

# ПЕТРОЛОГИЯ,

## часть 2. Магматизм

### Лекция 2. Кристаллизация многокомпонентных расплавов

Физико-химические основы кристаллизации магматических расплавов. Понятия ликвидуса, солидуса, катектики, эвтектики. Псевдоликвидусные температуры, влияние летучих компонентов и давления на температуры кристаллизации. Равновесная и фракционная кристаллизация, понятие кристаллизационной дифференциации. Кристаллизационные ряды Боуэна, их область применимости. Процессы ликвации и смешения магм, их петрологические признаки. Примеры гибридных пород.

каф.петрологии

Геологический факультет МГУ

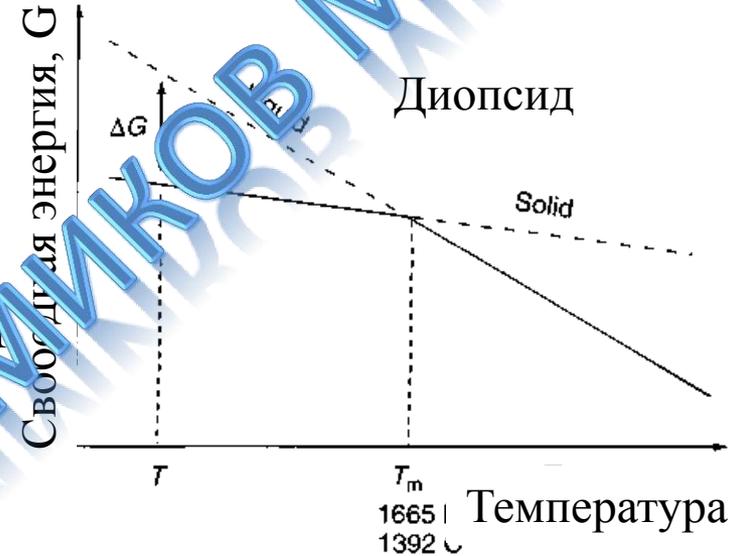
2013

# Кристаллизация одного минерала

Диопсид –  $\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$

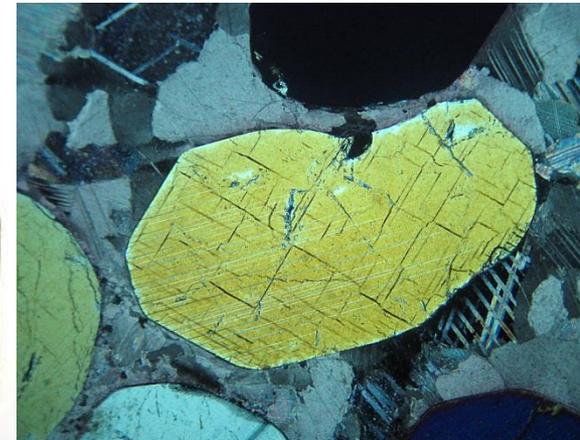
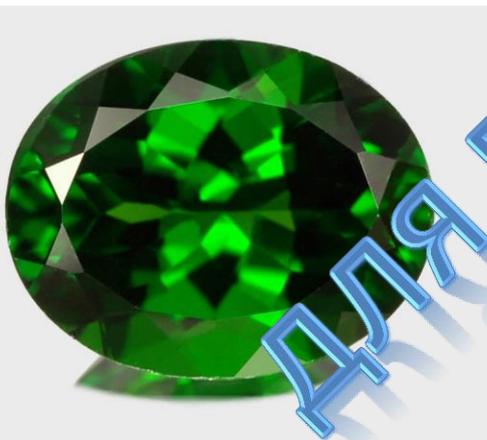
Температура плавления  
чистого диопсида ( $T_m$ ) 1392 С

Энтальпия плавления ( $H_m$ ) 142.5 КJ/mol



$$\frac{\partial G}{\partial T}$$

Отрицательные и для расплава и для минерала,  
для минерала наклон меньше



# Кристаллизация одного минерала

Запишем реакцию кристаллизации:

Диопсид (в расплаве)  $\rightleftharpoons$  Диопсид (в кристалле)

Условие химического равновесия – равенство химических потенциалов:

$$\mu_{Di}^S = \mu_{Di}^L = \mu_{Di}^{oL} + RT \ln(x_{Di}^L)$$

Перегруппируем:

$$RT \ln(x_{Di}^L) = \mu_{Di}^S - \mu_{Di}^{oL} = -\Delta G_r = -\Delta H_m + T \Delta S_m$$

Отсюда:

$$\ln(x_{Di}^L) = \frac{-\Delta H_m}{RT} + \frac{\Delta S_m}{R} \quad \text{или} \quad T = \frac{\Delta H_m}{\Delta S_m - R \ln(x_{Di}^L)}$$

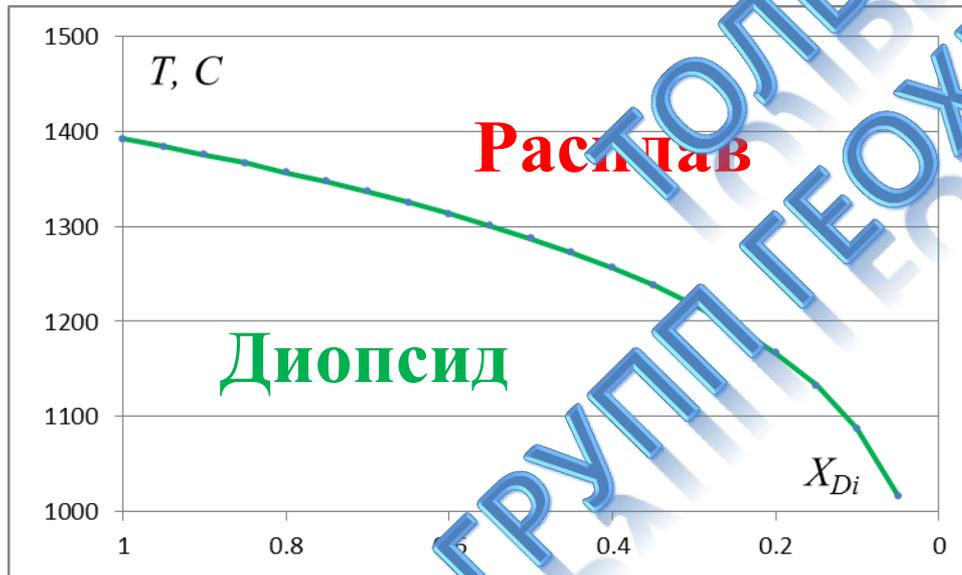
# Равновесие диопсида с идеальным расплавом

$$\Delta H_m = 142600 \text{ J/mol}$$

$$T_m = 1392 + 273 = 1665 \text{ K}$$

$$\Delta S_m = \Delta H_m / T_m = 85.6456 \text{ J/mol} \cdot \text{K}$$

$$R = 8.3144621 \text{ J/mol} \cdot \text{K}$$



X(Di)L	T, K	T, C
1	1665.0	1392.0
0.95	1656.8	1383.8
0.9	1648.1	1375.1
0.85	1639.1	1366.1
0.8	1629.7	1356.7
0.75	1619.8	1346.8
0.7	1609.3	1336.3
0.65	1598.2	1325.2
0.6	1586.3	1313.3
0.55	1573.7	1300.7
0.5	1560.0	1287.0
0.45	1545.2	1272.2
0.4	1529.0	1256.0
0.35	1511.0	1238.0
0.3	1490.8	1217.8
0.25	1467.5	1194.5
0.2	1440.0	1167.0
0.15	1406.0	1133.0
0.1	1360.8	1087.8
0.05	1289.9	1016.9

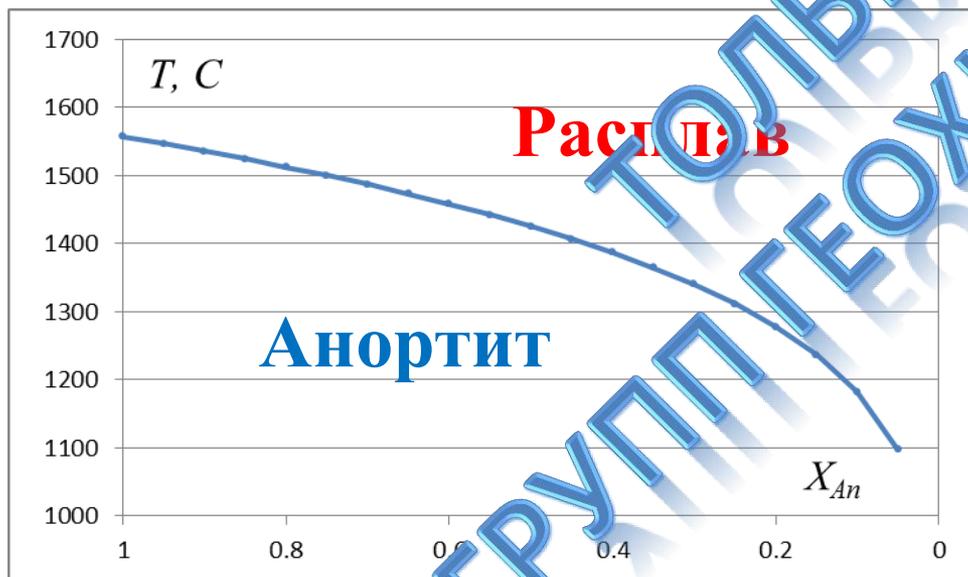
# Равновесие анортита с идеальным расплавом

$$\Delta H_m = 136000 \text{ J/mol}$$

$$T_m = 1830 \text{ K}$$

$$\Delta S_m = 74.317 \text{ J/mol}\cdot\text{K}$$

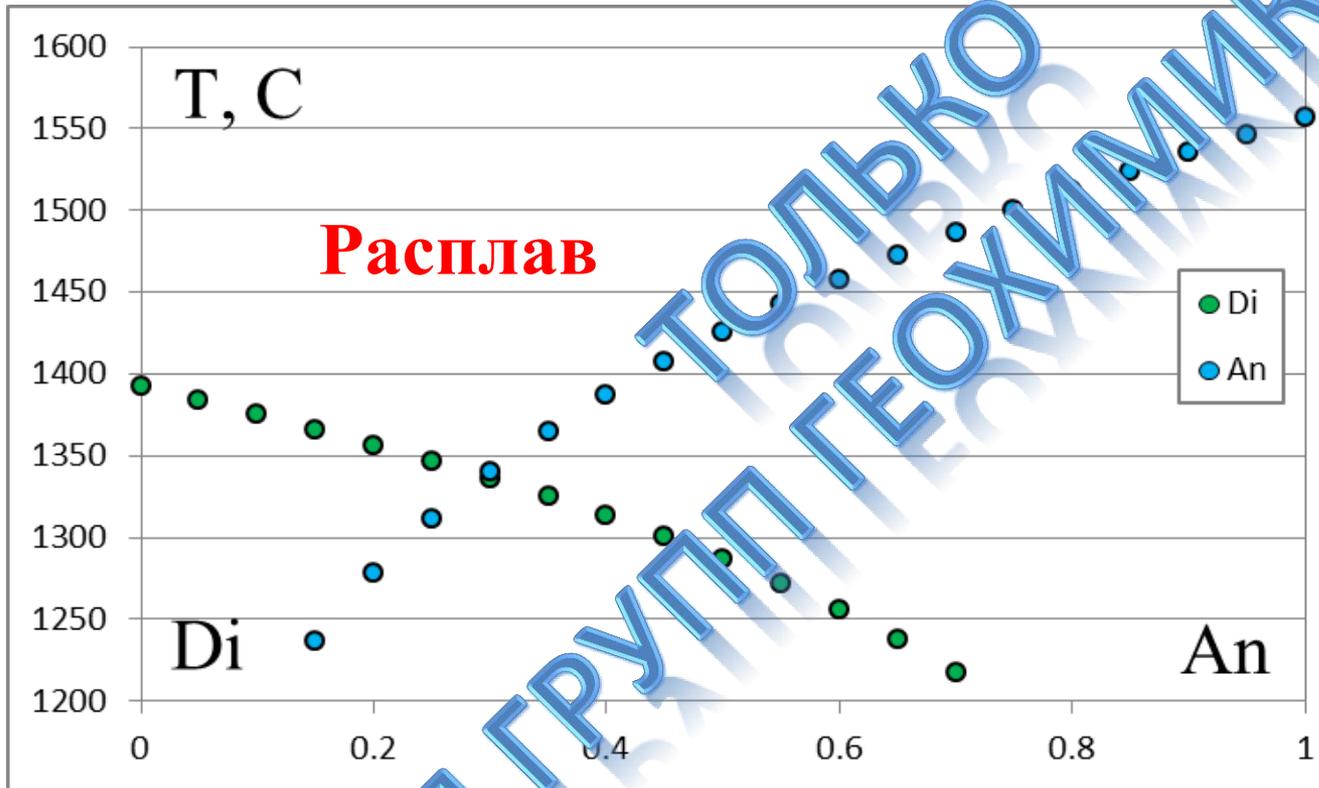
$$R = 8.3144621 \text{ J/mol}\cdot\text{K}$$



$X(\text{An})_L$	$T, \text{ K}$	$T, \text{ C}$
1	1830.0	1557.0
0.95	1819.6	1546.6
0.9	1808.7	1535.7
0.85	1797.3	1524.3
0.8	1785.4	1512.4
0.75	1772.9	1499.9
0.7	1759.8	1486.8
0.65	1745.9	1472.9
0.6	1731.1	1458.1
0.55	1715.3	1442.3
0.5	1698.3	1425.3
0.45	1679.9	1406.9
0.4	1659.8	1386.8
0.35	1637.7	1364.7
0.3	1612.8	1339.8
0.25	1584.3	1311.3
0.2	1550.8	1277.8
0.15	1509.6	1236.6
0.1	1455.1	1182.1
0.05	1370.6	1097.6

# Бинарная система Диопсид-Анортит

$$x_{Di} + x_{An} = 1$$



Диопсид:  
 $\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$

Анортит:  
 $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$

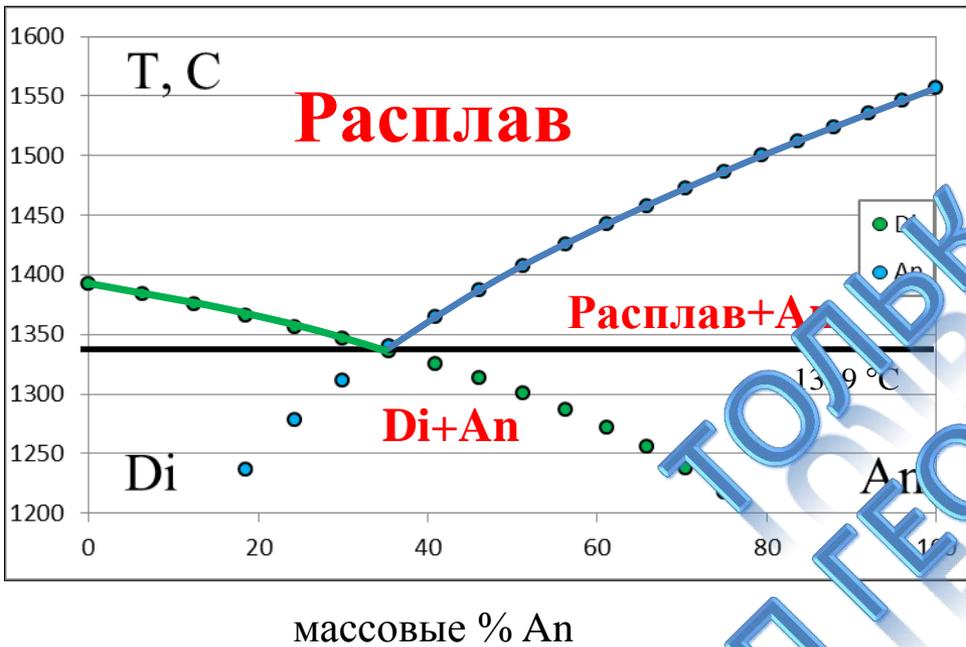
Молекулярная масса:

Di = 216.6

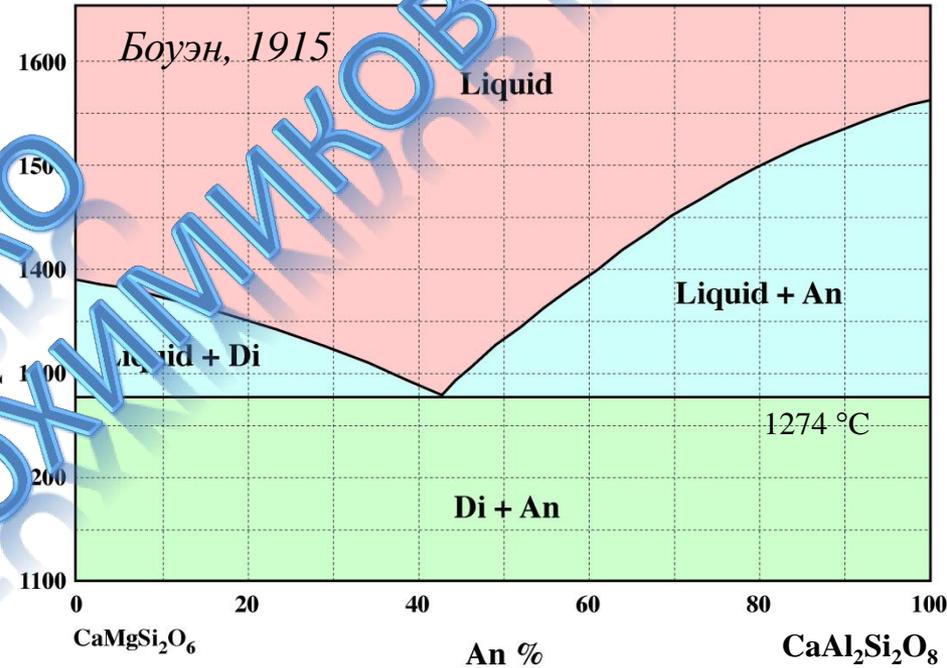
An=278.2

Диаграмма построена в мол. долях

# Бинарная система Диопсид-Анортит



Расчетная диаграмма плоскости Di-An



Экспериментальная диаграмма Di-An

$$T = \frac{\Delta H_m}{\Delta S_m - R \ln(x_S^L)}$$

$$T = \frac{\Delta H_m}{\Delta S_m - R \ln(\gamma x_S^L)}$$

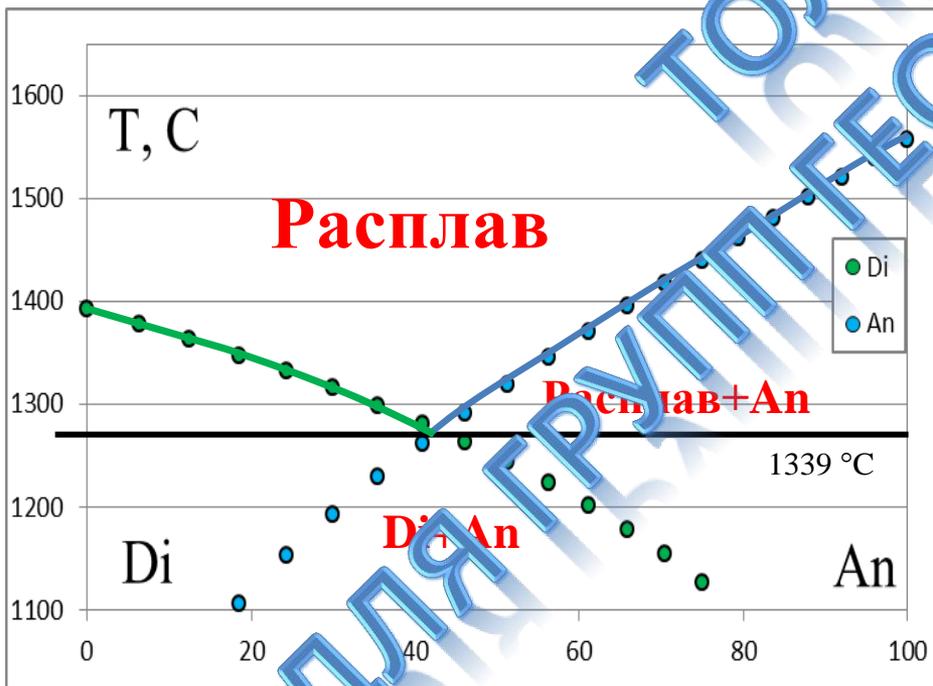
# Оценка коэффициента активности

$$T = \frac{\Delta H_m}{\Delta S_m - R \ln(\gamma x_S^L)}$$

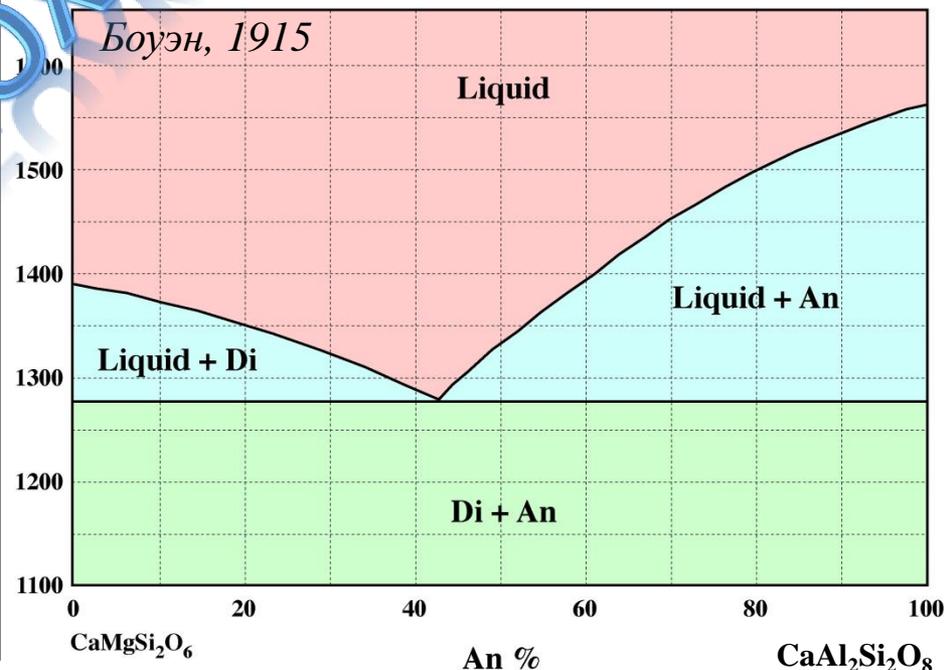
$$\ln(\gamma x_S^L) = \frac{-\Delta H_m}{RT} + \frac{\Delta S_m}{R}$$

Для диопсида:  $\gamma = 0.75 * x_{Di} + 0.25$

Для анортита:  $\gamma = 0.75 * x_{An} + 0.25$

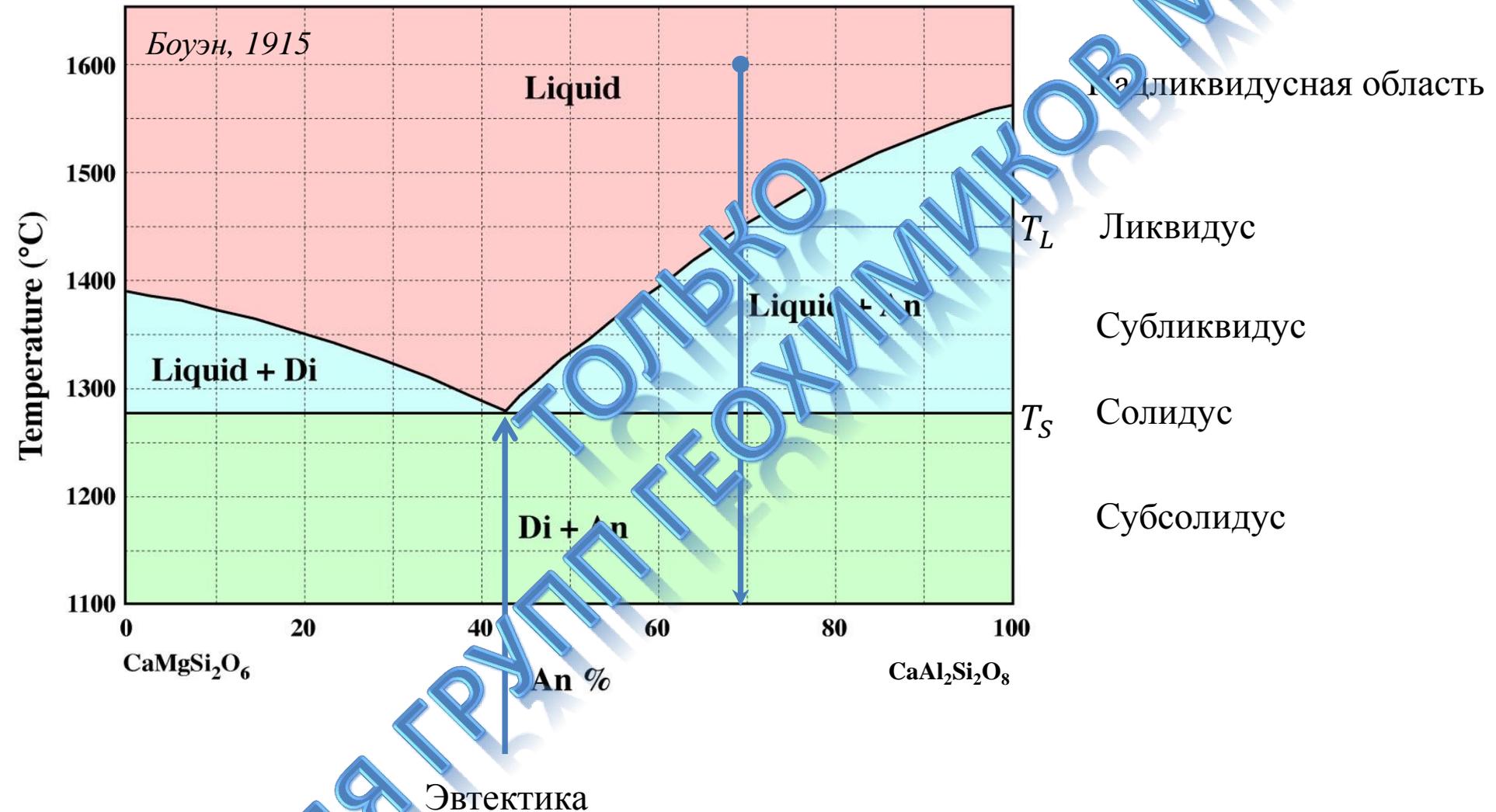


Расчетная диаграмма плавкости Di-An



Экспериментальная диаграмма Di-An

# Основные линии и поля



# Эффект давления

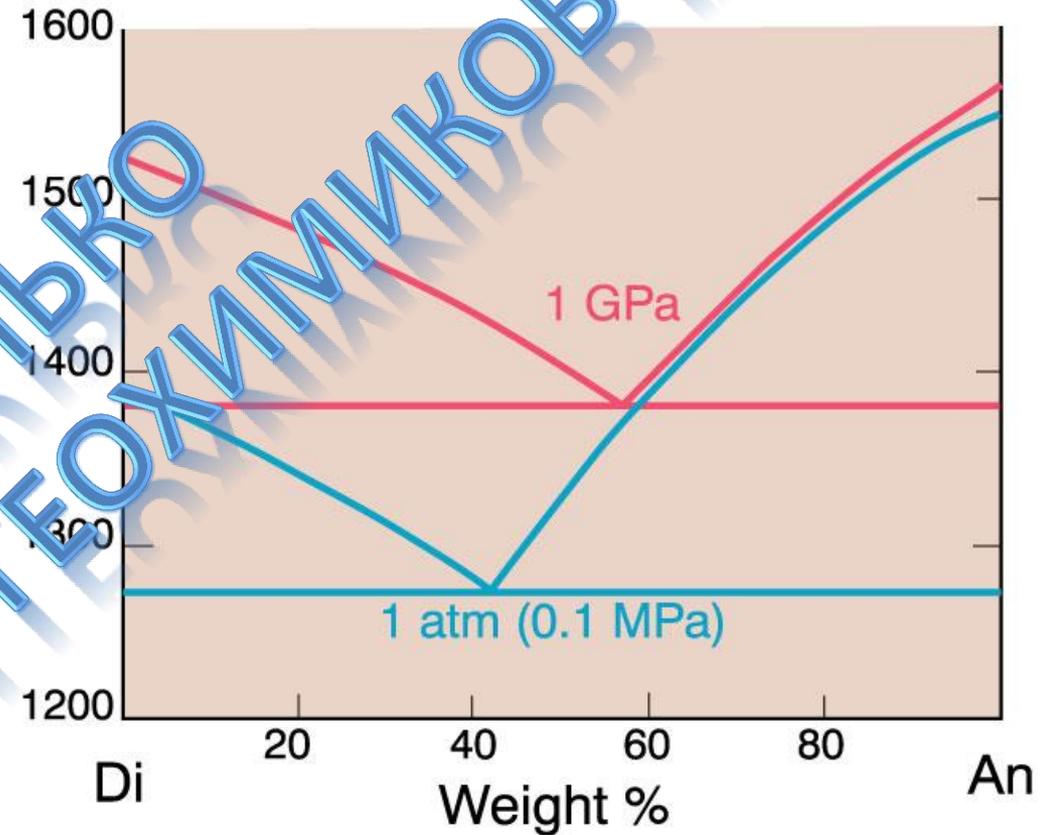
$$T = \frac{\Delta H_m + p\Delta V_m}{\Delta S_m - R\ln(\gamma x_S^L)}$$

преобразуем в:

$$T = T_{p_0} + p * k, \text{ где}$$

$$k = \frac{\Delta V_m}{\Delta S_m - R\ln(\gamma x_S^L)}$$

Для клинопироксена  $k > 10^\circ/\text{kbar}$   
Для плагиоклаза  $k < 2^\circ/\text{kbar}$



Система диопсид-анортит. Данные для 1 GPa Presnall *et al.* (1978). *Contr. Min. Pet.*, 66, 203-220.

# Эффект давления воды

Растворенная в расплаве вода сильно понижает ликвидусные температуры

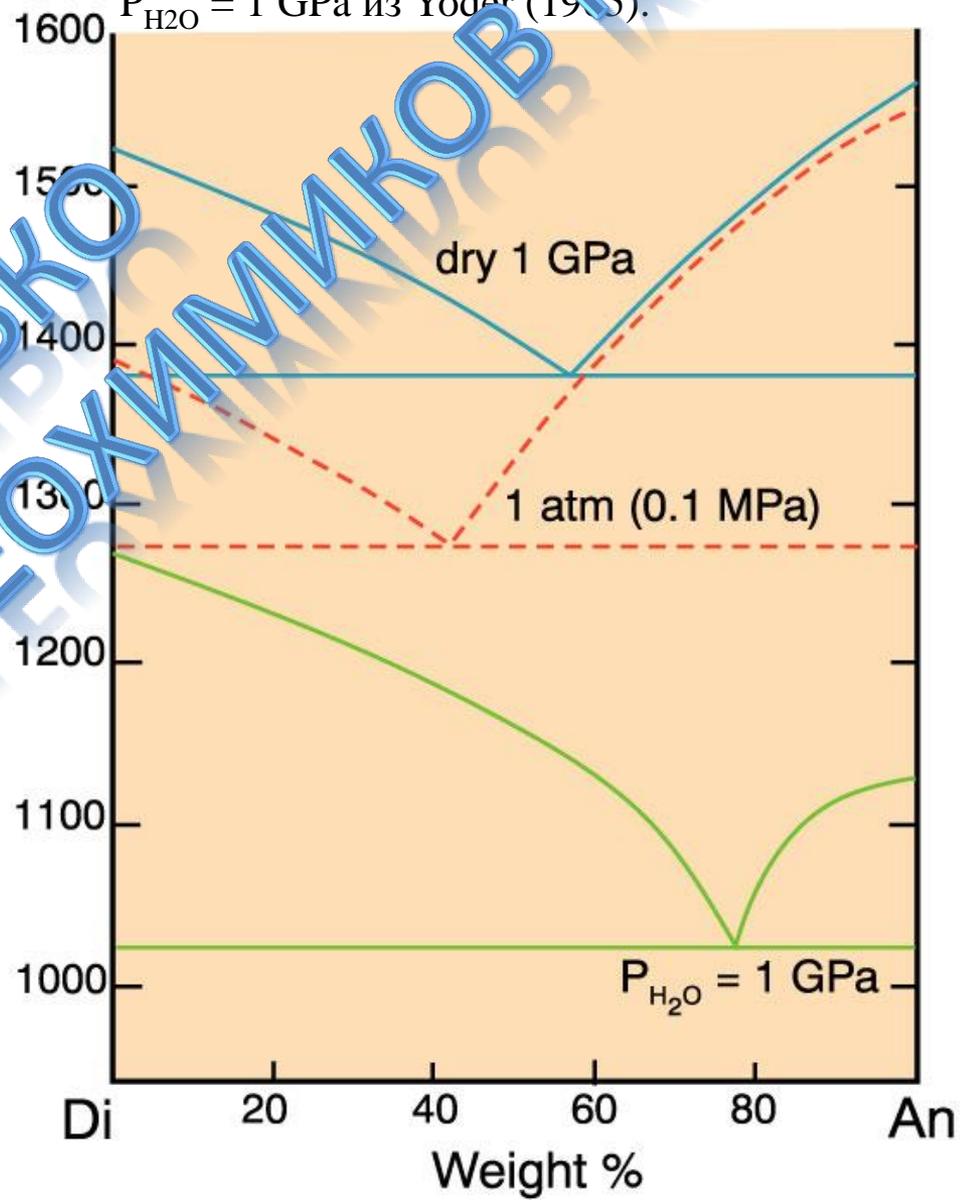
$$T = T_{p_0} + p_{H_2O} * w, \text{ где}$$

Для CPX  $w \approx -15 \text{ K/kbar}$

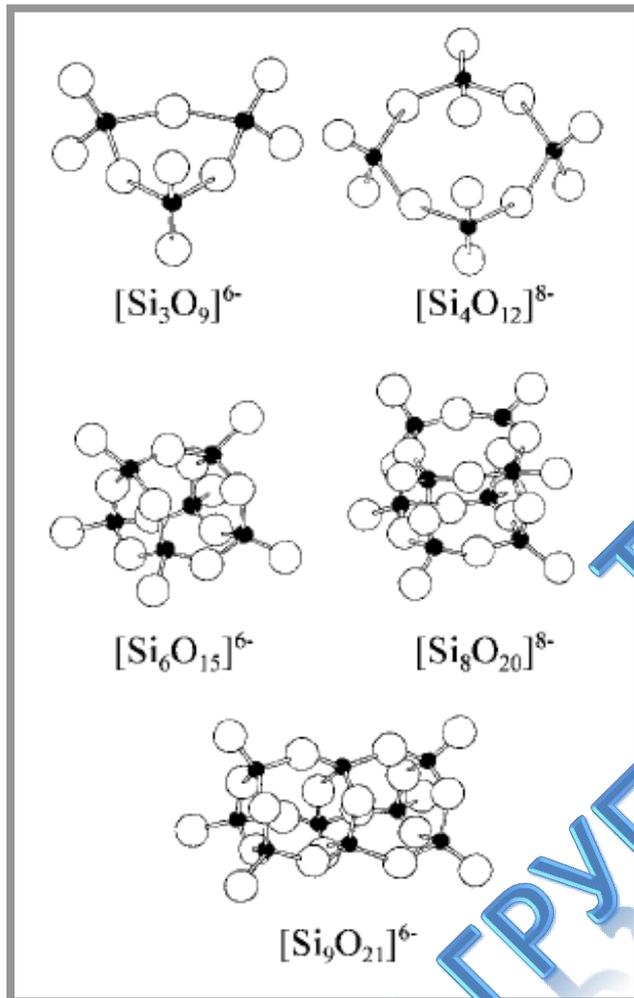
Для Pl  $w \approx -40-60 \text{ K/kbar}$

Вода влияет на активности компонентов в расплаве сложным образом и влияние воды на температуры ликвидуса не может быть описано линейным уравнением.

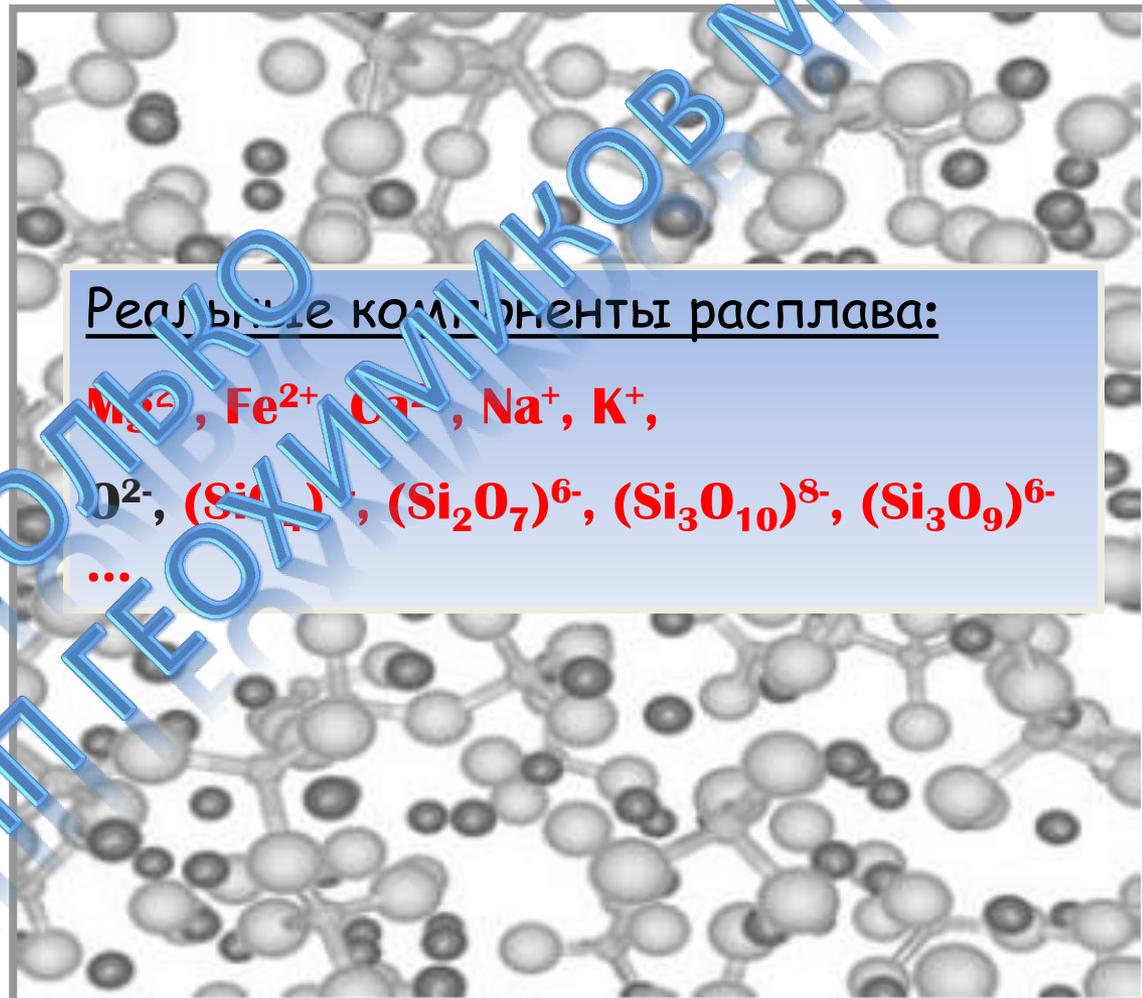
Система диопсид-анорт. Данные для  $P_{H_2O} = 1 \text{ GPa}$  из Yoder (1955).



# Строение силикатных расплавов



Простейшие кольца  
(Вокрис 1955)



Фрагмент структуры  $K_2SiO_3$  при 2000 К  
(O – крупные и Si – мелкие белые шары, K – темные шарики)

# A Model of Magmatic Crystallization

J. Petrol. 19(1), 66–94 (1978)

by H. D. NATHAN\* and C. K. VAN KIRK†

Department of Geology, and Computer Centre, Acadia University, Wolfville, Canada BOP 1X0

(Received 5 October 1976; in revised form 3 February 1977)

$$T = a_0 + a_1 \text{Al} + a_2 \text{Ti} + a_3 \text{Fe}^{+3} + a_4 \text{Fe}^{+2} + a_5 \text{Mg} + a_6 \text{Ca} + a_7 \text{Na} + a_8 \text{K} + a_9 (\log_e \text{II}) + a_{10} \sqrt[2]{\text{Al}(\text{Na} + \text{K})}$$

Mineral	II
Magnetite	$\sqrt[3]{(\text{Fe}^{+2})(\text{Fe}^{+3})^2}$
Olivine	$\sqrt[3]{(\text{Mg} + \text{Fe}^{+2})^2(\text{Si})}$
Hypersthene	$\sqrt[3]{(\text{Mg} + \text{Fe}^{+2})(\text{Si})}$
Augite	$\sqrt[4]{(\text{Ca})(\text{Mg} + \text{Fe}^{+2})(\text{Si})^2}$
Plagioclase	$\sqrt[5]{(\text{Na} + \text{Ca})(\text{Al})(\text{Si})^3}$
Orthoclase	$\sqrt[5]{(\text{K})(\text{Al})(\text{Si})^3}$
Leucite	$\sqrt[4]{(\text{K})(\text{Al})(\text{Si})^2}$
Nepheline	$\sqrt[3]{(\text{Na})(\text{Al})(\text{Si})}$

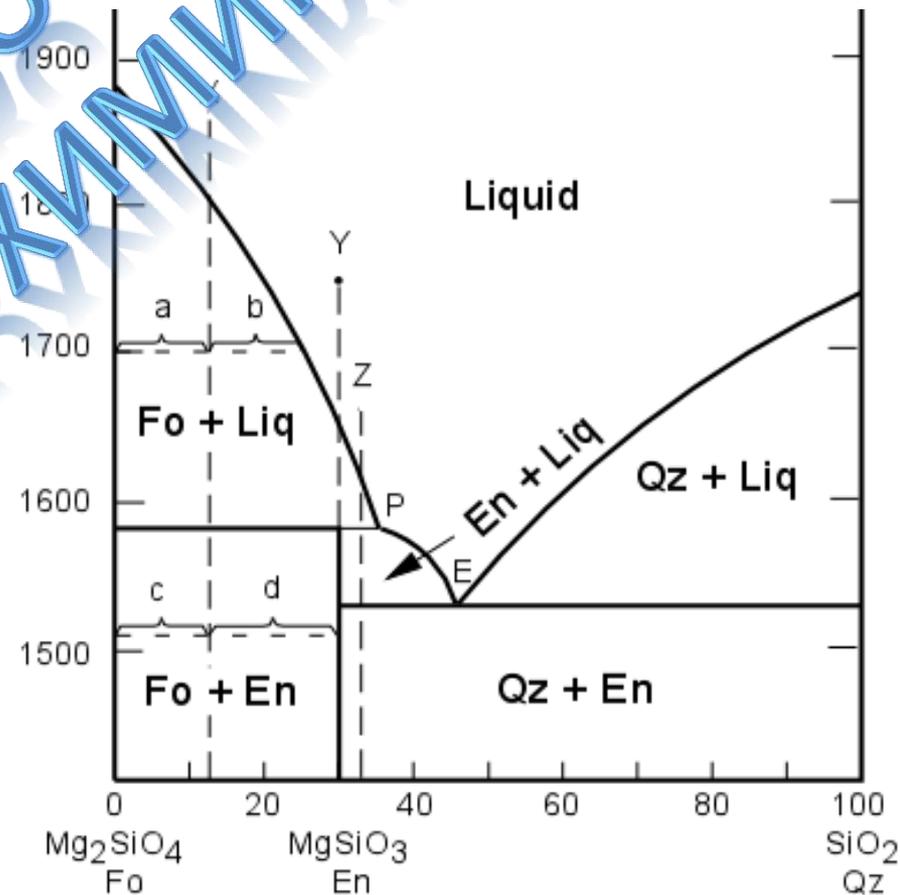
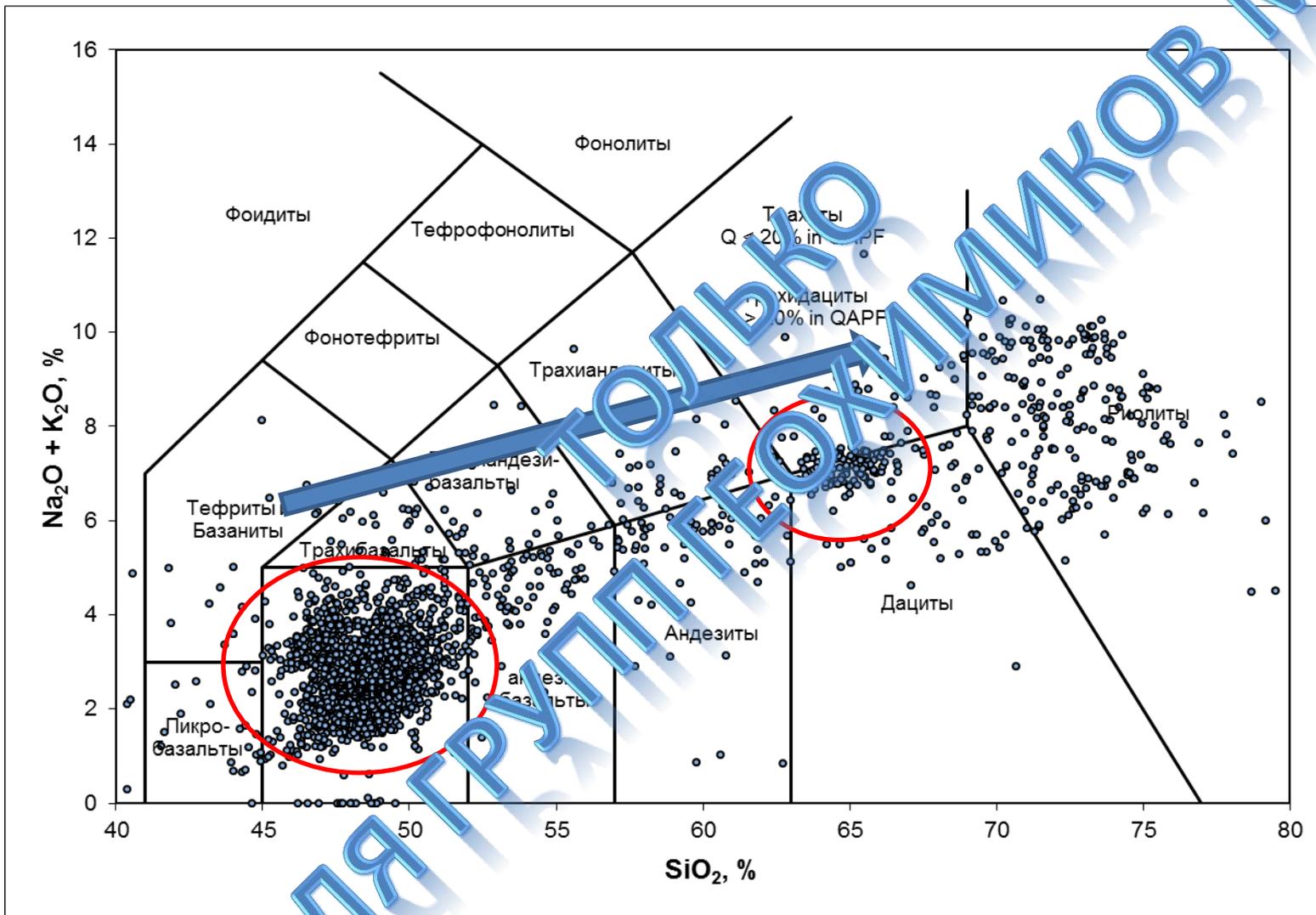


Figure 2



# Причины разнообразия магматических пород



Составы магматических пород Исландии  
(типичная толеитовая серия)

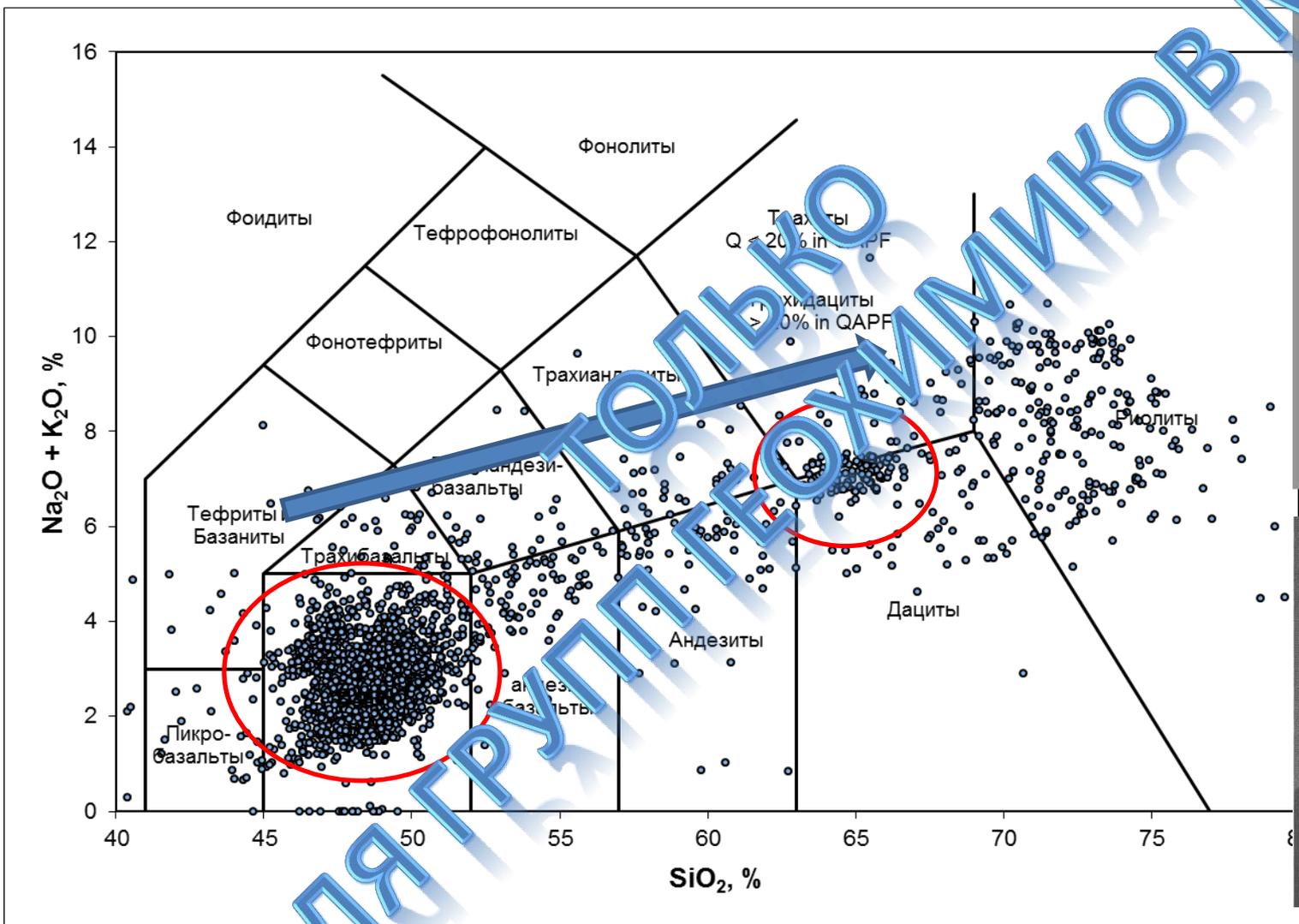
# Причины разнообразия магматических пород, предложенные >100 лет назад

Изложено по статье D.Young “Norman Levi Bowen (1887–1956) and igneous rock diversity”//Geological Society, London, Special Publications 2002, v. 192; p. 99-111

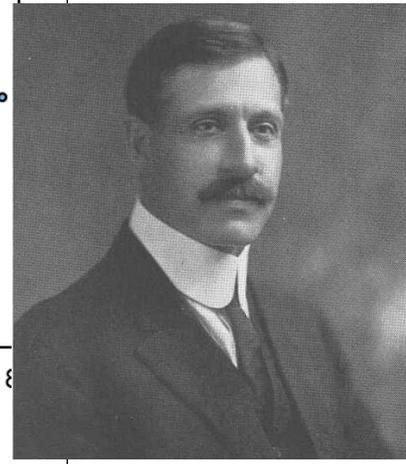
- Смешение 2 первичных магм, базальтовой и рифтовой (Бунзен, 1851)
- Ассимиляция вмещающих пород и смешение магм (Левинсон-Лессинг, 1899)
- Ликвация (Durocher, 1857, Rosenbusch, 1889)
- Многообразие эвтектик (Teall, 1888, Vogt, 1903)
- Существование разнообразных стоев магм от кислых до основных (Вальтерхаузен, 1853; Durocher, 1857)
- Эффект Core (термодиффузия) в крупных магматических очагах (Lagorio, 1887; Teall, 1888; Brögger, 1890; Vogt, 1891; Iddings, 1892; Judd, 1893)
- Эффект Гойи и Шаперона (гравитационное перераспределение в жидкости) - (Iddings, 1892; Brögger, 1894)
- Фракционная кристаллизация (Becker, 1897; Левинсон-Лессинг, 1899; Боуэн, 1913)

Франц Юльевич Левинсон-Лессинг (1861-1939) предложил для объяснения разнообразия пород комплексную модель ассимиляции, повторного плавления, дифференциации и многообразия эвтектик, наиболее прогрессивную на то время.

# Феннер и Боуэн, Исландия, 1920-е годы



NORMAN L. BOWEN  
(1887 - 1956)



Fenner Clarence Norman  
(1870-1949)

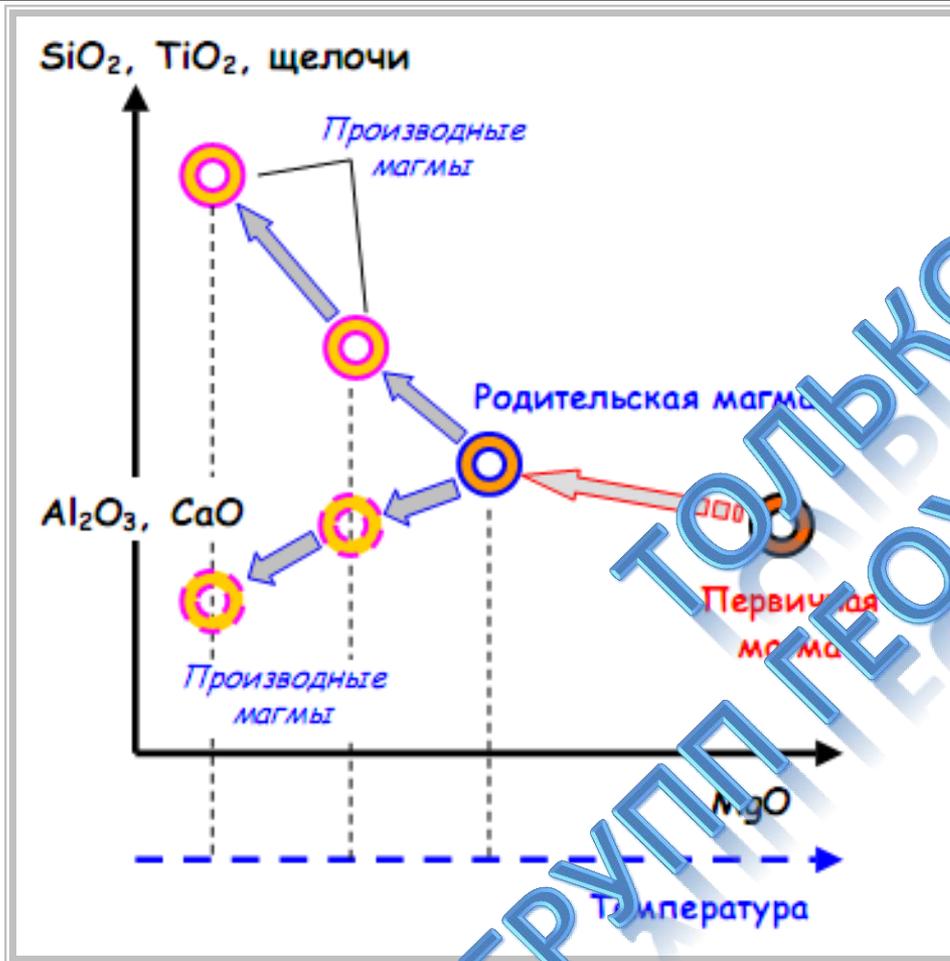
Составы магматических пород Исландии (типичная толеитовая серия) – смешение или дифференциация?

# Реакционный и непрерывный ряды Боуэна



NORMAN L. BOWEN  
(1887 - 1956)

# Первичная, родительская и производная магмы



Исходной или первоначальной (*parental*) называется магма, при дифференциации которой сформировалась данная серия или ассоциация магматических пород

Примитивные расплавы

Расплавы, формирующиеся непосредственно в зоне плавления мантийного вещества, называются первичной (*primary*) магмой

# Основные типы дифференциации

## Закрытая система

Отделение кристаллов и расплава

Гравитационное осаждение

Сепарация в потоке

Фильтр-прессинг

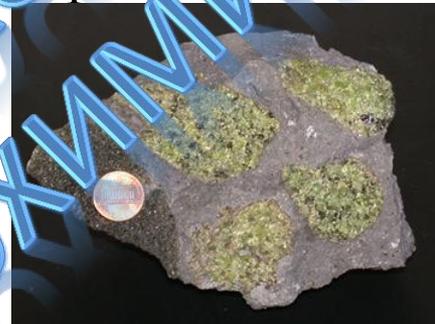
Отделение 2-х расплавов (дифференция)

Отделение флюида и расплава

## Открытая система

Ассимиляция

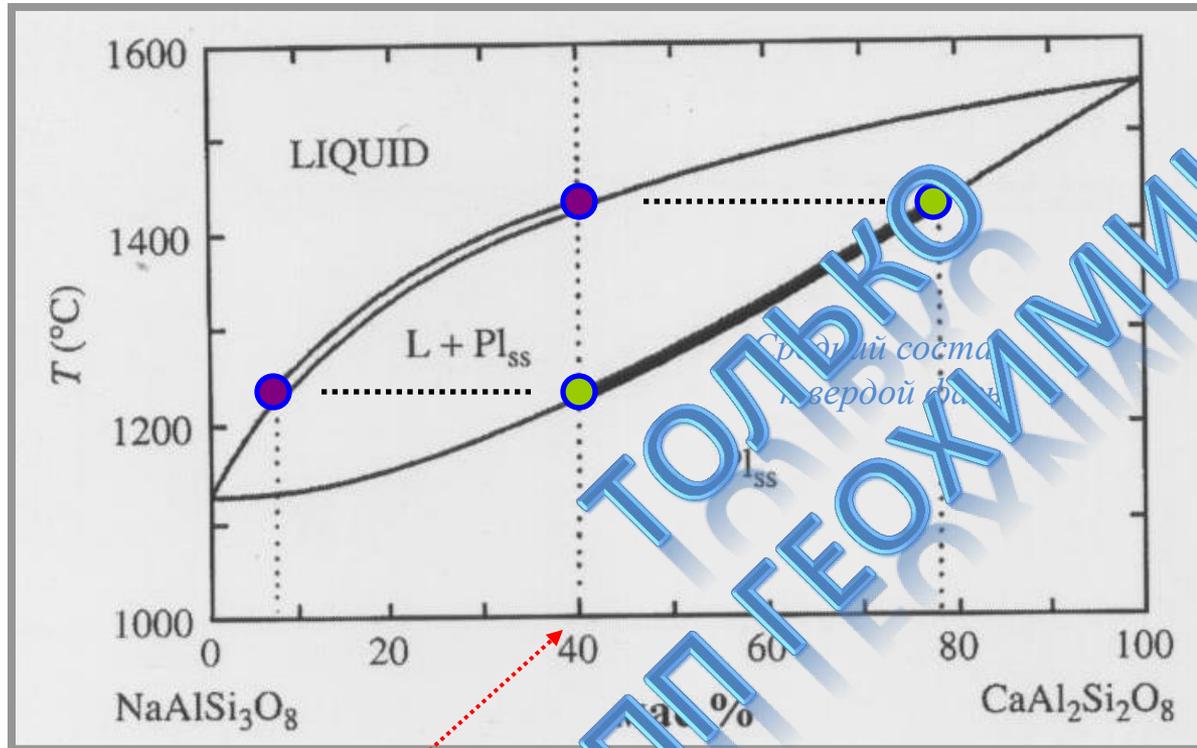
захват магмой кусочков вмещающих пород и частично в твердом состоянии



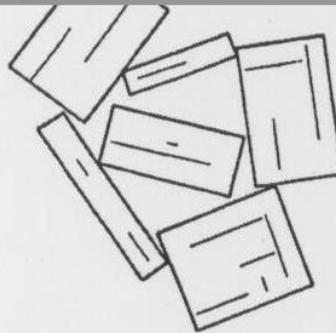
Смешение двух или более контрастных магм



# Равновесная кристаллизация в системе Ab-An



Исходный состав системы

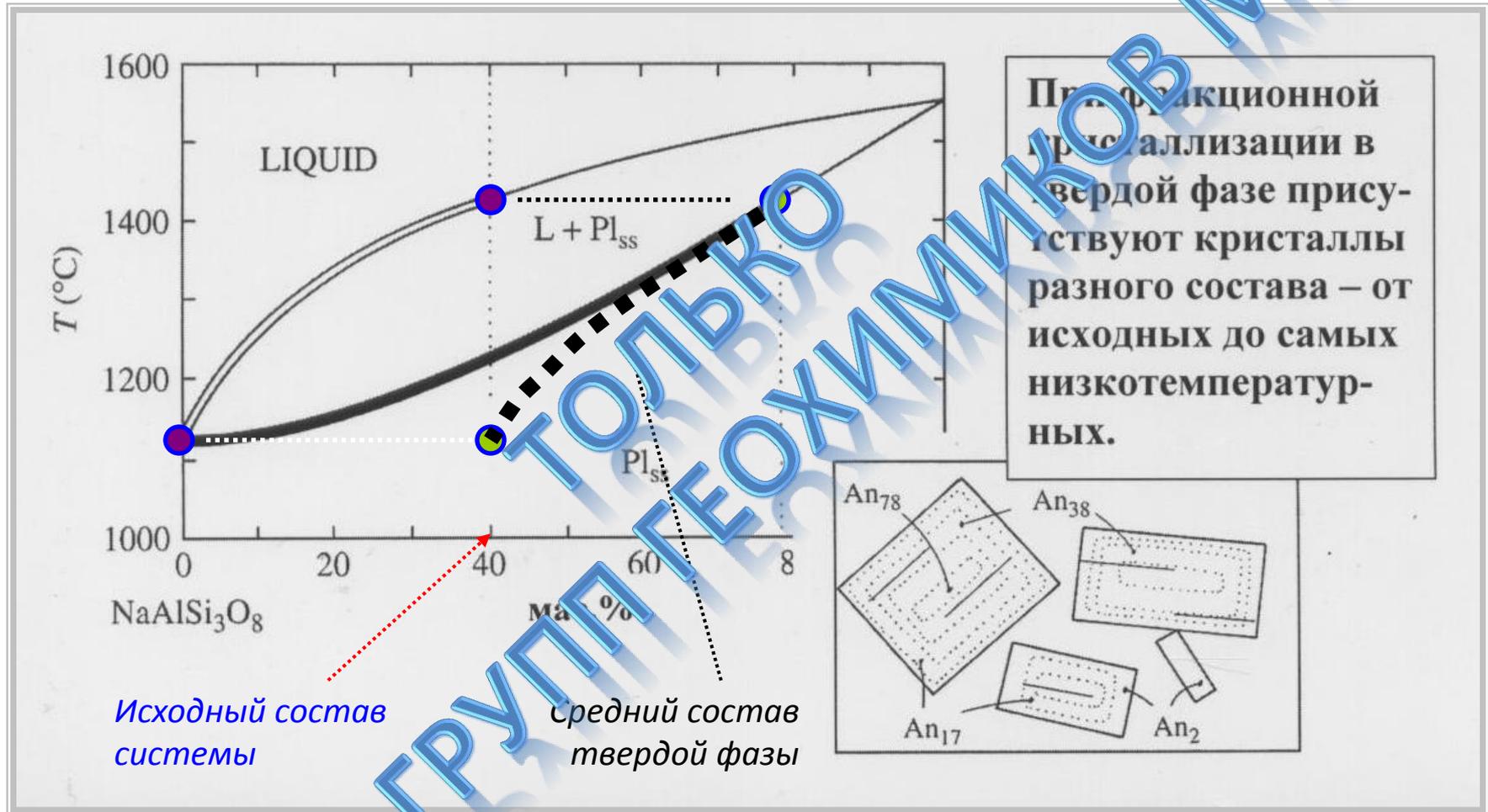


В результате равновесной кристаллизации процесс завершается образованием однородных кристаллов (An<sub>40</sub>).

«Средний» состав Pl на каждой стадии кристаллизации постоянный и отвечает равновесию со всем объемом остаточного расплава

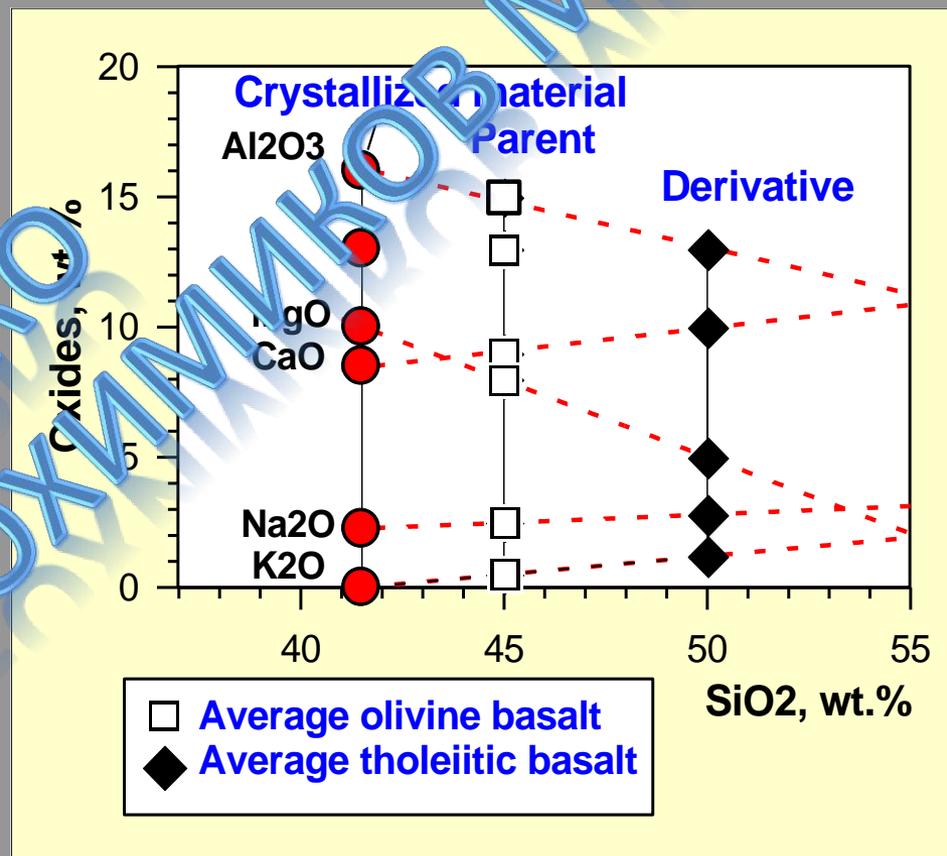
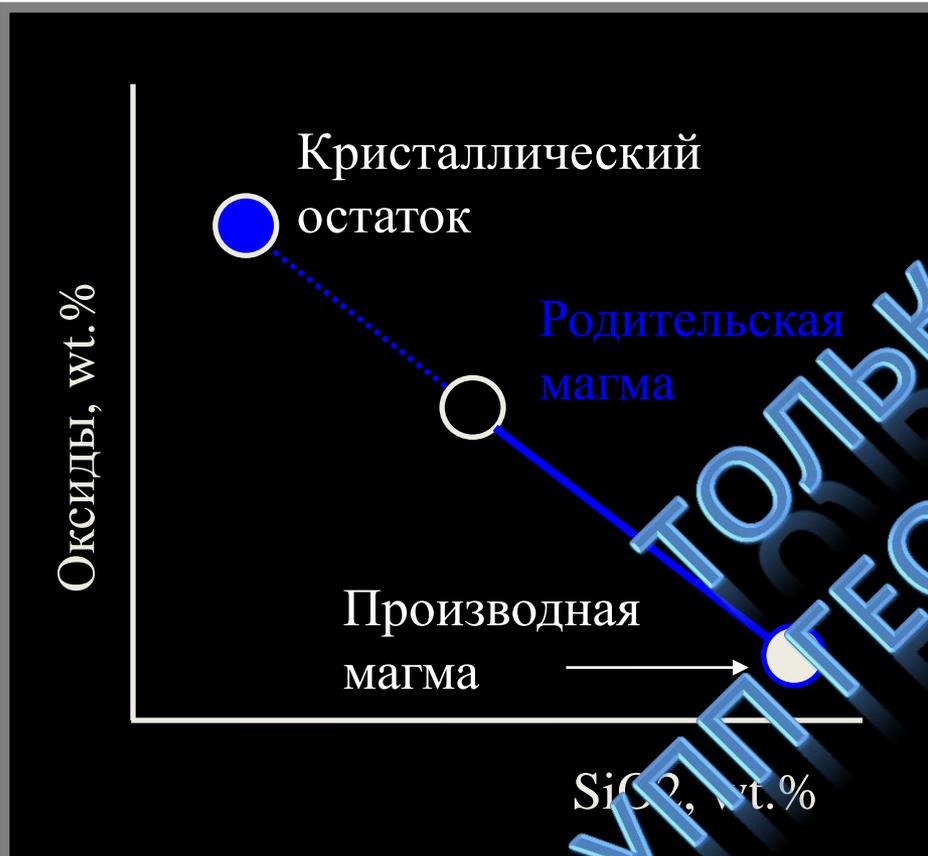
Средний состав твердой фазы

# Фракционная кристаллизация в системе $\lambda$ b-An



“Средний” состав  $Pl$  выделившегося  $Pl$  на разных стадиях кристаллизации разный, хотя состав (бесконечно малого количества)  $Pl$ , кристаллизующегося в данный момент и отвечает равновесию с объемом остаточного расплава

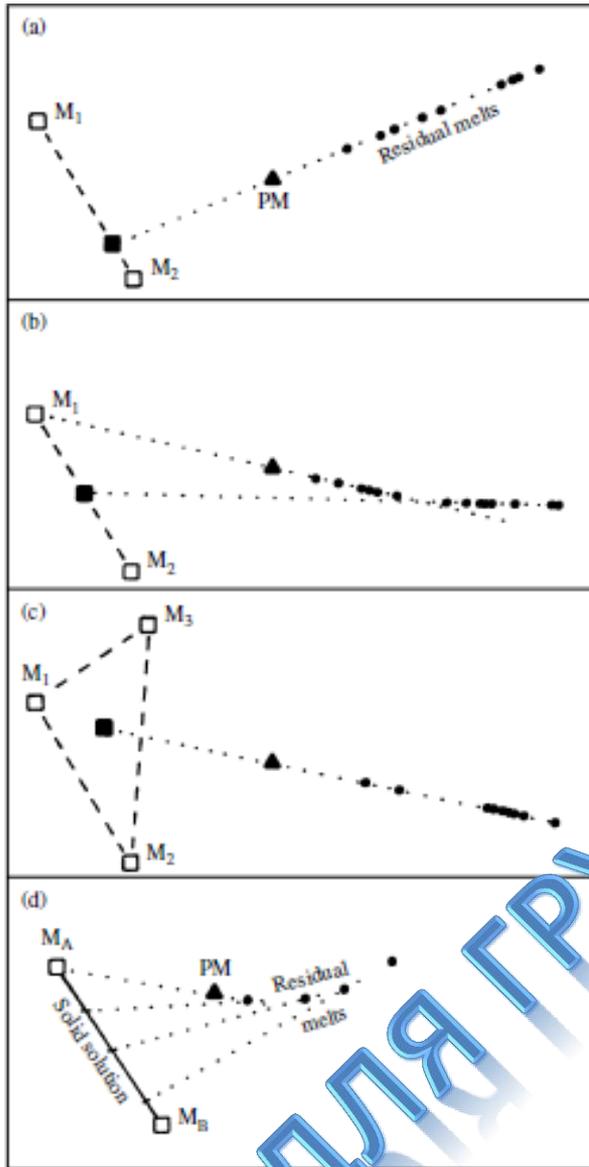
# Диаграммы вычитания



$$DM = PM - (mineral X + mineral Y + mineral Z)$$

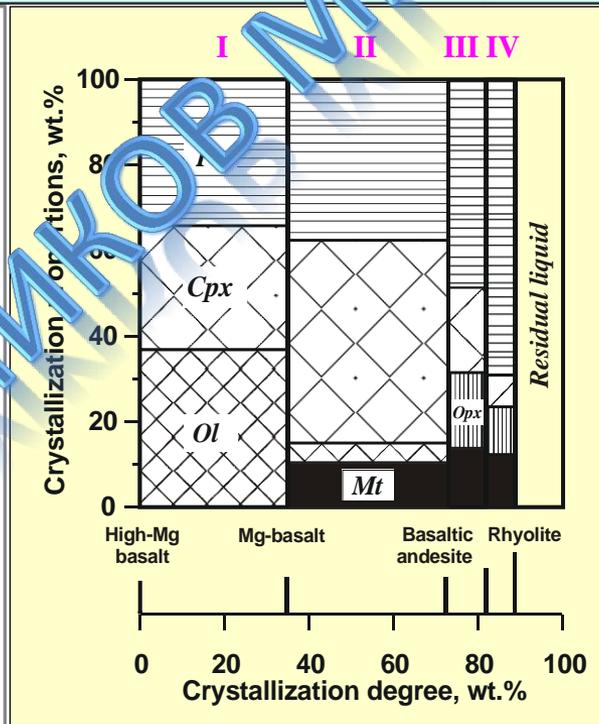
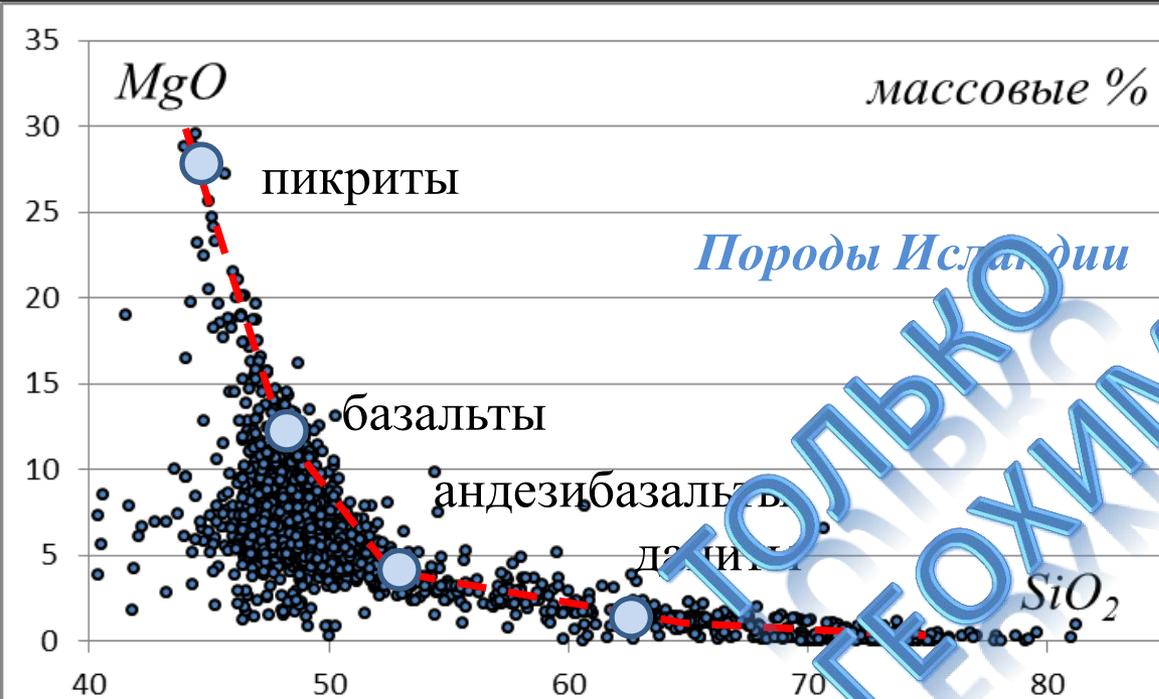
Производный расплав = Родительский расплав - Кристаллический материал (удаленный)

# Диаграммы вычитания для нескольких минералов



	Базальт	Стекло
$\text{SiO}_2$	51.1	66.5
$\text{TiO}_2$	1.1	1.3
$\text{Al}_2\text{O}_3$	14.3	13.9
$\text{FeO}$	10.4t	1.9t
$\text{MgO}$	8.1	0.1
$\text{CaO}$	9.2	0.9
$\text{Na}_2\text{O}$	3.1	3.3
$\text{K}_2\text{O}$	1.1	7.0
Total	99.0	94.9
$Q$	0.0	19.0
$C$	6.5	41.2
$Ab$	26.2	27.7
$An$	21.5	2.4
$Di$	19.2	0.7
$Hy$	13.1	0.0
$Ol$	5.9	0.0
$Mt$	4.5	0.7
$Il$	3.2	2.4

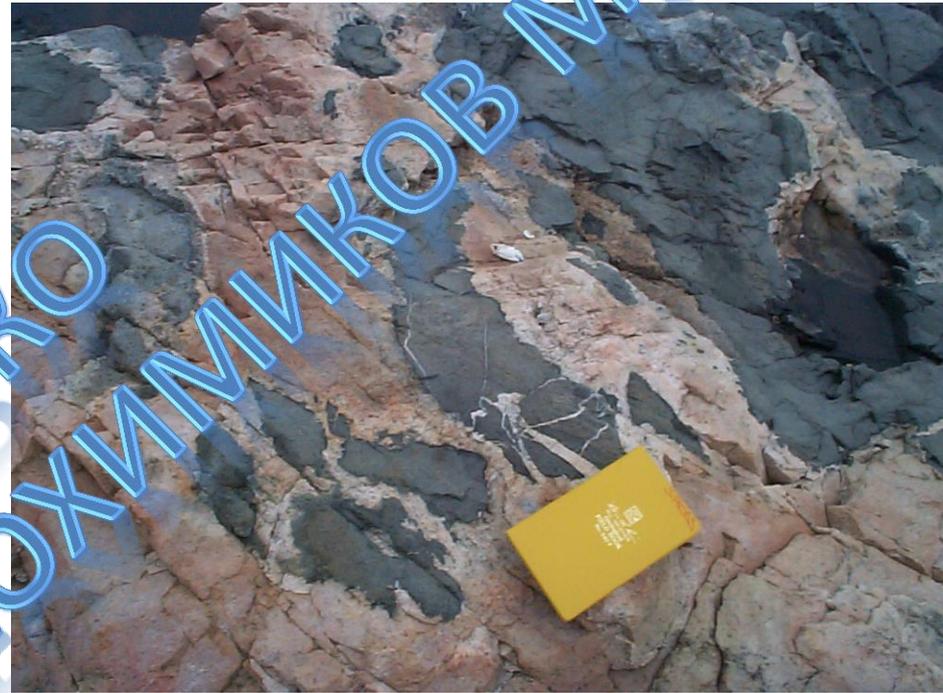
# Типичные тренды дифференциации



Стадия	Родит. → Производ.	Минералы
I	Пикриты → базальты	$OI + Pl + Cpx$
II	Базальты → Андезибаз.	$OI + Pl + Cpx + Mt$
III	Андезибаз. → Дациты	$Pl + Cpx + Mt + Orx$
IV	Дациты → Риолиты	$Pl + Cpx + Mt + Orx$

Идея фракционной кристаллизации: Пикриты (или пикробазальты) являются родительской магмой для всей серии пород

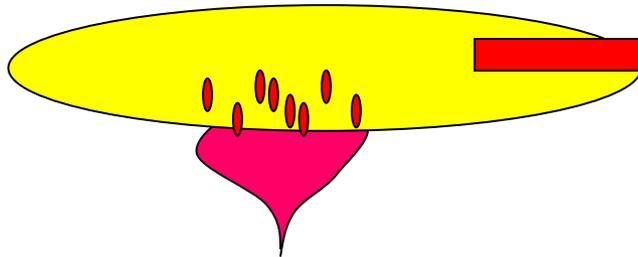
# Физическое смешение магм (magma mingling)



Физическое смешение магм может происходить

- 1) при внедрении даек в долгоживущие магматические очаги
- 2) при конвекции (например, в расслоенных интрузивах)
- 3) при подпитке очага новыми порциями магмы

# Физическое смешение магм (magma mingling)



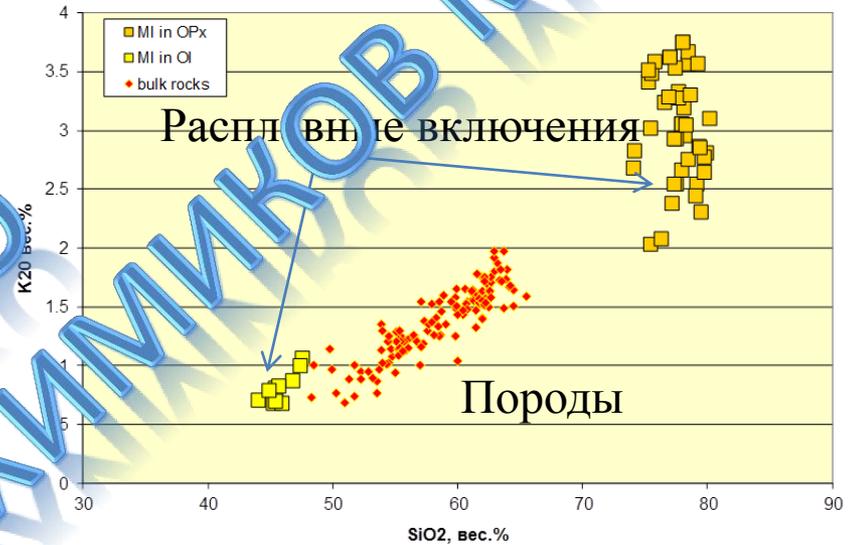
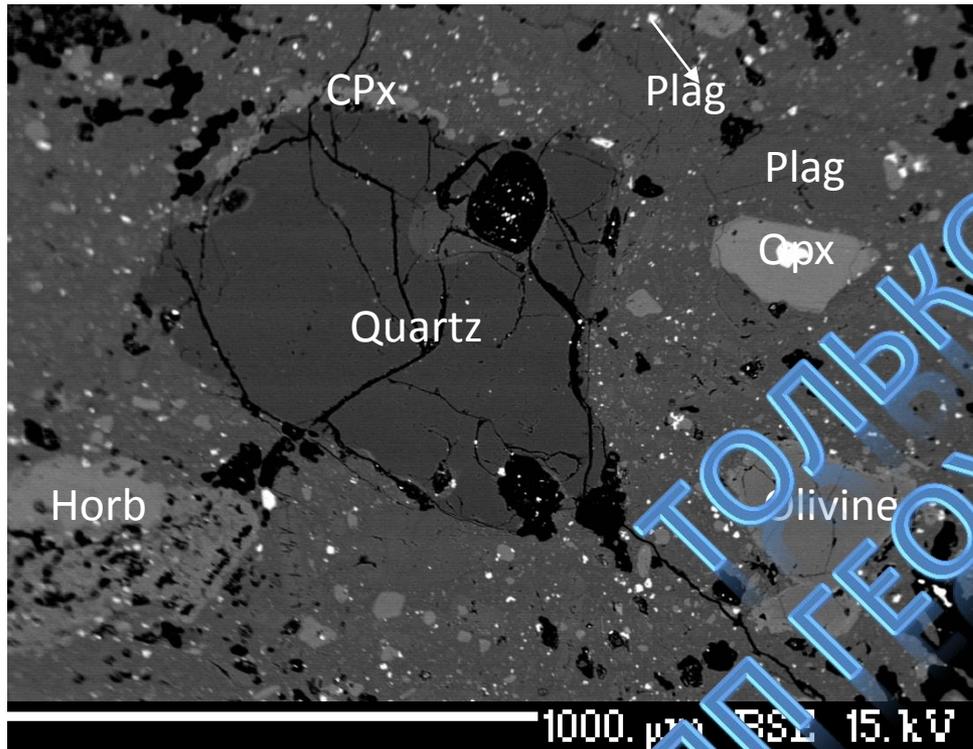
- Фрагментация на отдельные глобулы
- Кристаллизация, гомогенизация



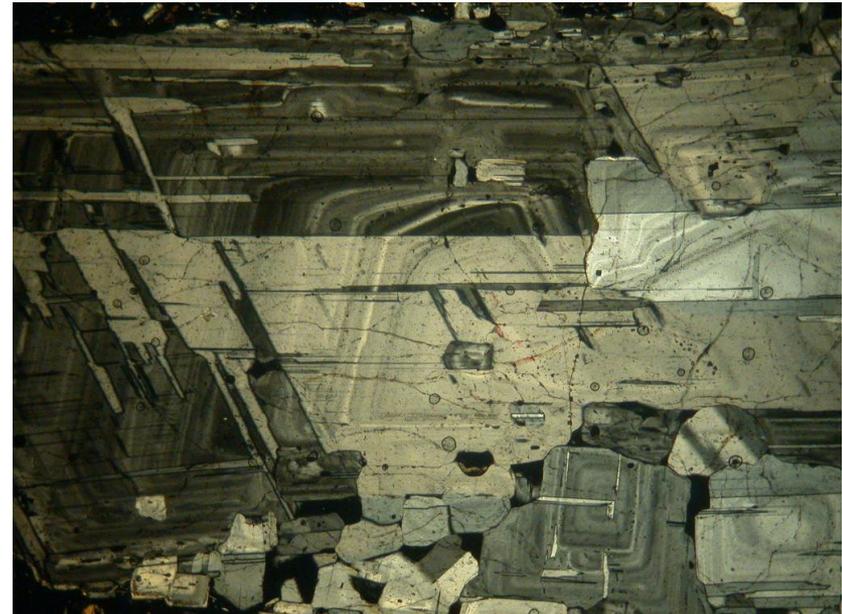
Физическое смешение магм хорошо распознается при контрасте температуры и состава смешивающихся магм.

Более горячая магма остывает на контакте с более холодной и часто образует закалочные зоны, которые препятствуют дальнейшему смешению.

# Петрологические признаки смешения

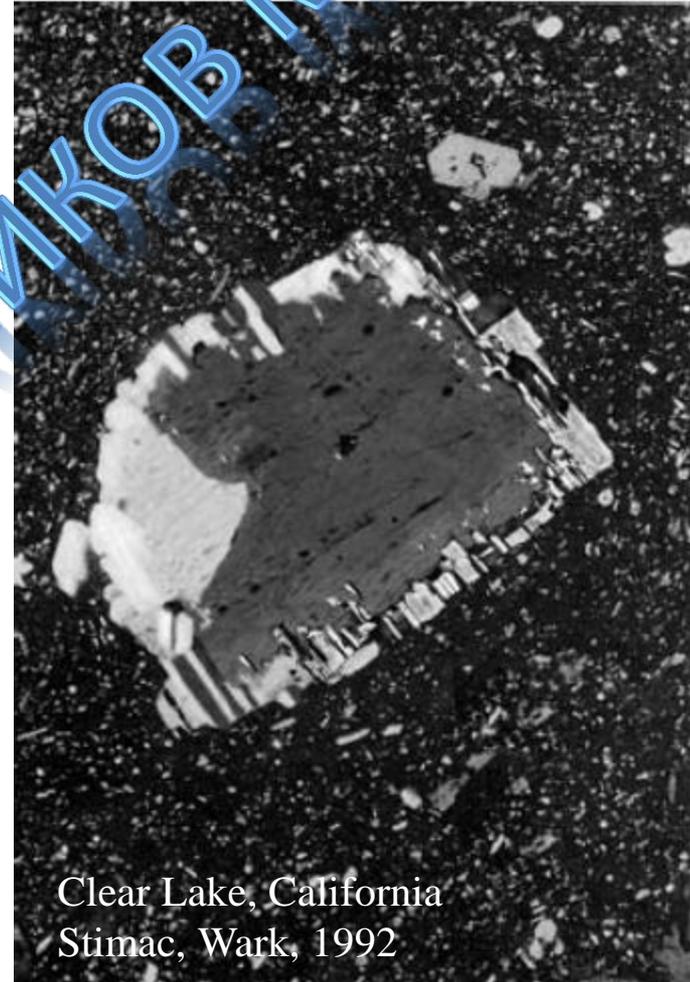


- 1) Контрастные ассоциации вкрапленников с реакционными взаимоотношениями
- 2) Контрастные составы расплавов
- 3) Сложная, ритмичная зональность вкрапленников



# Петрологические признаки смешения

Deer island, Мэн (США)

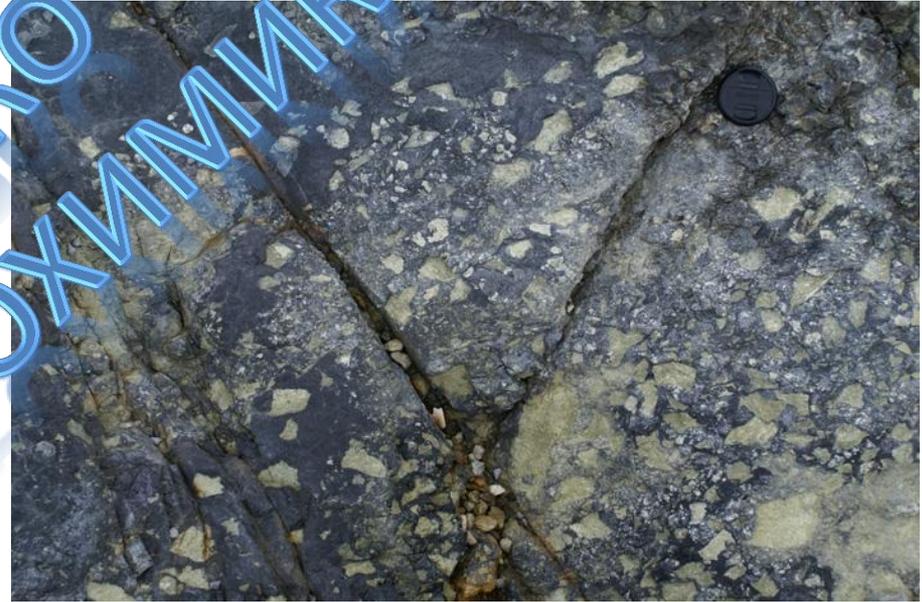


Clear Lake, California  
Stimac, Wark, 1992

Каймы плагиоклаза вокруг калиевого полевого шпата в гранитах рапакиви считаются признаком смешения с более основной, более горячей и менее флюидной магмой (Best, 2003)

# Гибридные породы

Гибридные породы возникают при смешении двух или более магм (или значительном количестве ассимилированного материала)



Пепериты – гибридные породы, в которых не менее 20% чужеродного материала, попавшего в породу в результате смешения или ассимиляции. Раньше такие породы назывались магматическими брекчиями.

White, et. al. (2009)