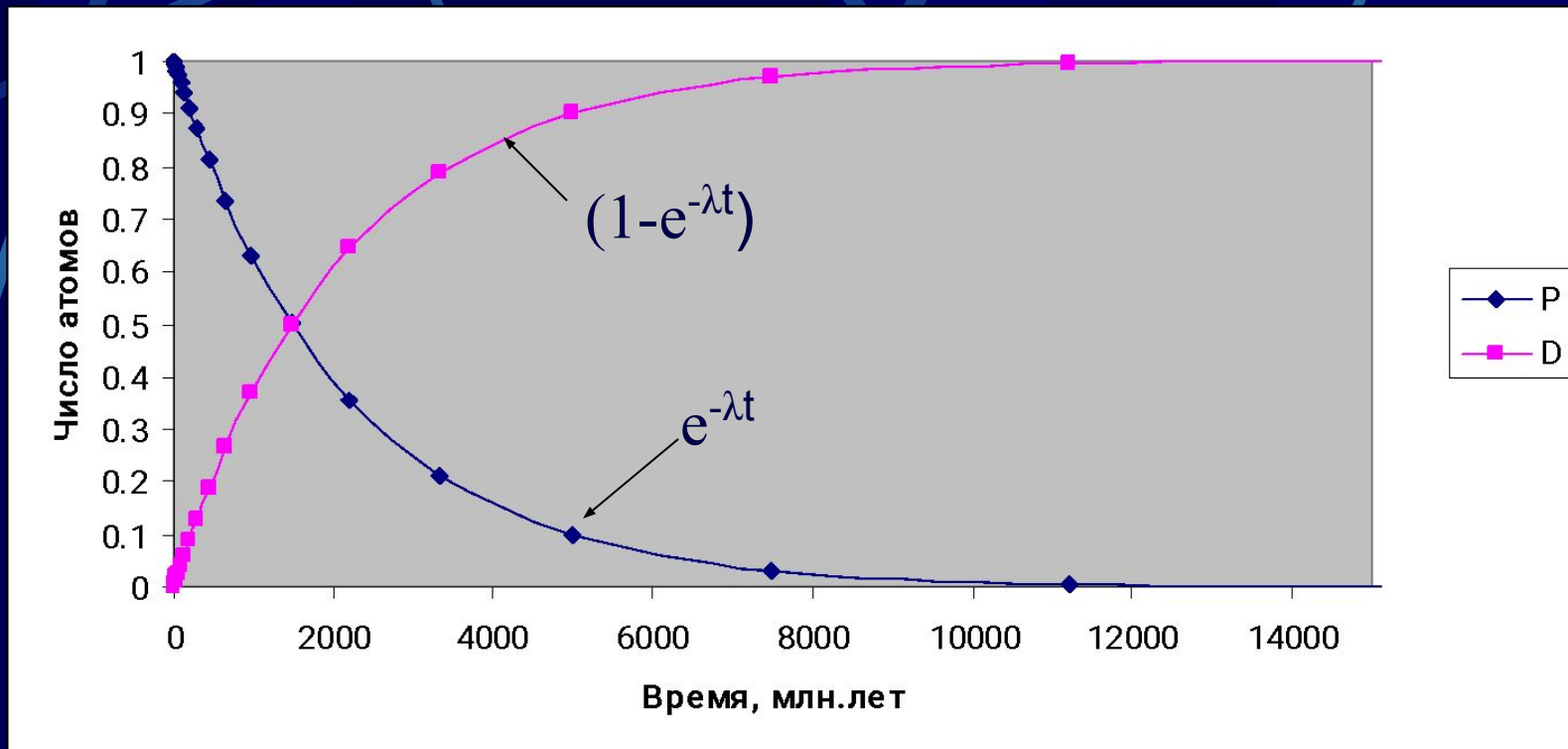


8.4 Принципы ядерной геохронологии

Как определить возраст пород?

Атомные часы



Число атомов материнского (P) и дочернего (D) изотопов
P – K, D – Ar, T=1484 млн. лет

Основное уравнение датирования

$P(t) = P_0 e^{-\lambda t}$ – число атомов материнского изотопа

$D(t) = P_0 - P(t) = P_0(1 - e^{-\lambda t})$ – число атомов дочернего изотопа

$$\frac{D(t)}{P(t)} = \frac{1 - e^{-\lambda t}}{e^{-\lambda t}} = e^{\lambda t} - 1 \quad \text{основное уравнение}$$

Уран-свинцовый (U-Pb) метод



Необходимо найти такие объекты исследования, в которых присутствует уран в количестве, которое можно определить путем специального анализа и в которых пренебрежимо мало содержание свинца!

*Наиболее удачный объект – **циркон (ZrSiO₄)** – акцессорный минерал многих магматических пород . Кроме того используют сфен, уранинит, монацит, апатит*

Пример

Положим, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}=1.562 \times 10^{-2}$, тогда в соответствии с основным уравнением:

$$0.01562 = (e^{\lambda t} - 1)$$

$$1.01562 = e^{\lambda t}$$

$$\ln(1.01562) = \lambda t$$

$$0.015499 = \lambda t$$

$$t = \frac{0.015499}{\lambda} = \frac{0.015499}{1.55 \times 10^{-10}} = 100 \text{ млн. лет}$$

Как измерить содержание ИЗОТОПОВ?

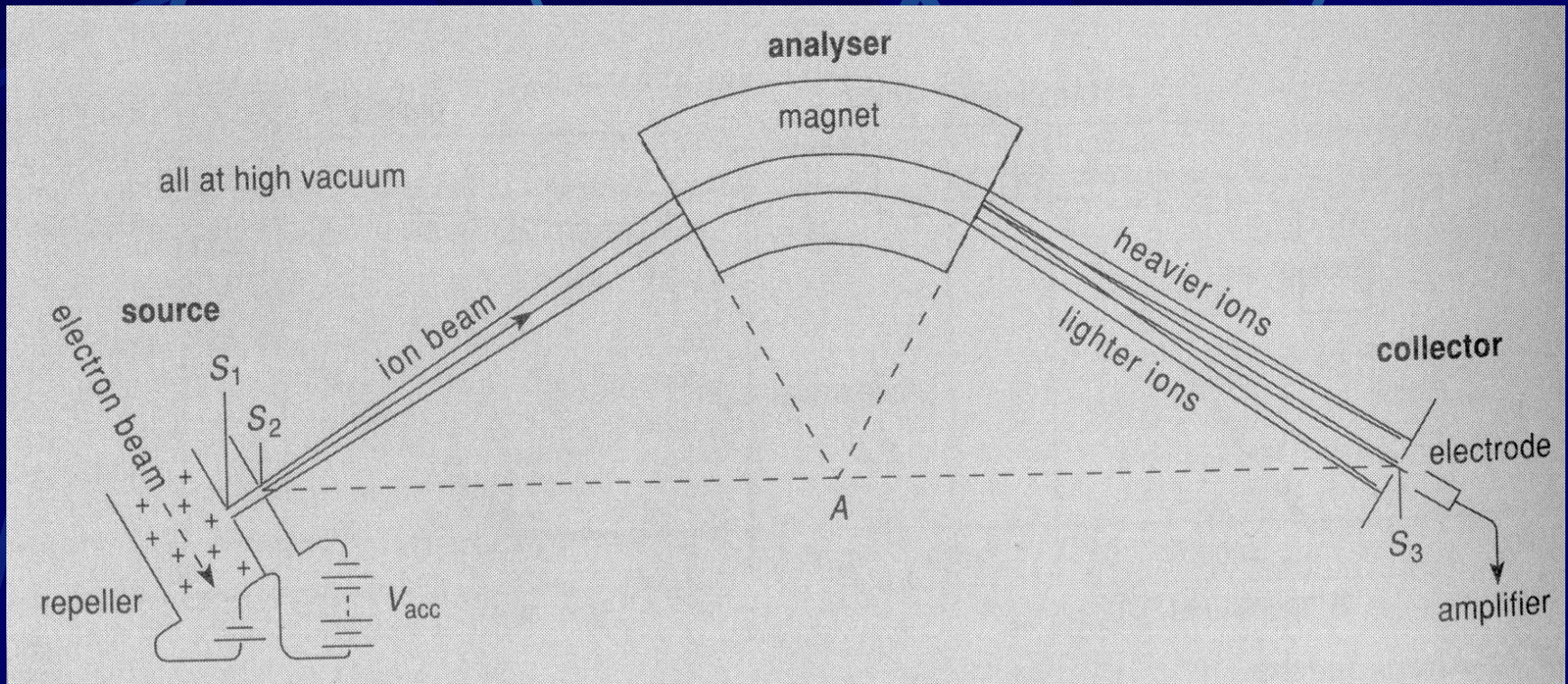
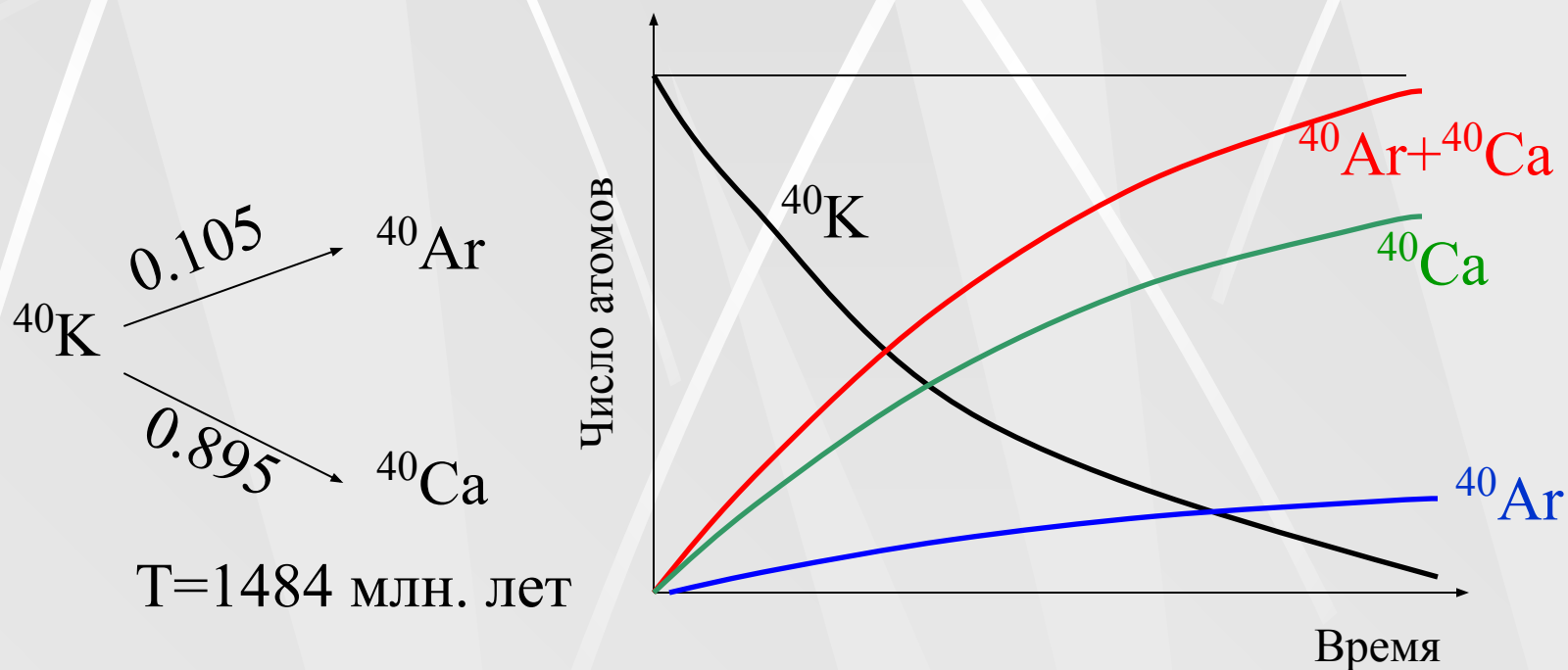


Схема масс-спектрометра

Когда “работает” основное уравнение?

- (1) Закрытость системы;
- (2) Одному материнскому изотопу соответствует один дочерний изотоп;
- (3) Дочерние атомы отсутствуют в начальный момент времени

Калий-аргоновый метод (K-Ar)



Радиоактивный ^{40}K представляет лишь 0.01167% от общего содержания K

Условие (2) – нарушено!

$$\frac{{}^{40}\text{Ar}}{{}^{40}\text{K}} = 0.105(e^{\lambda t} - 1)$$

В какой момент времени “включаются” К-Аг часы?

Какие объекты использовать?

- ✓ *роговая обманка;*
- ✓ *слюда;*
- ✓ *полевои шпат.*

Мешающий фактор – атмосферный ${}^{40}\text{Ar}$

Рубидий-стронциевый метод (Rb-Sr)

$^{87}\text{Rb} \rightarrow ^{87}\text{Sr}$, 48800 млн. лет, $1.42 \times 10^{-11} \text{ год}^{-1}$

^{86}Sr – Стабильный изотоп сравнения

Объекты – полевой шпат, слюда

Минералы, содержащие ^{87}Rb , содержат и ^{87}Sr , следовательно,
условие (3) – нарушено!

Баланс атомов ^{87}Sr :

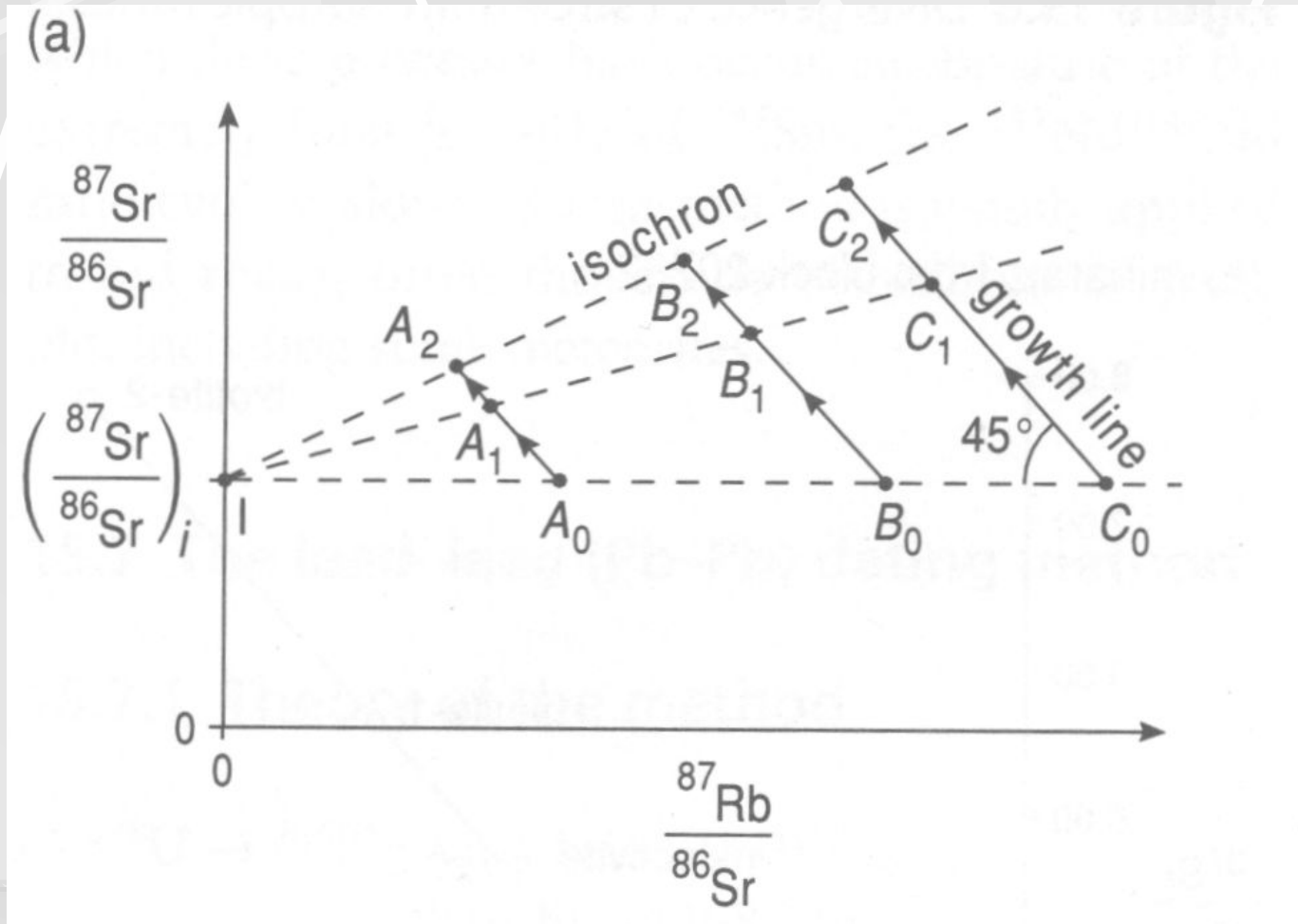
$$^{87}\text{Sr}_t = ^{87}\text{Sr}_0 + ^{87}\text{Rb}_t (e^{\lambda t} - 1) \quad \begin{array}{l} \text{(индекс “t” относится к текущему моменту;} \\ \text{индекс “0” – к моменту “запуска” часов)} \end{array}$$

Используем число атомов изотопа сравнения ^{86}Sr :

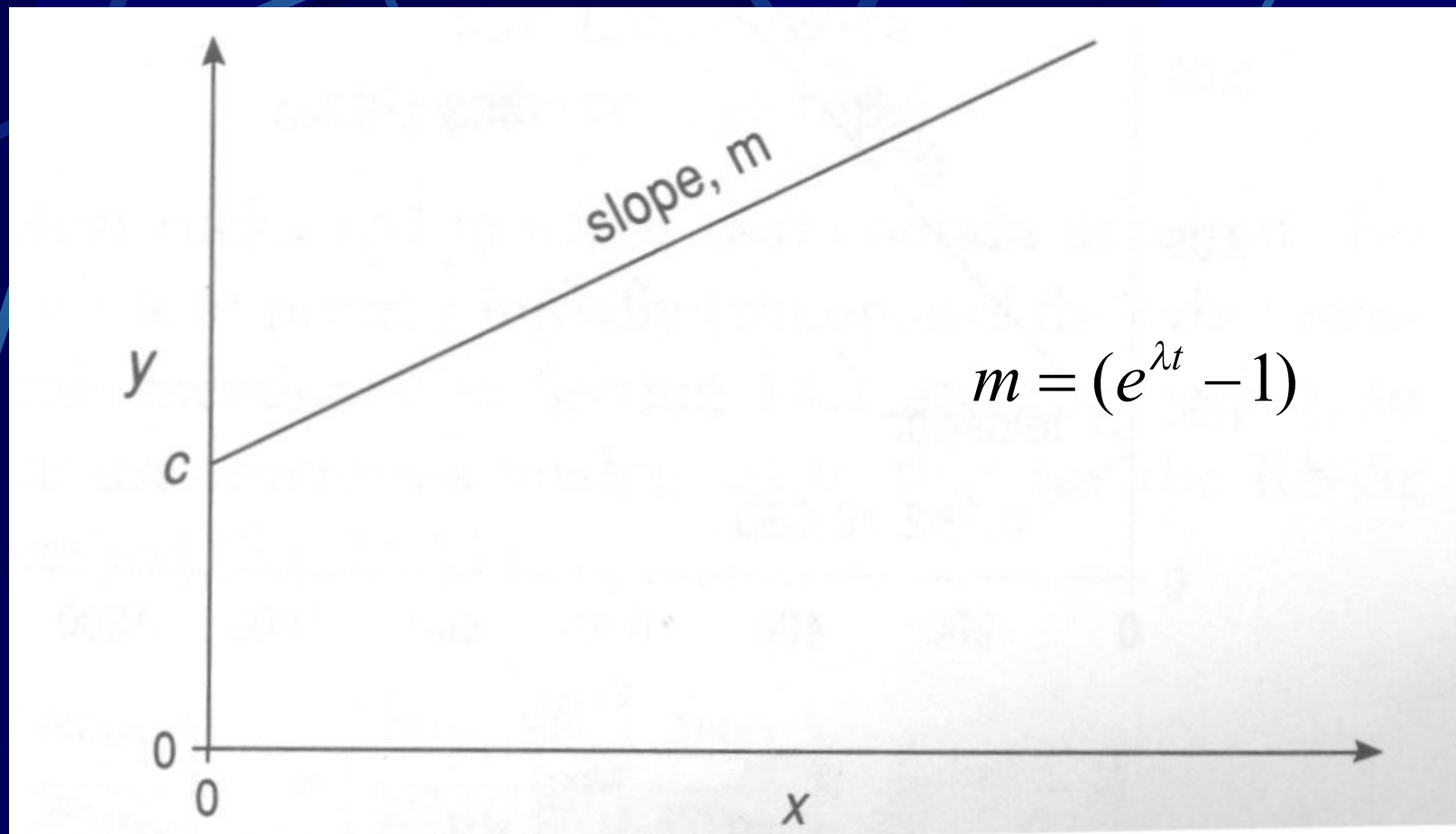
$$\frac{^{87}\text{Sr}_t}{^{86}\text{Sr}} = \frac{^{87}\text{Sr}_0}{^{86}\text{Sr}} + \frac{^{87}\text{Rb}_t}{^{86}\text{Sr}} (e^{\lambda t} - 1)$$

$$y = a + x \cdot m$$

Изохроны минералов А,В,С для разных моментов времени



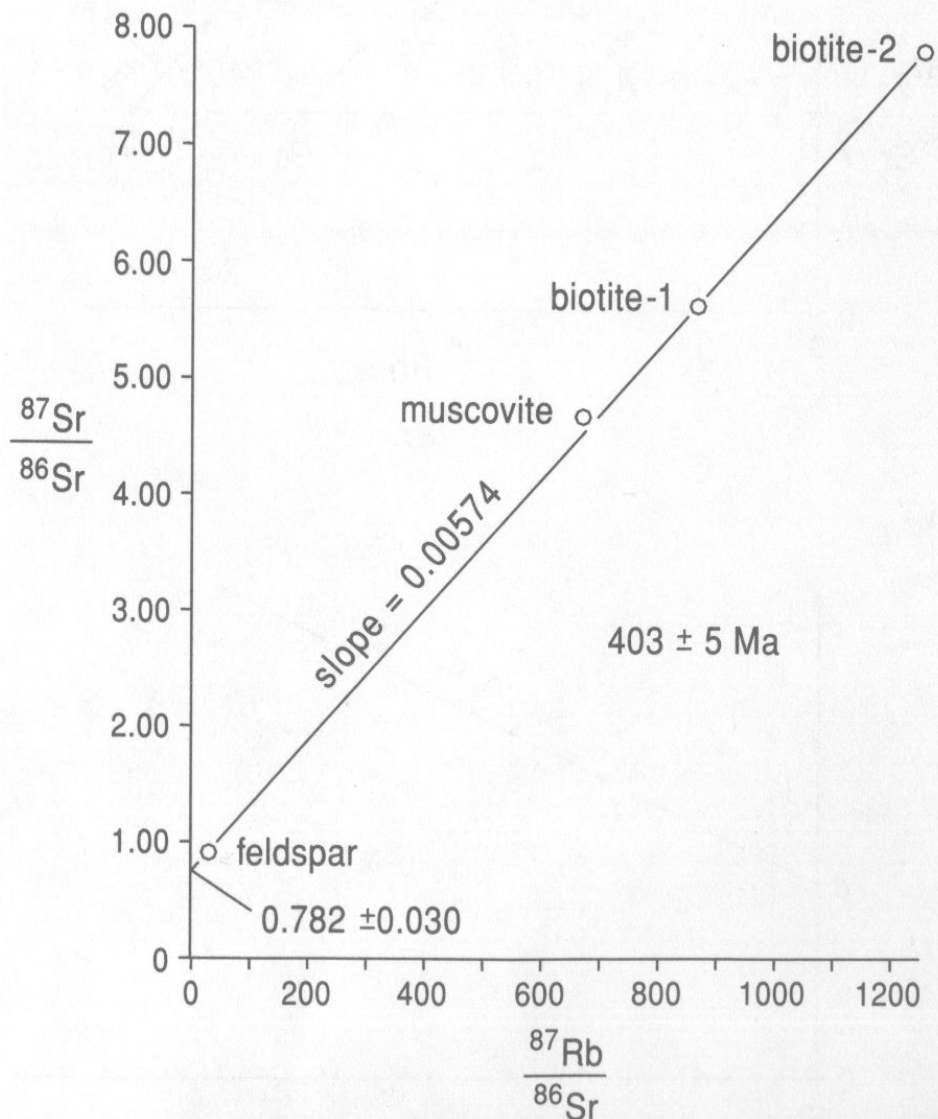
Тангенс угла наклона изохроны m :



Пример интерпретации изохроны Rb-Sr метода

$$\begin{aligned}m &= 0.00574 = \exp(\lambda t) - 1 \\ 1.00574 &= \exp(\lambda t) \\ \ln(1.00574) &= 1.42 \times 10^{-11} t \\ t &= 0.005724 / 1.42 \times 10^{-11} = \\ &= 403 \text{ млн. лет}\end{aligned}$$

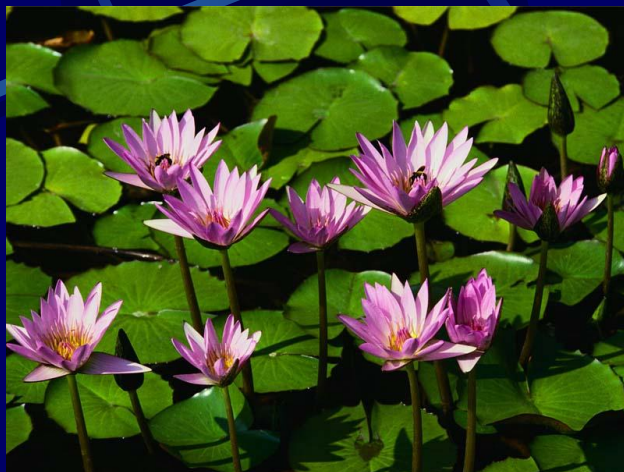
(a) minerals from block 20782



Углеродный (^{14}C) метод

^{14}C образуется из ^{14}N в верхних слоях атмосферы и распространяется по всей атмосфере. Более распространен стабильный изотоп ^{12}C .



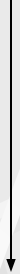


фотосинтез



...

Как измерить отношение $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$?



Счет β -частиц в
диоксиде углерода



Специальный масс-спектрометр

Продукты и константы распада изотопов, используемых в некоторых методах геохронологии

Реакция распада	Постоянная распада (лет ⁻¹)	Период полураспада (лет)
$^{238}\text{U} \rightarrow ^{206}\text{Pb} + 8^4\text{He}$	$1.55 \cdot 10^{-10}$	$4.47 \cdot 10^9$
$^{235}\text{U} \rightarrow ^{207}\text{Pb} + 7^4\text{He}$	$9.85 \cdot 10^{-10}$	$7.04 \cdot 10^8$
$^{40}\text{K} \rightarrow ^{40}\text{Ar}, ^{40}\text{Ca}$	$5.54 \cdot 10^{-11}$	$1.25 \cdot 10^9$
$^{87}\text{Rb} \rightarrow ^{87}\text{Sr}$	$1.42 \cdot 10^{-11}$	$4.88 \cdot 10^{10}$
$^{14}\text{C} \rightarrow ^{12}\text{C}$	$1.209 \cdot 10^{-4}$	5730

Какой метод выбрать?

- Тип породы, например, гранит – слюда (K, Rb), - циркон (U);
- Предполагаемый возраст пород;
- В какой момент “запускаются” часы?

K-Ar

- Широко распространен (K);
- Может использоваться для датировки молодых пород (<1 млн. лет)
- Потери Ar приводят к ошибкам

U-Pb

- Ограничен числом минералов, в которых мало содержание свинца.
- Циркон с возрастом сотни миллионов лет датируется с точностью до 1 млн. лет. Точность уменьшается для более молодых пород.

Rb-Sr

- Используется для датирования кислых пород ($>60\%$ SiO_2).
- Датирование возможно для пород старше 10 млн. лет.
- Возможность использования изохрон повышает точность датирования.

^{14}C

- Используется для молодых пород (и не только пород) моложе 40000 лет.

Вопросы по радиометрии и ядерной геофизике

- 1. Какие природные элементы являются радиоактивными?
- 2. Как определяется постоянная распада, среднее время жизни элемента, период полураспада?
- 3. Что такое «радиоактивное равновесие»?
- 4. Сформулируйте закон радиоактивного распада.
- 5. В каких магматических породах содержание урана наибольшее и наименьшее?
- 6. В каких условиях уран накапливается, а в каких мигрирует?
- 7. В каких осадочных породах наименьшее содержание радиоактивных элементов?
- 8. Чем отличаются интегральный и спектрометрический методы?
- 9. Для каких целей используют гамма-метод?
- 10. Какой параметр позволяет оценить гамма-гамма метод, гамма-нейтронный метод?
- 11. Для каких целей необходимо измерять содержание радона?
- 12. Какие методы изотопной геохронологии вы знаете? Почему этих методов так много?
- 13. Как на основе уран-свинцового метода определить время образования породы и время ее повторного разогрева?
- 14. Возраст каких объектов может быть определен с помощью радиоуглеродного метода?