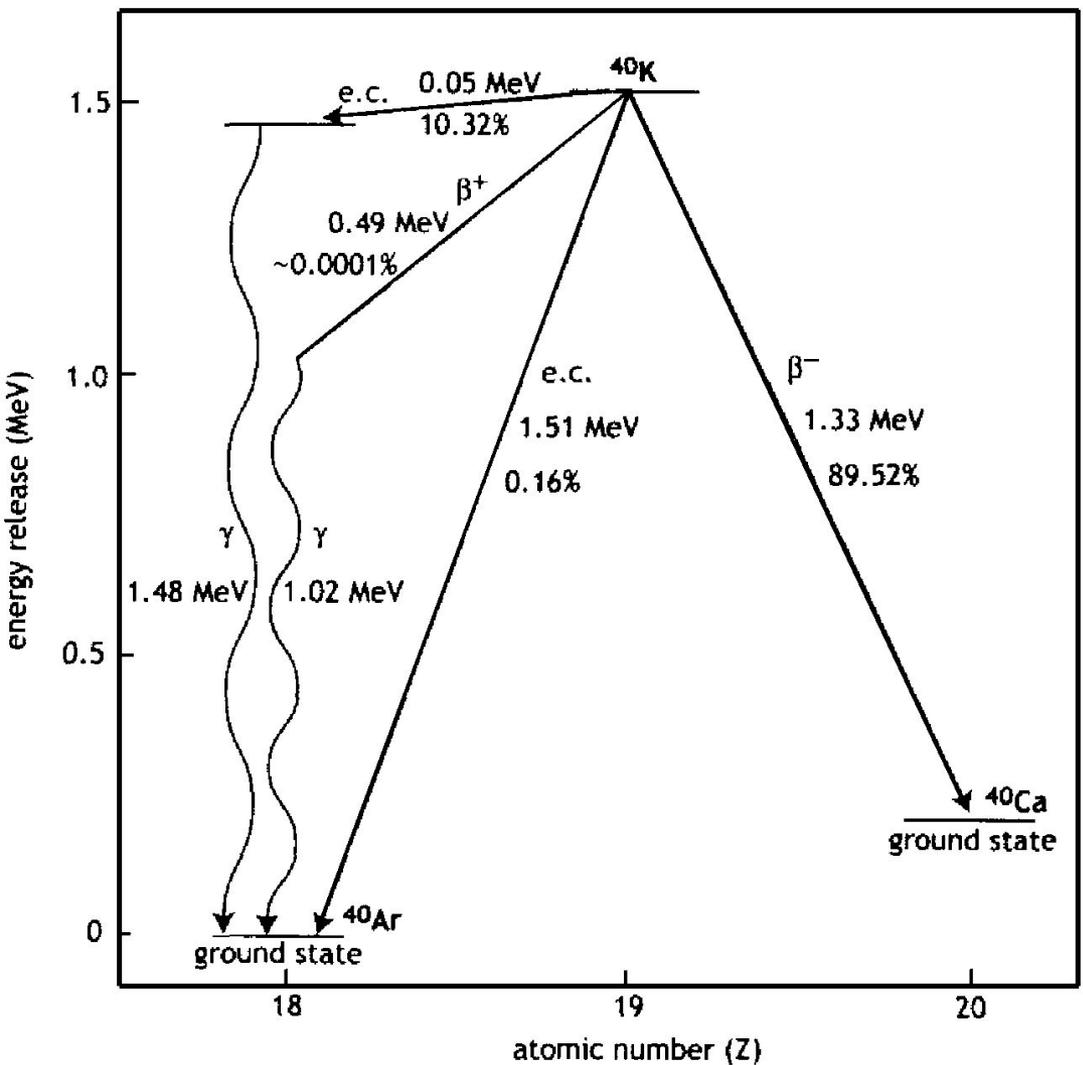


# К-Ar изотопная система



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



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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

$$AW_{40Ar} = 39.962$$

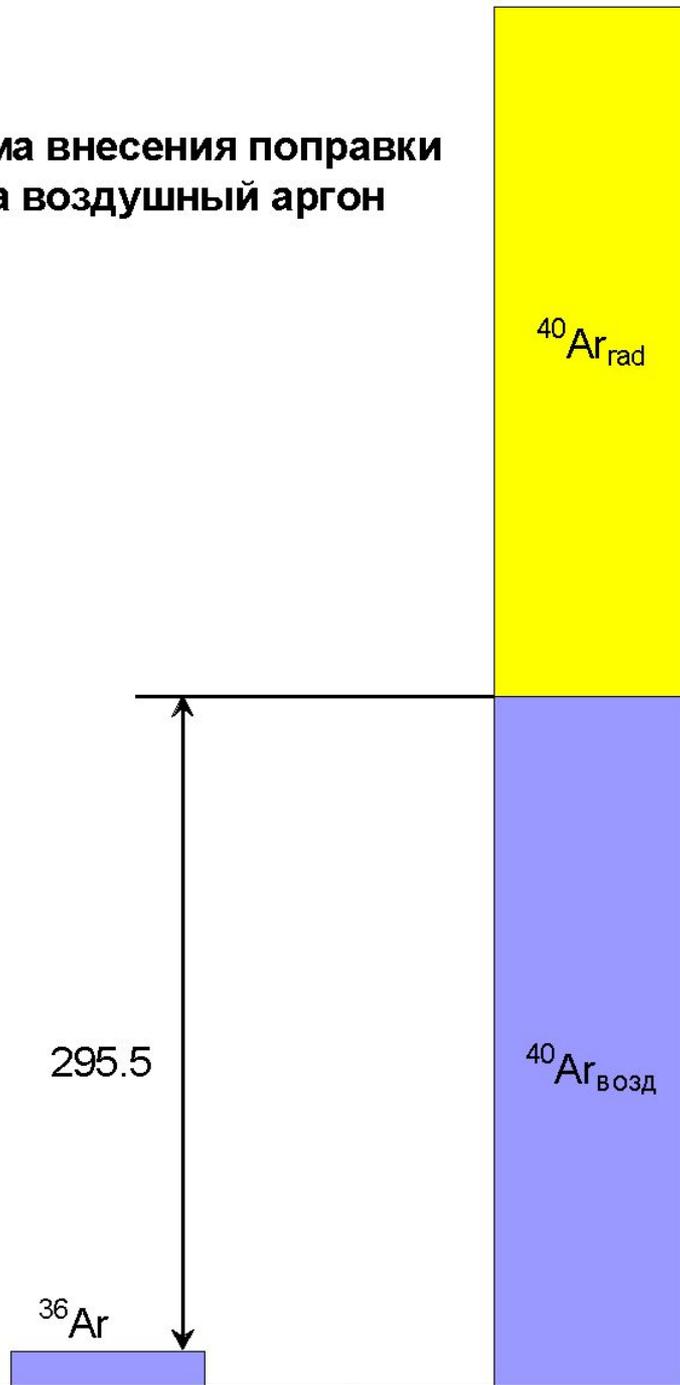
# Методы определения

- 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

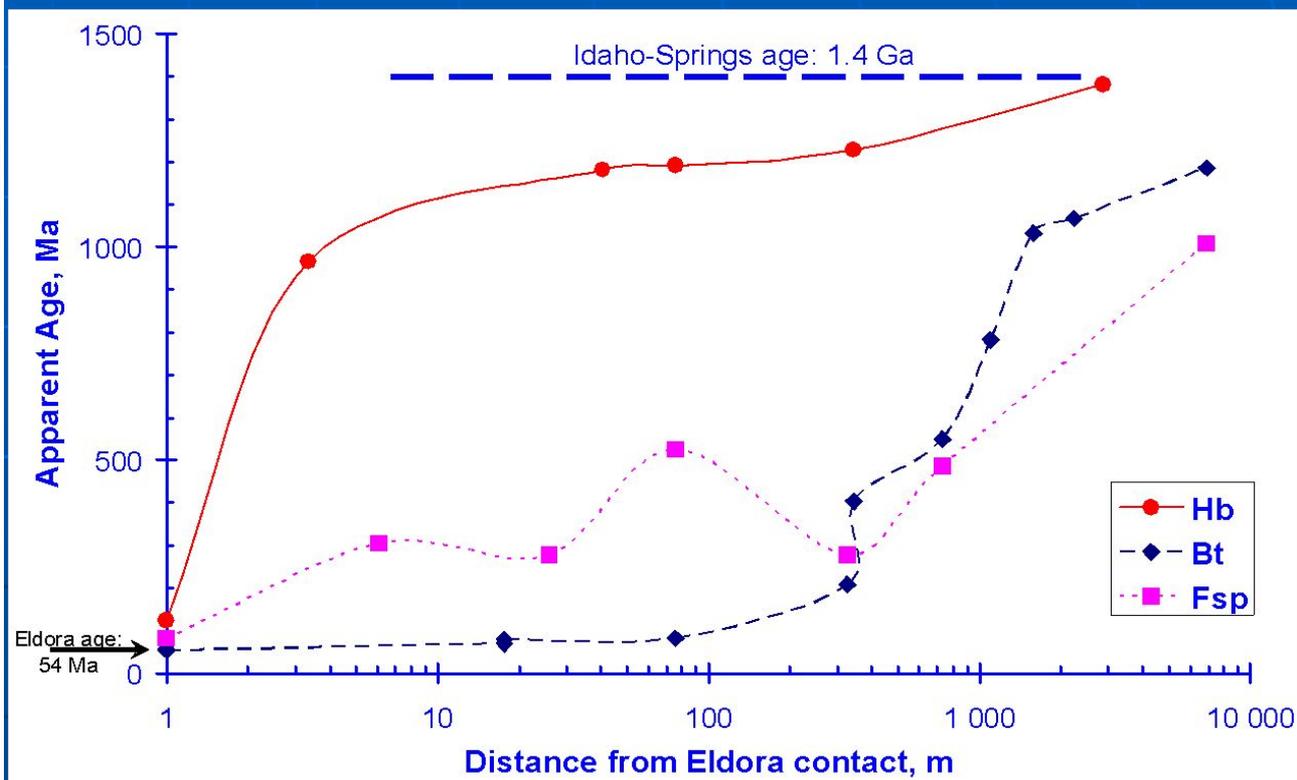
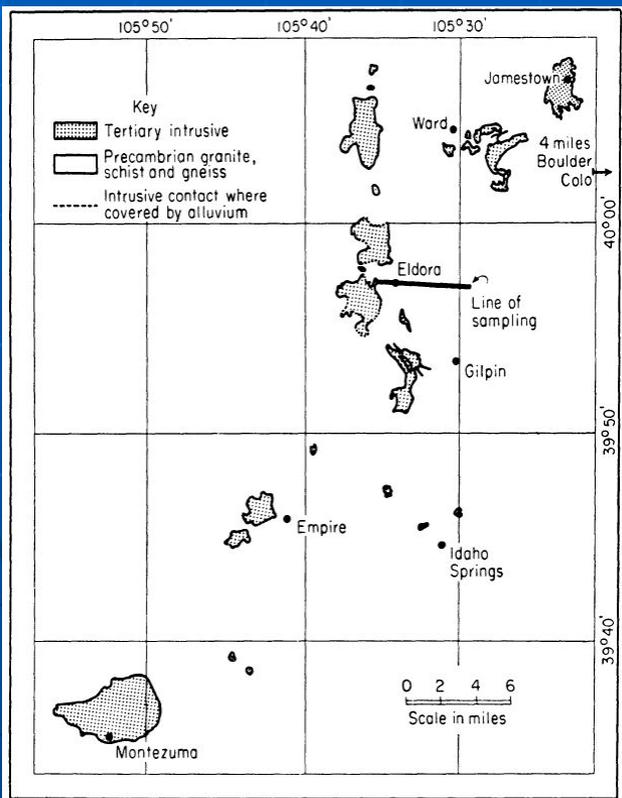
# Условия получения неискажённого значения возраста K-Ar методом

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

Как это проверить?

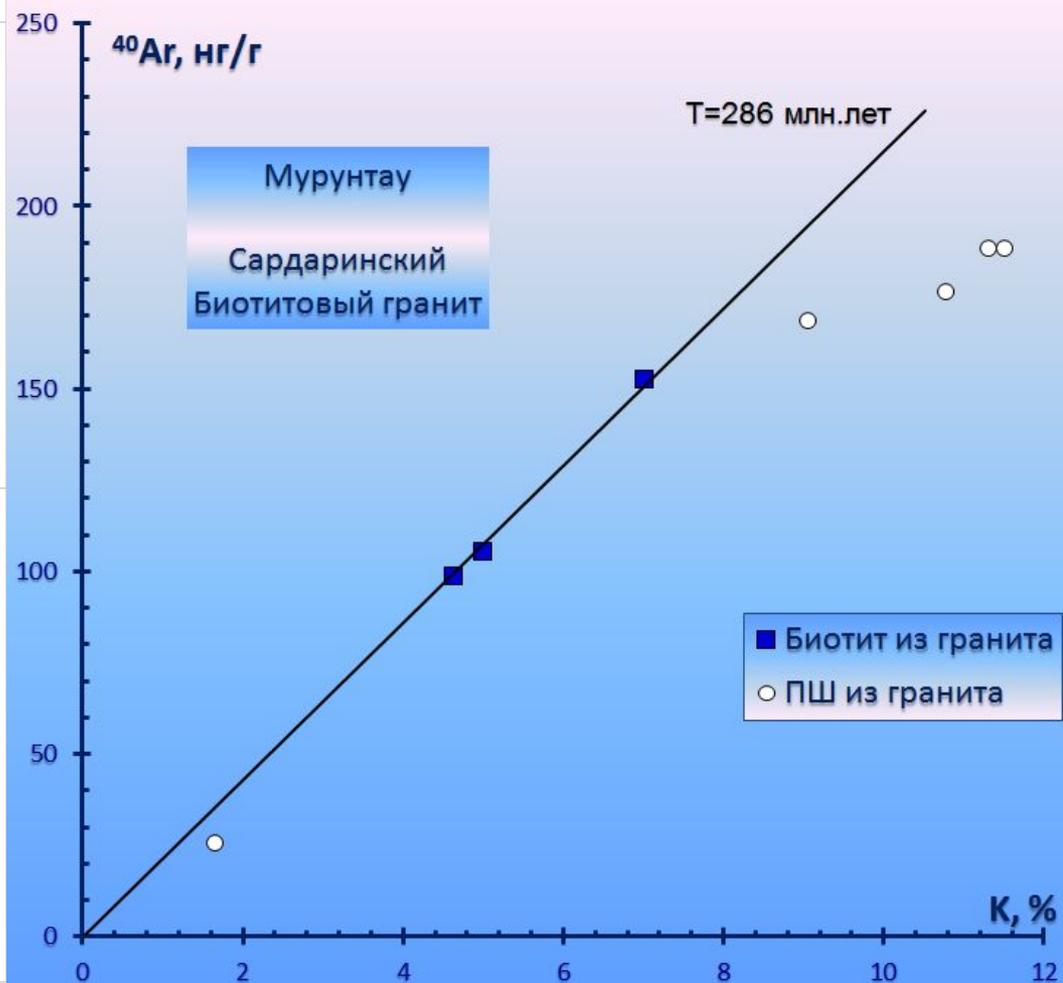
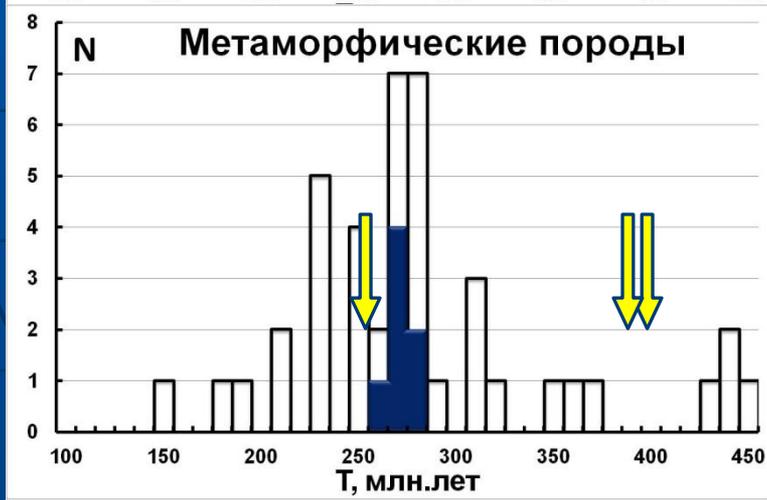
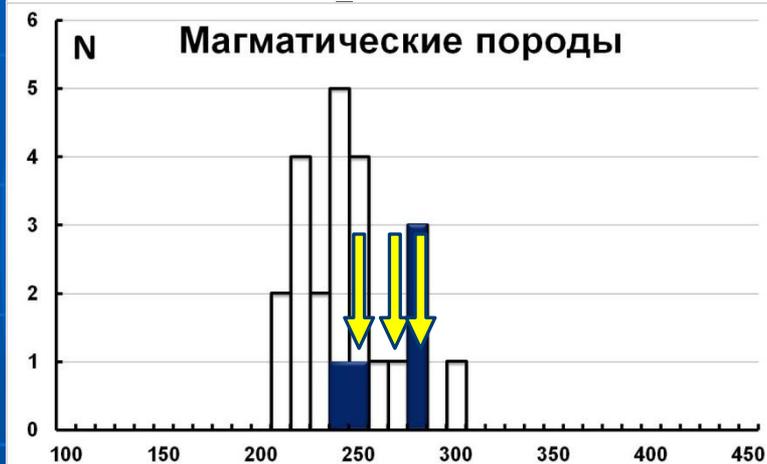
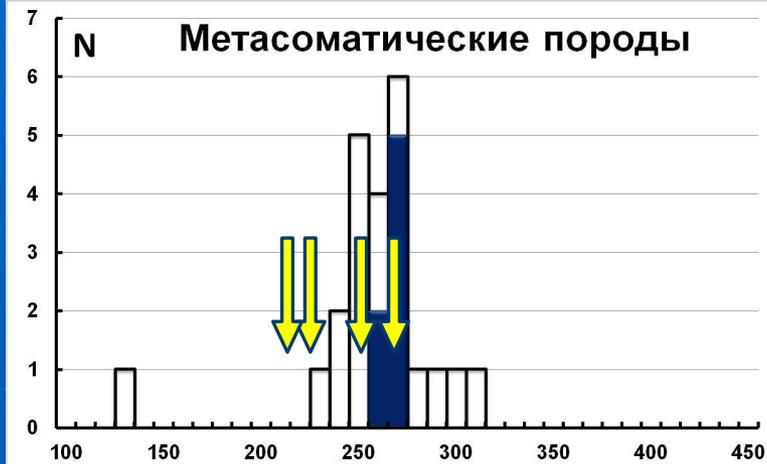
- Анализ минералов из разных образцов
- Анализ разных минералов из одного образца

# Термальное омоложение K-Ar системы минералов

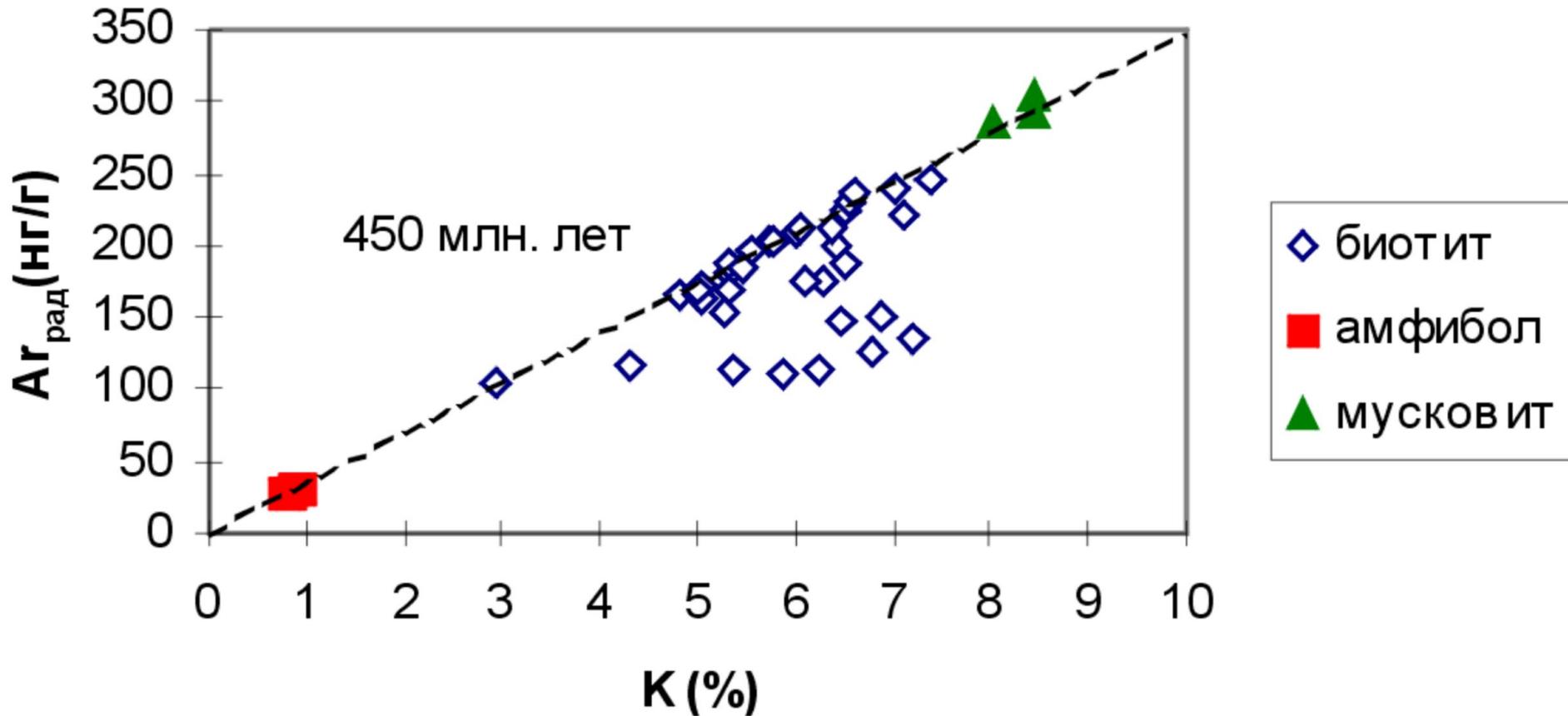


S.R.Hart. The Journal of Geology. 1964. V.72. P.493-525.

# Золоторудное месторождение Мурунтау (Центральные Кызылкумы)



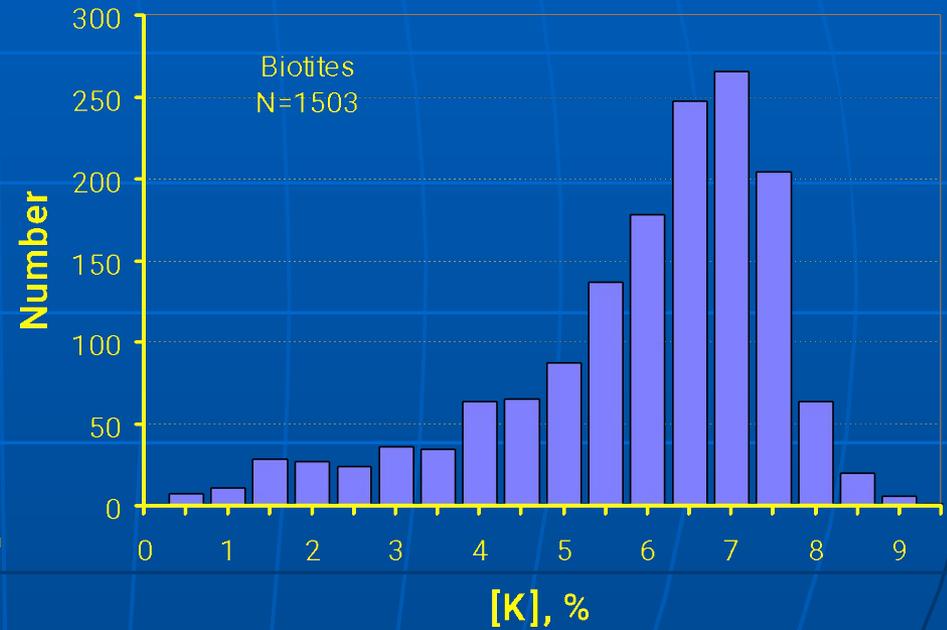
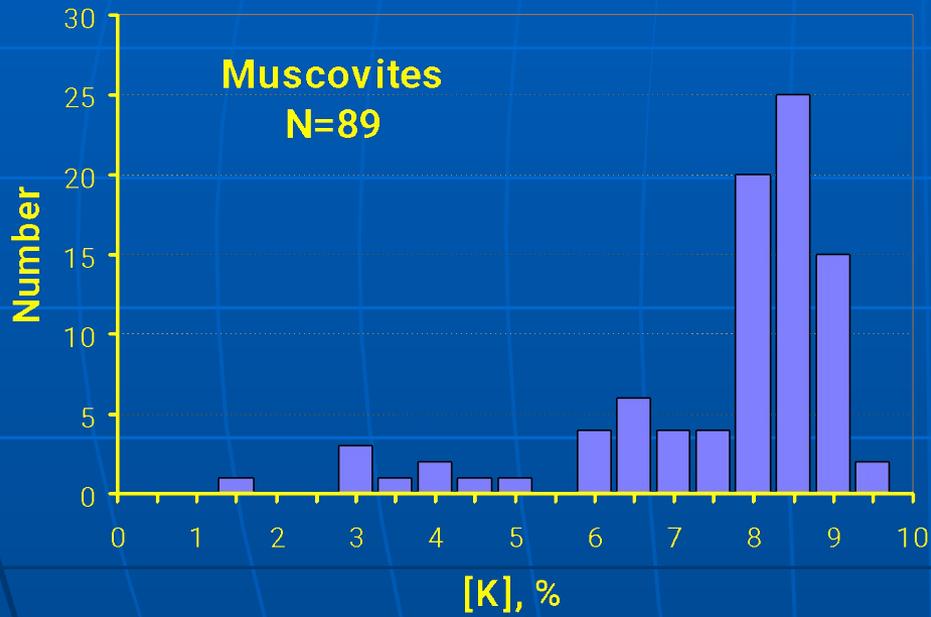
# Зерендинские граниты, С.Казахстан



Шатагин, 2001.

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

# Гранитоиды С.Казахстана



# Устойчивость K-Ar системы породообразующих минералов

- Эмпирический ряд устойчивости:

(Px,Hb) □ 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 K-Ar возраста по результатам анализа серицита, выделенного из кварц-серицитовых сланцев на месторождении Мурунтау

Место отбора	Исследов. материал	K, вес. %	<sup>40</sup> Ar, 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
$\infty$	1.960



метод геохронологии



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

$\tau$  – продолжительность облучения,

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

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

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

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

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.

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

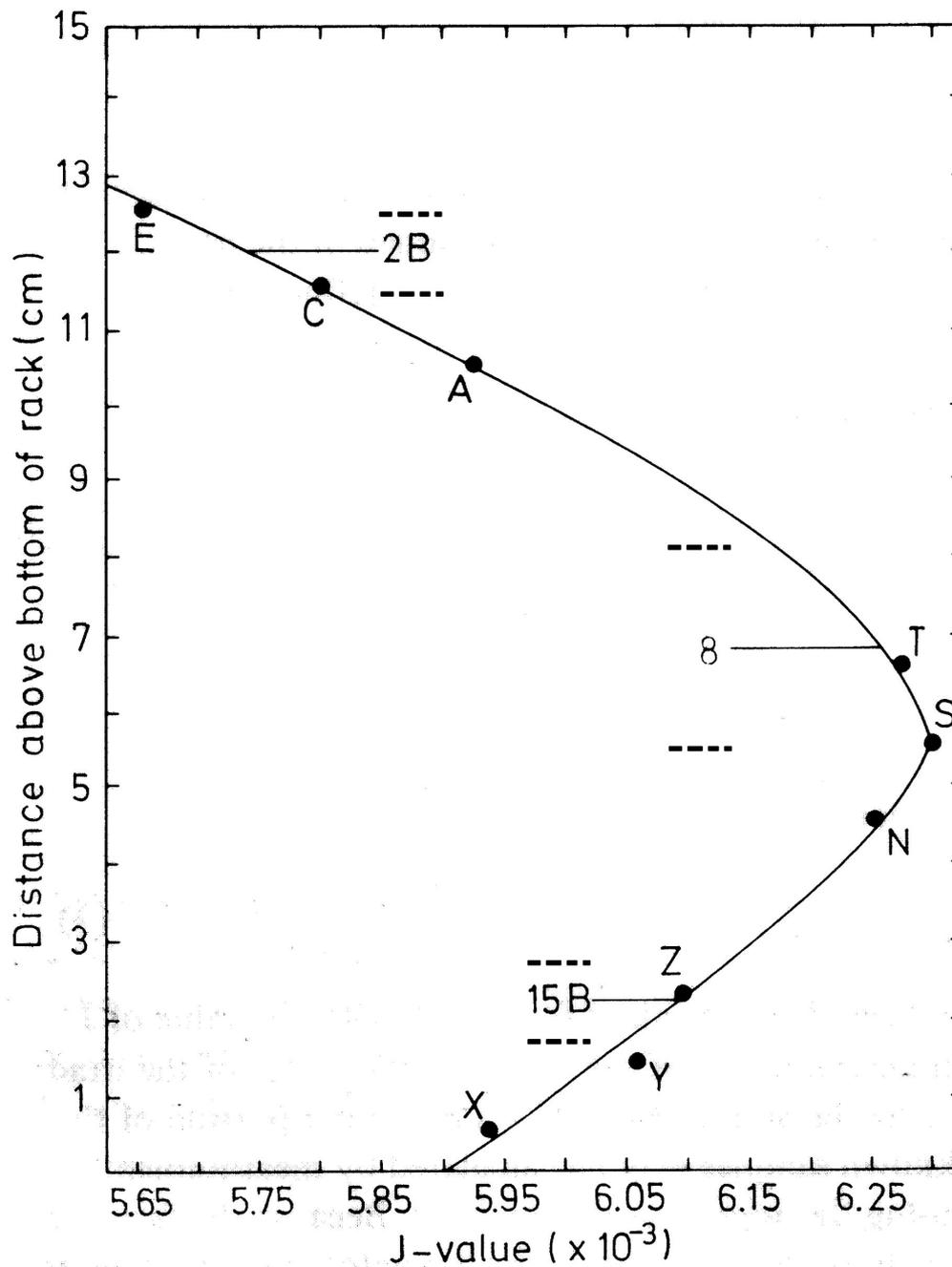
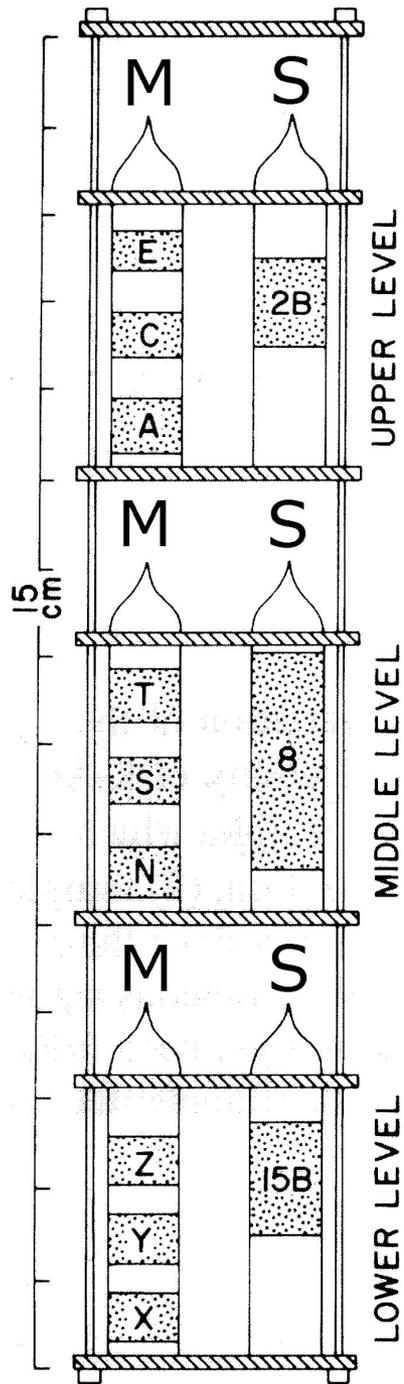
$$t = \frac{1}{\lambda} \ln \left( \frac{{}^{40}\text{Ar}_{\text{rad}}}{{}^{39}\text{Ar}} \cdot J + 1 \right)$$

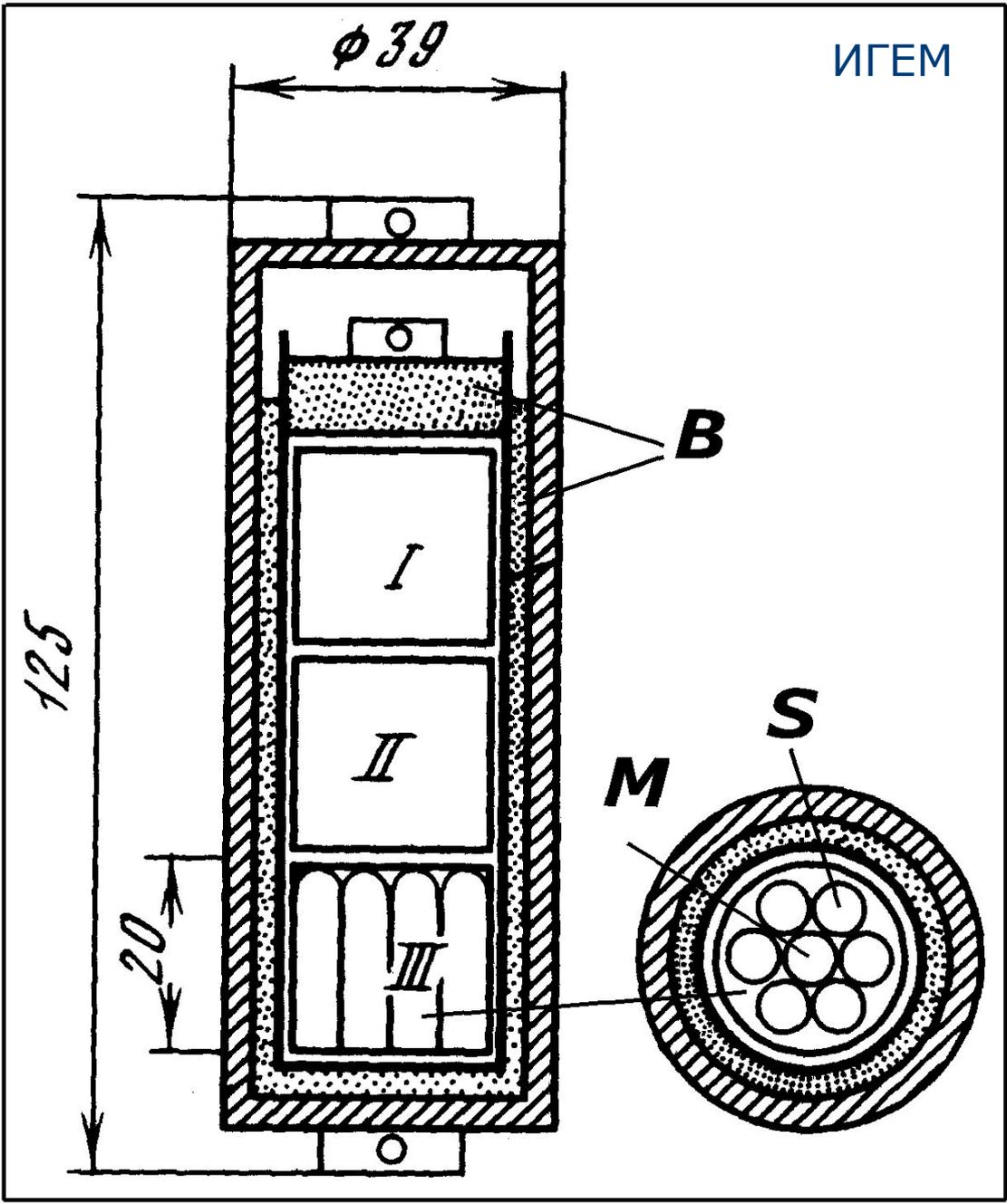
- Главное преимущество  $^{39}\text{Ar}$ - $^{40}\text{Ar}$  метода перед классическим K-Ar – локальность анализа вплоть до микронных точек

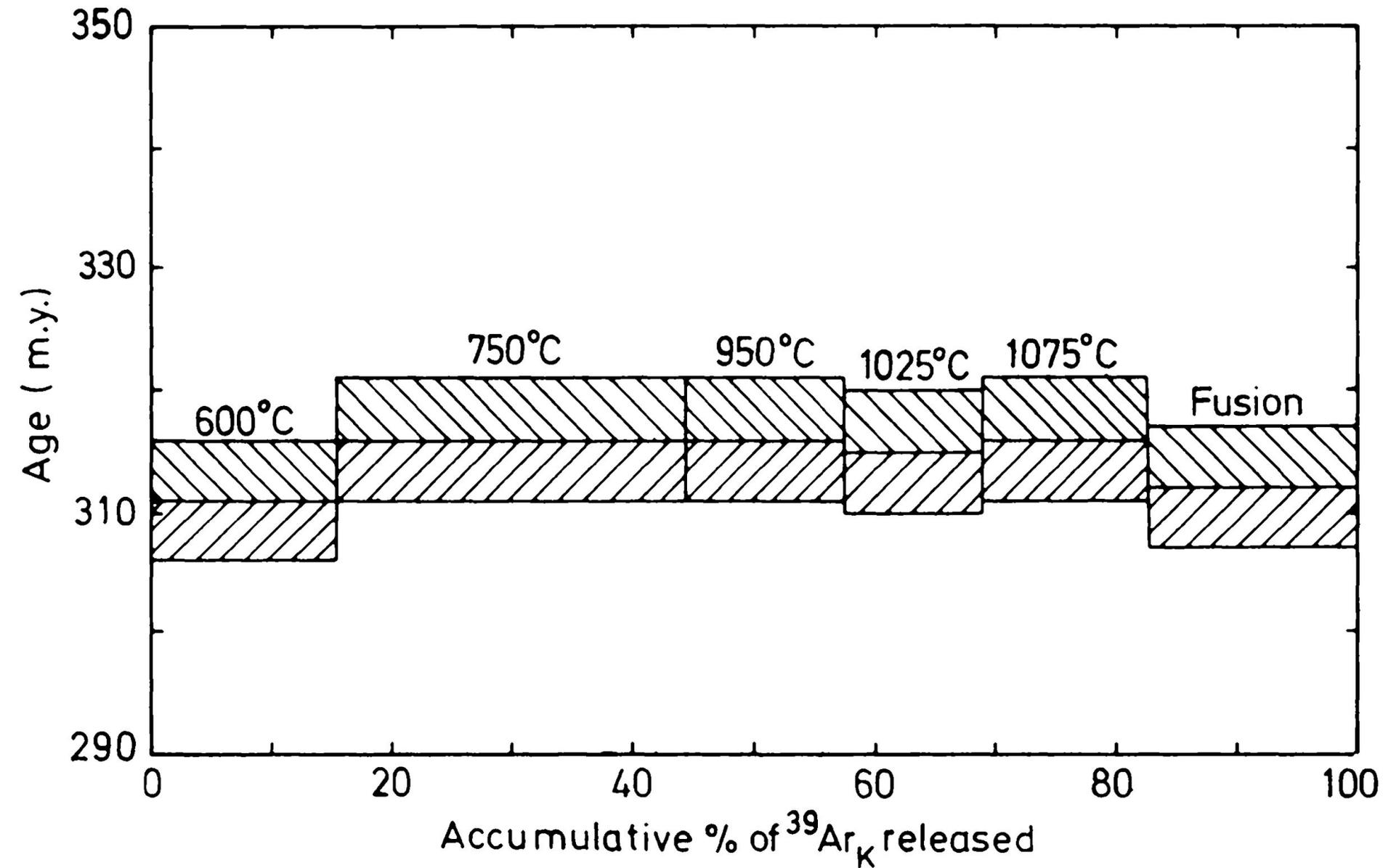
Отдача ядра  $^{39}\text{Ar}$  измерена напрямую в ряде работ и достигает 0.08 мкм.

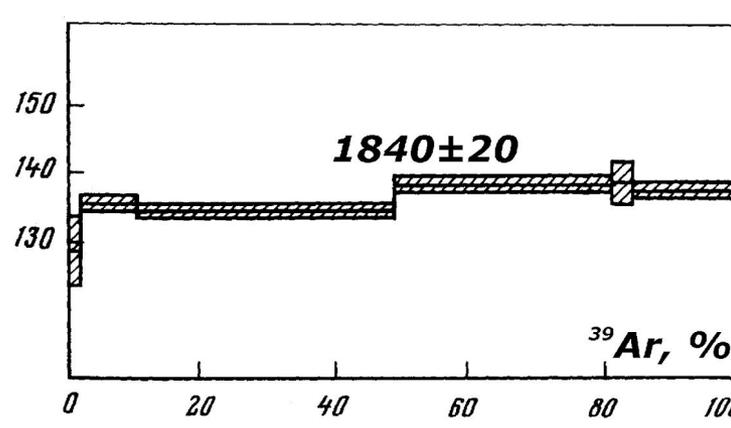
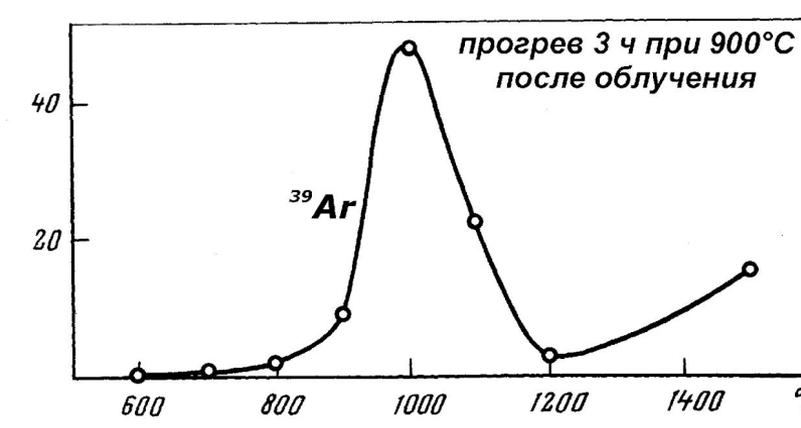
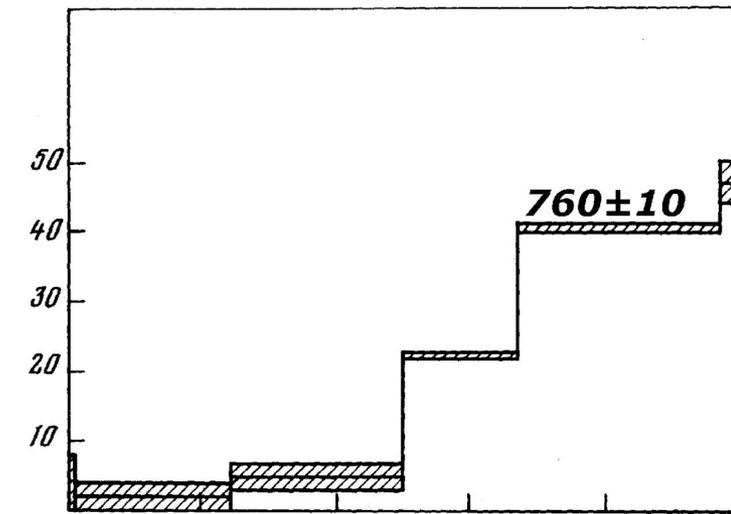
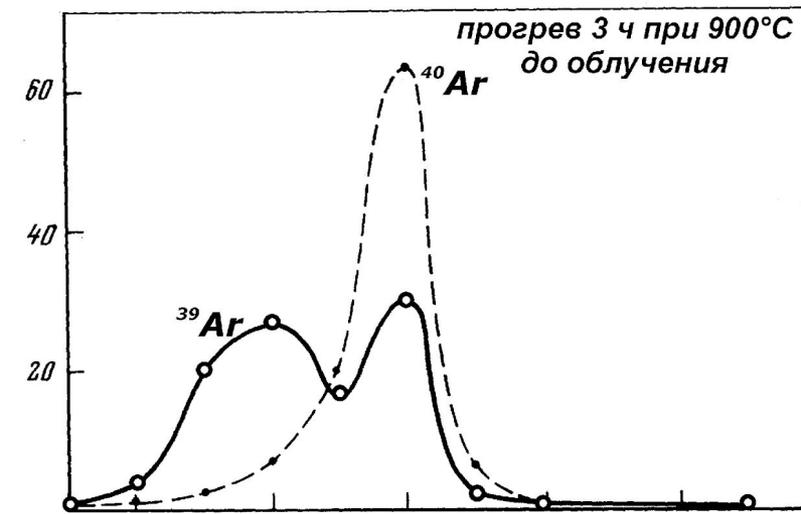
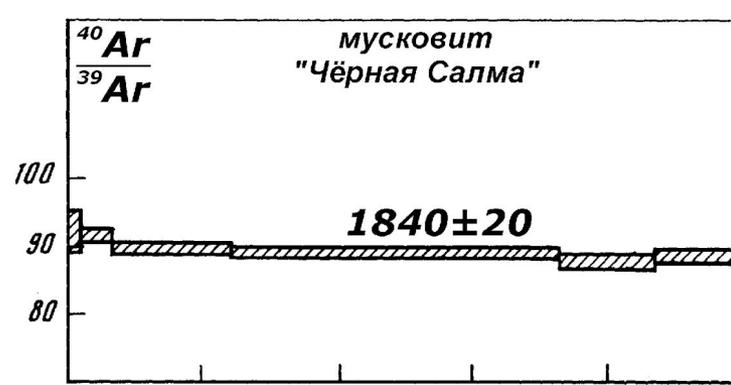
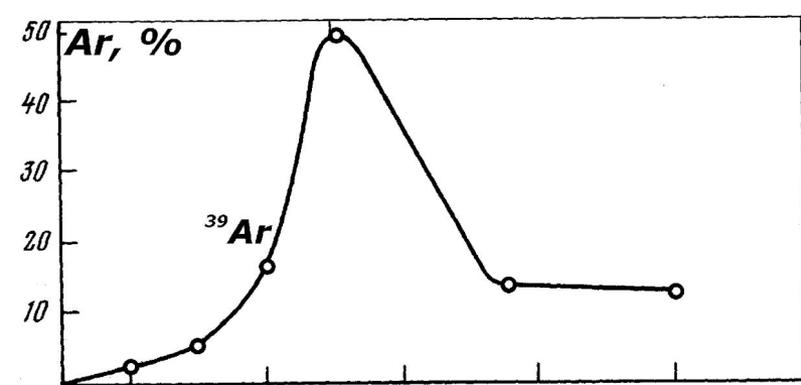
- Недостатки:
  - Относительность измерения (нужен хорошо аттестованный стандарт)
  - Большое количество помех

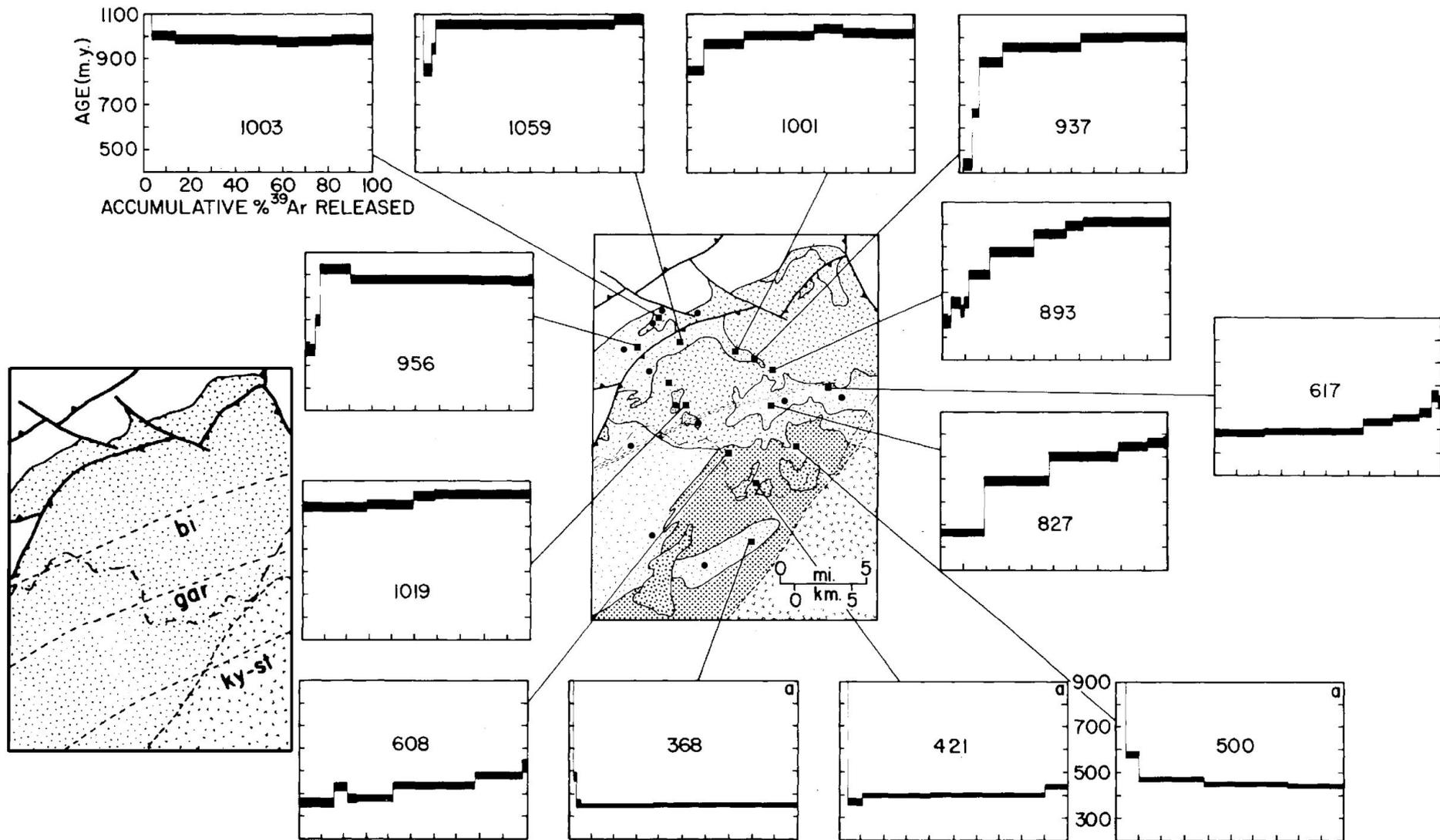




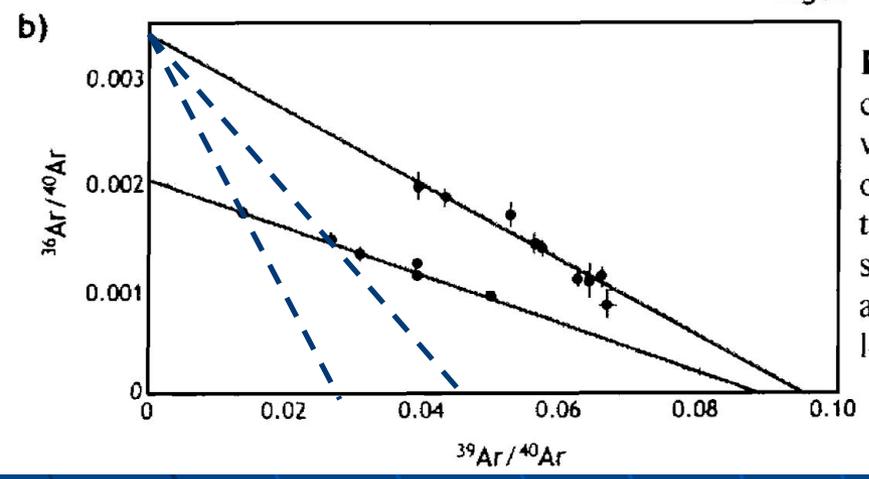
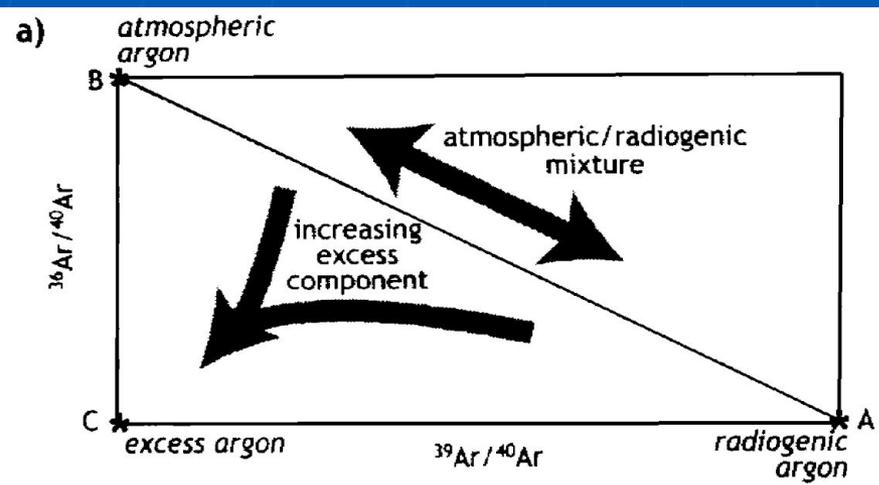
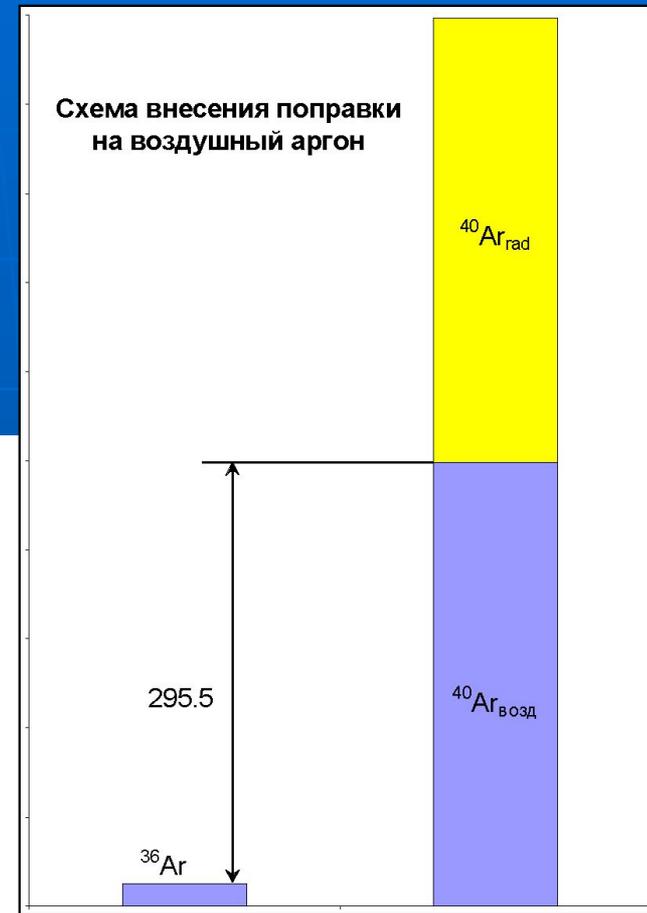








**Fig. 11.**  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  age spectra of hornblende from variably retrograded basement gneisses in the west-central Blue Ridge (from Dallmeyer, 1975a). Similar coordinates (*upper left*) used for all spectra except three on *lower right (a)* which have different vertical scale. Estimated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



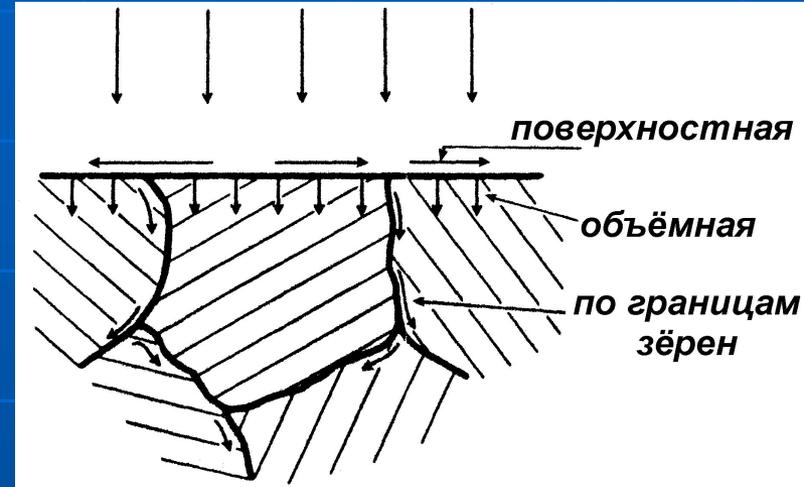
**Figure 3.** (a) An argon isotope correlation diagram, showing a correlation between atmospheric and radiogenic argon components which form an isochron. Any pure  $^{40}\text{Ar}$  component would lie at the origin and thus any excess argon component tends to pull the point B towards the origin. (b) 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 ( $\partial\mu/\partial x$ ).

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

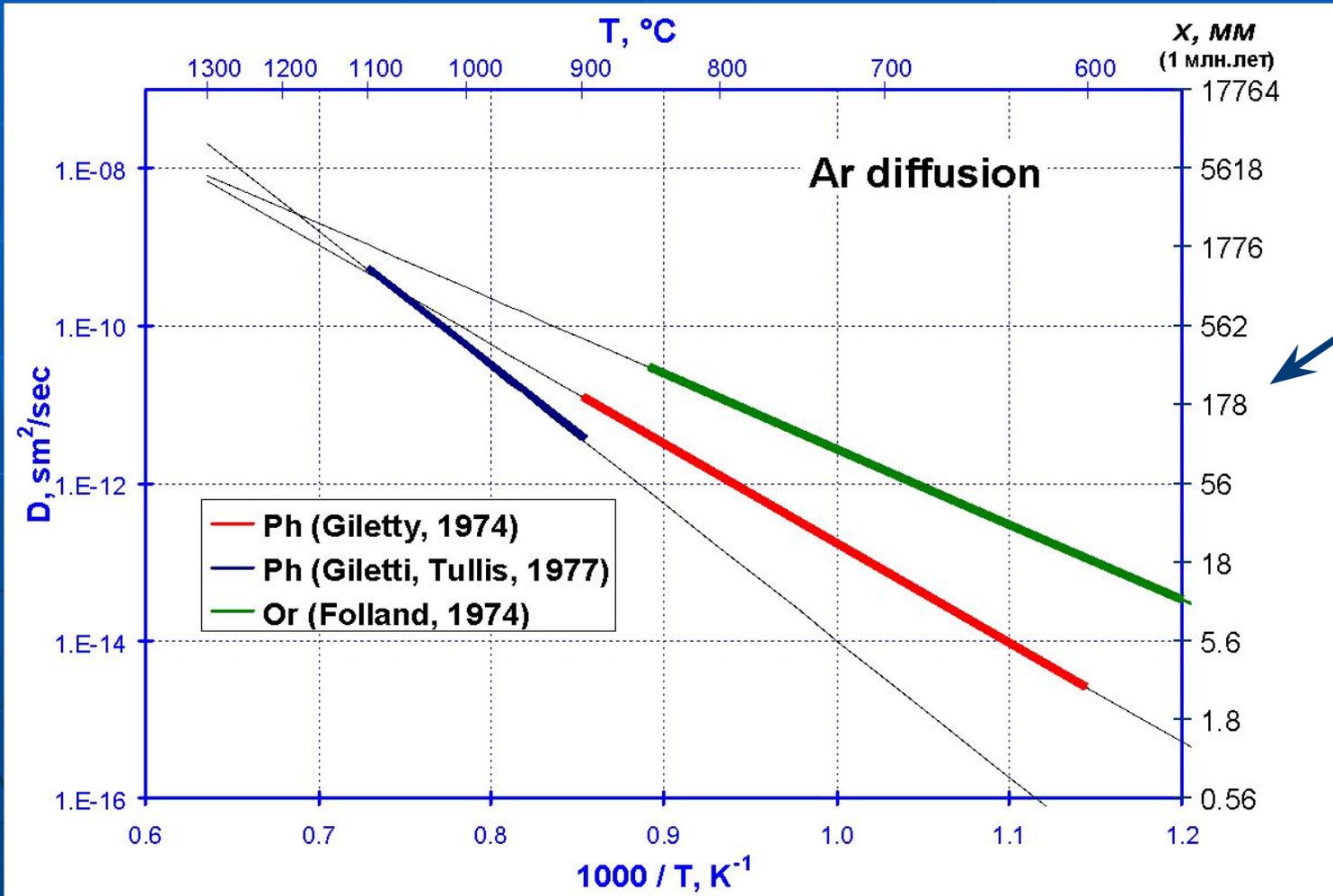
- Химическая диффузия (взаимодиффузия, интердиффузия)
- Диффузия примесей



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

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

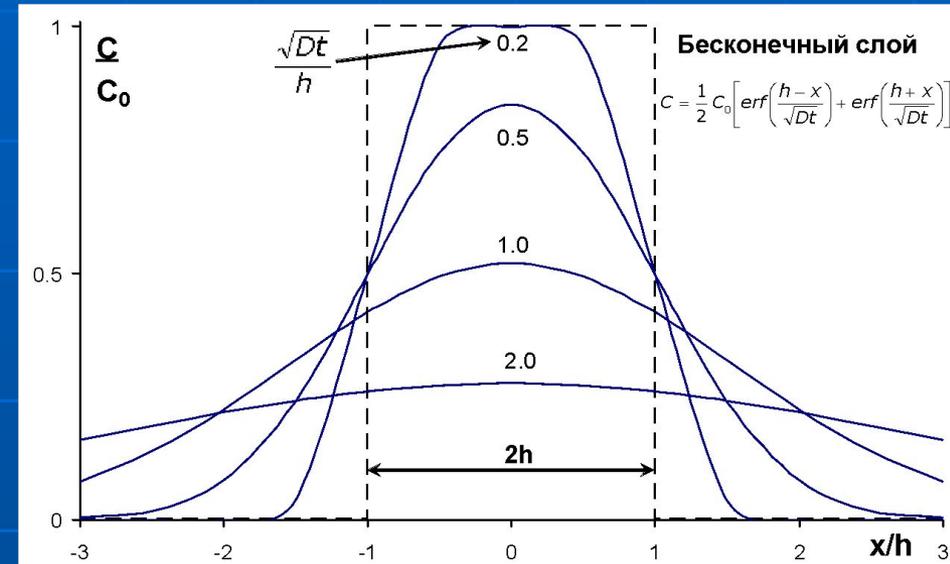
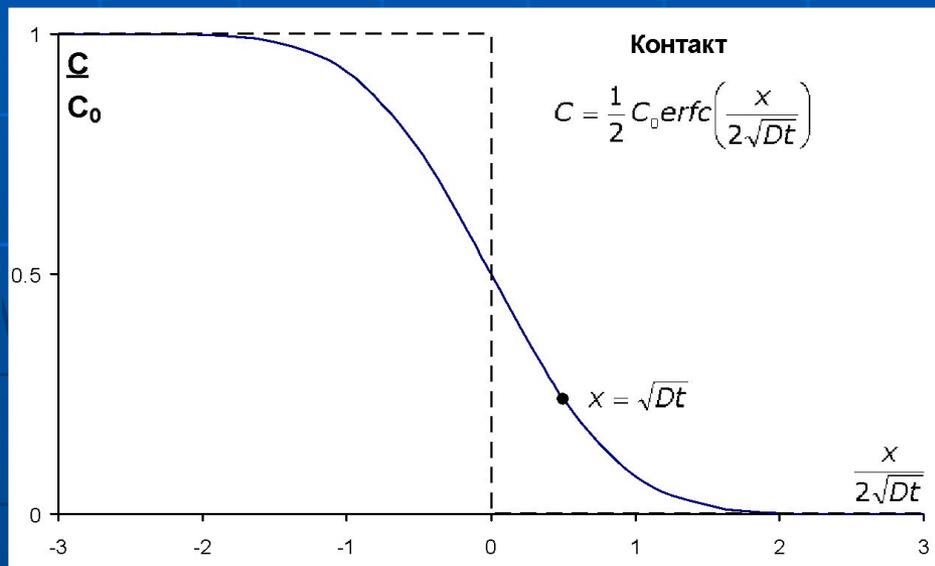
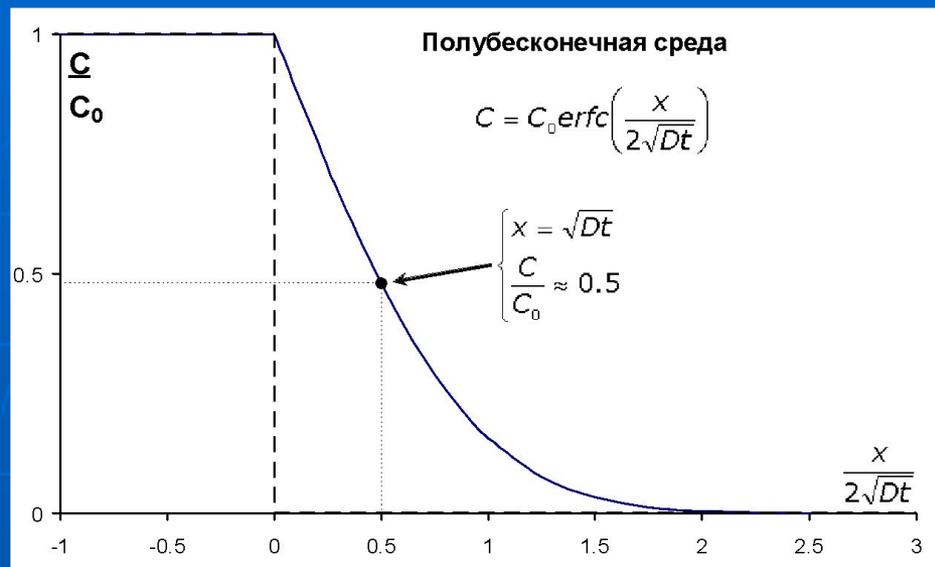
E	D и D <sub>0</sub>	R
Дж/моль	м <sup>2</sup> /с	8.314 Дж/(К·моль)
Кал/моль	см <sup>2</sup> /с	1.985 Кал/(К·моль)



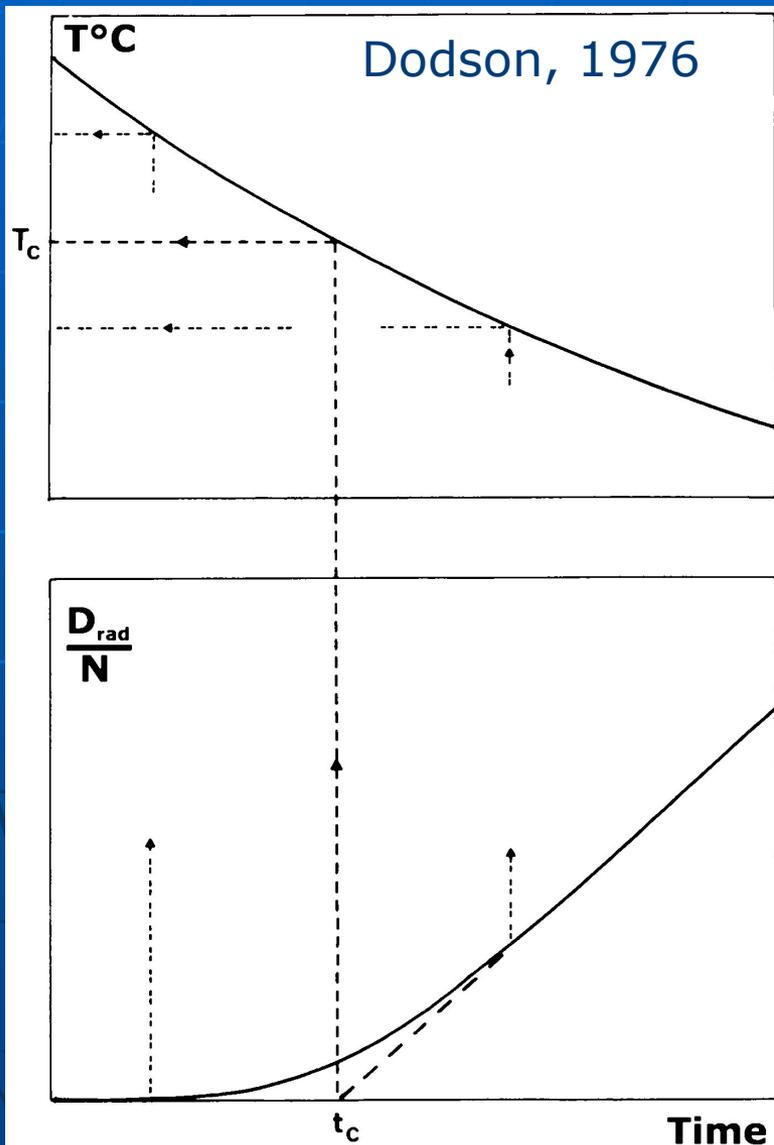
$$x = \sqrt{D \cdot t}$$



# 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):

$$D_0 = 0.75 \text{ см}^2/\text{с}$$

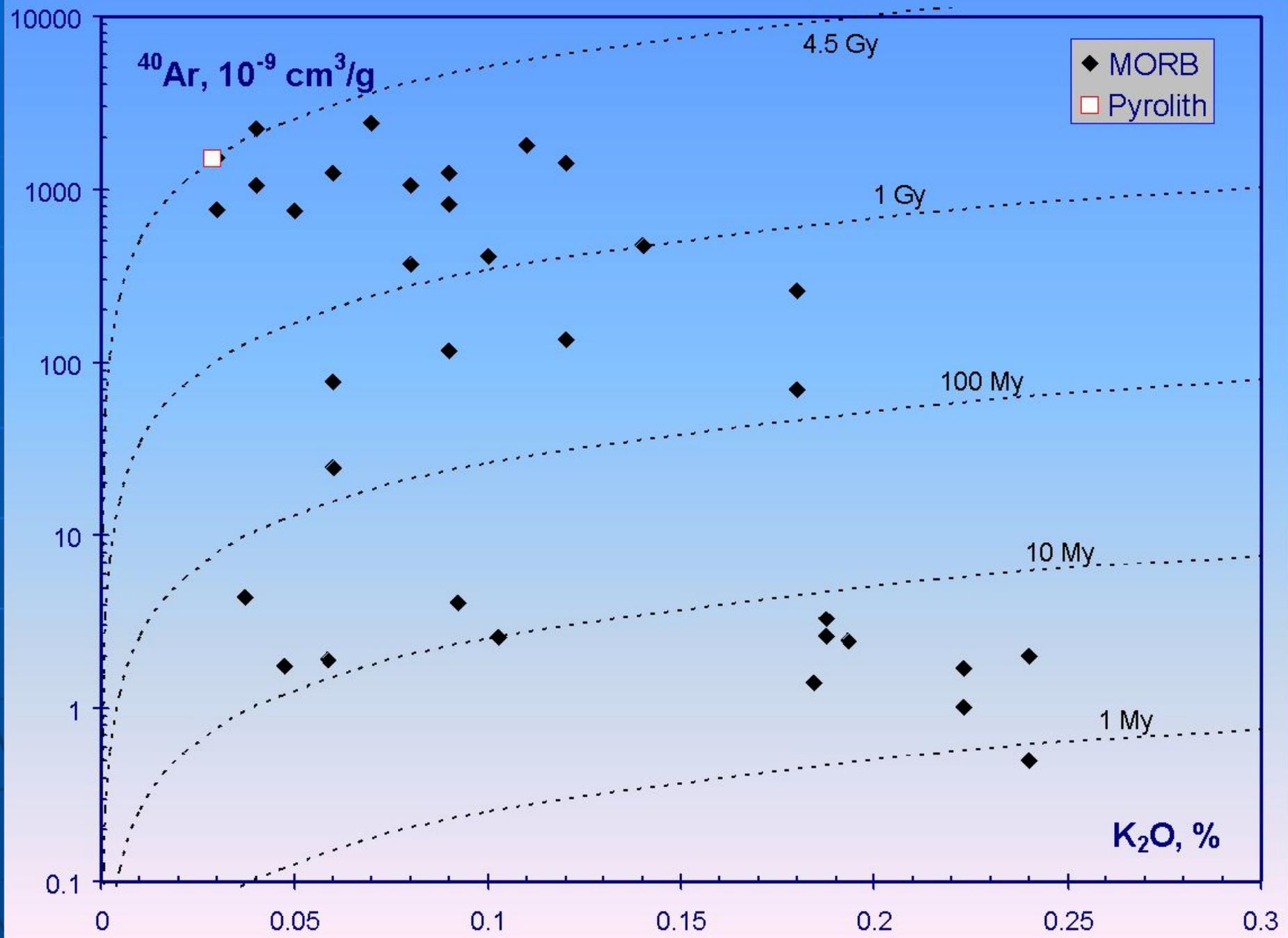
$$E = 58 \text{ ккал/моль}$$

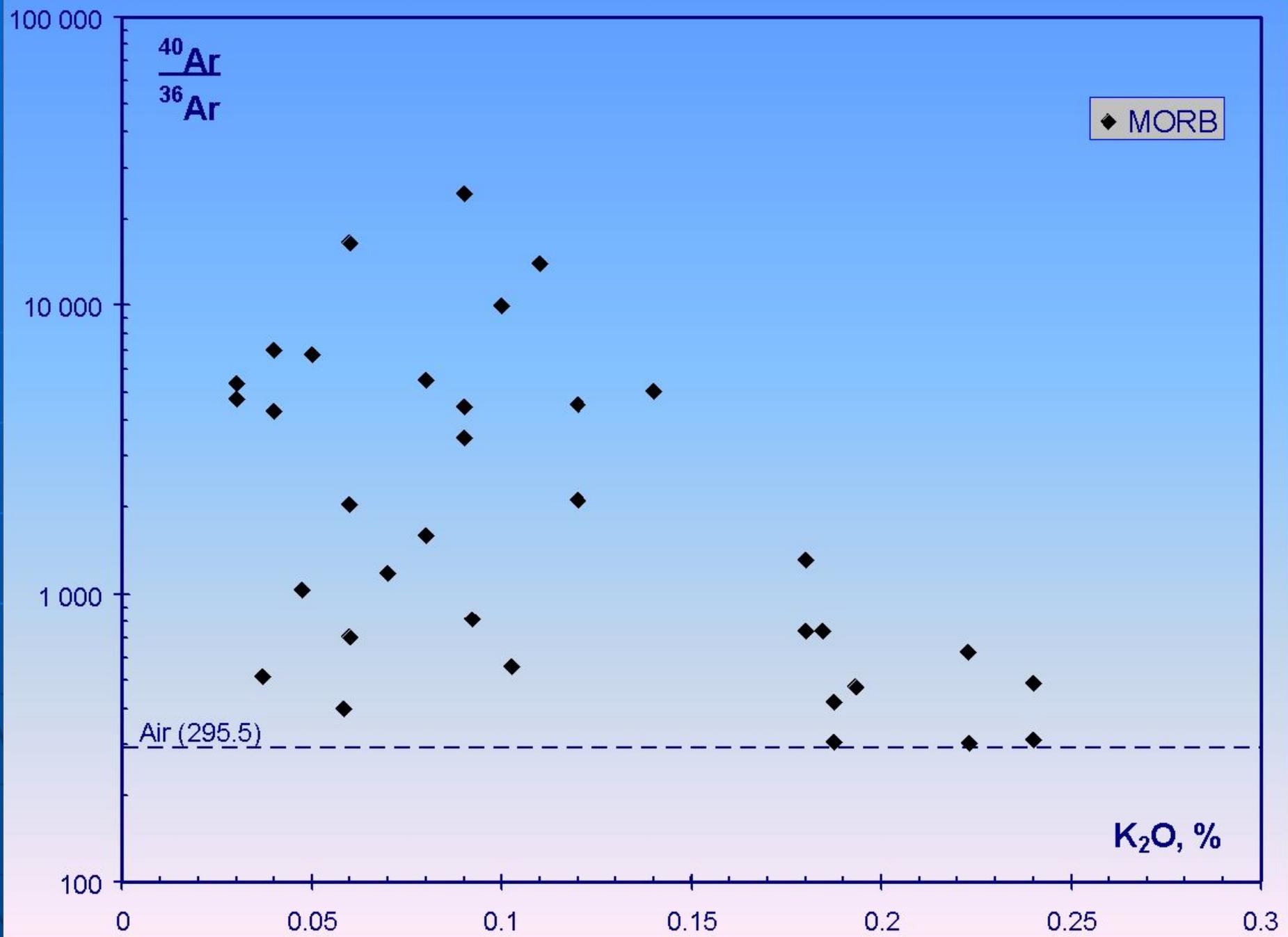
$$A = 27$$

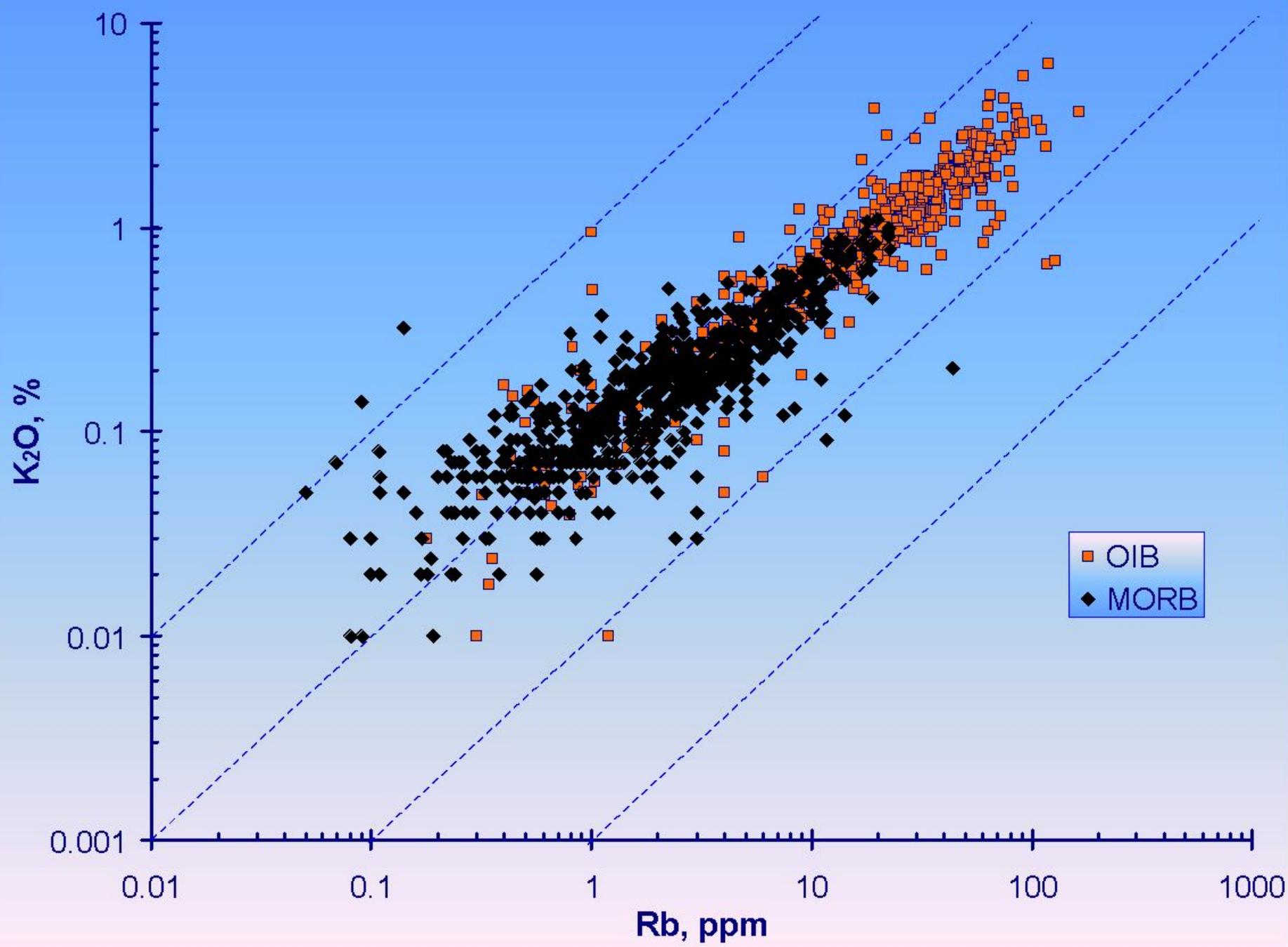
$$T_c = 464^\circ\text{C} \text{ при } dT/dt = 30^\circ\text{C/млн.лет}$$

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

- 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  $^{40}\text{Ar}$  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