  
потерю или захват  $^{40}\text{Ar}$





# Rb – Sr метод



Анализируются как валовый состав пород, так и состав отдельных K-содержащих минералов: биотита, мусковита, КПШ и т.д.

Точность определений улучшается с ростом содержаний K, поэтому данный метод лучше работает при оценке возраста кремнекислых и щелочных пород

**Изохронный** метод – необходимость анализа множества навесок  
*(для корректного определения - не менее 4)*

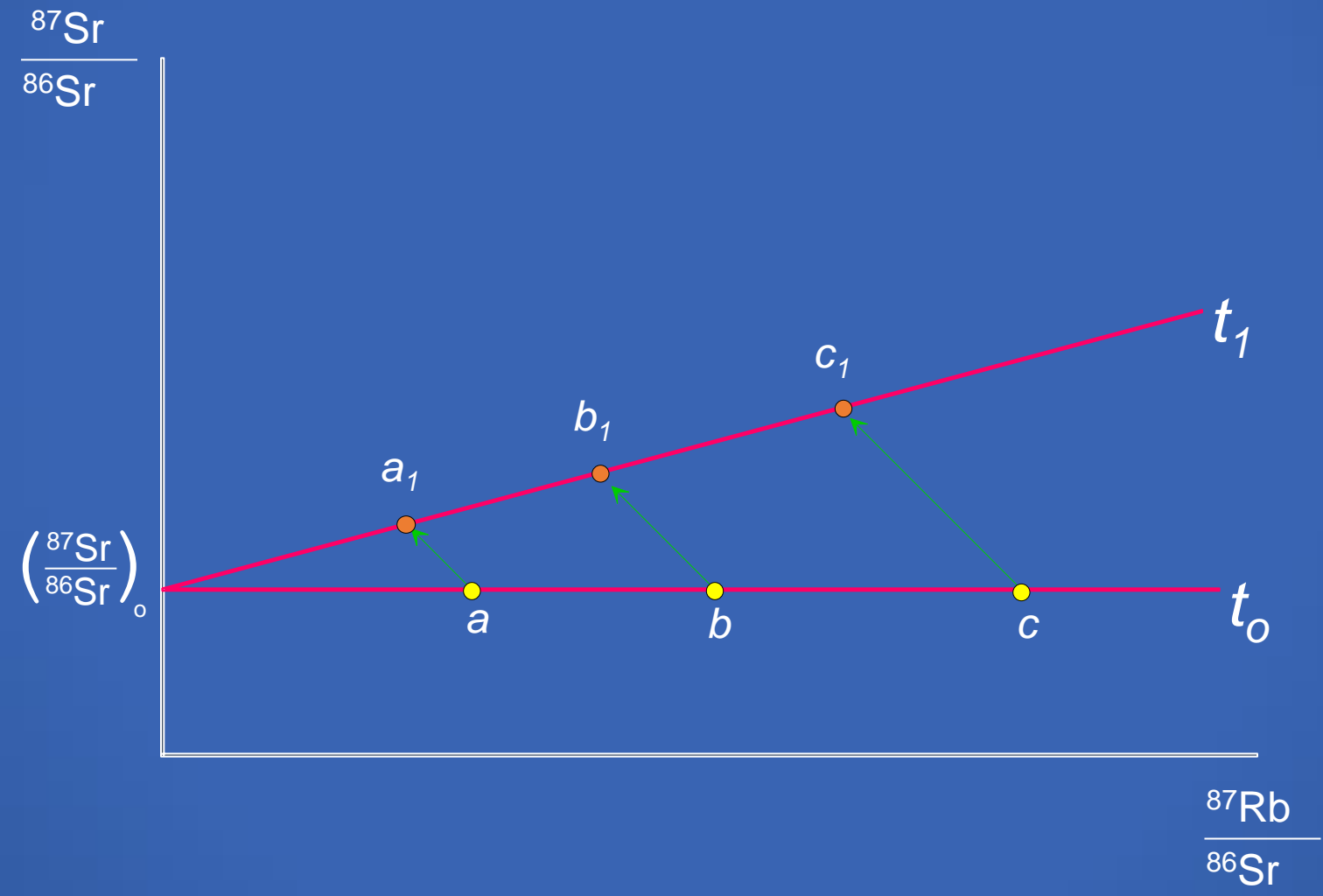
# Формирование изохроны: 1

радиоогенный изотоп →  $^{87}\text{Sr}$   
 стабильный изотоп →  $^{86}\text{Sr}$

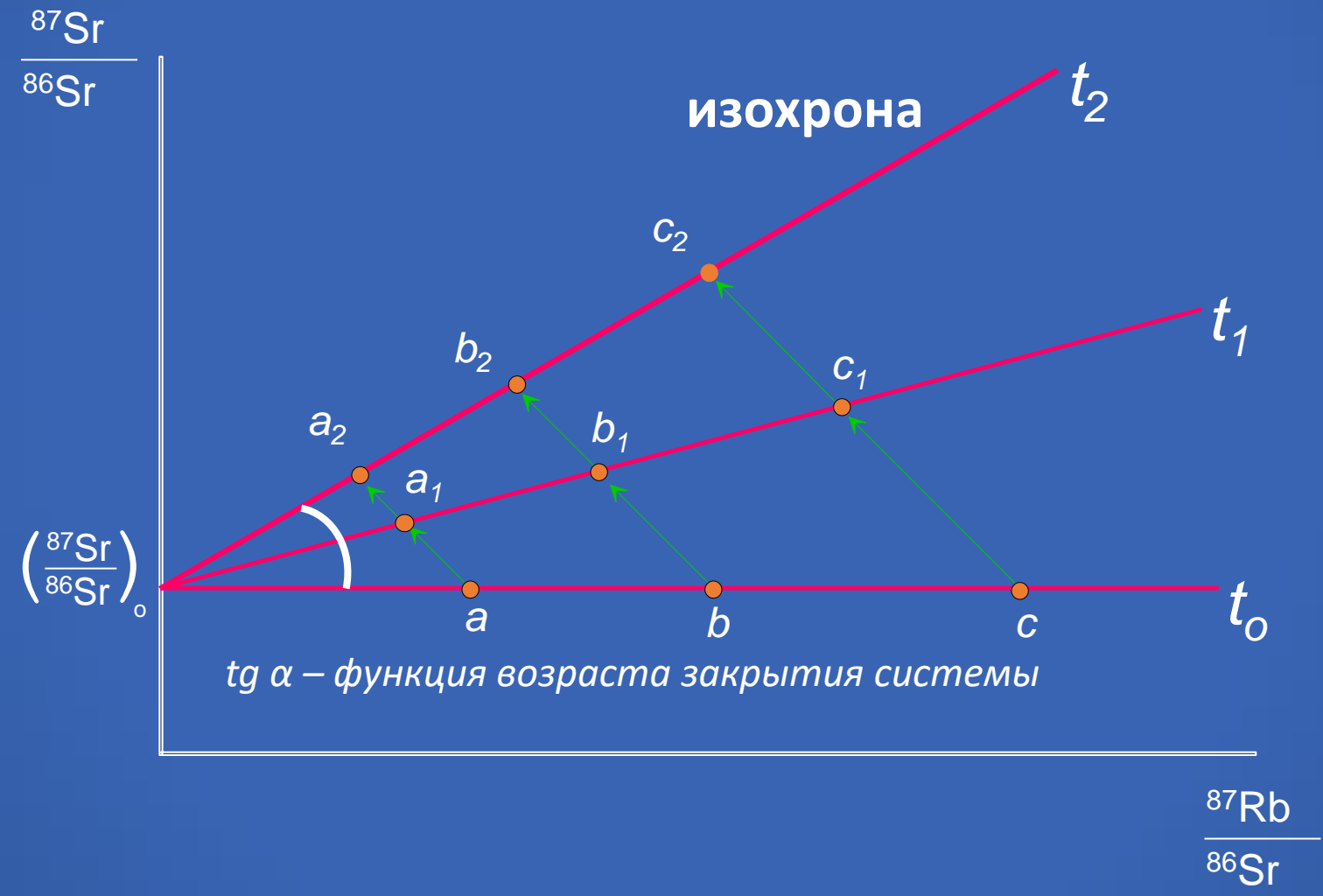


радиоактивный изотоп →  $^{87}\text{Rb}$   
 стабильный изотоп →  $^{86}\text{Sr}$

# Формирование изохроны: 2

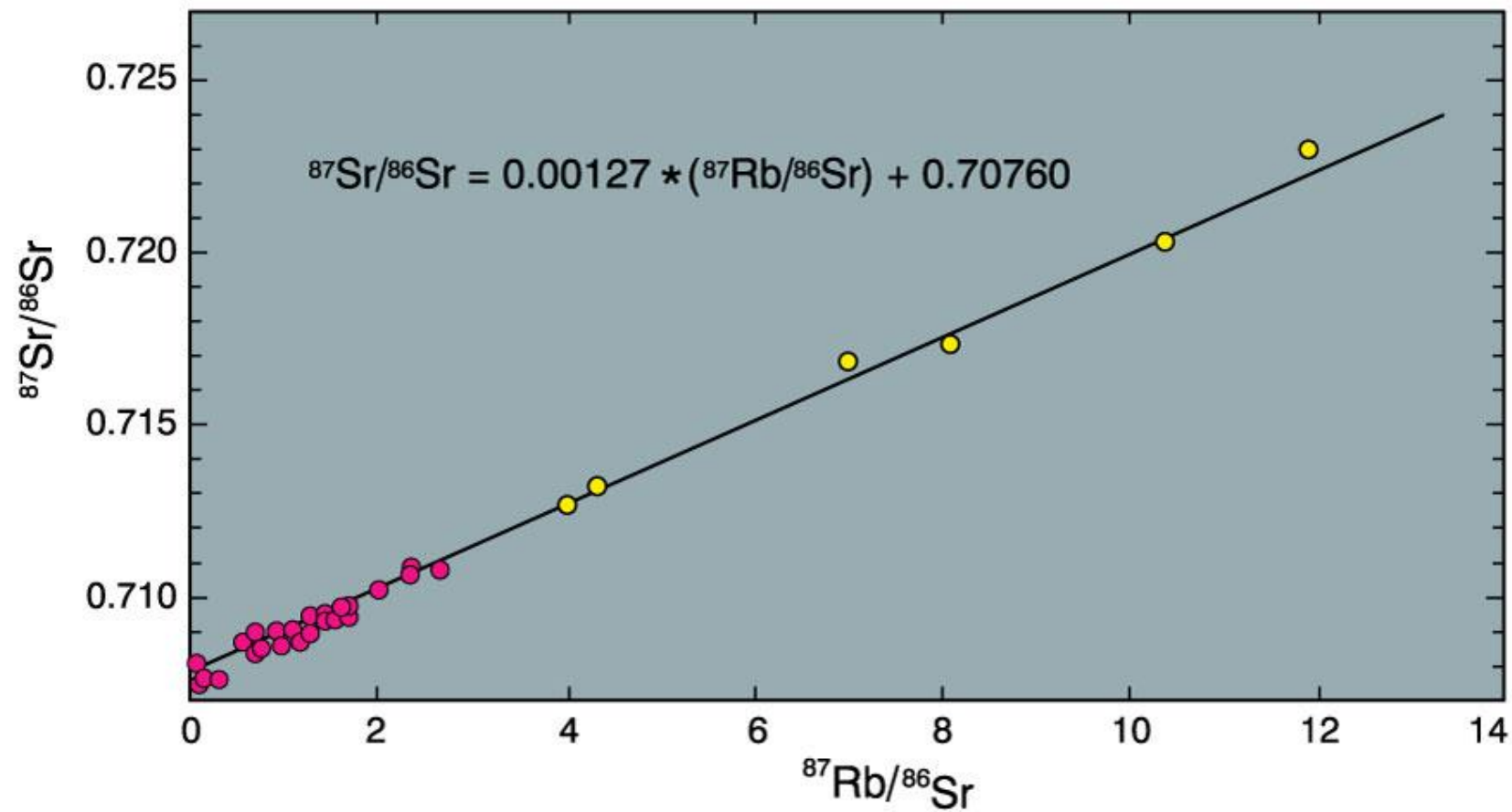


# Формирование изохроны: 3



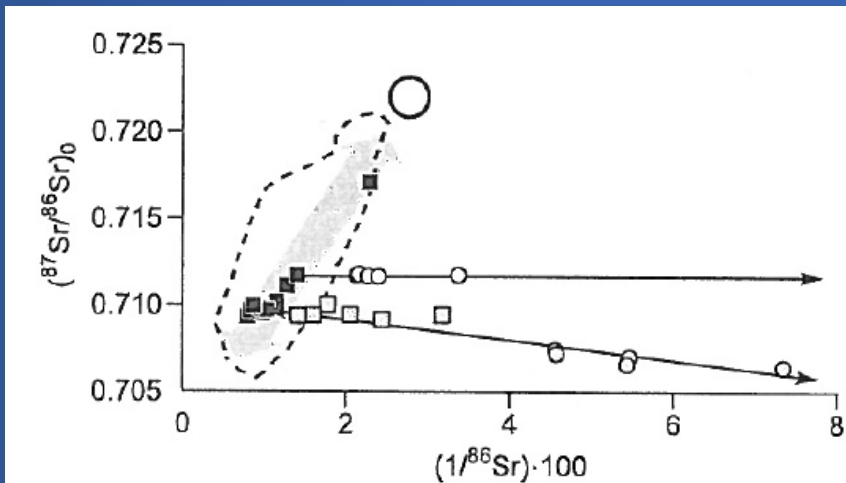
# Пример Rb-Sr изохроны, построенной по данным анализа валовых проб

Rb-Sr Isochron, Eagle Peak Pluton, Sierra Nevada Batholith



# Rb – Sr метод

**Ложные изохроны** – результат включения в диаграмму данных по производным источников с различным  $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_0$



наличие устойчивой корреляции  $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_0$  и  $1/^{86}\text{Sr}$ , как и непостоянство отношения  $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_0$  в целом – признак изотопной гетерогенности источника

В общем случае минеральные изохроны предпочтительнее «породных»

# Sm – Nd метод



Изохронный метод, как и Rb-Sr

Длительный период полураспада – с приемлемой точностью датируются комплексы **не моложе палеозойских**

Преимущество перед Rb-Sr методом при датировании пород **основного и ультраосновного состава** вследствие значимых концентраций РЗЭ

Относительная стабильность минералов РЗЭ при низкотемпературных процессах (в сравнении с минералами Rb и Sr) – сравнительная устойчивость к гидротермальным преобразованиям

## Прочие изохронные методы:

$^{176}\text{Lu} - ^{176}\text{Hf}$  (возможность изучения изотопного состава Hf в цирконах)

$^{187}\text{Re} - ^{187}\text{Os}$  (возможность оценки возраста молибденита в составе рудных ассоциаций)



# U – Th – Pb метод



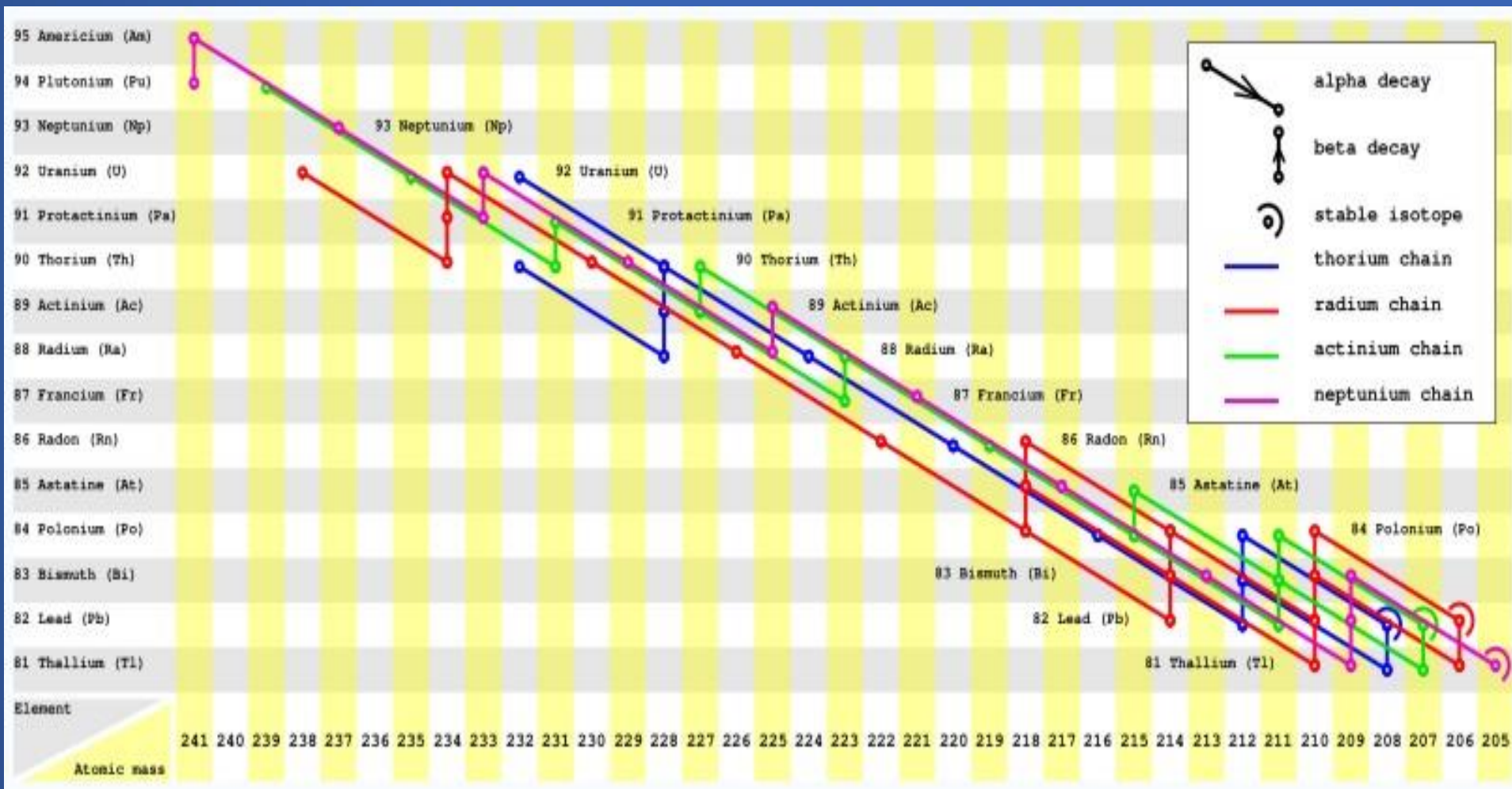
Как правило, анализируются минералы – концентраторы U и Th  
 (циркон, бадделеит, монацит, сфен, апатит, рутил,....)

Преимущества метода:

1. Три независимые пары изотопов, возможность взаимного контроля;
2. Высокая температура закрытия изотопной системы (циркон – около 800°C);
3. Возможность локального анализа и сравнительно низкая погрешность.

# U – Th – Pb метод

Промежуточные продукты распада U и Th – короткоживущие изотопы  
( $T_{1/2}$  – до 246 тыс. лет)



# Цирконовая геохронология

1. Широкое распространение циркона;
2. Возможность взаимного контроля систем  $^{235}\text{U} - ^{207}\text{Pb}$  и  $^{238}\text{U} - ^{206}\text{Pb}$ ;
3. Высокая температура закрытия (около  $800^\circ\text{C}$ ) и устойчивость к наложенным процессам;
4. Возможность локального анализа и сравнительно низкая погрешность датирования.

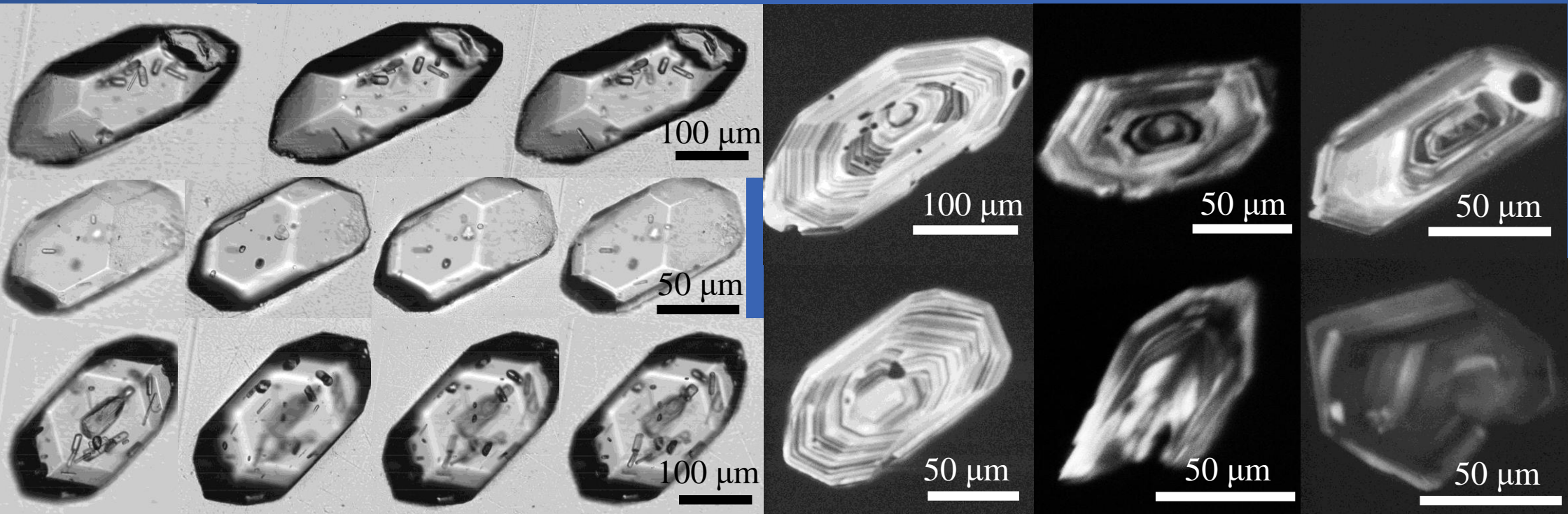
## Использование:

- локальный анализ (SIMS, SHRIMP) – датирование древних ядер и зон роста отдельных кристаллов
- в модификации CA-TIMS (методика химической абразии и изотопной десорбционной термально-ионизационной масс-спектрометрии) – **точность до десятков тыс. лет** для палеозойских и мезозойских дат
- датирование обломочных (детритовых) цирконов из осадочных толщ

# Цирконовая геохронология

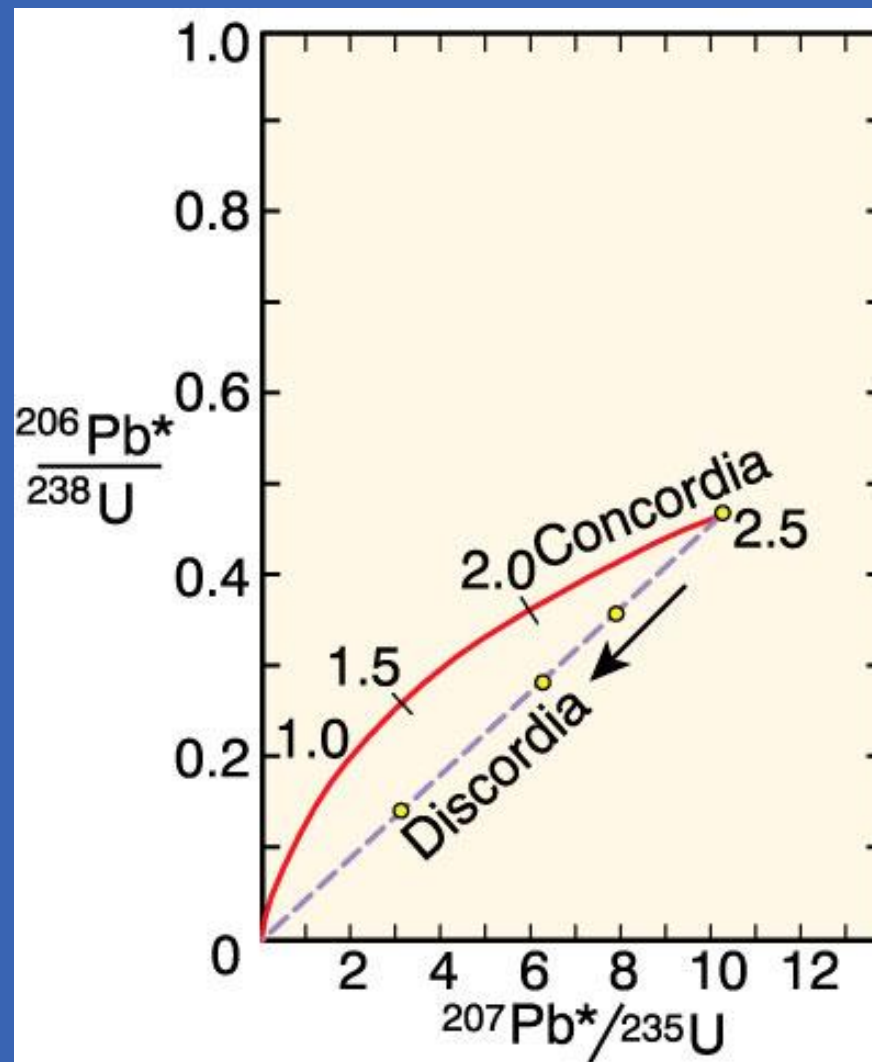
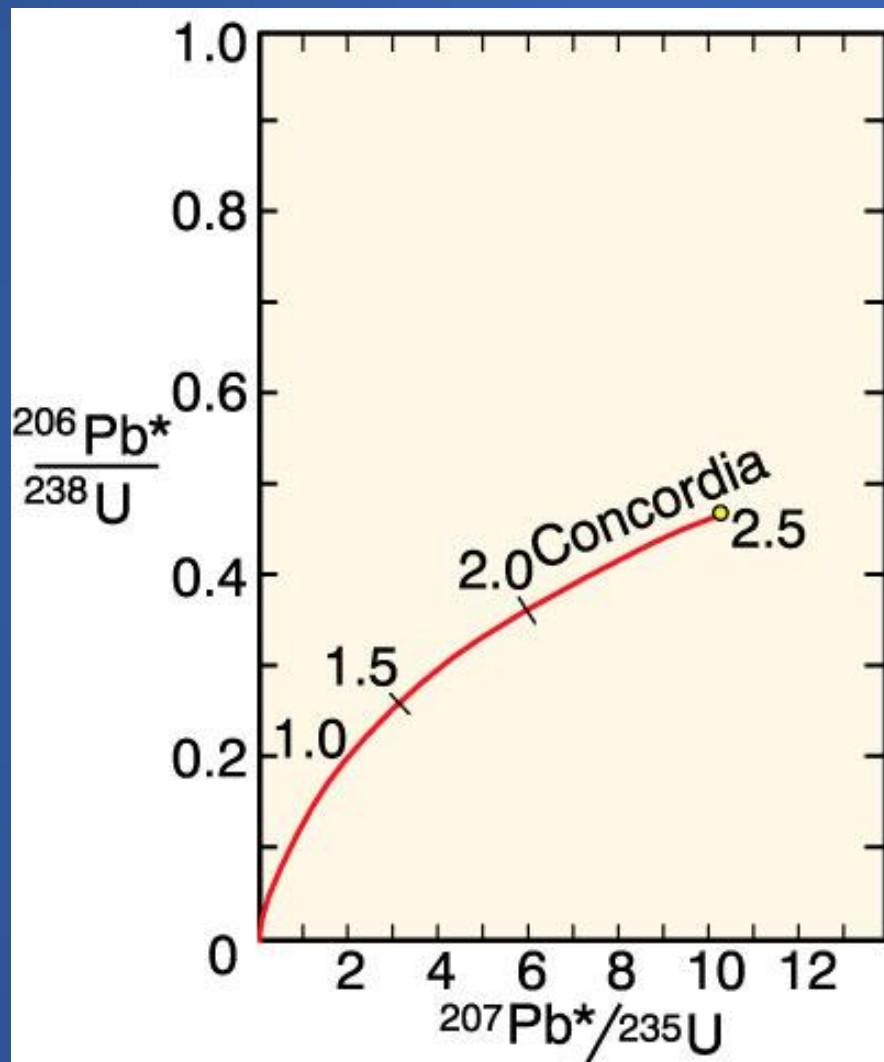
Подготовка проб:

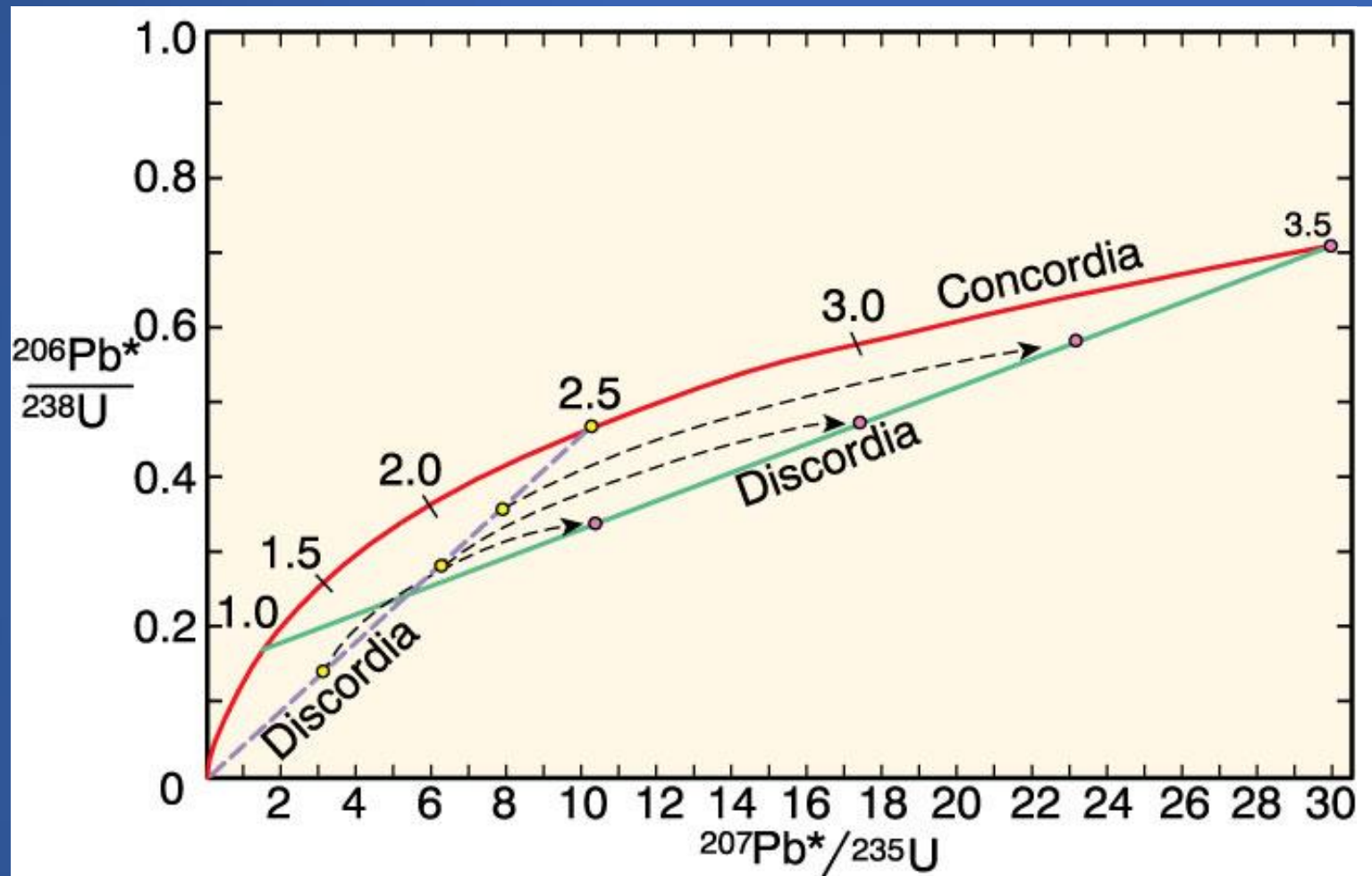
1. Извлечение цирконов
2. (для локального анализа) – подготовка шашек
3. Изучение цирконов в проходящем свете и в катодолюминесцентном изображении (CL) – выбор зерен и их участков для анализа



# Цирконовая геохронология

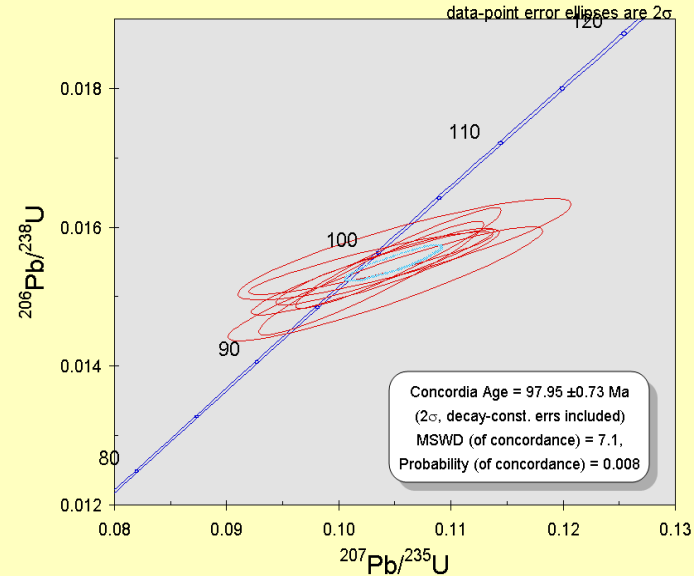
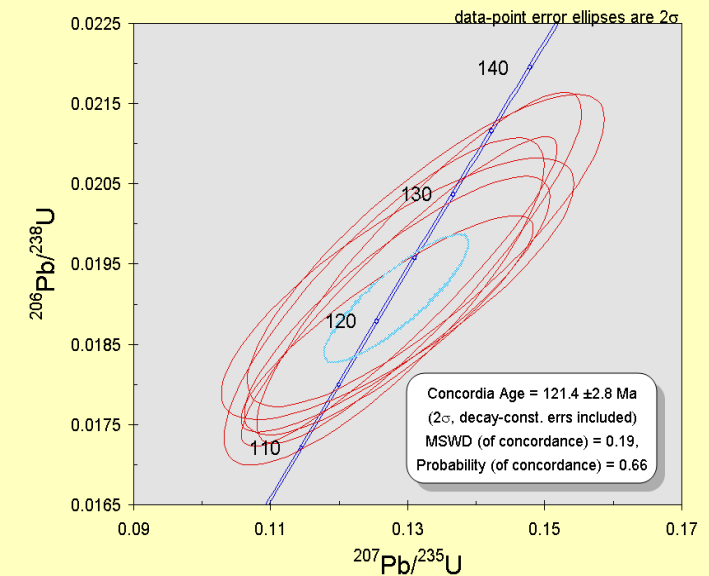
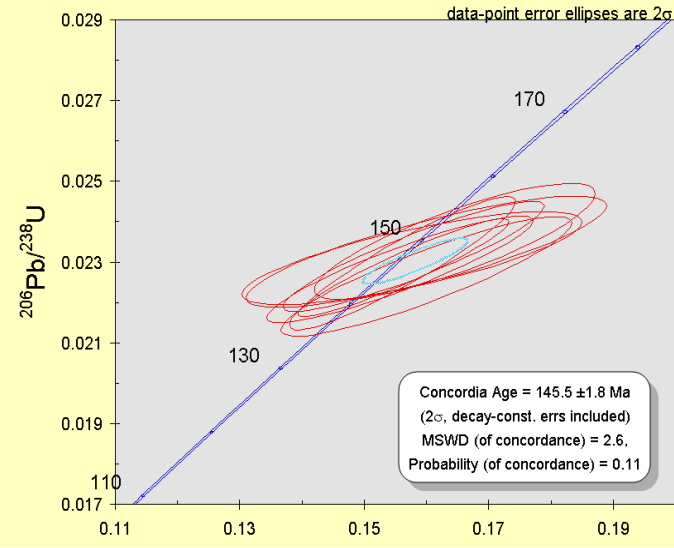
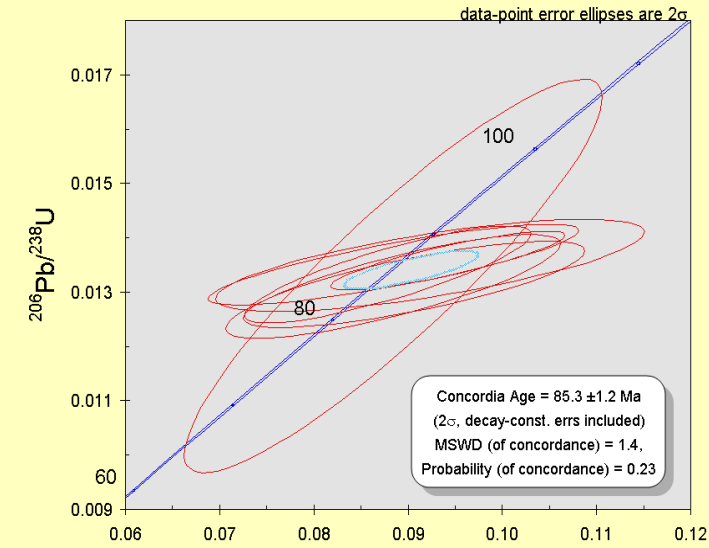
Интерпретация результатов анализа - *диаграммы с конкордией / дискордией*





Winter, 2000

верхнее пересечение – **возраст магматического события**  
нижнее пересечение – **возраст преобразования**  
**(метаморфического события)**



# Геохимия радиогенных изотопов

(в приложении к изучению магматических комплексов)



информация о составе протолита

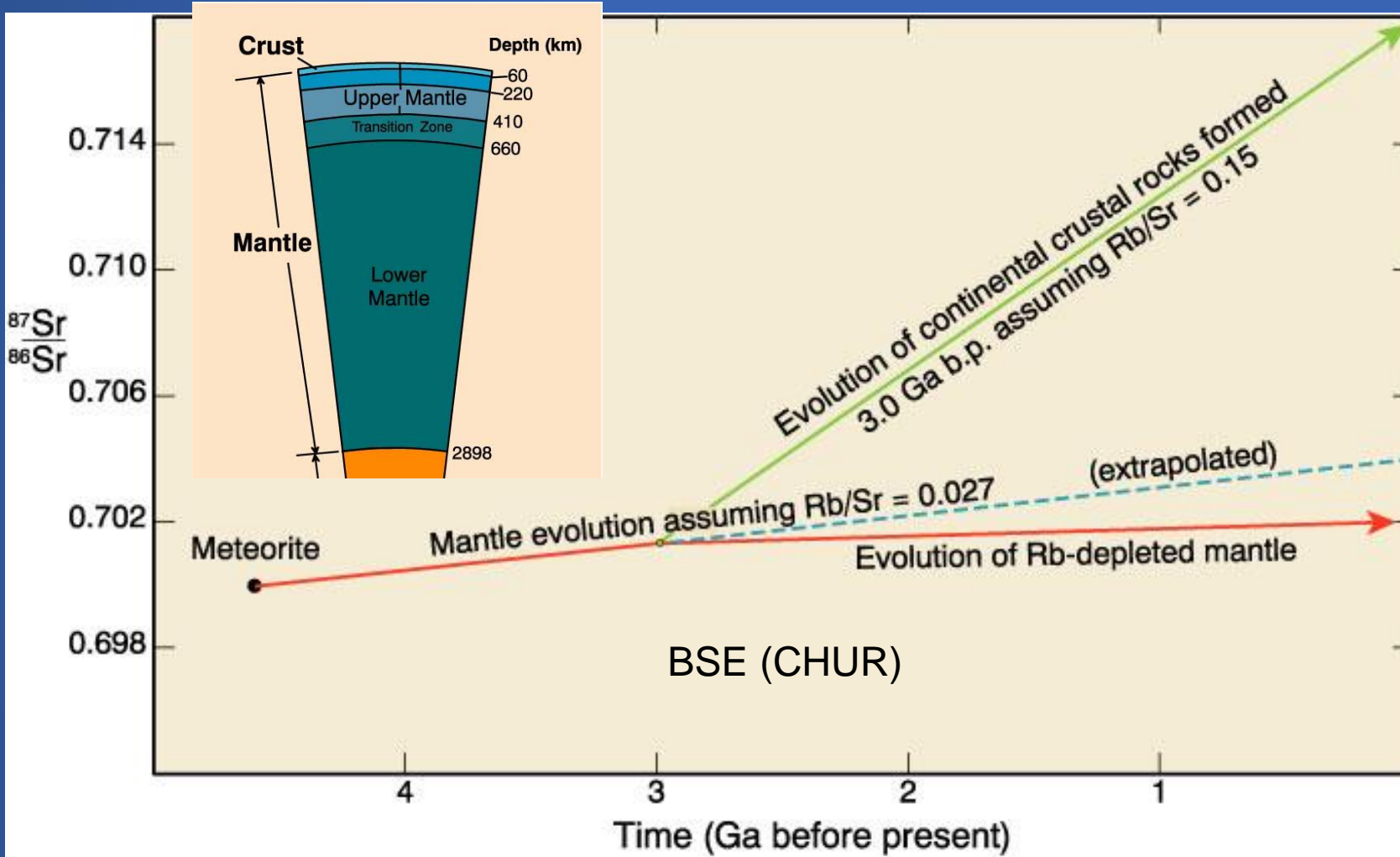
*Преимущество перед методами геохимии элементов – идентичность химических свойств изотопов и отсутствие их фракционирования в процессе эволюции магм*



# Эволюция изотопного состава

## главных геохимических резервуаров Земли

Rb-Sr



$(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_0$   
современной Земли:

истощенная мантия  
0.7027-0.7029

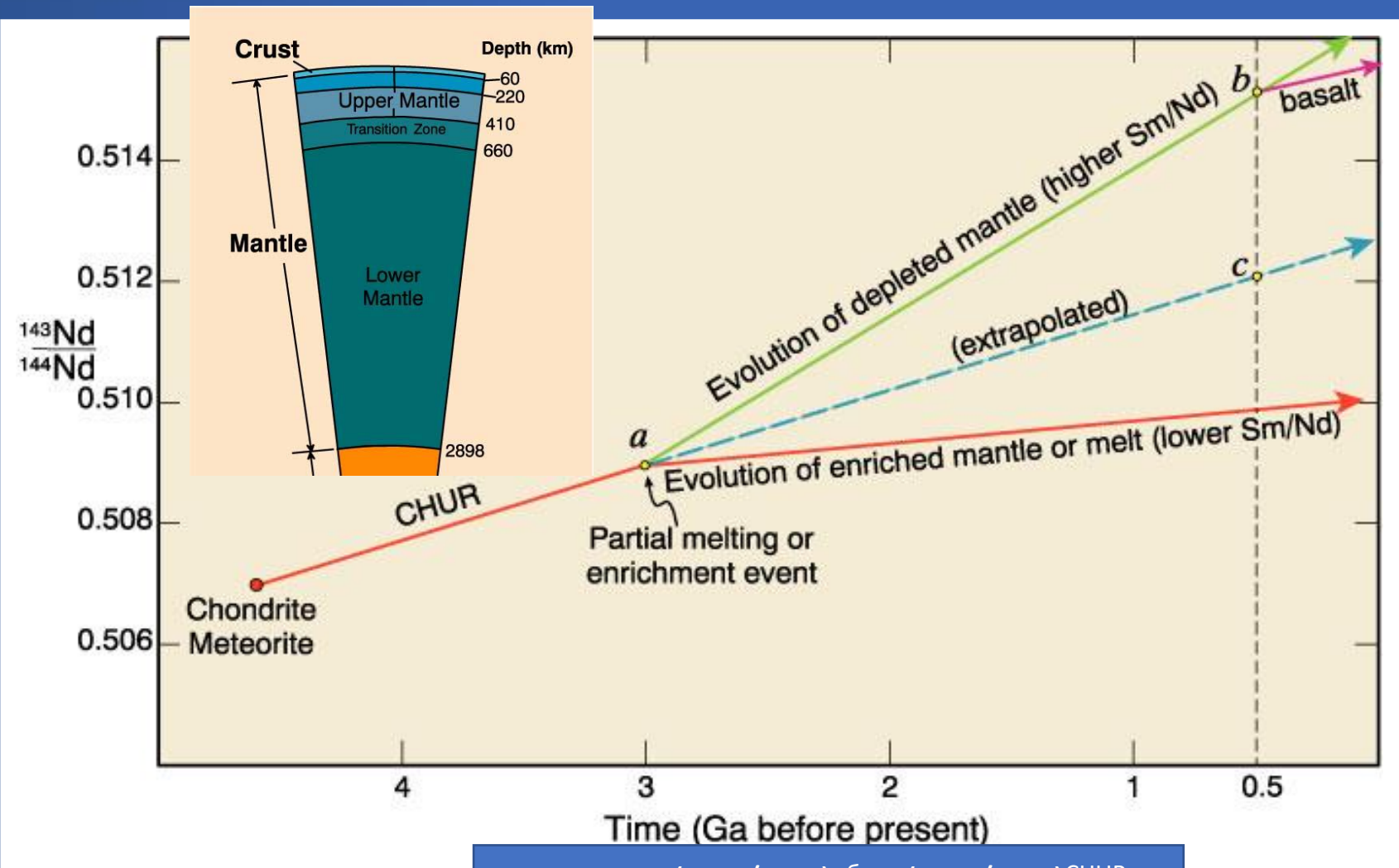
обогащенная мантия  
~0.7035-0.7070

древняя конт. кора  
>0.7080

# Эволюция изотопного состава

## Sm-Nd

## главных геохимических резервуаров Земли



$^{143}\text{Nd} / ^{144}\text{Nd}$   
современной Земли:

истощенная мантия  
0.51325-0.51360 ( $\epsilon\text{Nd} > 0$ )

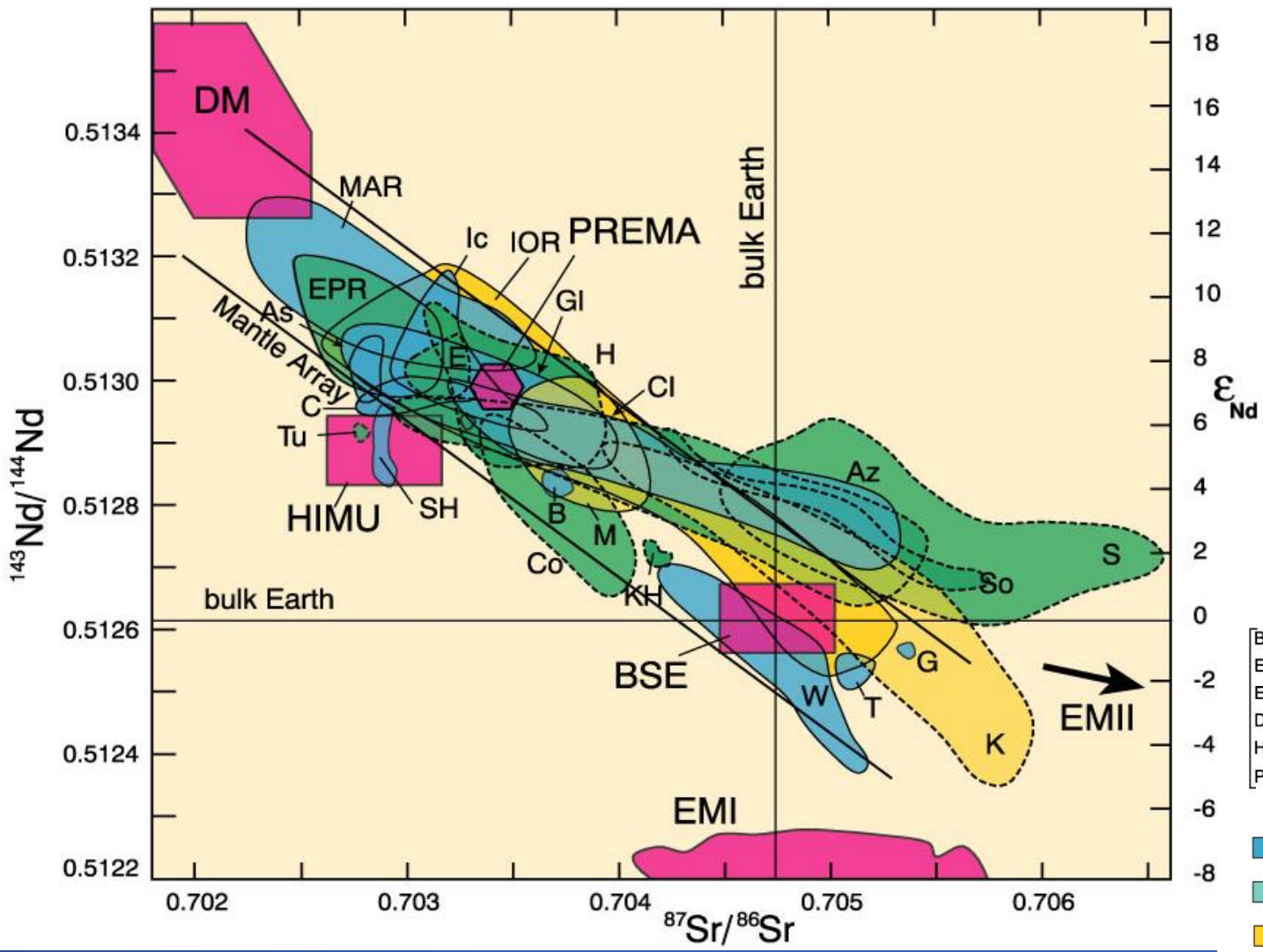
обогащенная мантия  
 $\sim 0.51200-0.51310$  ( $\epsilon\text{Nd} < 0$ )

древняя конт. кора  
 $\sim 0.51000-0.51250$  ( $\epsilon\text{Nd} < 0$ )

$$\epsilon\text{Nd} = \frac{(143/144)^{\text{обр}} - (143/144)^{\text{CHUR}}}{(143/144)^{\text{CHUR}}}$$

# Sr-Nd изотопная систематика

*неоднородность изотопного (и, следовательно, химического) состава мантии*



**Key**

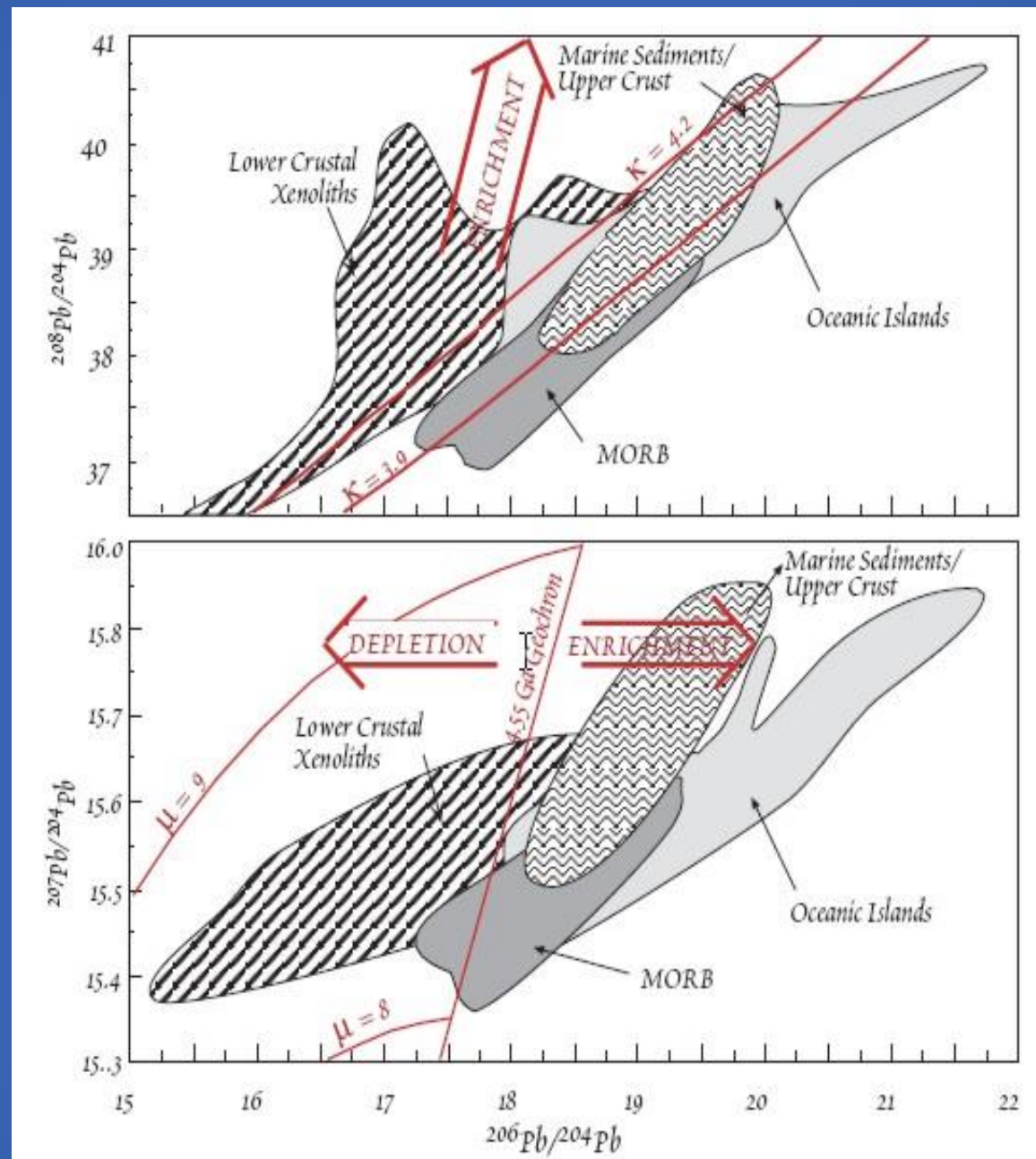
<b>Mantle Reservoirs:</b>	As	Ascension
■ (pink)	Az	Azores
■ (blue)	B	Bouvet
BSE Bulk Silicate Earth	C	Canary Is.
EMI Enriched Mantle I	CI	Central Indian*
EMII Enriched Mantle II	E	Easter Is.
DM Depleted Mantle	EPR	East Pacific Rise
HIMU High Mantle	G	Gough
PREMA Prevalent Mantle	GI	Galapagos
■ (green)	Gu	Guadaloupe
■ (yellow)	H	Hawaii
■ (Atlantic Islands)	Ic	Iceland
■ (Pacific Islands)	IOR	Indian Ocean Ridge
■ (Indian Ocean Islands)	K	Kerguelen
-----	KH	Koolau, Hawaii
	M	Marqueseas
	MAR	Mid-Atlantic Ridge
	S	Samoa
	SH	St. Helena
	So	Society Is.
	T	Tristan da Cunha
	Tu	Tubaii
	W	Walvis

\* includes: Amsterdam, Crozet, Marion-Prince Edward, Mauritius, Reunion, and Rodriguez.

# Изотопы Pb

повышение  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ ,  
 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ ,  $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  –  
- признак  
обогащения источника

(следствие повышенных  
 $\text{U}/\text{Pb}$ ,  $\text{Th}/\text{Pb}$  )



White, 2001

## Рекомендуемая литература:

1. Г. Фор . Основы изотопной геологии. М.: Мир, 1986 (*+ более поздние издания*).
2. W.M. White. Isotope Geochemistry. Wiley-Blackwell, 2015.

Спасибо за внимание



[www.igeotech.ru](http://www.igeotech.ru)

Контакты

+7 (495) 246-85-54

+7 (499) 220-85-54

[info@igeotech.ru](mailto:info@igeotech.ru)

119234, Россия, г.Москва, ул.

Ленинские Горы, д. 1, стр. 77.

Научный парк МГУ