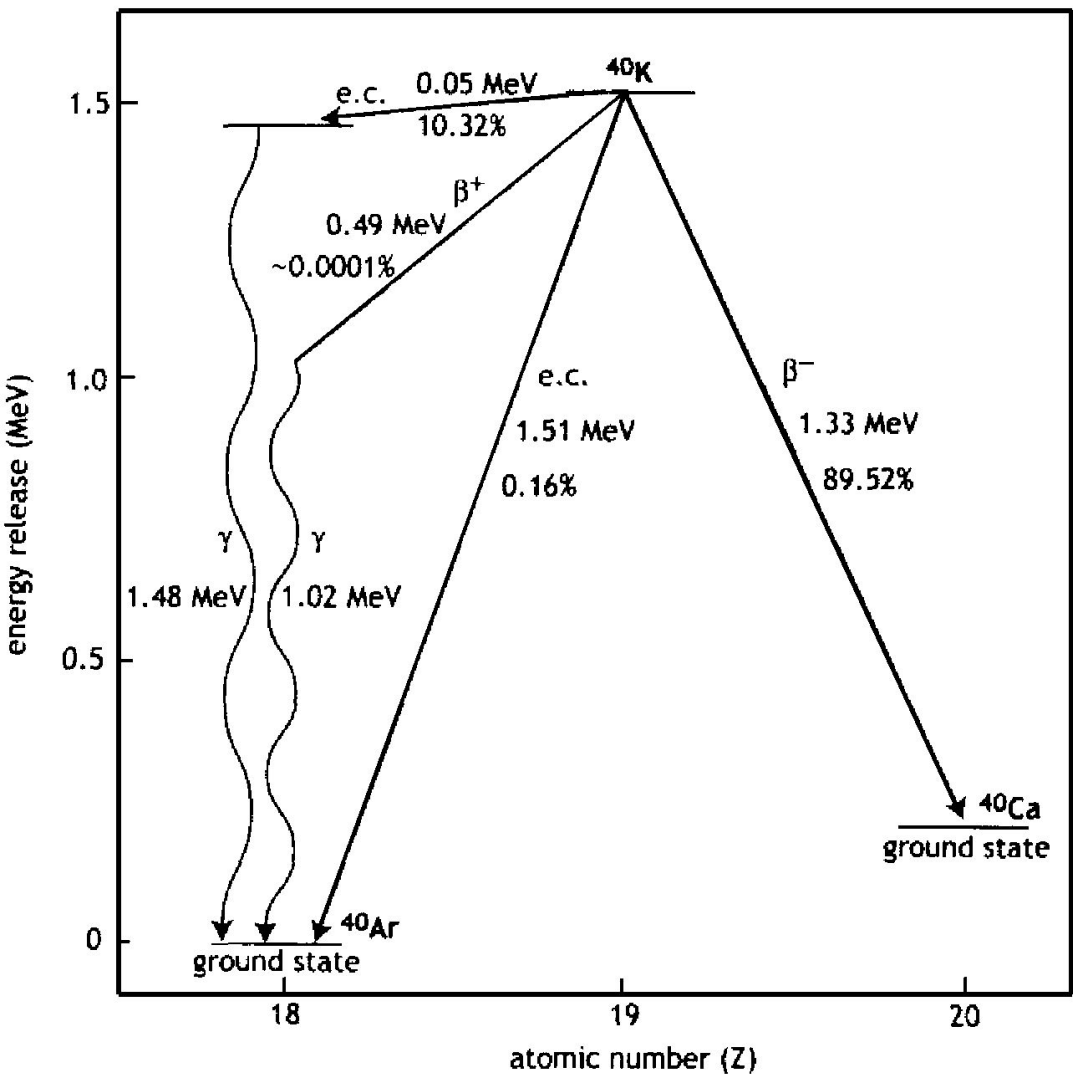


К-Ar изотопная система



$$\lambda_{\beta} = 4.962 \cdot 10^{-10} \text{ год}^{-1}$$



$$\lambda_{\text{Э.З.}} = 0.581 \cdot 10^{-10} \text{ год}^{-1}$$

$$\lambda = 5.543 \cdot 10^{-10} \text{ год}^{-1}$$

$$T_{1/2} = 1.2505 \cdot 10^9 \text{ лет}$$

$$\lambda_{\beta} = 0.4962 \text{ млрд.лет}^{-1}$$

$$\lambda_{\text{Э.З.}} = 0.0581 \text{ млрд.лет}^{-1}$$

$$\lambda = 0.5543 \text{ млрд.лет}^{-1}$$

| | |
|-----------------------------|----------------------------|
| $^{39}\text{K} = 93.2581\%$ | $^{40}\text{Ar} = 99.60\%$ |
| $^{40}\text{K} = 0.01167\%$ | $^{38}\text{Ar} = 0.063\%$ |
| $^{41}\text{K} = 6.7302\%$ | $^{36}\text{Ar} = 0.337\%$ |
| $AW_{\text{K}} = 39.0983$ | $AW_{\text{Ar}} = 39.9476$ |

Задача 3. Каким был изотопный состав калия 4.56 млрд.лет назад?

$$t = \frac{1}{\lambda} \ln \left(\frac{D_{rad}}{N} + 1 \right)$$

$$t = \frac{1}{\lambda} \ln \left(\frac{{}^{40}Ar_{rad}}{{}^{40}K} \cdot \frac{? + \lambda_1}{\lambda_{\text{Э.З.}}} + 1 \right) \quad {}^{40}Ar_{rad} = {}^{40}K \frac{\lambda_{\text{Э.З.}}}{\lambda} [\exp(\lambda t) - 1]$$

$$t = \frac{1}{\lambda} \ln \left(\frac{{}^{40}Ar_{rad} (ppm)}{K (\text{век.}\%) } \cdot ? \cdot \frac{\lambda}{\lambda_{\text{Э.З.}}} + 1 \right)$$

$$t = \frac{1}{\lambda} \ln \left(\frac{{}^{40}Ar_{rad} (ppm)}{K (\text{век.}\%) } \cdot \frac{1}{10^4 \cdot 0.0001167} \cdot \frac{AW_K A}{AW_{40_{Ar}} A} \cdot \frac{\lambda}{\lambda_{\text{Э.З.}}} + 1 \right)$$

$$AW_{40_{Ar}} = 39.962$$

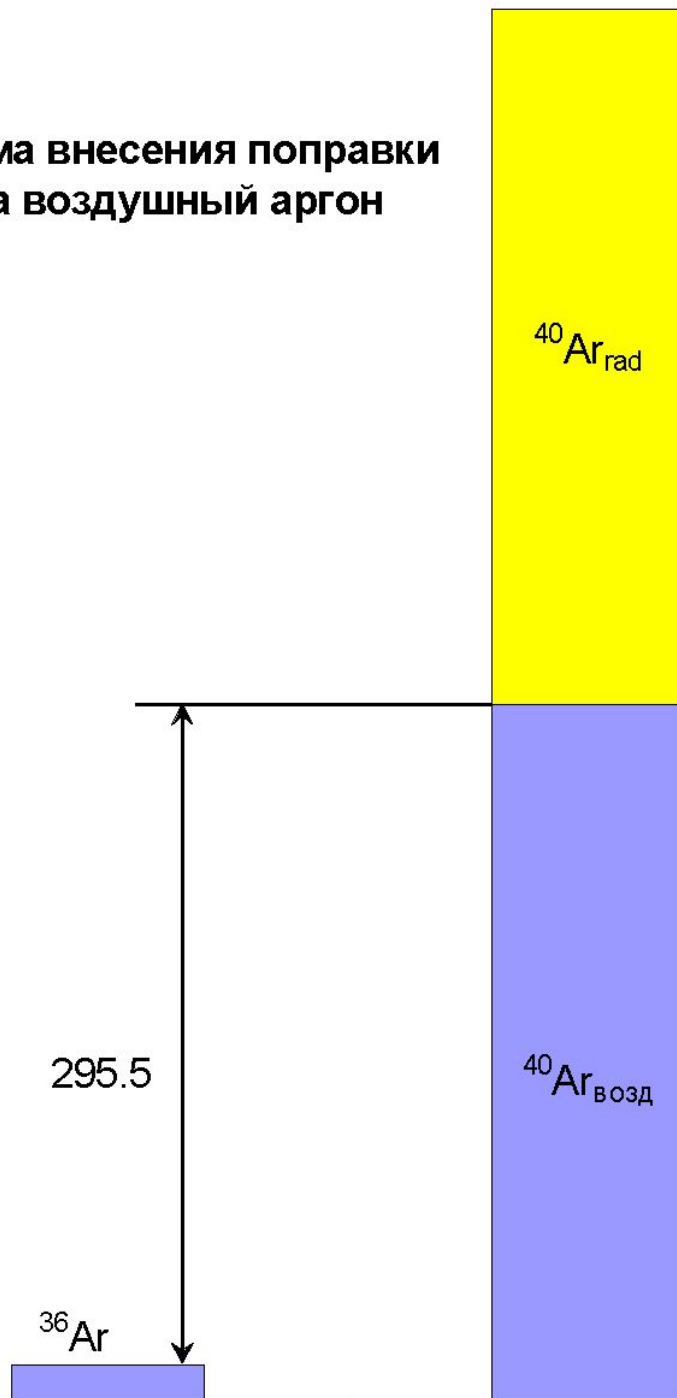
Методы определения

- К – пламенная фотометрия, изотопное разбавление.
- Ar – объёмный метод, изотопное разбавление.

$$1\text{л} = 1\text{дм}^3 = AW_{40\text{Ar}} / V_{\text{mol}} = 39.962 / 22.414 \text{ (г)}$$

$$1\text{мм}^3 = 1.783 \text{ мкг } ^{40}\text{Ar}$$

Схема внесения поправки
на воздушный аргон



Важное улучшение К-Аг
анализа – учёт воздушного
аргона

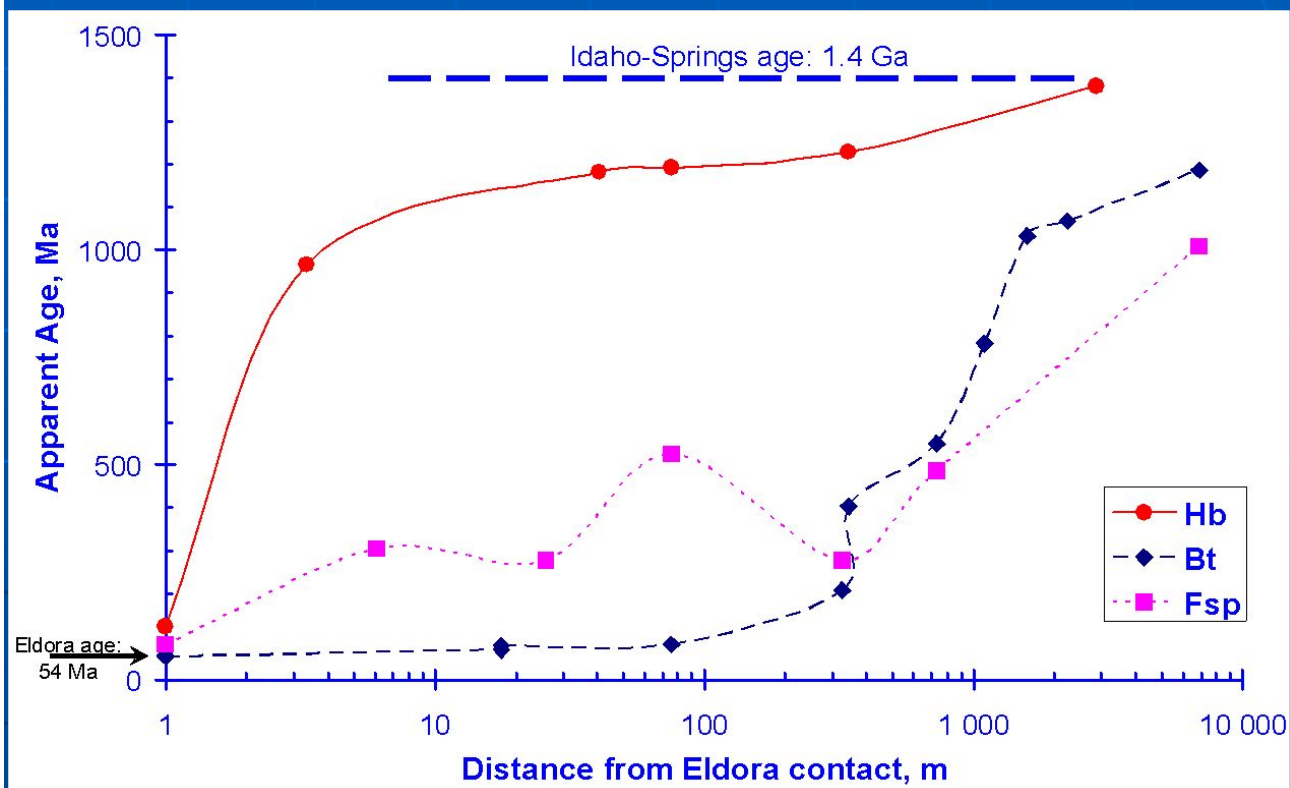
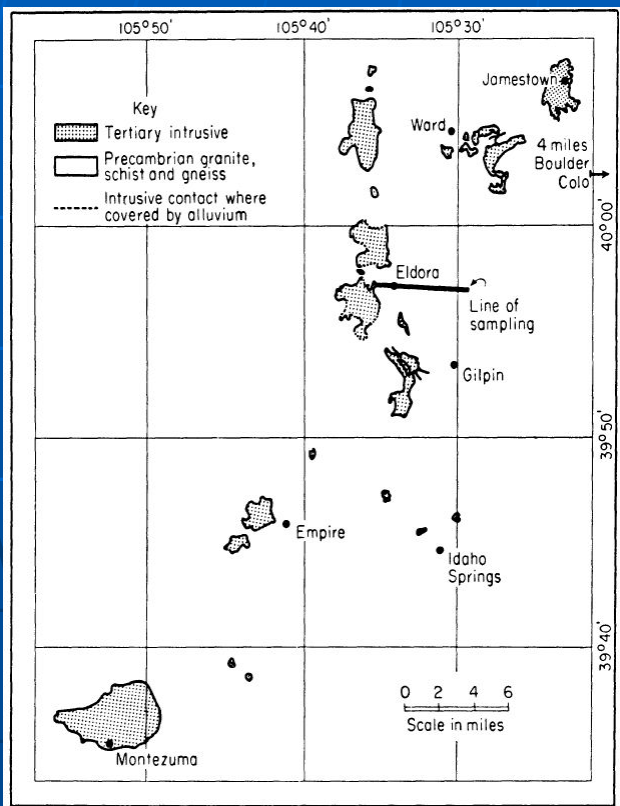
Условия получения неискажённого значения возраста K-Ar методом

- Замкнутость исследуемого минерала в отношении K и Ar (отсутствие потерь/привноса)
- Отсутствие избыточного (захваченного) ^{40}Ar

Как это проверить?

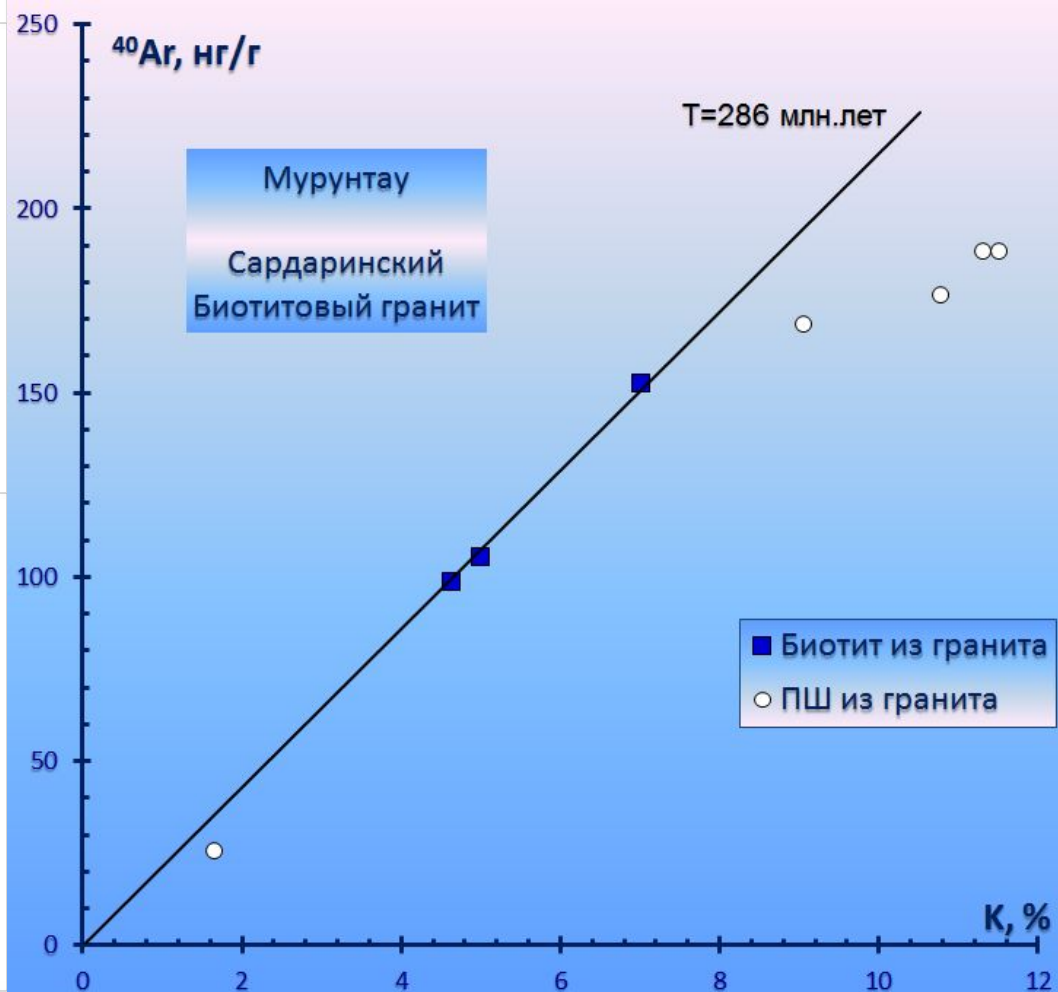
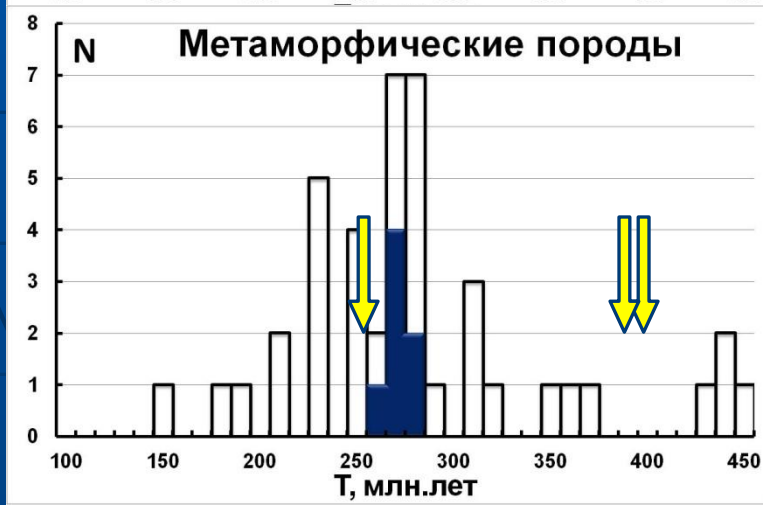
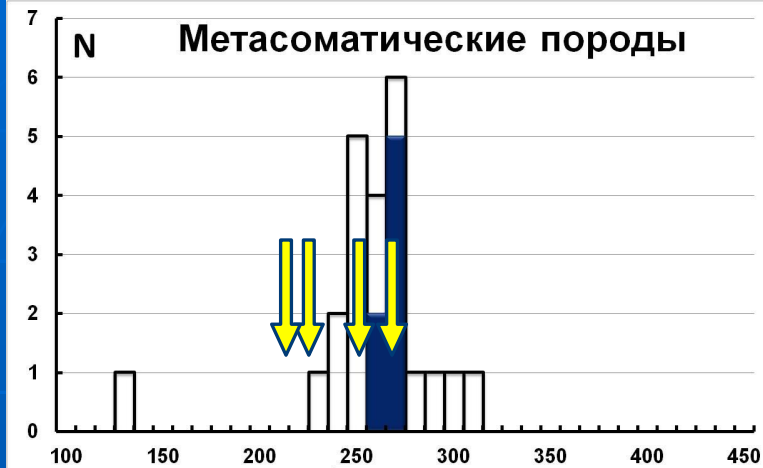
- Анализ минералов из разных образцов
- Анализ разных минералов из одного образца

Термальное омоложение К-Ar системы минералов

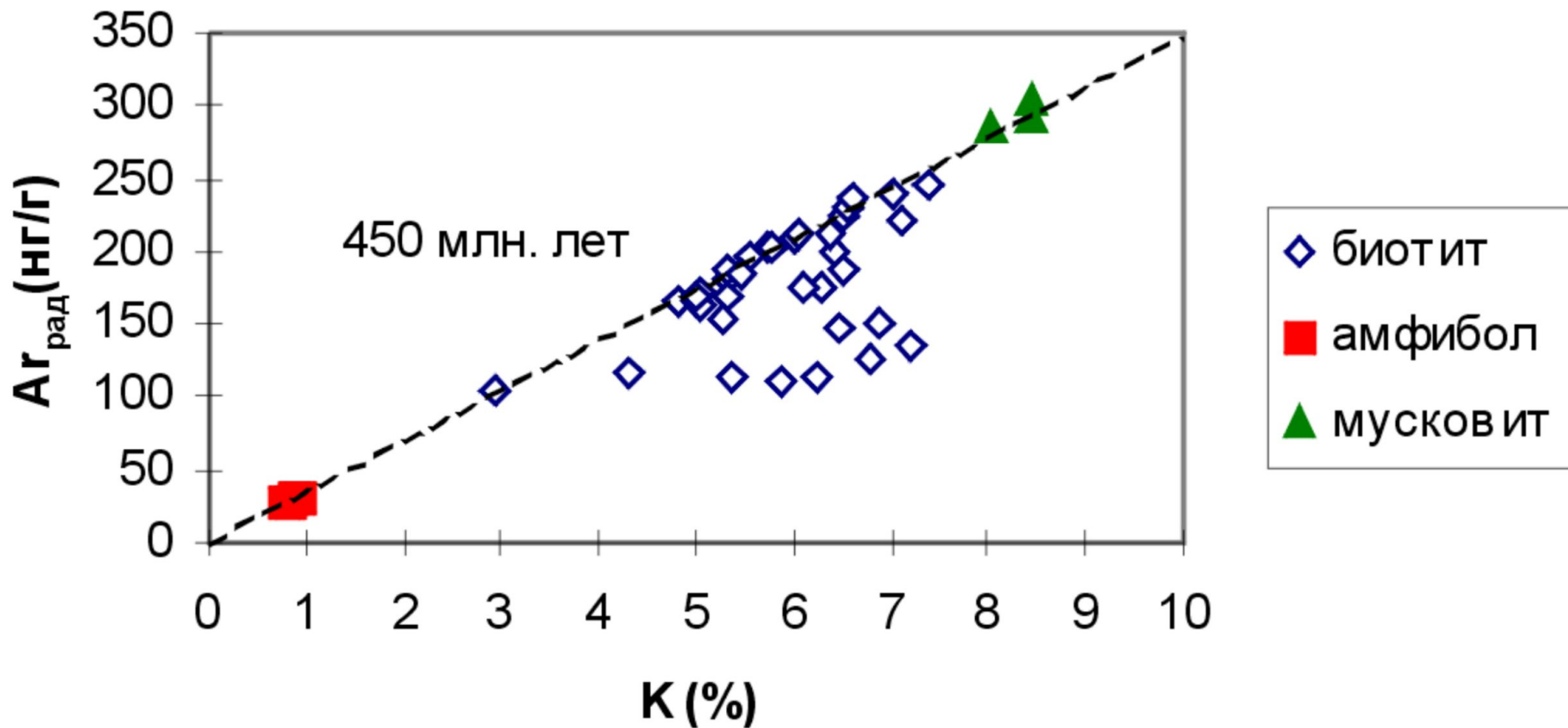


S.R.Hart. The Journal of Geology. 1964. V.72. P.493-525.

Золоторудное месторождение Мурунтау (Центральные Кызылкумы)



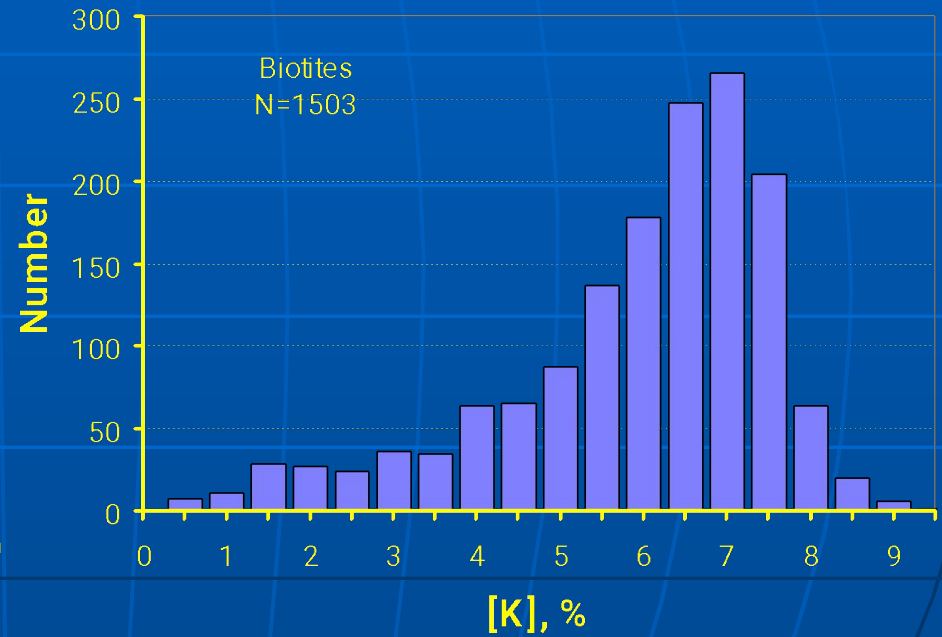
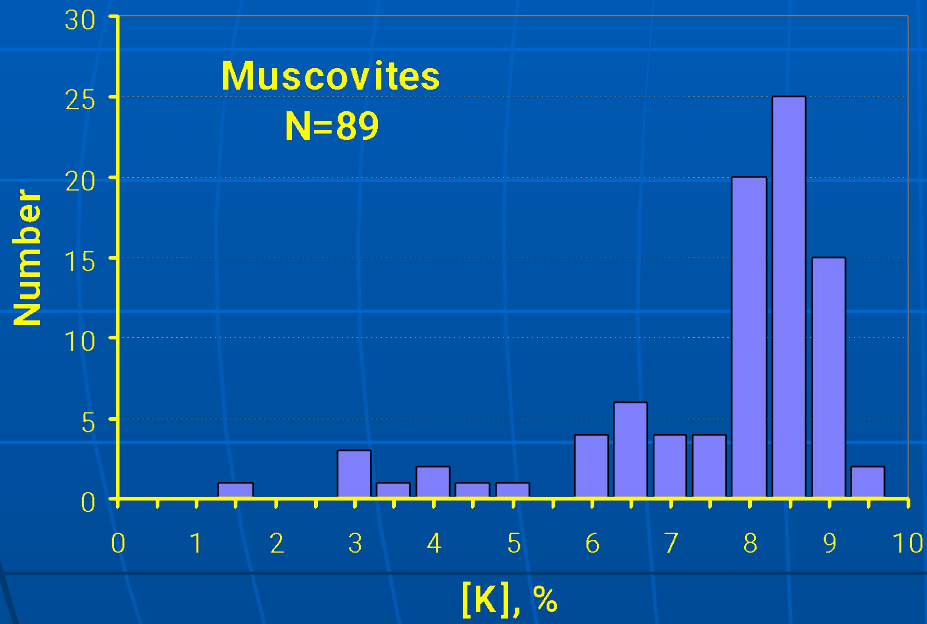
Зерендинские граниты, С.Казахстан



Шатагин, 2001.

$T_{\text{Rb-Sr}} = 443 \pm 11$ млн.лет

Гранитоиды С.Казахстана



Устойчивость K-Ar системы породообразующих минералов

- Эмпирический ряд устойчивости:

(Px, Nb) □ Ms □ (Phl, Bt) □ Fsp

Как получать надёжные результаты K-Ar
методом?

- Не использовать полевые шпаты
(исключение – санидин)
- Не использовать породы в целом
(исключение – стёкла)

Критерии надёжности K-Ar данных

- Конкордантность результатов – главный критерий реальности события
 - Совпадение нескольких K-Ar результатов
 - Сопоставление K-Ar данных с данными других методов датирования (U-Pb, Rb-Sr, Sm-Nd)
- Хорошая сохранность минералов
- Использование устойчивых минералов

Задача 4. Рассчитать значения К-Аг возраста по результатам анализа серицита, выделенного из кварц-серицитовых сланцев на месторождении Мурунтау

| Место отбора | Исследов. материал | К, вес. % | ⁴⁰ Аг, нг/г |
|-------------------------|--------------------|-----------|------------------------|
| Скважина СГ-10, 425м | серицит | 3.92 | 82.0 |
| 515м | серицит | 2.69 | 57.2 |
| 655м | серицит | 3.64 | 75.2 |
| 774м | серицит | 4.23 | 84.9 |
| 886м | серицит | 5.16 | 109.4 |
| 903 м | серицит | 4.47 | 92.3 |

Погрешности К-Аг анализа

- Пусть имеется n образцов, проанализированных по несколько раз, всего N анализов. Имеется n средних определений калия, \bar{K}_i и N индивидуальных K_{ij} , $N \geq 2n$. Тогда

$$\sigma_K(\%) = 100 \sqrt{\frac{\sum_i^N \sum_j [(\bar{K}_i - K_{i,j}) / \bar{K}_i]^2}{N - n}}$$

$$\sigma_{Ar}(\%) = 100 \sqrt{\frac{\sum_i^N \sum_j [(\bar{Ar}_i - Ar_{i,j}) / \bar{Ar}_i]^2}{N - n}}$$

$$\sigma_t(\%) = \sqrt{\sigma_K^2(\%) + \sigma_{Ar}^2(\%)}$$

- Пусть имеется N результатов многократных измерений X_i некоторой величины (X)

$$\bar{X} = \frac{\sum X_i}{N}$$

$$\sigma_X = \sqrt{\frac{\sum (X - X_i)^2}{N}} \quad \text{или} \quad \sigma_X = \sqrt{\frac{\sum (\bar{X} - X_i)^2}{N - 1}}$$

$$\sigma_{\bar{X}} \quad \text{или} \quad \bar{\sigma}_X = \frac{\sigma_X}{\sqrt{N}} = \sqrt{\frac{\sum (\bar{X} - X_i)^2}{N(N - 1)}}$$

В случае нормального распределения выборки X_i справедливо утверждение:

величина X с вероятностью 95% находится в интервале $\bar{X} \pm t_{0.95} \cdot \bar{\sigma}$, где $t_{0.95}$ – квантиль t -распределения Стьюдента

| Кол-во степеней свободы (N-1) | $t_{0.95}$ |
|-------------------------------|------------|
| 1 | 12.71 |
| 2 | 4.303 |
| 3 | 3.182 |
| 4 | 2.776 |
| 5 | 2.571 |
| 6 | 2.447 |
| 7 | 2.365 |
| 8 | 2.306 |
| 9 | 2.262 |
| 10 | 2.228 |
| 15 | 2.131 |
| 20 | 2.086 |
| 30 | 2.042 |
| 40 | 2.021 |
| ∞ | 1.960 |



метод геохронологии



$${}^{39}\text{Ar} = {}^{39}\text{K} \cdot \tau \int \varphi(\varepsilon) \cdot \sigma(\varepsilon) d\varepsilon,$$

τ – продолжительность облучения,

$\varphi(\varepsilon)$ – плотность потока нейтронов с энергией ε ,

$\sigma(\varepsilon)$ – сечение захвата нейтронов с энергией ε .

$${}^{40}\text{Ar}_{rad} = \frac{\lambda_{\text{э.з.}} \cdot {}^{40}\text{K}}{\lambda} \cdot [\exp(\lambda \cdot t) - 1]$$

$$\frac{{}^{40}\text{Ar}_{rad}}{{}^{39}\text{Ar}} = \frac{\lambda_{\text{эз}}}{\lambda} \cdot \frac{{}^{40}\text{K}}{{}^{39}\text{K}} \cdot \frac{\exp(\lambda \cdot t) - 1}{\tau \int \varphi(\varepsilon) \cdot \sigma(\varepsilon) d\varepsilon}$$

Обозначим $J = \frac{\lambda}{\lambda_{\text{э.з.}}} \cdot \frac{{}^{39}\text{K}}{{}^{40}\text{K}} \cdot \tau \int \varphi(\varepsilon) \cdot \sigma(\varepsilon) d\varepsilon$

$$\frac{{}^{40}\text{Ar}_{rad}}{{}^{39}\text{Ar}} = \frac{\exp(\lambda \cdot t) - 1}{J = ?}$$

- Для определения J используют минерал известного возраста – монитор.

$$J = \frac{{}^{39}\text{Ar}}{{}^{40}\text{Ar}_{\text{rad}}} \cdot [\exp(\lambda \cdot t_M) - 1]$$

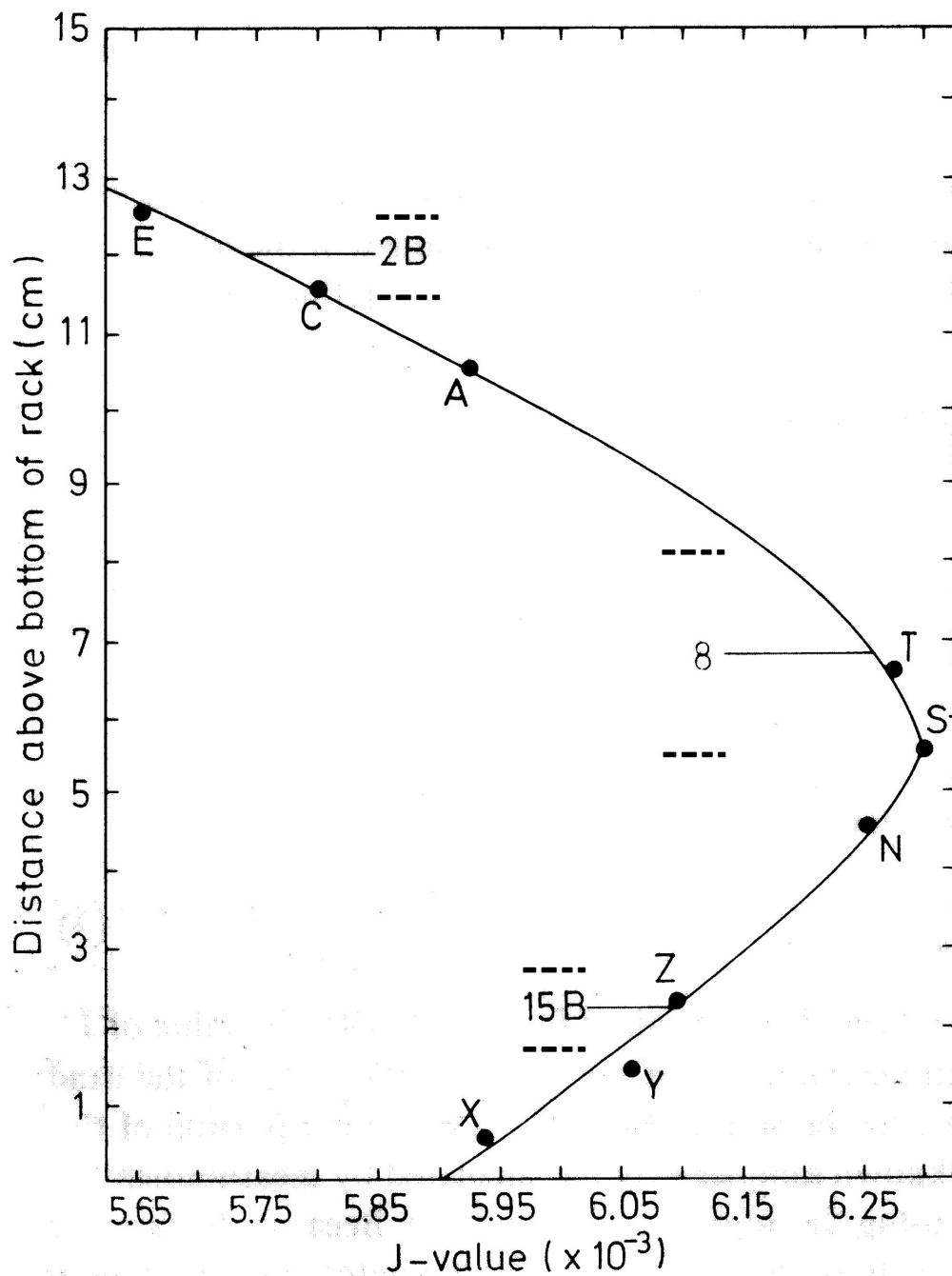
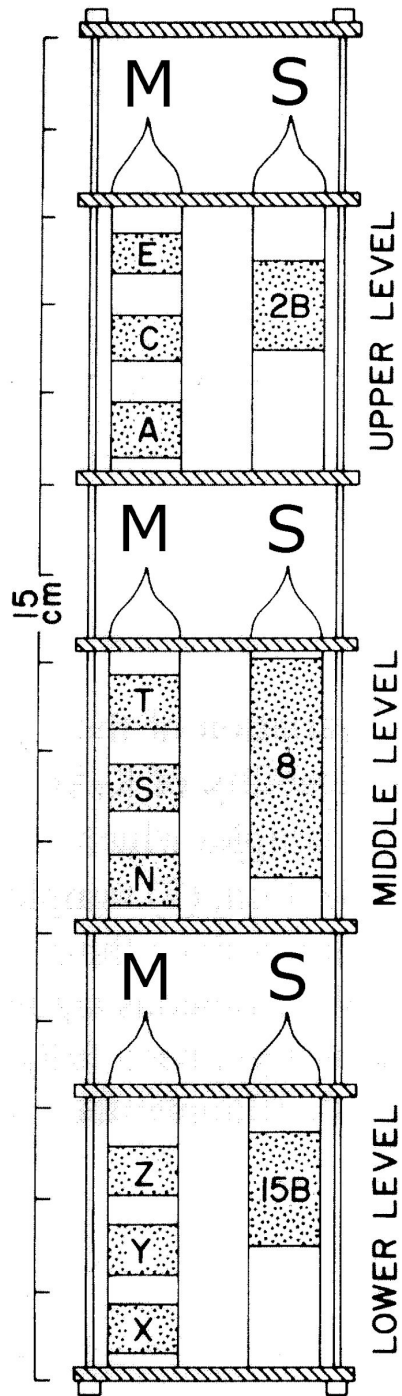
$$t = \frac{1}{\lambda} \ln \left(\frac{{}^{40}\text{Ar}_{\text{rad}}}{{}^{39}\text{Ar}} \cdot J + 1 \right)$$

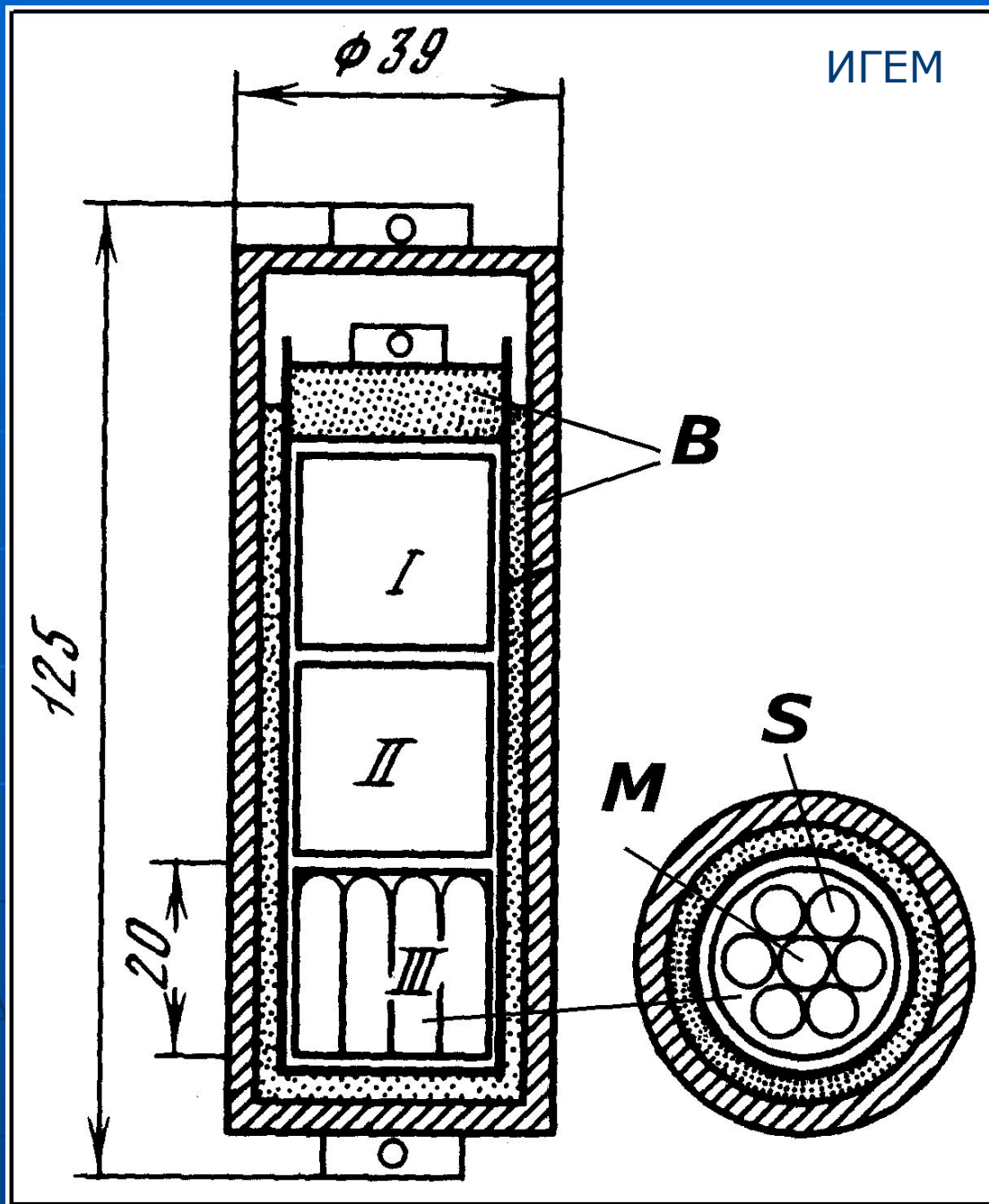
- Главное преимущество ^{39}Ar - ^{40}Ar метода перед классическим K-Ar – локальность анализа вплоть до микронных точек

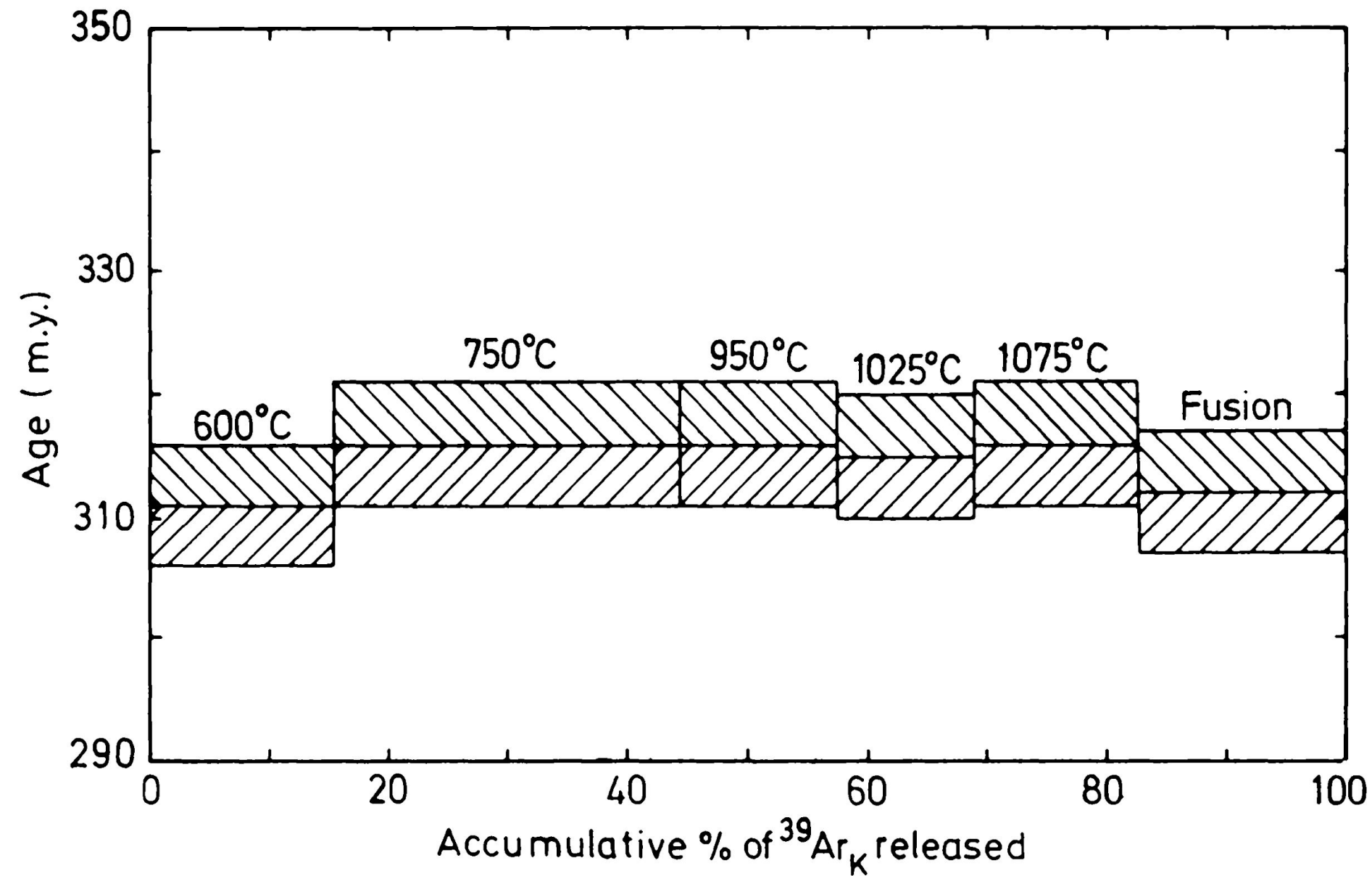
Отдача ядра ^{39}Ar измерена напрямую в ряде работ и достигает 0.08 мкм.

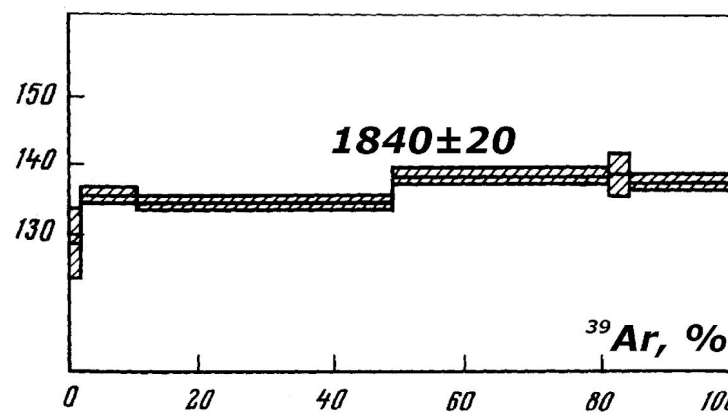
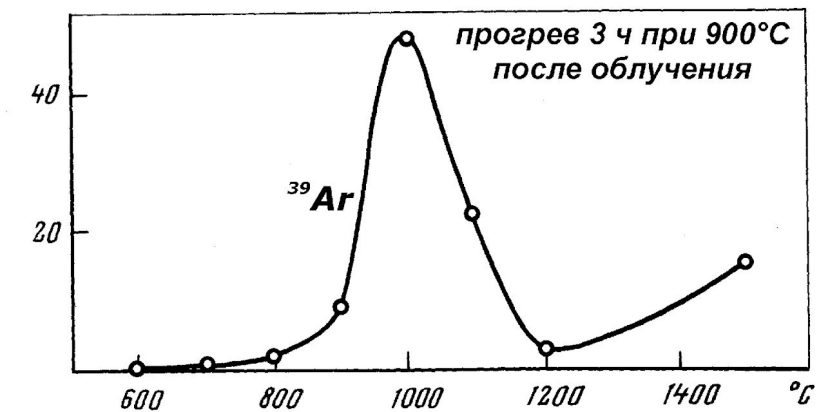
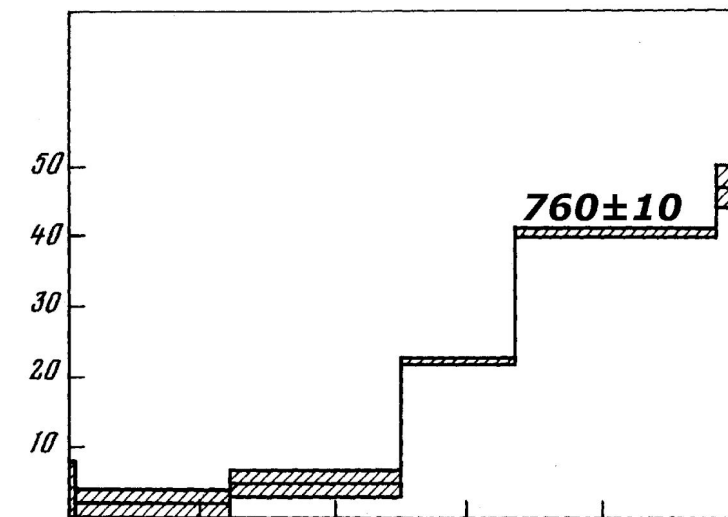
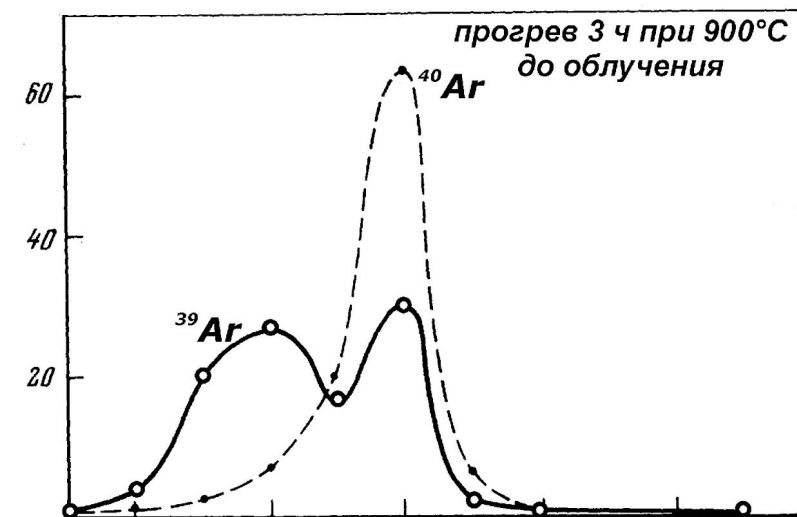
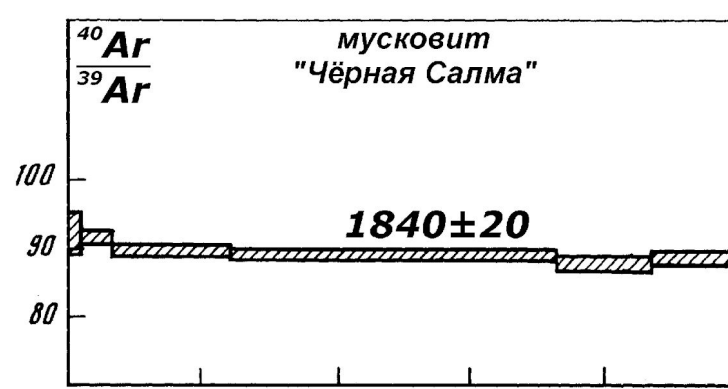
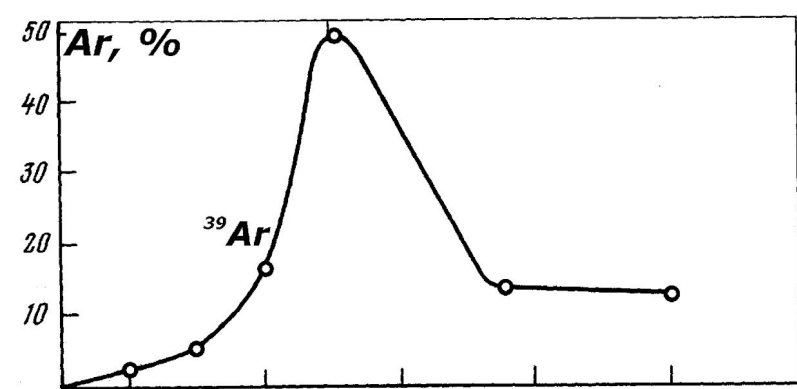
- Недостатки:
 - Относительность измерения (нужен хорошо аттестованный стандарт)
 - Большое количество помех











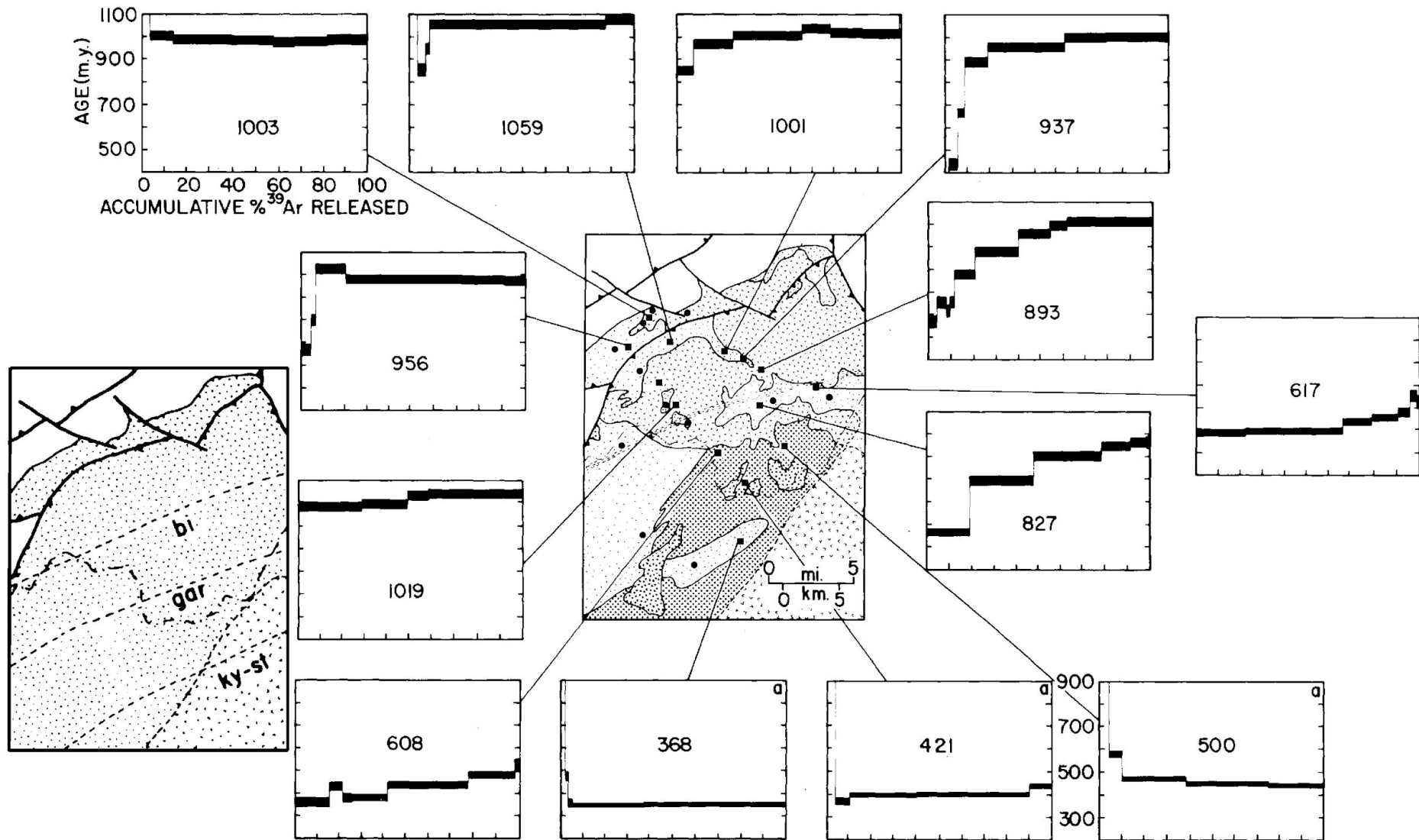


Fig. 11. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ age spectra of hornblende from variably retrograded basement gneisses in the west-central Blue Ridge (from Dallmeyer, 1975a). Similar coordinates (*upper left*) used for all spectra except three on *lower right (a)* which have different vertical scale. Estimated uncertainties indicated by *width of bar*. Total-gas ages (in m.y.) shown on each spectrum

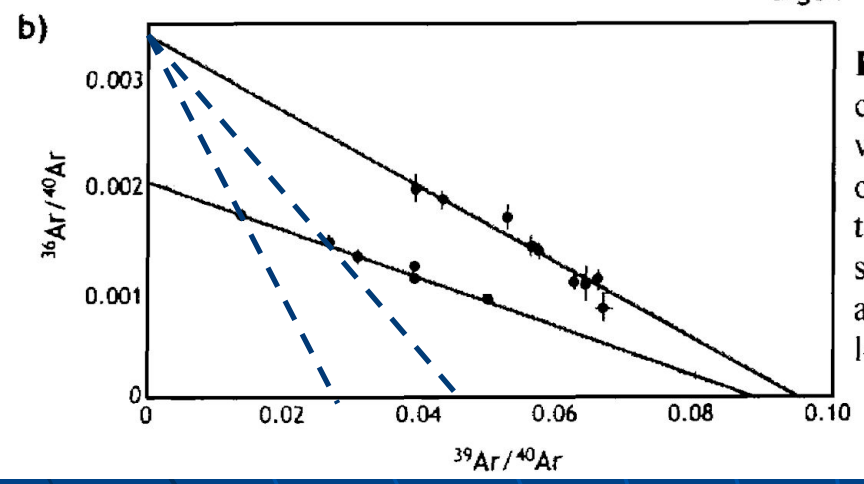
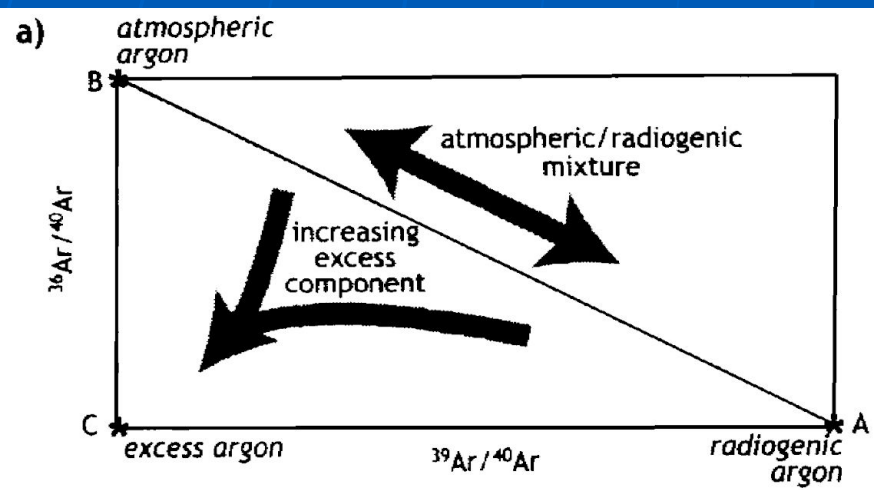
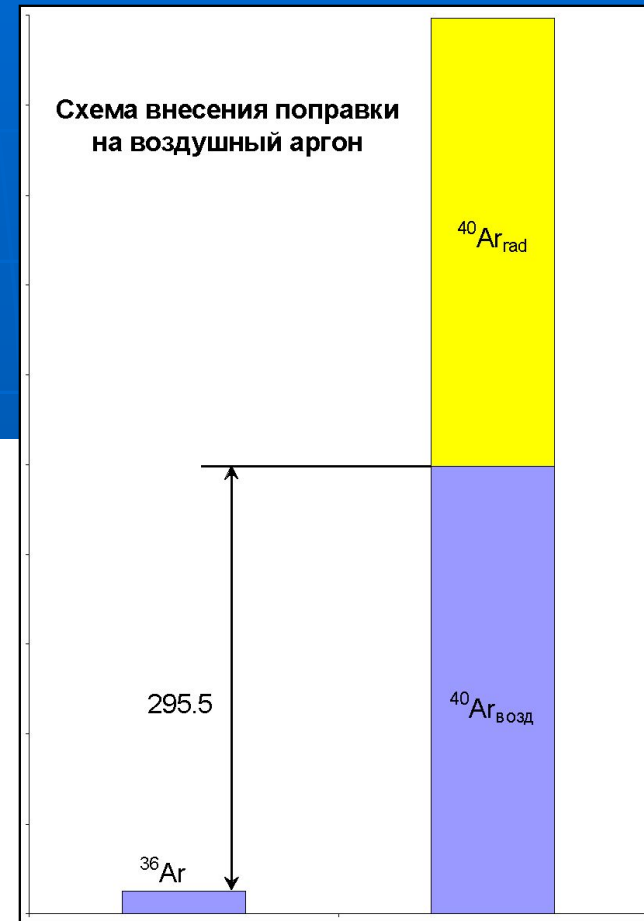


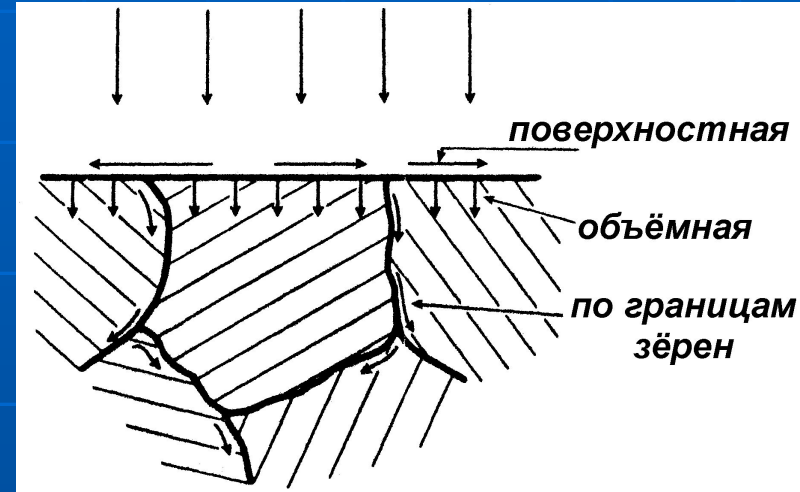
Figure 3. (a) An argon isotope correlation diagram, showing a correlation between atmospheric and radiogenic argon components which form an isochron. Any pure ^{40}Ar component would lie at the origin and thus any excess argon component tends to pull the point B towards the origin. (b) Two samples of amphibole analyzed by laser spot technique. The upper line intercepts within errors of atmospheric argon, the lower line yields a very similar age yet intercepts at a much lower $^{36}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ ratio and contains excess argon.

Диффузия и миграция изотопов

- Диффузия – поток (J) вещества под влиянием градиента химического потенциала ($\partial\mu/\partial x$).

$$J = -D \frac{\partial c}{\partial x} - \text{первый закон Фика}$$

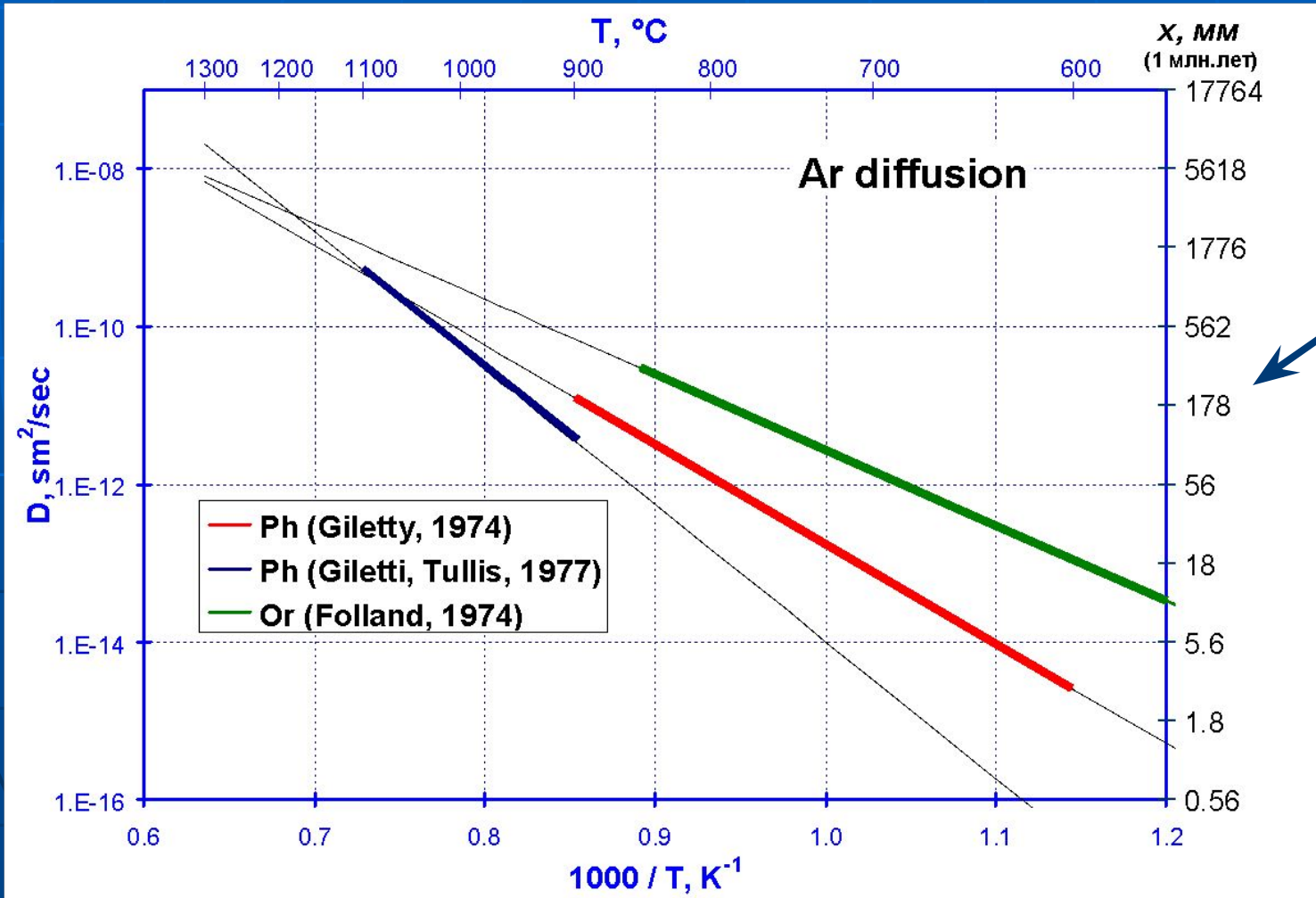
- Химическая диффузия (взаимодиффузия, интердиффузия)
- Диффузия примесей



$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} - \text{второй закон Фика}$$

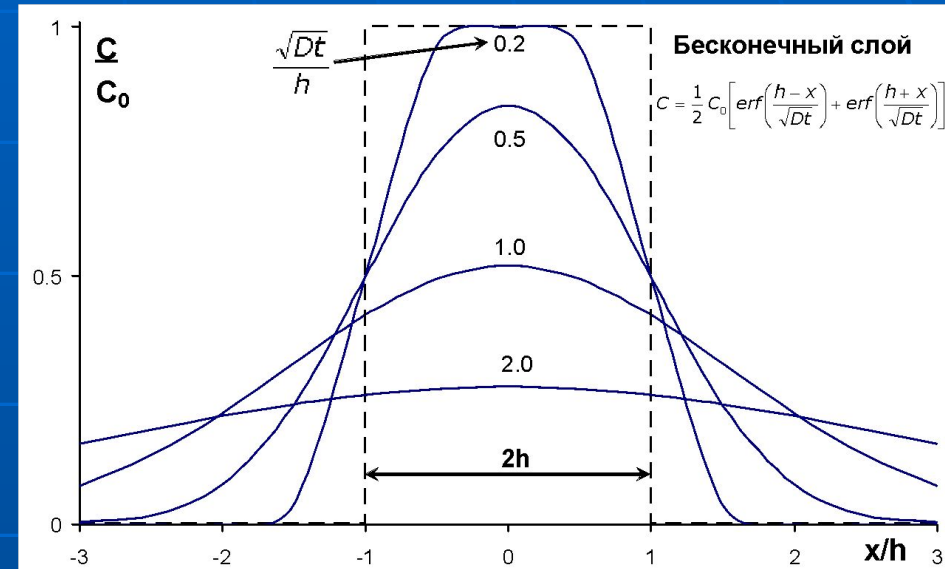
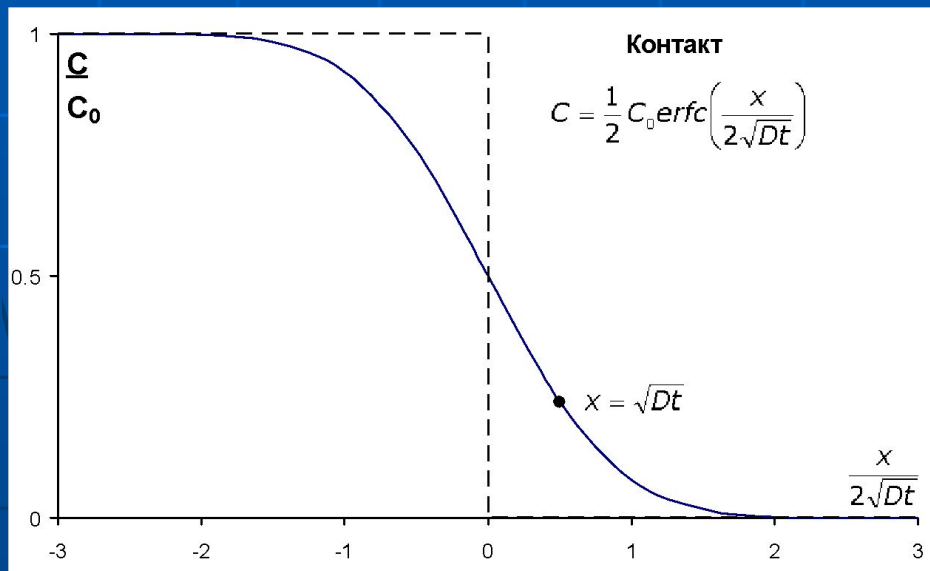
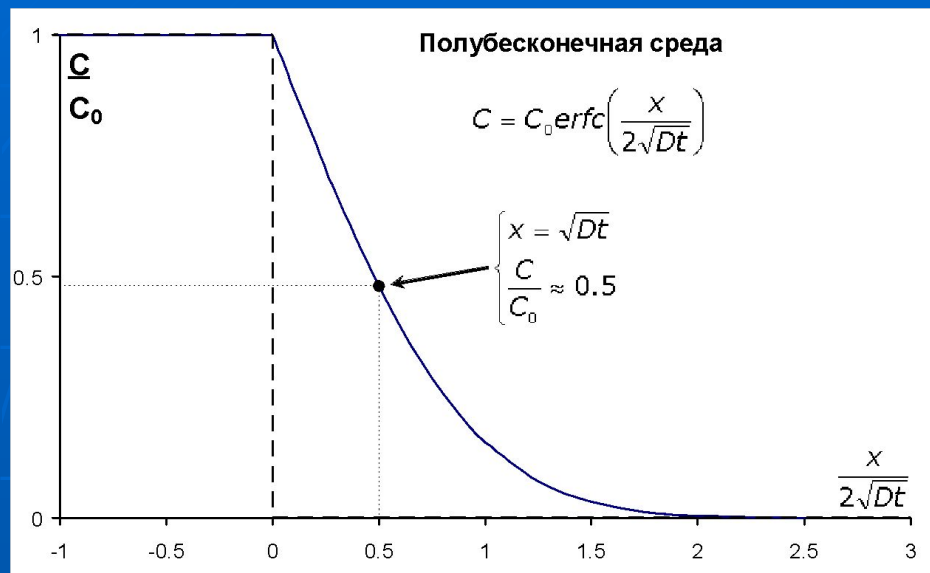
$$D = D_0 \exp\left(\frac{-E}{RT}\right)$$

| E | D и D ₀ | R |
|----------|--------------------|--------------------|
| Дж/моль | м ² /с | 8.314 Дж/(К·моль) |
| Кал/моль | см ² /с | 1.985 Кал/(К·моль) |

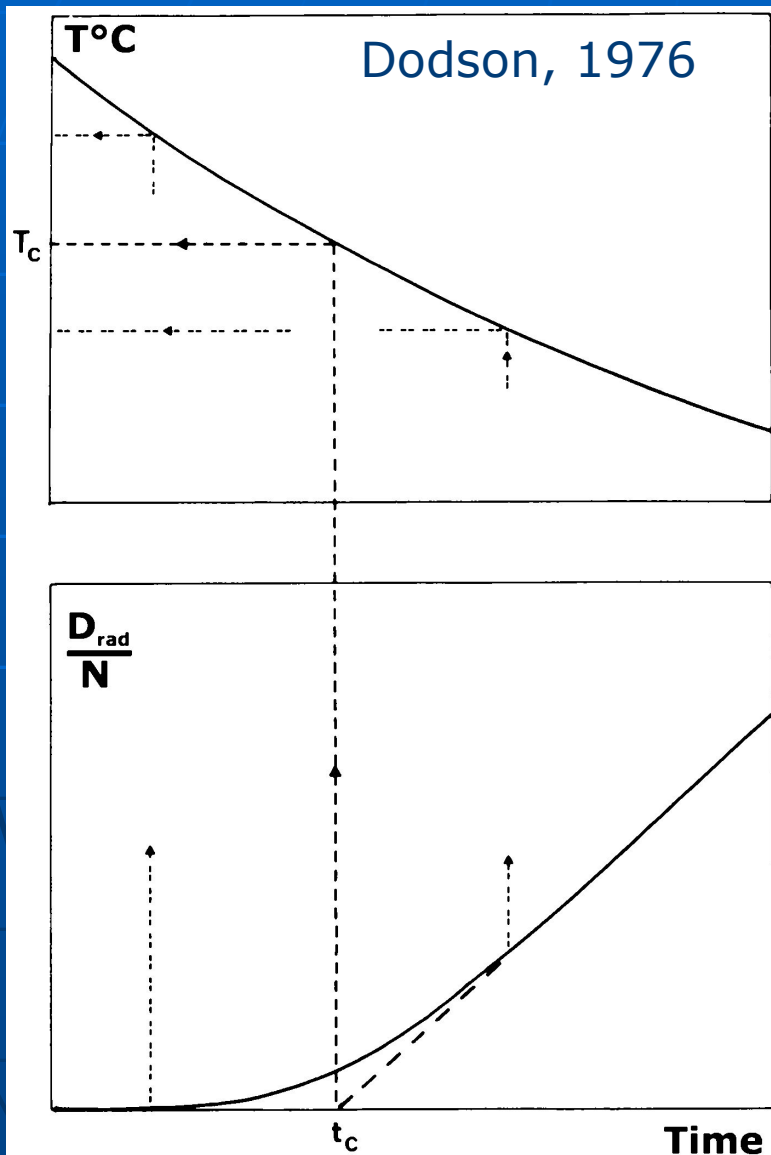


$$X = \sqrt{D \cdot t}$$

Распространение вещества путём диффузии



Теория "возрастов охлаждения" (cooling ages)



$$\frac{dT}{dt} = \frac{T_c - T_0}{t}$$

T_0 – современная температура

T_c – температура закрытия

t – измеренный возраст

$$T_c = \frac{R}{E} \ln \left[\frac{-A \cdot D_0}{r^2} \frac{RT_c^2}{E} / \frac{T_c - T_0}{t} \right]$$

E – энергия активации

r – радиус минерала

A – геометрический фактор

$A=8.7$ – для бесконечной пластины

$A=27$ – для бесконечного цилиндра

$A=55$ – для сферы

- Температура закрытия кристаллов флогопита диаметром 1 мм по отношению к Ar (Dodson, 1979):

$$D_0 = 0.75 \text{ см}^2/\text{с}$$

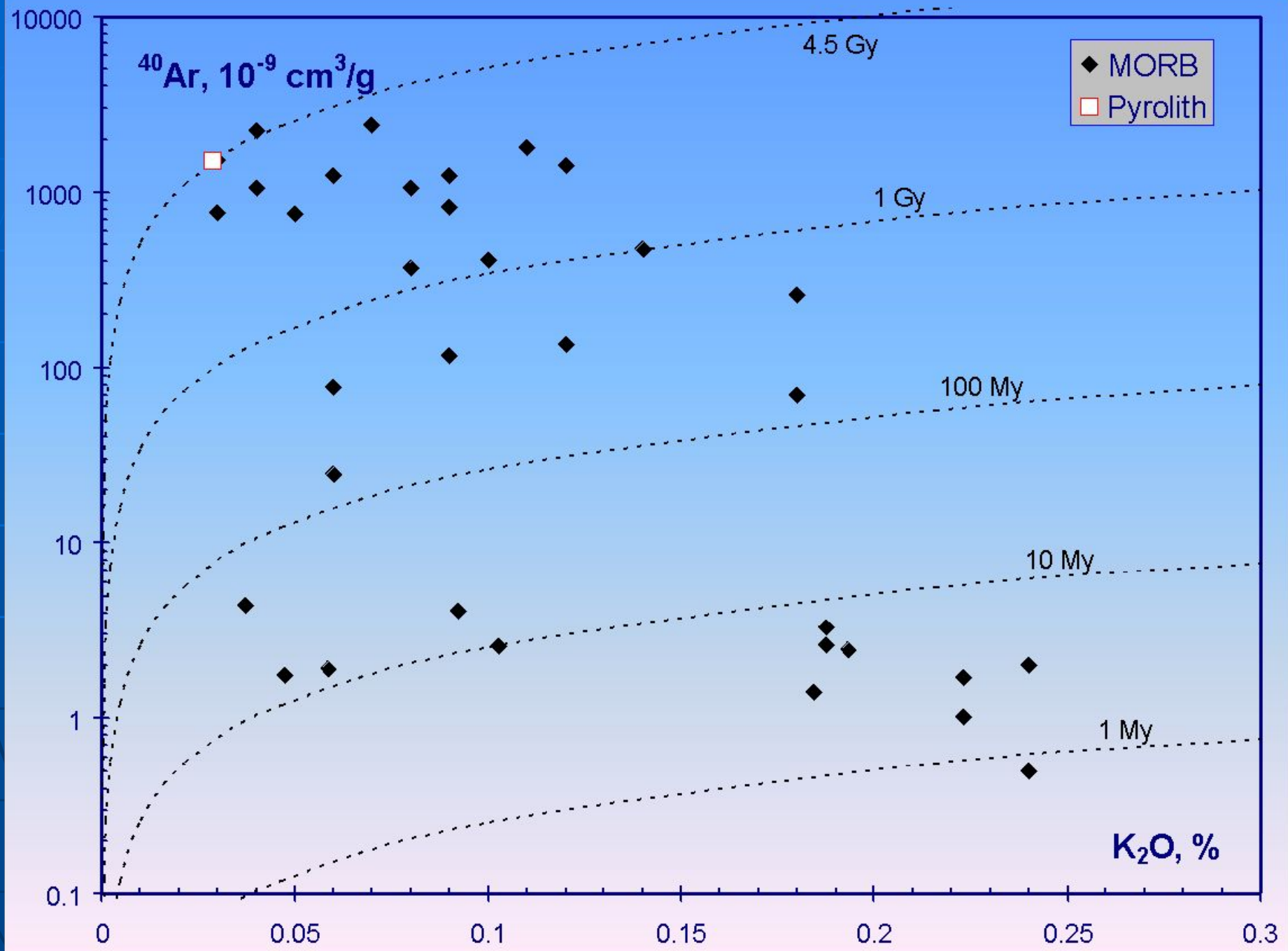
$$E = 58 \text{ ккал/моль}$$

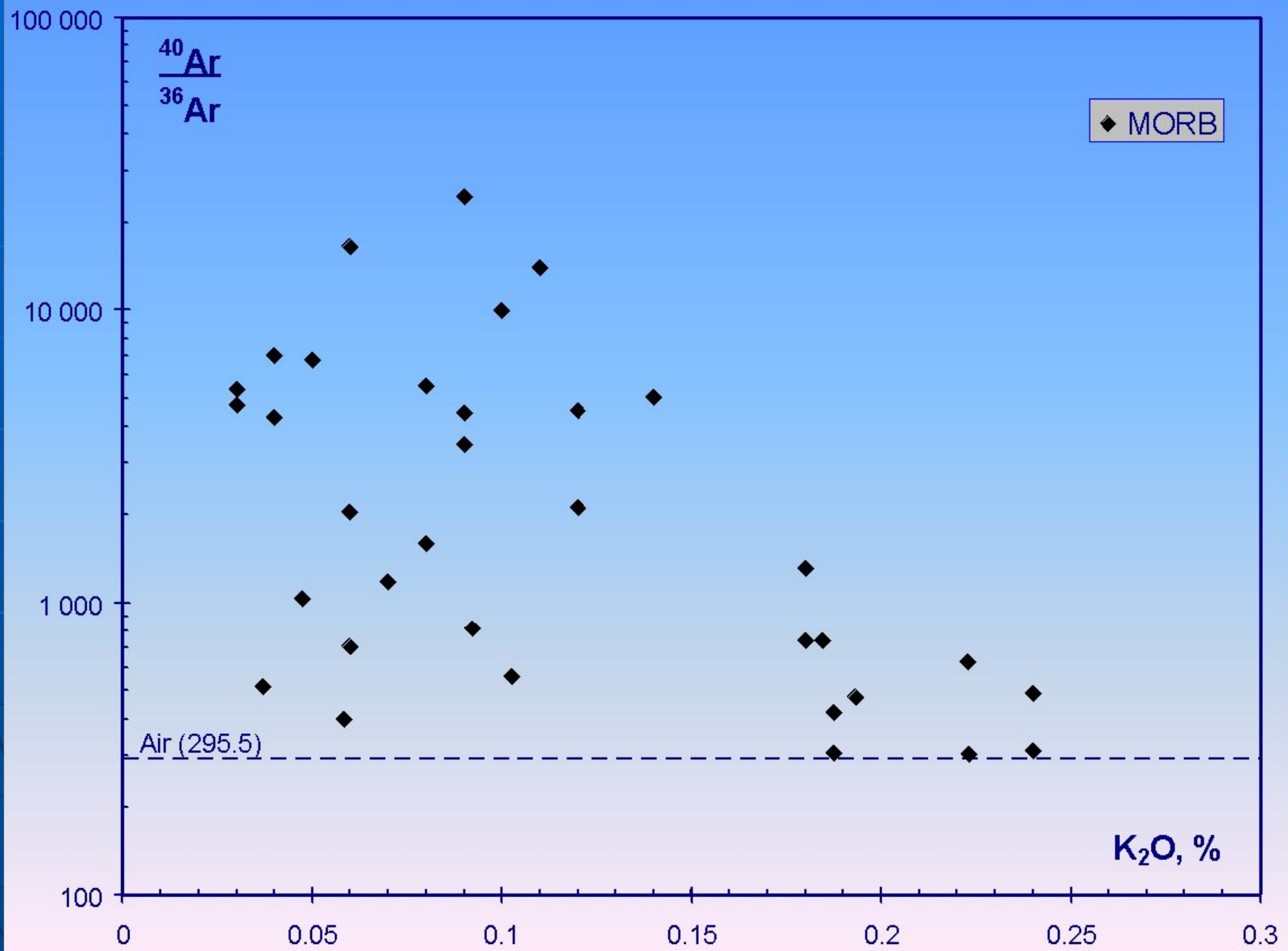
$$A = 27$$

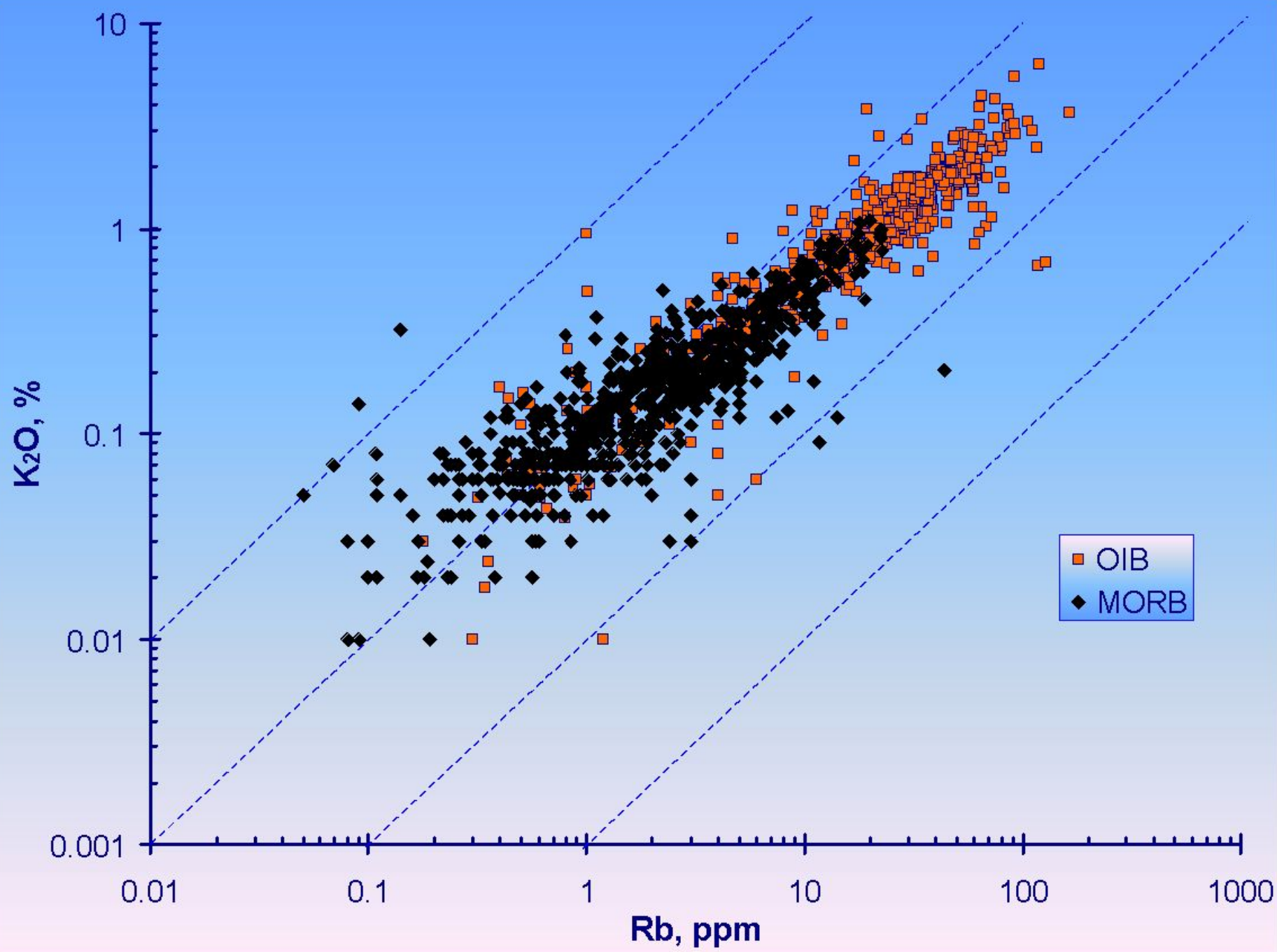
$$T_c = 464^\circ\text{C} \text{ при } dT/dt = 30^\circ\text{C/млн.лет}$$

$$T_c = 425^\circ\text{C} \text{ при } dT/dt = 3^\circ\text{C/млн.лет}$$

- Теория Додсона применима только лишь при отсутствии минеральных преобразований!







Задача 5

- Масса атмосферы Земли – $5.135 \cdot 10^{21}$ г
- Масса силикатной части Земли – $4.19 \cdot 10^{27}$ г
- $[Ar]_{\text{атм}} = 1.286$ вес.%
- Если допустить, что
 1. исходное количество ^{40}Ar пренебрежимо мало и
 2. весь накопленный за 4.56 млрд.лет радиогенный аргон находится в атмосфере,

то какова средняя концентрация калия в силикатной части Земли?

- $[K] = ?$, ppm
- Сравнить с имеющимися оценками содержания калия в пиролите