

ПЕТРОЛОГИЯ,

часть 2. Магматизм

Лекция 3. Реконструкция физико-химических условий протекания магматических процессов

Нуклеация и рост кристаллов, закон Стокса, кумулятивные и порфиновые структуры, последовательность кристаллизации, Распределение кристаллов по размерам (CSD), зональность кристаллов, расплавные включения и использование ликвидусных геотермометров, признаки реакционных взаимоотношений кристаллов с расплавом, использование реакций для определения условий кристаллизации.

каф.петрологии
Геологический факультет МГУ
2015

Рост кристаллов

ТОЛЬКО
ДЛЯ ГРУПП ГЕОХИМИКОВ МГУ

HEW LYSTENITE CRYSTALS (1sec-30sec)

IGOR MONTAZE, EMERSON MACHI and ANDRE AMBROSIO



Нуклеация кристаллов

переохлаждение (ΔT) – разница температуры между температурой термодинамического равновесия и реальной температурой системы



W.Ostwald, 1897

Для образования зародыша кристалла необходима дополнительная энергия – энергия нуклеации.

$$\Delta G = G_c - G_l = \frac{4}{3} * \frac{\pi r^3 (g_c - g_l)}{V} + 4\pi r^2 \cdot E_a$$

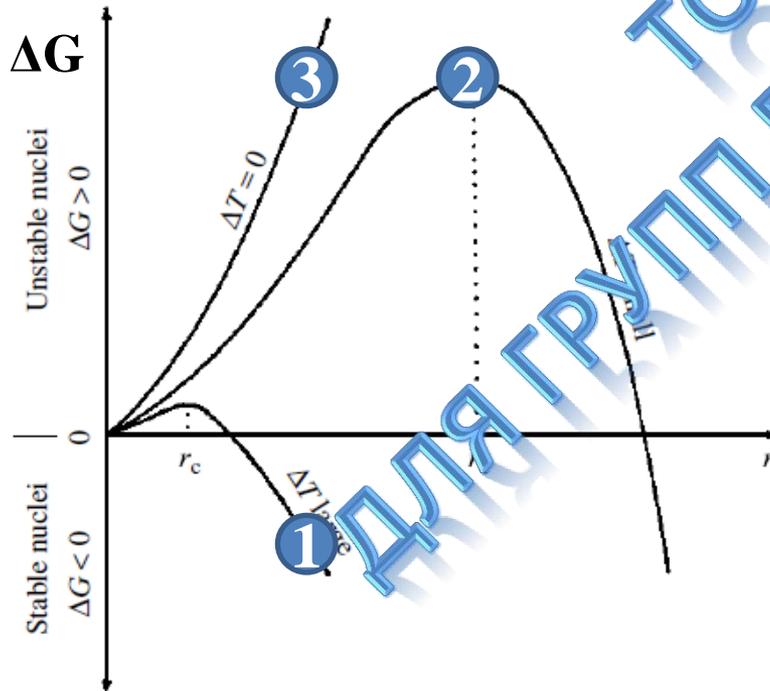
Уравнение гомогенной нуклеации

Скорость гомогенной нуклеации

- 1) При большом переохлаждении размер зародыша меньше
- 2) При малом переохлаждении размер зародыша больше
- 3) При нулевом переохлаждении зародыши не образуются



I. Carmichael, 1974

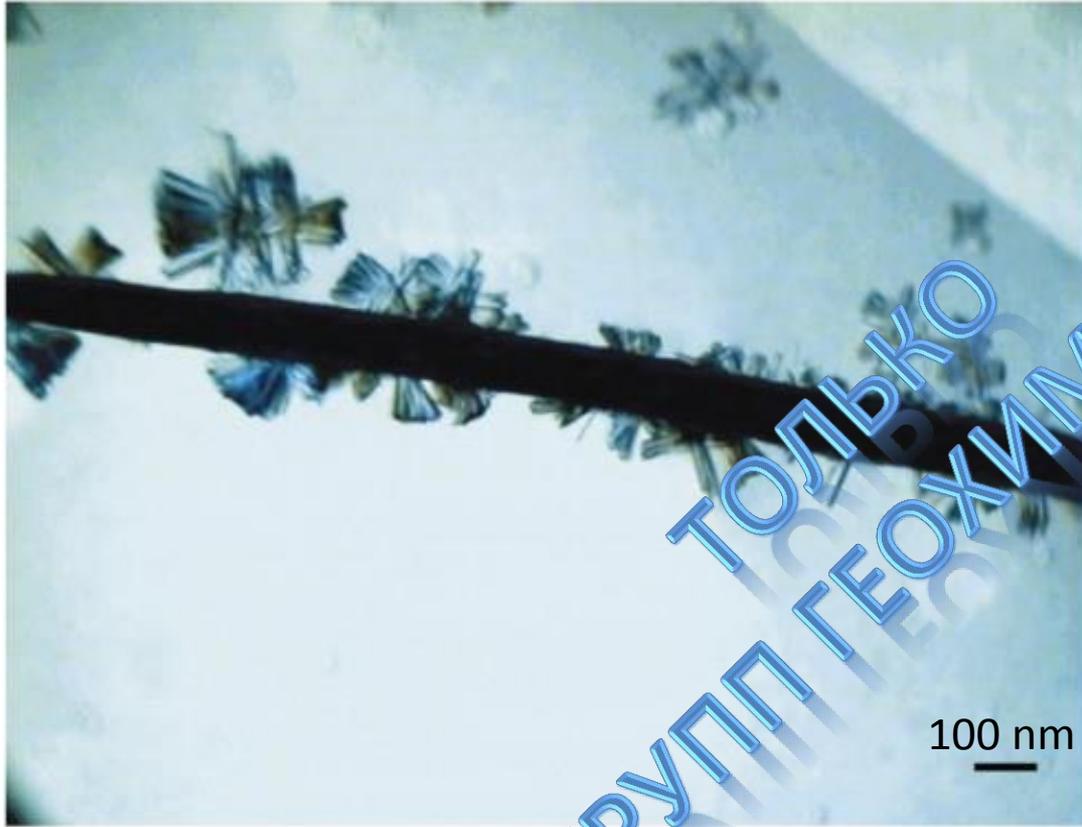


Способность к нуклеации конкретного минерала пропорциональна корню из энтропии плавления

Рейтинг способности к нуклеации:

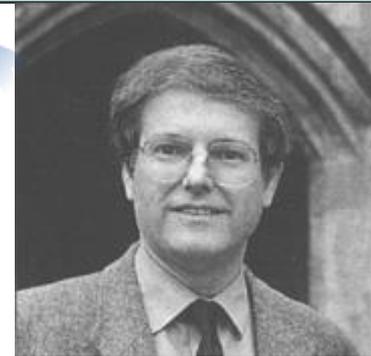
- 1) Оксиды
- 2) Fe-Mg силикаты
- 3) Каркасные силикаты и кварц

Гетерогенная нуклеация

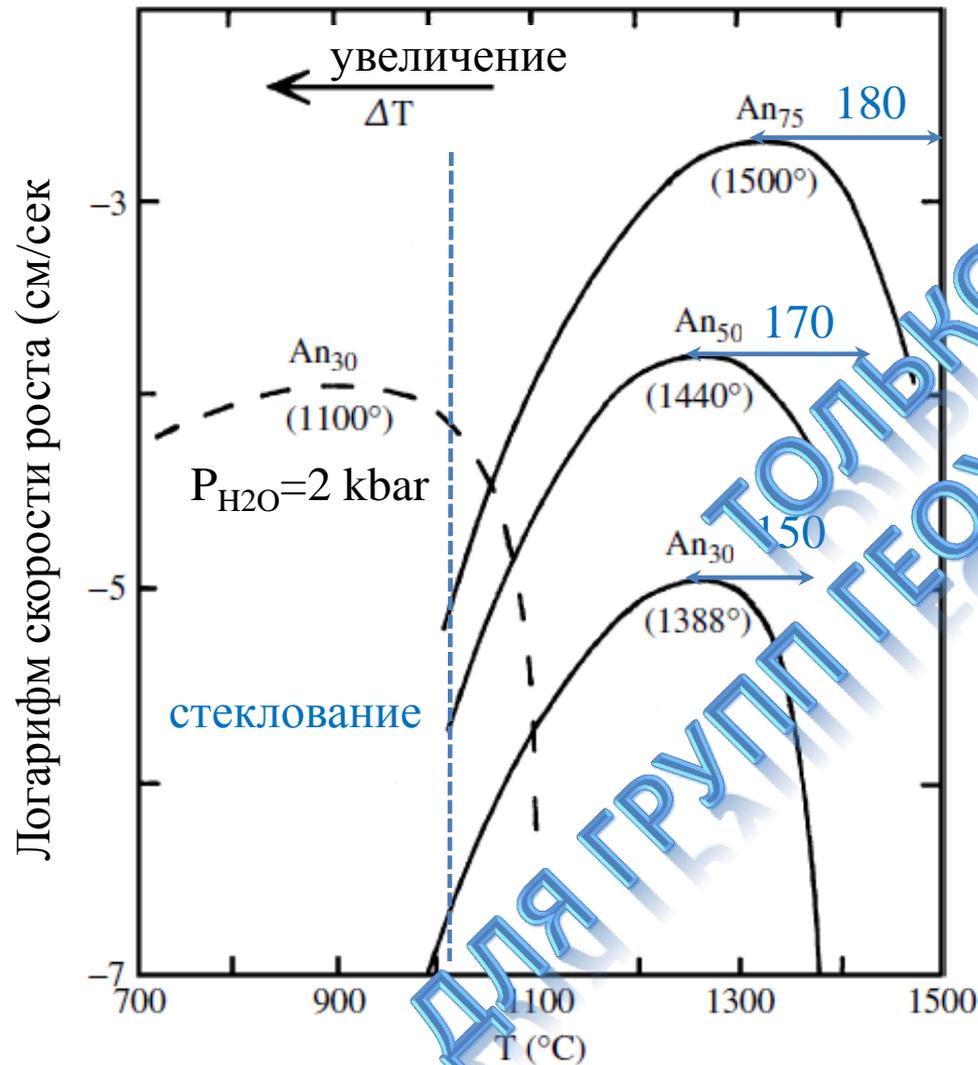


Гетерогенная нуклеация (образование зародышей на уже имеющейся фазовой границе) требует значительно меньшей энергии, чем гомогенная нуклеация. Роль гетерогенной нуклеации в магме до сих пор неясна.

Скорость роста



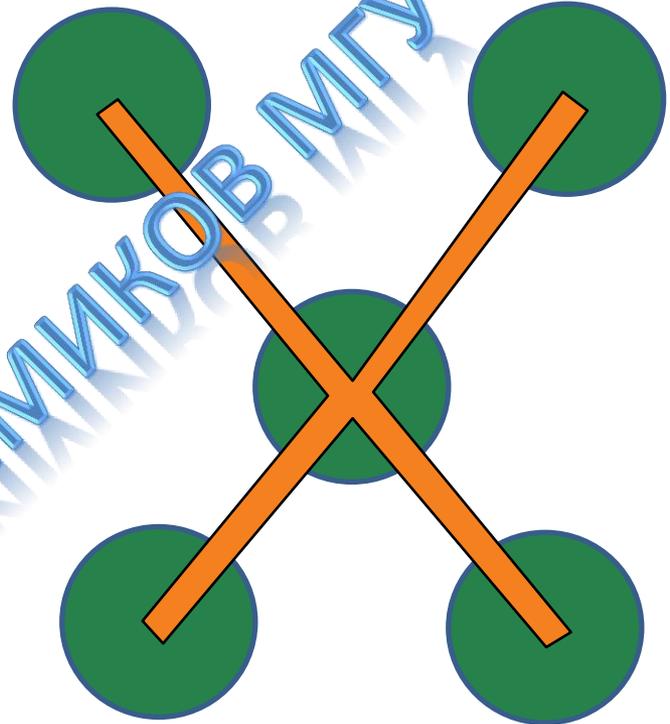
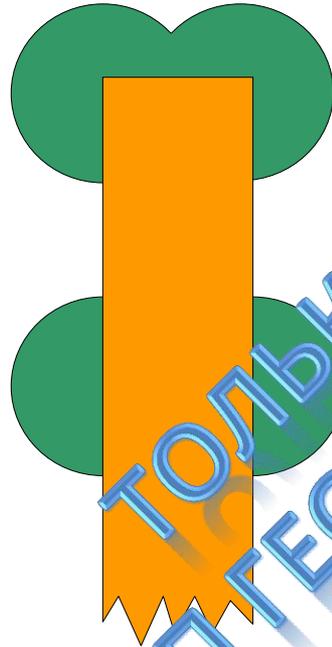
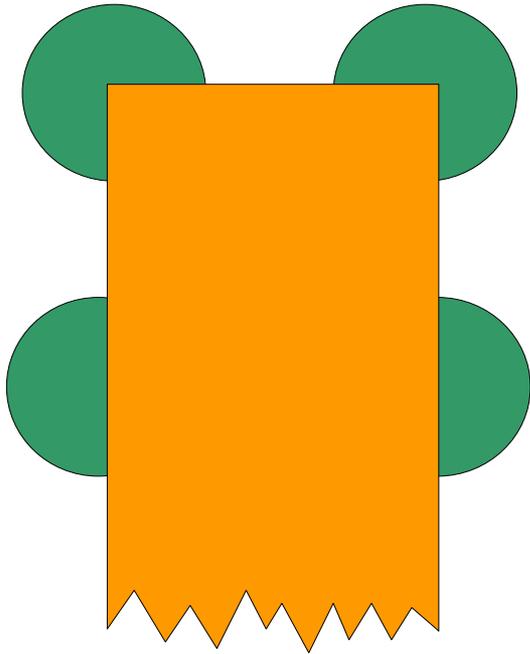
A.Lasaga, 1998



Скорость роста нелинейно зависит от переохлаждения системы.

При слишком большом переохлаждении рост замедляется из-за увеличения вязкости расплавов и замедления миграции компонентов к растущим граням. В водосодержащих расплавах скорость роста выше.

Зависимость формы кристаллов от скорости роста



При быстром росте кристаллов важен объем расплава, из которого вычерпываются компоненты.

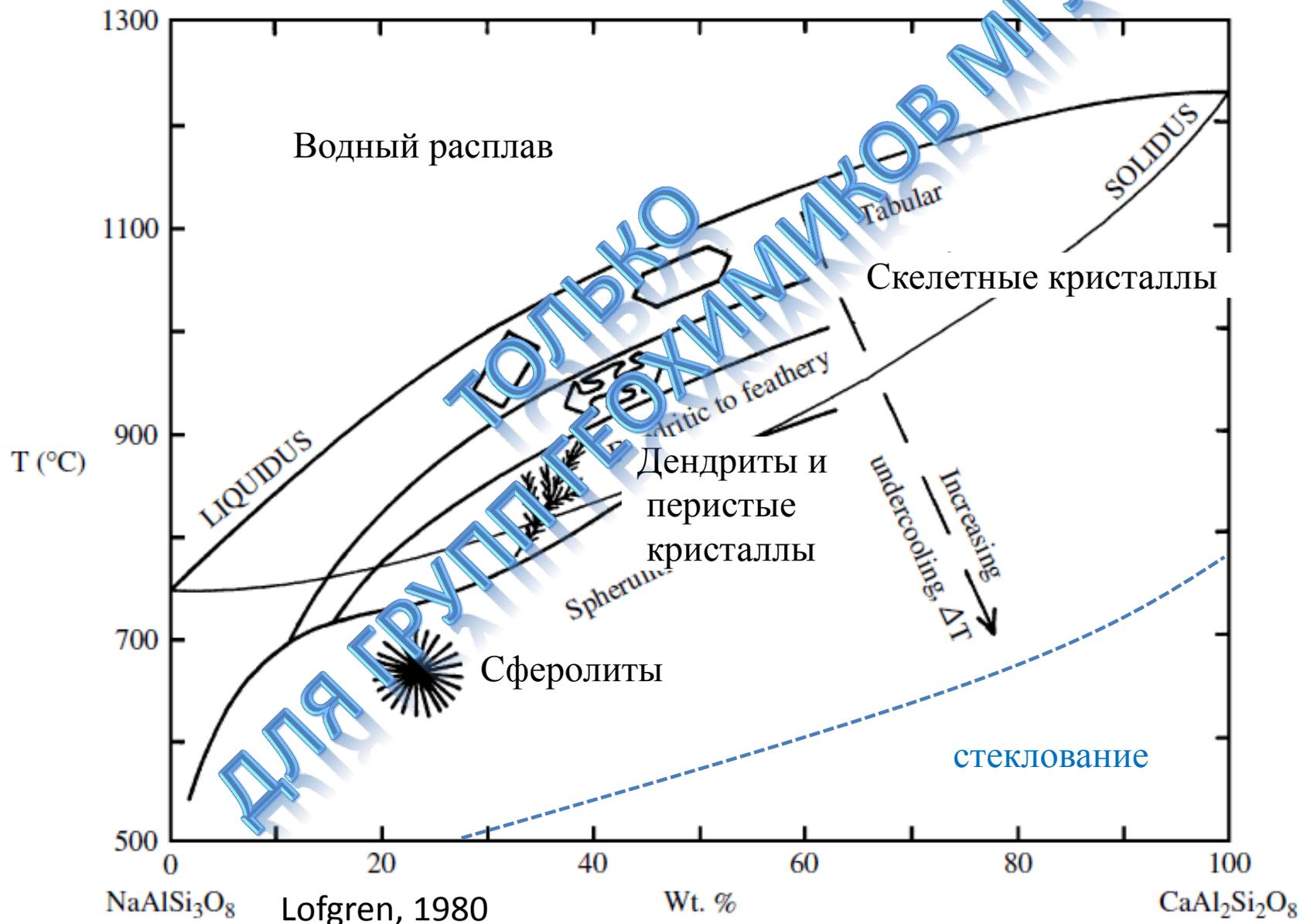
Для точки на грани: $\frac{1}{2}$ шара

Для точки на ребре: $\frac{3}{4}$ шара

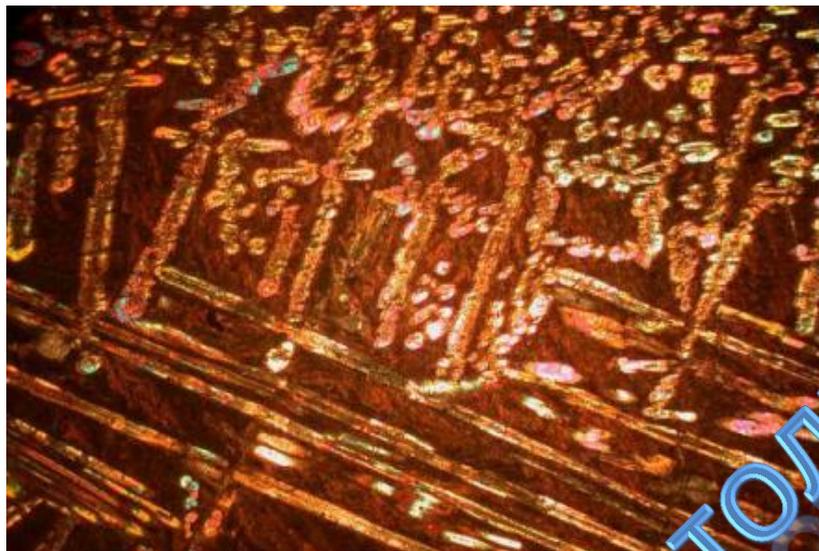
Для вершины: $\frac{7}{8}$ шара



Зависимость формы кристаллов от скорости роста



Примеры структур быстрого роста



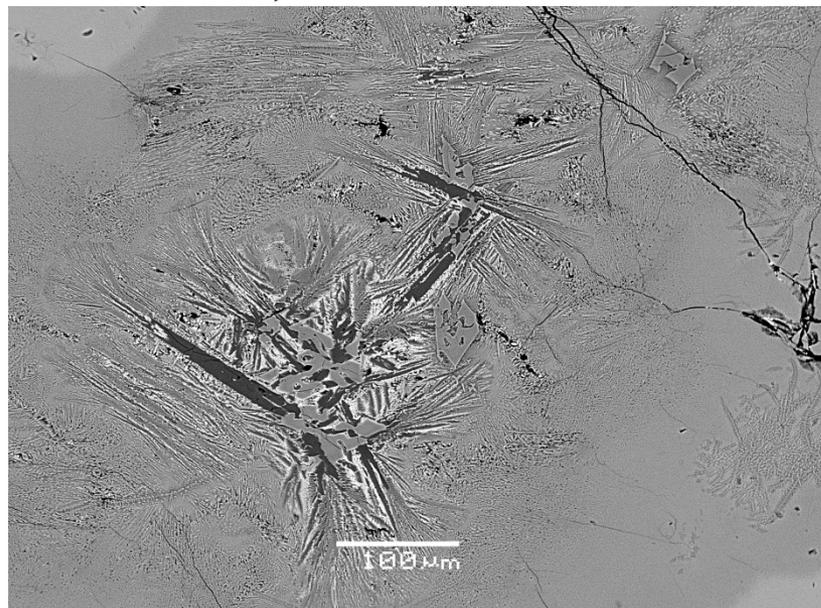
Коматиитовый базальт, Ветренный пояс



Гиалобазальт, Атлантический океан

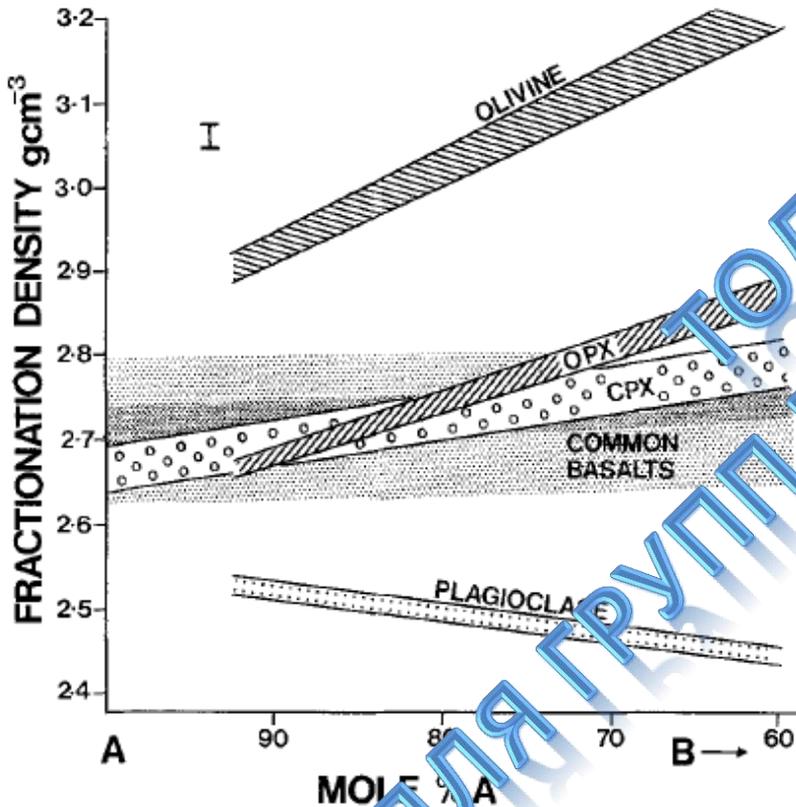


Обсидиан



Закон Стокса

$$V = \frac{2gr^2(\rho_s - \rho_l)}{9\eta}$$



Sparks, Huppert, 1984

- V = скорость осаждения (см/с)
- g = ускорение свободного падения (980 см/с²)
- r = радиус кристалла (см)
- ρ_s = плотность кристалла (г/см³)
- ρ_l = плотность жидкости (г/см³)
- η = вязкость жидкости (пуазы)

ДЛЯ ГРУПП ГЕОХИМИКОВ МГУ

Оливин в базальтовом расплаве

С какой скоростью будет тонуть в базальтовом расплаве кристалл оливина (Fo_{80}) диаметром 2 мм?

Плотность оливина : $\rho_s = 3.1 \text{ г/см}^3$

$r = 0.1 \text{ см}$

Плотность расплава $\rho_f = 2.65 \text{ г/см}^3$

$\eta = 1000 \text{ пуаз}$

$$V = 2 \cdot 980 \cdot 0.1^2 (3.1 - 2.65) / (9 \cdot 1000) = 0.001 \text{ см/сек} \approx 300 \text{ м/год}$$



Плагиоклаз и амфибол в риолитовом расплаве

С какой скоростью будет тонуть в базальтовом расплаве кристалл плагиоклаза и роговой обманки диаметром 2 мм?

Плотность плагиоклаза: $\rho_s = 2.45 \text{ г/см}^3$

Плотность амфибола: $\rho_s = 3.0 \text{ г/см}^3$

$r = 0.1 \text{ см}$

Плотность расплава $\rho_l = 2.3 \text{ г/см}^3$

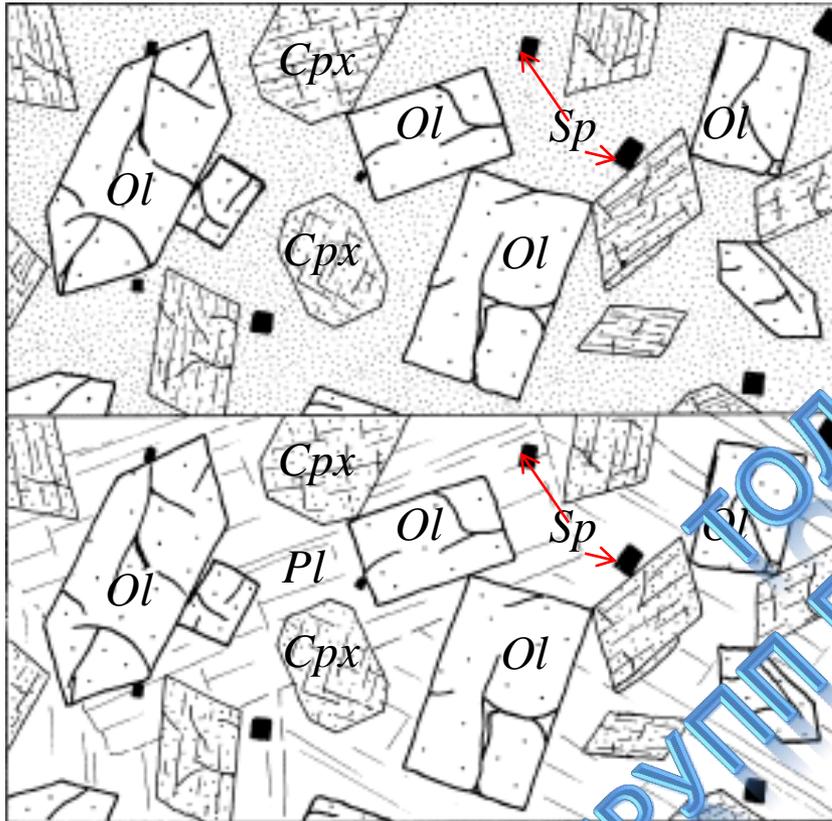
$\eta = 10^7 \text{ пуаз}$



$$V(\text{Plg}) = 2 \cdot 980 \cdot 0.1^2 (2.45 - 2.3) / (9 \cdot 10^7) \approx 1 \text{ см/год}$$

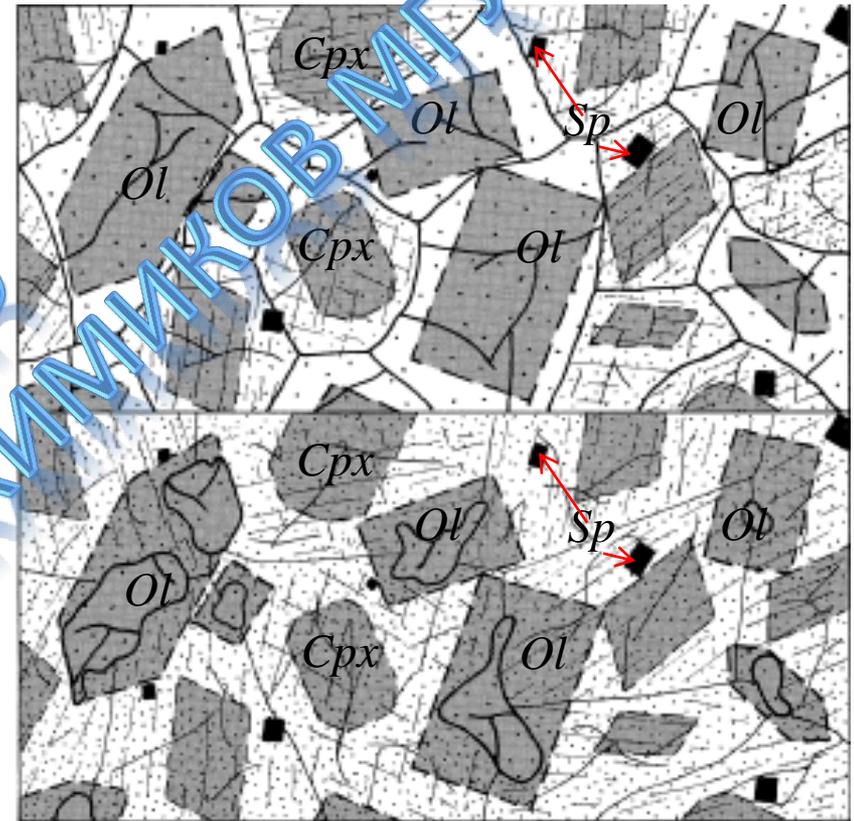
$$V(\text{Amf}) = 2 \cdot 980 \cdot 0.1^2 (3.0 - 2.3) / (9 \cdot 10^7) \approx 4.8 \text{ см/год}$$

Кумулятивные структуры



а) Кумулятивная структура магмы. В интеркумулусе – расплавление.

б) Кумулятивная структура породы. Интеркумулусное пространство занято плагиоклазом



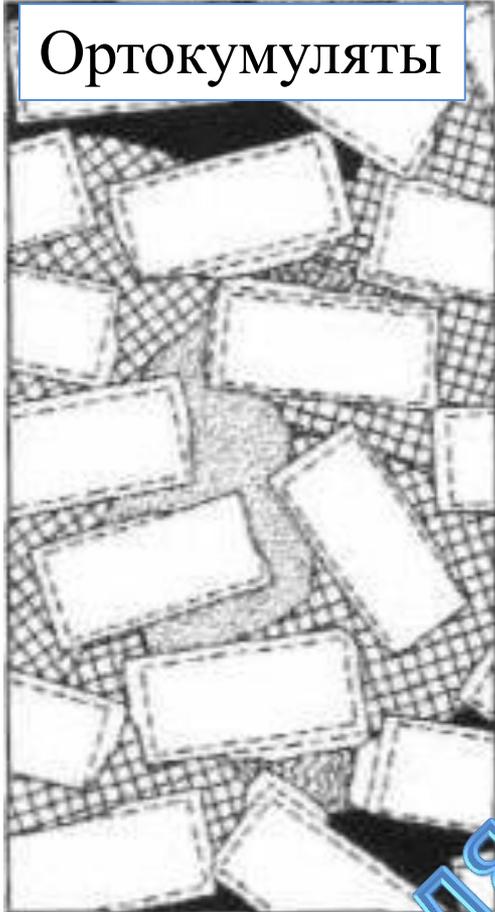
в) Кумулятивная структура породы. Кумулятивные кристаллы дорастают, заполняя пространство.

г) Кумулятивно-реакционная структура породы. Olivин растворяется, а Cpx занимает его место.

Кумулятивные структуры

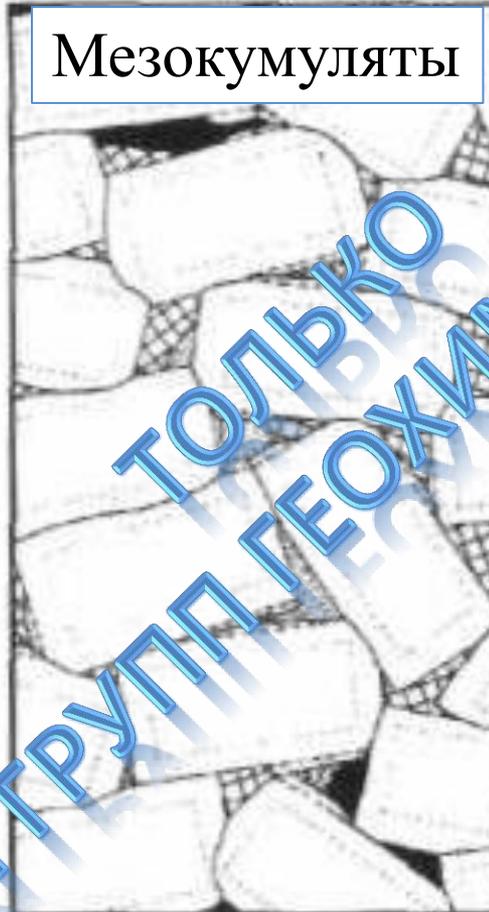
по Wager et al., 1960

Ортокумуляты



интеркумулус сложен несколькими минералами, а кумулятивные кристаллы имеют незначительную кайму, сохраняя форму.

Мезокумуляты



Каймы дорастания шире, интеркумулусное пространство не соединяется между собой

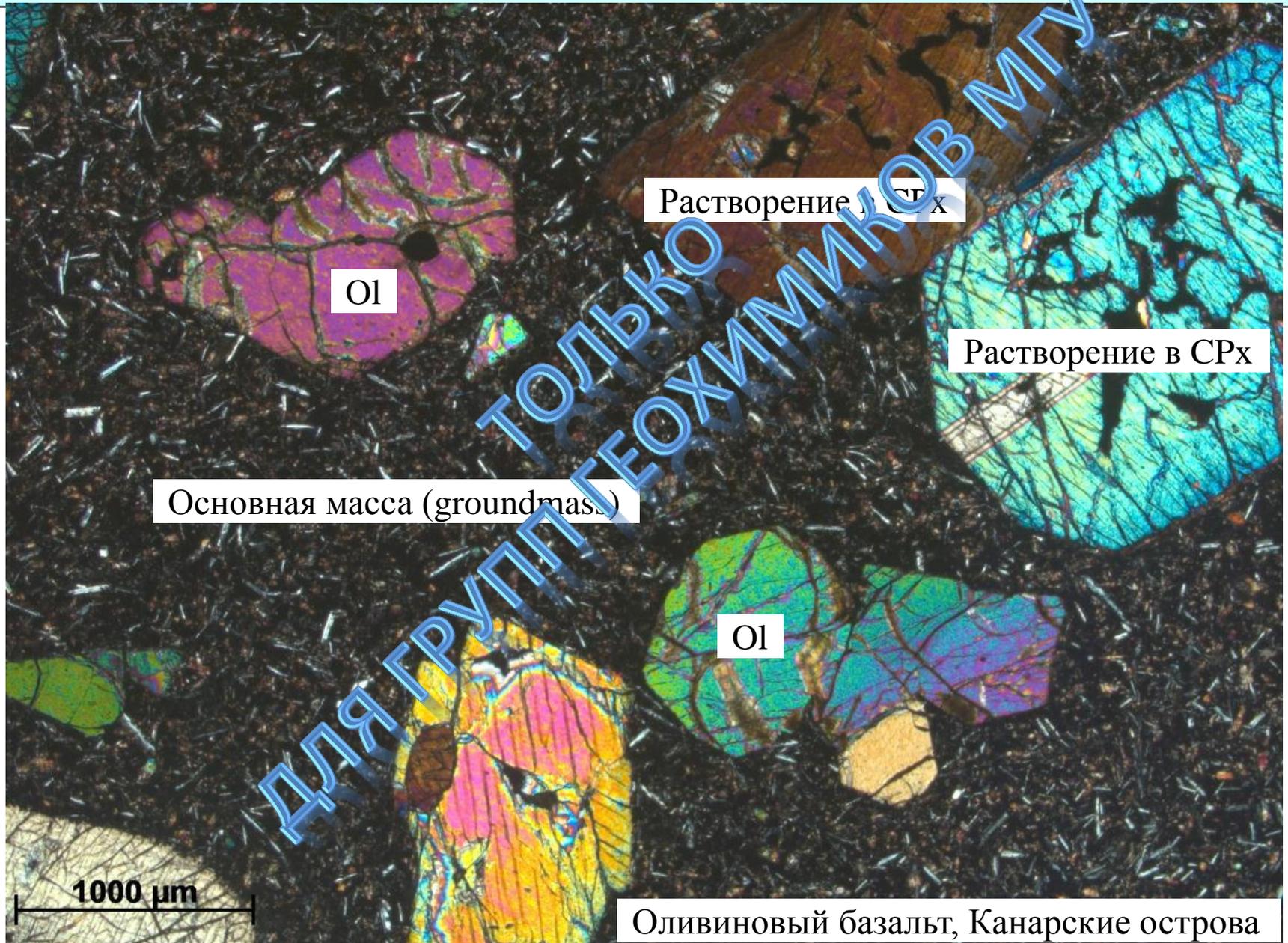
Адкумуляты



Интеркумулусное пространство почти полностью дорастает за счет кумулированного минерала

ДЛЯ ГРУПП ГЕОХИМИКОВ МГУ ТОЛЬКО

Порфириновые структуры



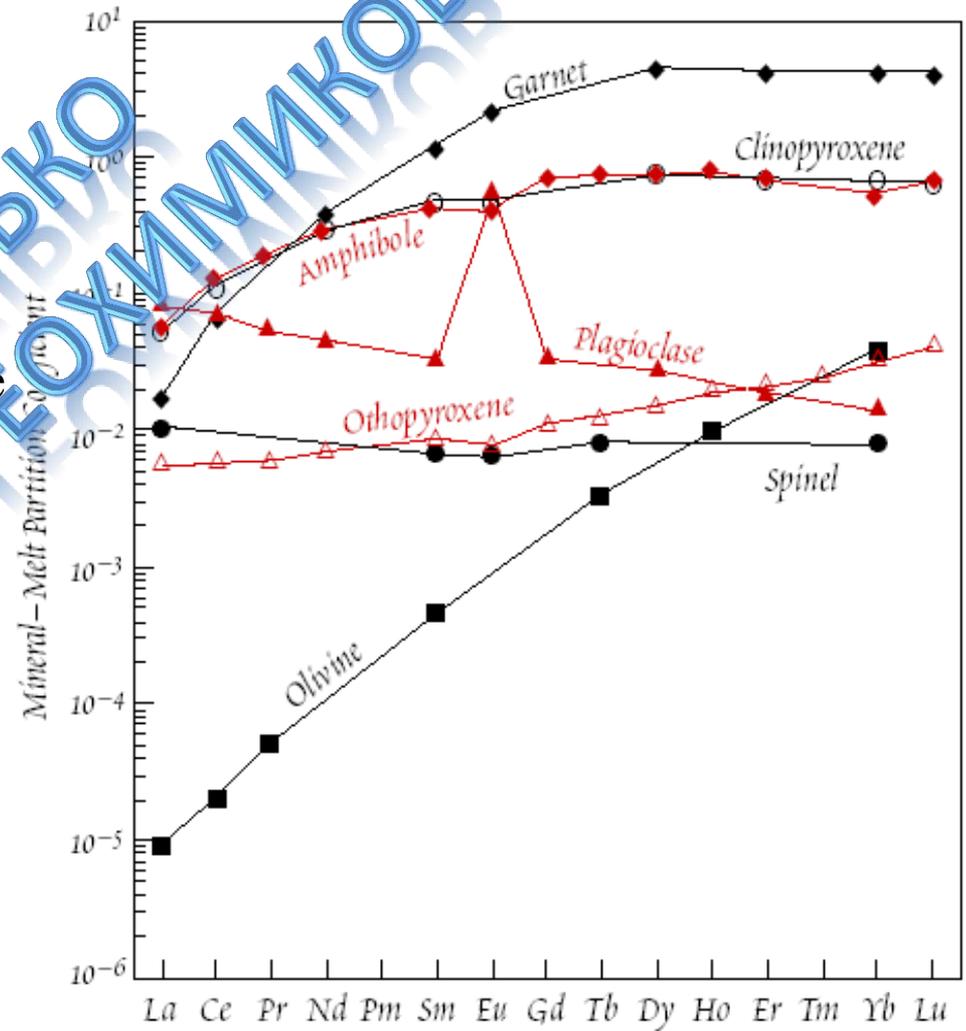
Оценка степени кристаллизации

$$D_i^{\alpha/\beta} = \frac{C_i^{\alpha}}{C_i^{\beta}}$$

где C_i^{α} – концентрация элемента в минерале,
 C_i^{β} – концентрация элемента в расплаве.

- когерентные или совместимые элементы ($K_d \gg 1$)
- умеренно-когерентные ($K_d > 1$)
- умеренно-некогерентные ($K_d < 1$)
- некогерентные или несовместимые элементы ($K_d \ll 1$)

Рассеянным элементом называется такой химический элемент, коэффициенты распределения которого в данной системе не зависят от его концентрации



Применения уравнения масс-баланса для равновесной кристаллизации

$$C_{\text{bulk}} = \sum c_i x_i \quad \text{- общий масс-баланс}$$

$$C_{\text{bulk}} = c_1 x_1 + c_2 (1 - x_1) \quad \text{- масс-баланс для двух компонентов}$$

Для фракционирования в системе минерал-расплав:

$$C_{\text{bulk}} = c_s F + c_L (1 - F), \quad \text{где } F \text{ — доля кристаллов}$$

$$C_s / C_L = Kd = D = \text{const} \quad (\text{для рассеянных элементов})$$

$$C_{\text{bulk}} = c_L DF + c_L (1 - F) \Rightarrow C_L / C_{\text{bulk}} = 1 / (DF + 1 - F)$$

Фракционная кристаллизация рассеянных элементов

$C_{\text{surface}} = D \cdot C_L$ Концентрация элемента на поверхности кристалла

$$C_L = X_L / M_L$$

$$C_L = (X_0 - X_s) / (M_0 - M_s)$$

Концентрация элемента в расплаве

$dX_s / dM_s = D \cdot C_L = D \cdot (X_0 - X_s) / (M_0 - M_s)$ Дифференциальная форма уравнения

$dX_s / (X_0 - X_s) = D \cdot dM_s / (M_0 - M_s)$ Перегруппировка членов уравнения

$\ln (X_0 - X_s) = D \ln (M_0 - M_s) + C$ Интегрирование

Оценим свободный член интегрирования при $t=0$ (до кристаллизации $X_s = M_s = 0$):

$$C = \ln X_0 - D \ln M_0$$

$$\ln [(X_0 - X_s) / X_0] = D \ln [(M_0 - M_s) / M_0]$$

Фракционная кристаллизация рассеянных элементов

$$\ln [(X_o - X_s)/X_o] = D \ln [(M_o - M_s)/M_o]$$

$$X_s = X_o [1 - (1 - M_s/M_o)^D]$$

Дифференцируем по M_s

$$C_{\text{surface}} = dX_s/dM_s = D * X_o/M_o (1 - M_s/M_o)^{D-1}$$

$$C_o = X_o/M_o \quad \text{начальная концентрация}$$

$$F = (M_s/M_o) \quad \text{степень фракционирования (доля кристаллов)}$$

$$C/C_o = D (1-F)^{D-1}$$

Поведение когерентных и некогерентных элементов

Случай равновесной кристаллизации

$$\frac{C_i^L}{C_i^0} = \frac{1}{DX + (1-X)}$$

Если $X=0 \Rightarrow C^L=C^0$

Если $X=1 \Rightarrow C^L/C^0=1/D$

Если $D=0 \Rightarrow C^L/C^0=1/(1-X)$,

при X стремящемся к 1, C_L стремится к ∞

Случай фракционной кристаллизации

$$\frac{C_i^L}{C_i^0} = (1-X)^{D-1}$$

при X стремящемся к 1 и $D>1$, C^L/C^0 стремится к 0,

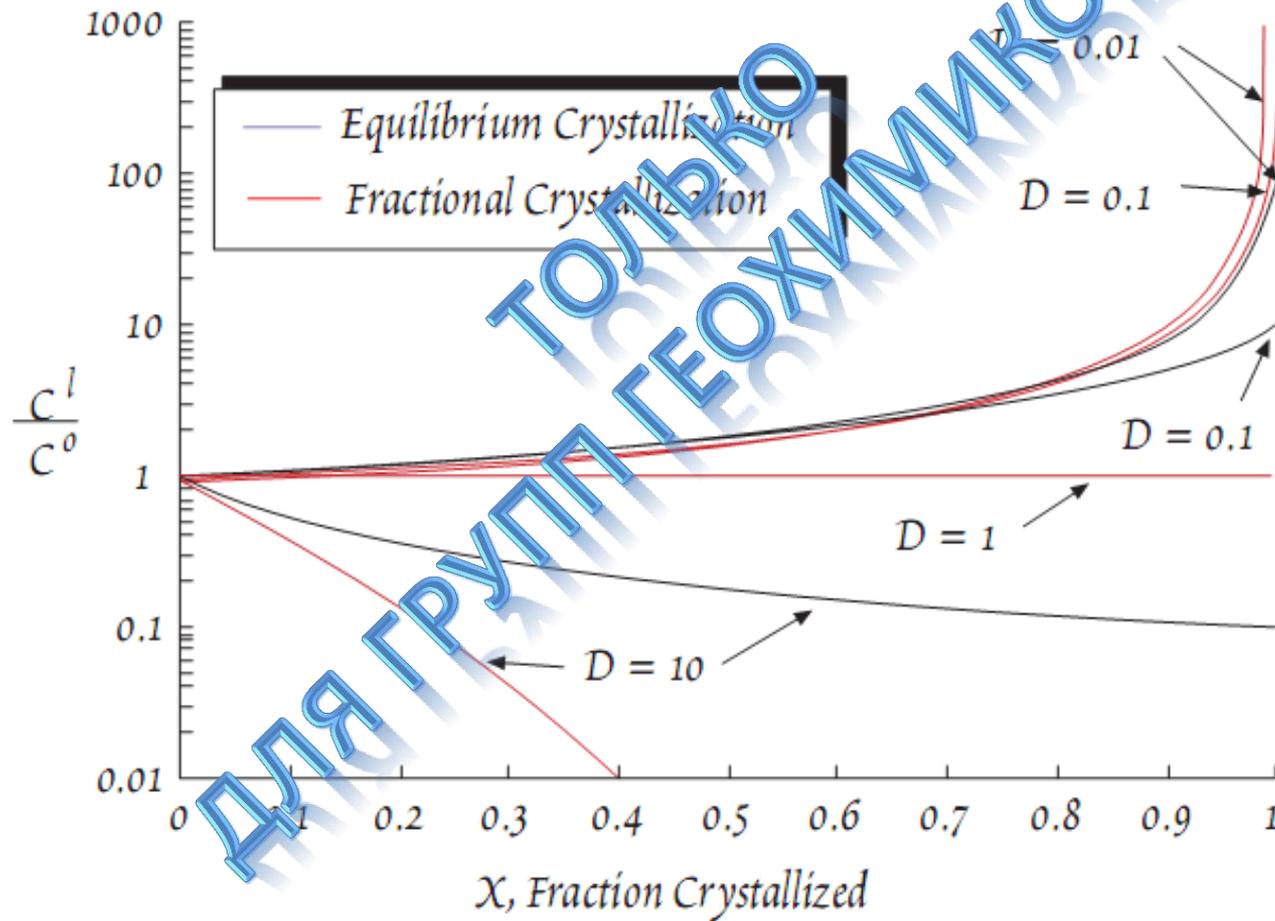
при X стремящемся к 1 и $D<1$, C^L/C^0 стремится к ∞

Если $D=0 \Rightarrow C^L/C^0=1/(1-X)$,

То есть то же, что и при равновесной кристаллизации

Для оценки степени фракционирования используют наиболее некогерентные элементы, принимая их $K_d=0$. Для базальтов это Zr, Rb и т.д.

Различные способы фракционирования



Задача

Дано:

Порода содержит 3 ppm La

Стекло содержит 7 ppm La

$Kd(La) = 0.1$

Какова кристалличность породы?

Решение:

Запишем уравнение масс-баланса для расплава и кристаллов:

$$C_{bulk} = c_I x_I + c_2 (1 - x_I)$$

или

$$C_{порода} = c_S x_S + c_L (1 - x_S), \text{ где}$$

$$c_S = Kd * c_L$$

Подставляем значения:

$$3 = 0.1 * 7 * x_S + 7(1 - x_S), \text{ откуда}$$

$$x_S \approx 0.63, \text{ т.е. кристалличность породы } 63\% \text{ мас.}$$

То же самое:

$$C_L / C_{bulk} = 1 / (DF + 1 - F)$$

$$7/3 = 1 / (0.1F + 1 - F) \text{ или } F = 40/63 \approx 0.63$$

Другая задача

Дано:

Базальт содержит 3 ppm La

Андезит содержит 7 ppm La

$K_d(\text{La}) = 0.1$

-
Сколько нужно фракционировать кристаллов, чтобы из базальта получился андезит?

Решение:

Запишем уравнение фракционирования:

$$\frac{C_i^d}{C_i^o} = (1 - X)^{D-1}$$

или

$$7/3 = (1 - X)^{0.9}$$

$$\ln(7/3) = 0.9 \ln(1 - X)$$

$$X = 1 - \exp(\ln(7/3)/0.9) = 0.61$$

Ответ:

Для получения андезита с 7 ppm La из базальта с 3 ppm La нужно фракционировать около 61 мас. % кристаллов