

# ПЕТРОЛОГИЯ,

## часть 2. Магматизм

### Лекция 2. Кристаллизация многокомпонентных расплавов

Физико-химические основы кристаллизации магматических расплавов. Понятия ликвидуса, солидуса, эвтектики, 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

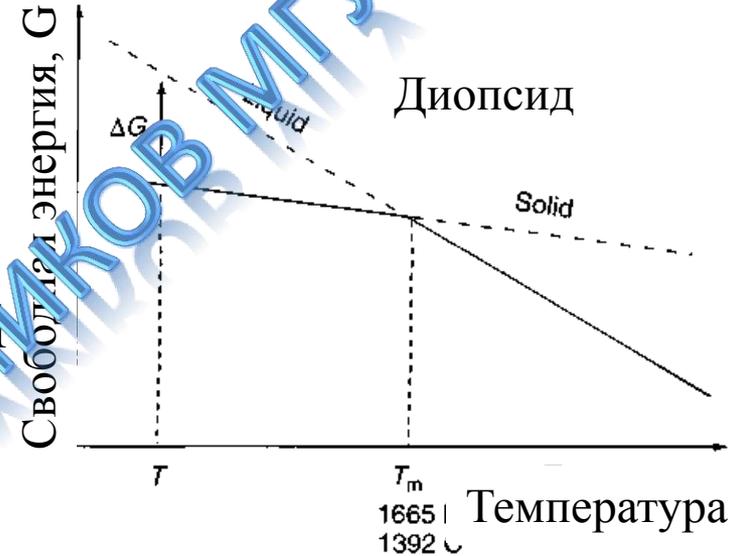
2013

# Кристаллизация одного минерала

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

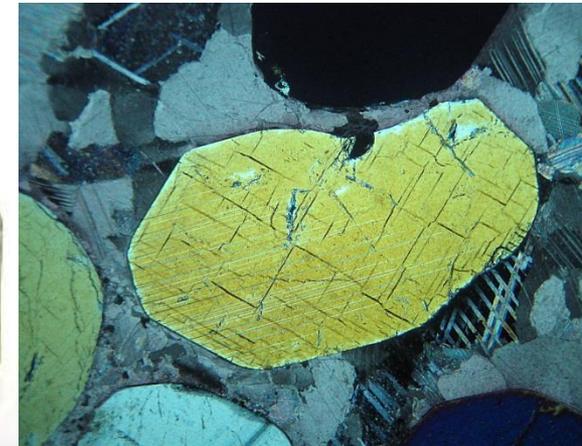
Температура плавления  
чистого диопсида ( $T_m$ ) 1392 С

Энтальпия плавления ( $H_m$ ) 142,6 КД/моль



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

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



# Кристаллизация одного минерала

Запишем реакцию кристаллизации:

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

Условие химического равновесия – равенство химических потенциалов:

$$\mu_{Di}^S = \mu_{Di}^L = \mu_{Di}^{L0} + RT \ln(x_{Di}^L)$$

Перегруппируем:

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

Отсюда:

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

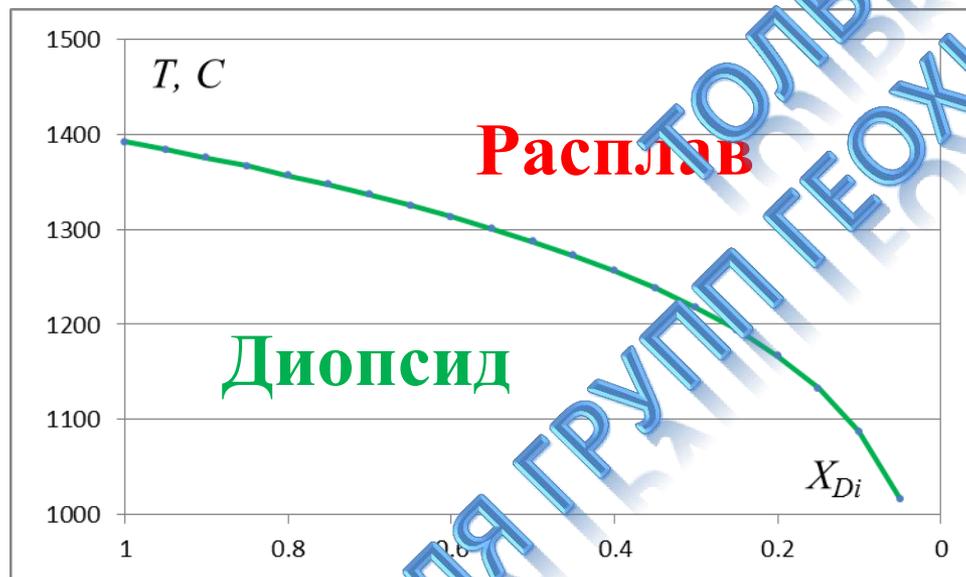
# Равновесие диопсида с идеальным расплавом

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

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

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

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



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

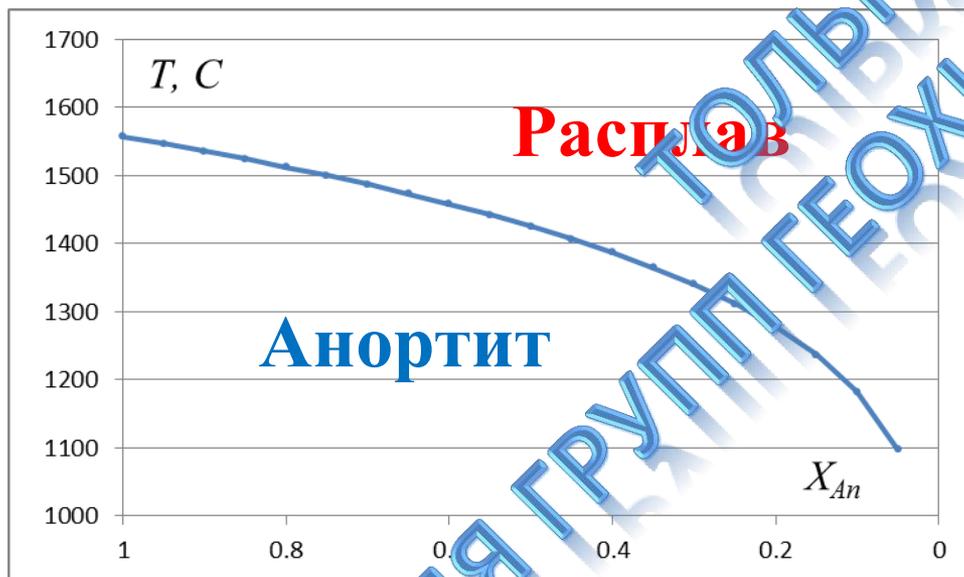
# Равновесие анортита с идеальным расплавом

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

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

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

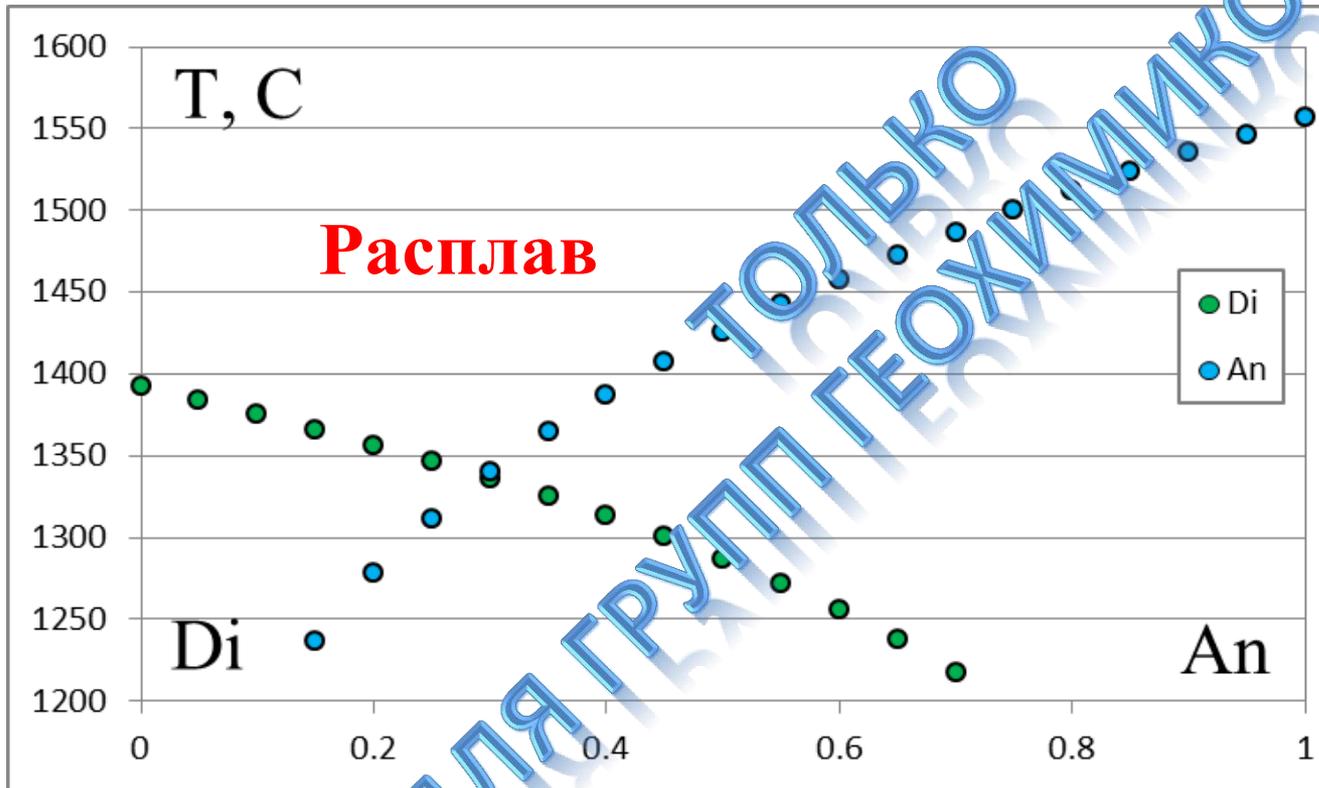
$$R = 8.3144621 \text{ J/mol}\cdot\text{K}$$



$X(An)_L$	$T, K$	$T, C$
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:  
 $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$

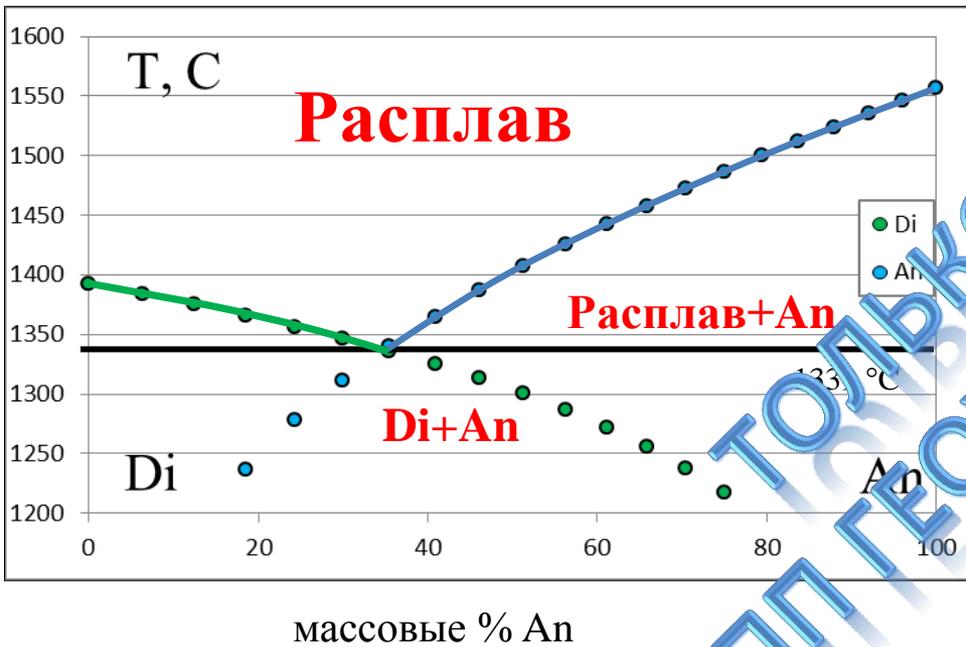
Молекулярная масса:

Di = 216.6

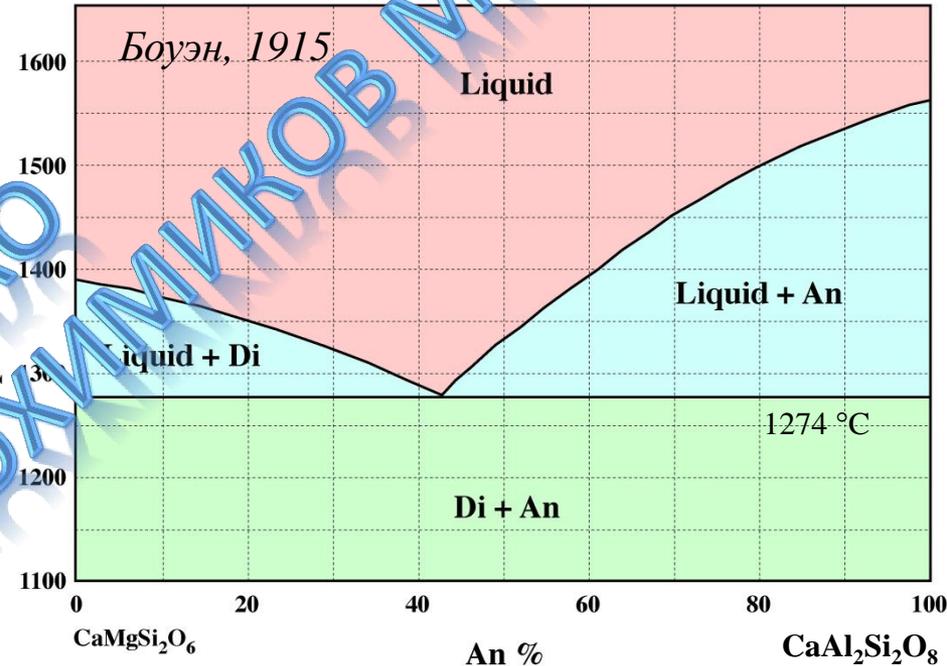
An=278.2

Диаграмма построена в мол. долях

# Бинарная система Диопсид-Анортит



Расчетная диаграмма плавления Ди-Ан



Экспериментальная диаграмма Ди-Ан

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

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

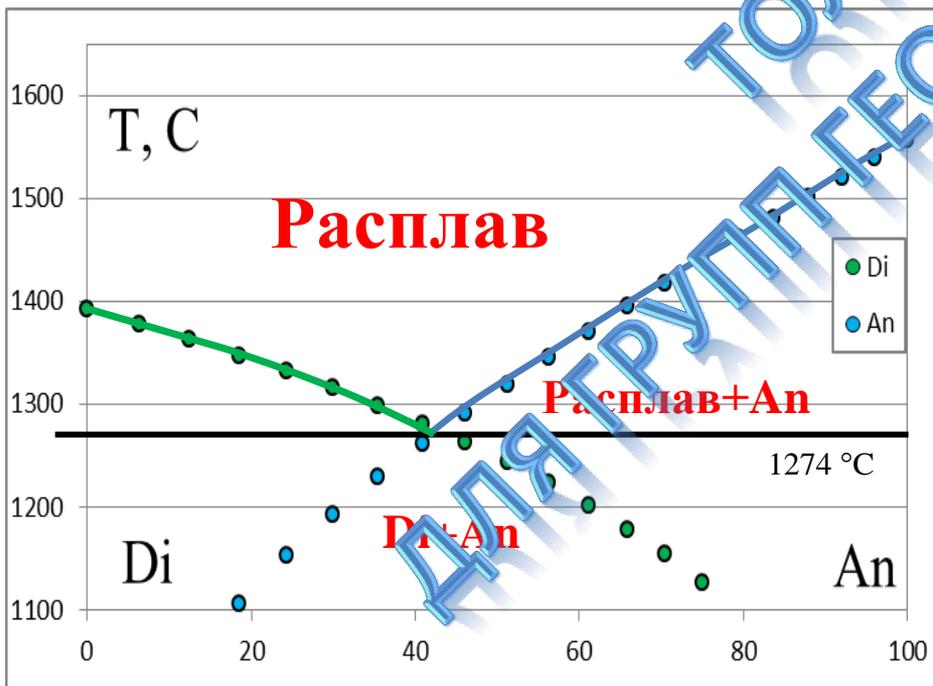
# Оценка коэффициента активности

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

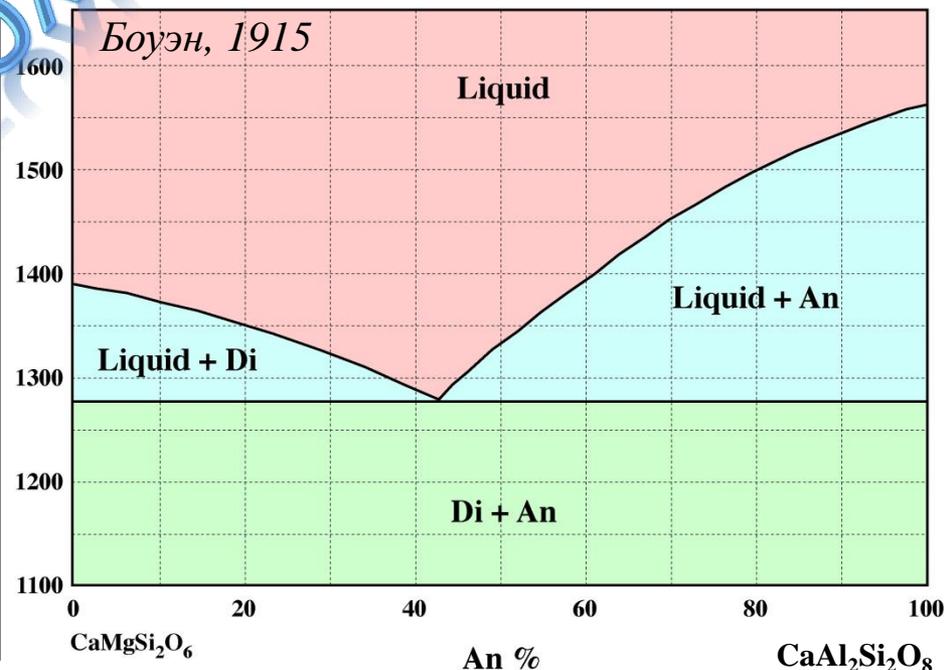
$$\ln(\gamma x_S^L) = \frac{-\Delta H_m}{RT} + \frac{\Delta S_m}{R}$$

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

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

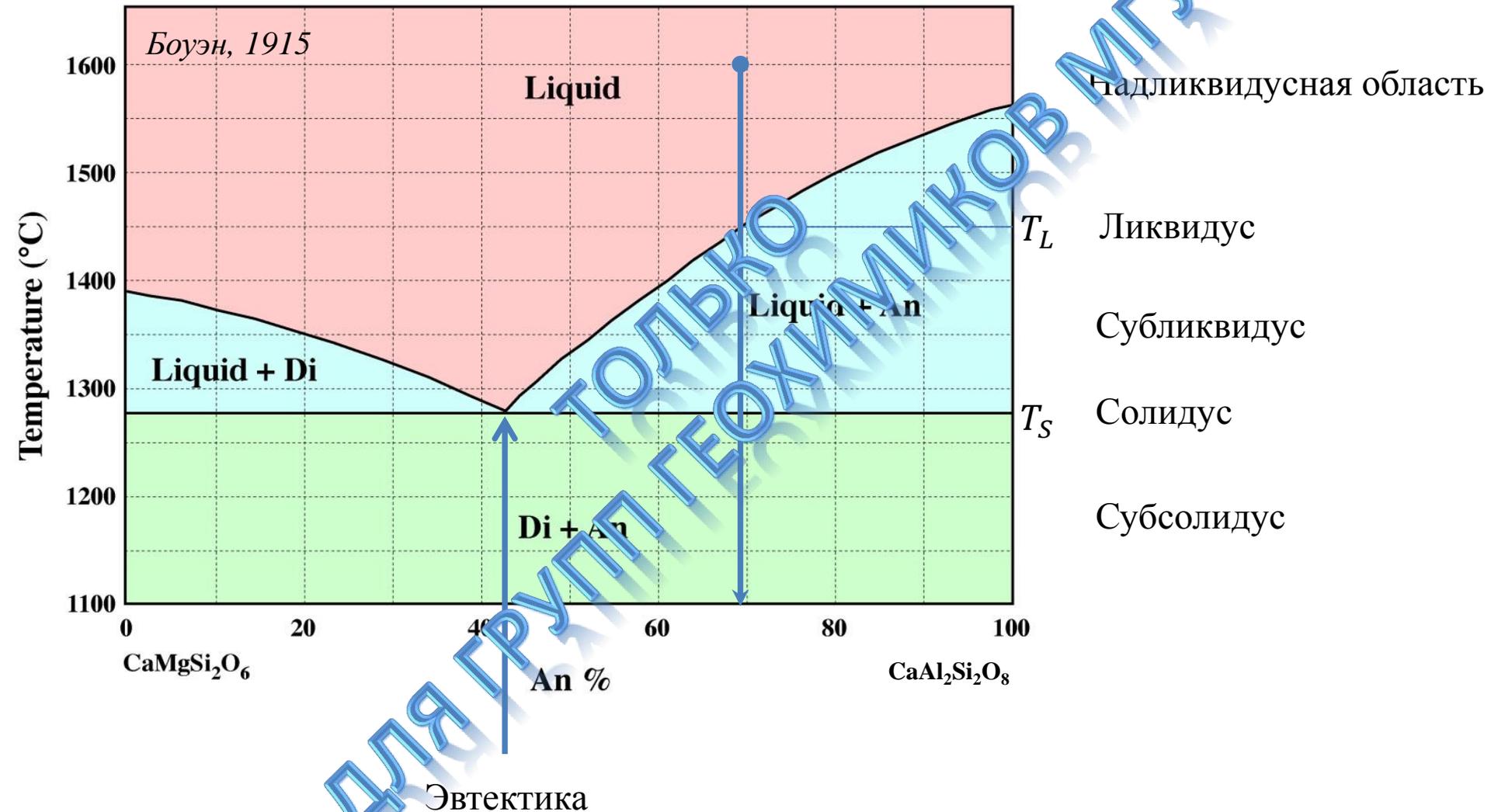


Расчетная диаграмма плавкости Di-An



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:

$$T = T_{p_0} + p * k, \text{ где}$$

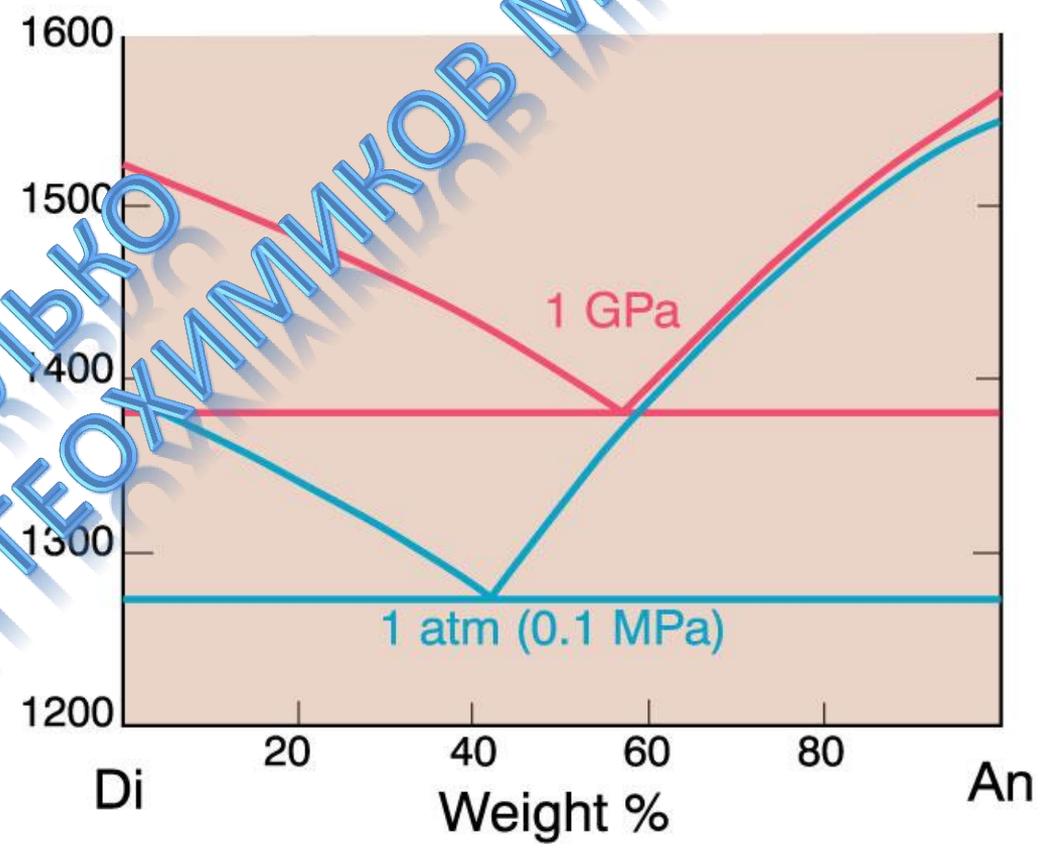
$$k = \frac{\Delta V_m}{\Delta S_m - R\ln(\gamma x_S^L)}$$

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

Для плагиоклаза  $k < 2^2/\text{kbar}$

$\Delta V_m$  (Di)=12 см<sup>3</sup>/моль

$\Delta V_m$  (An)=2 см<sup>3</sup>/моль



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

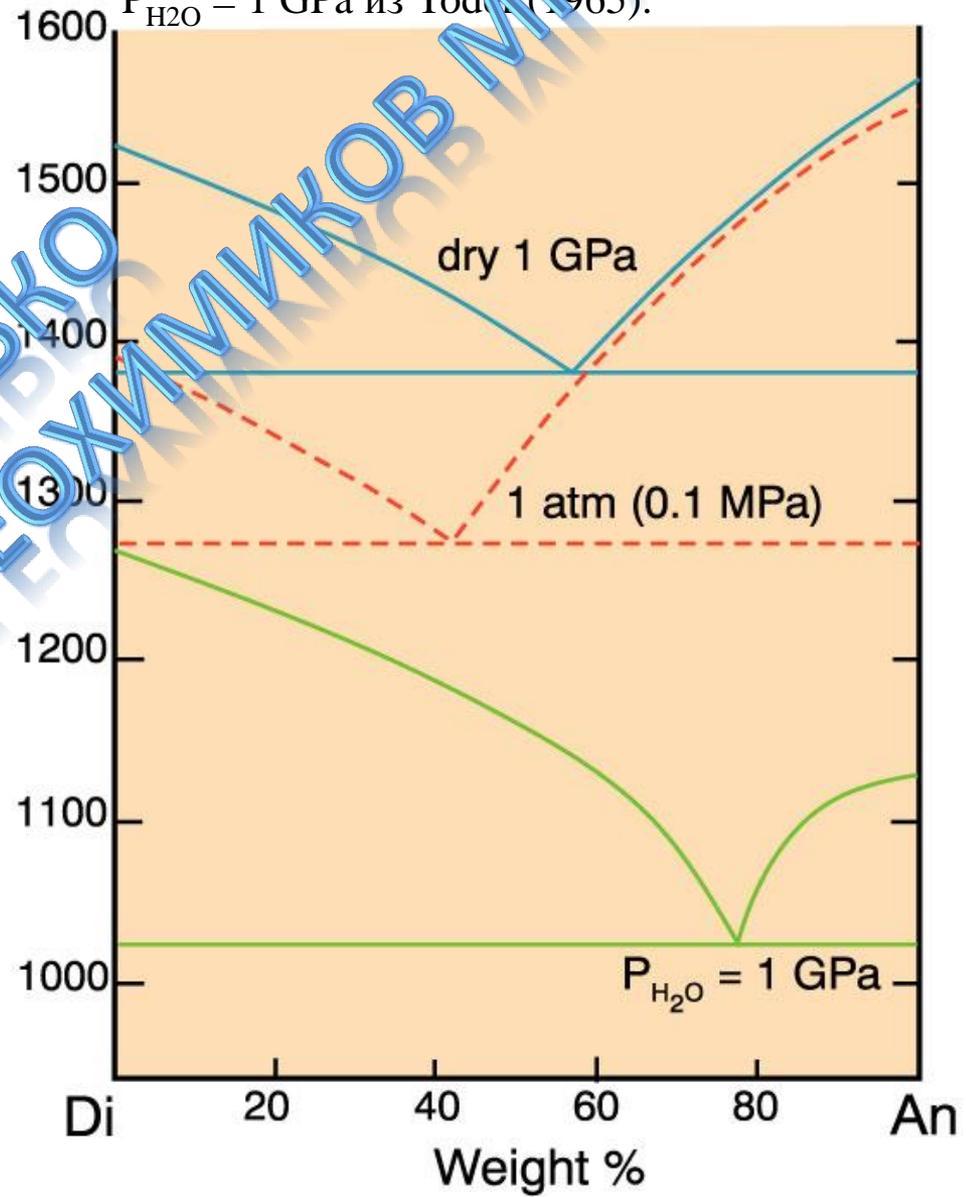
$$T = T_{p_0} + p_{H_2O} * w, \text{ где}$$

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

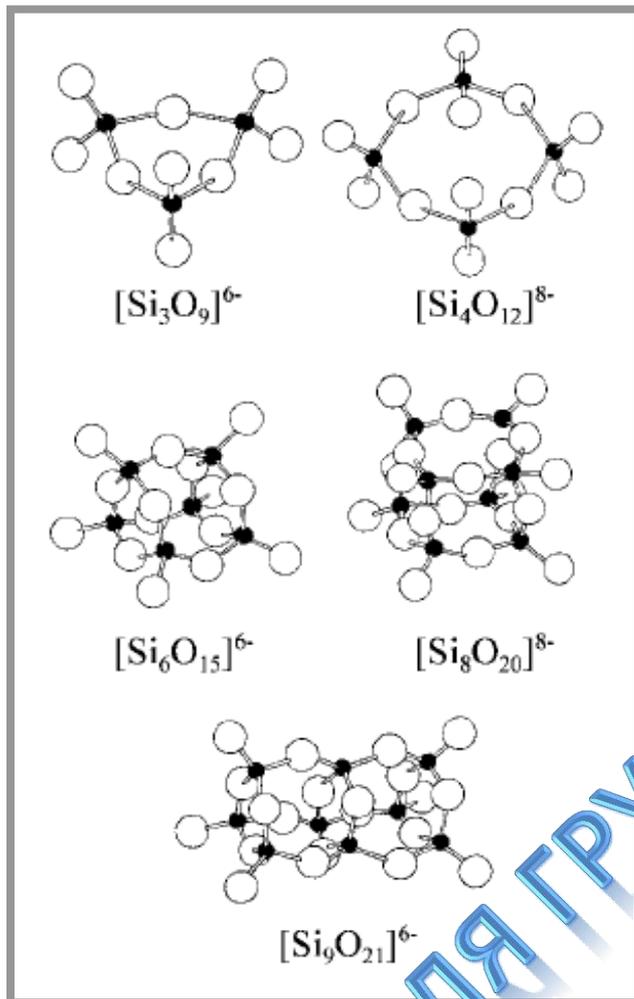
Для Pl  $w \approx -40-60 \text{ K/kbar}$

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

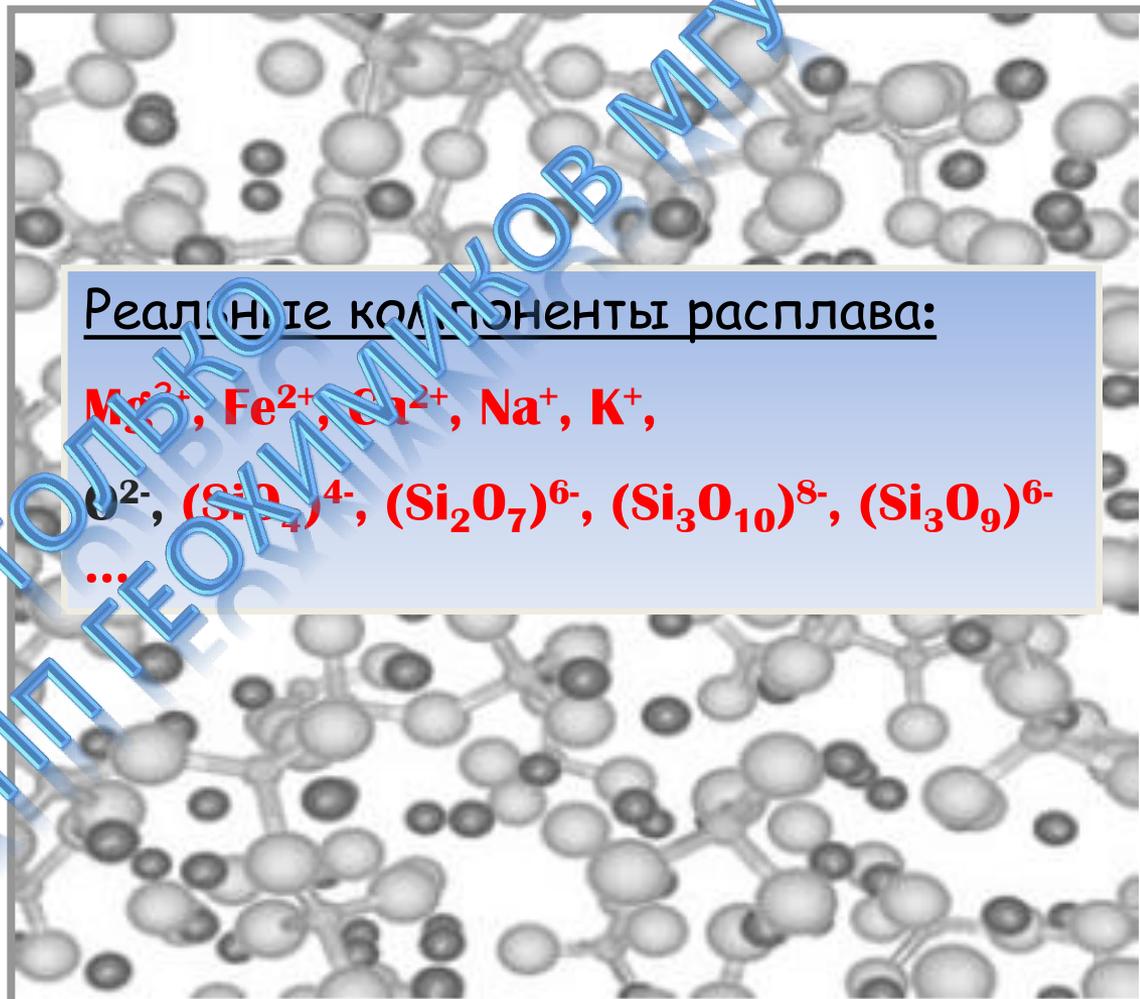
Система диопсид-анортит. Данные для  $P_{H_2O} = 1 \text{ GPa}$  из Yoder (1965).



# Строение силикатных расплавов



Простейшие кольца  
(Вокрис, 1955)



Фрагмент структуры  $K_2SiO_3$  при 2000 К  
(О – крупные и Si – мелкие белые шары, К – 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)

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

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

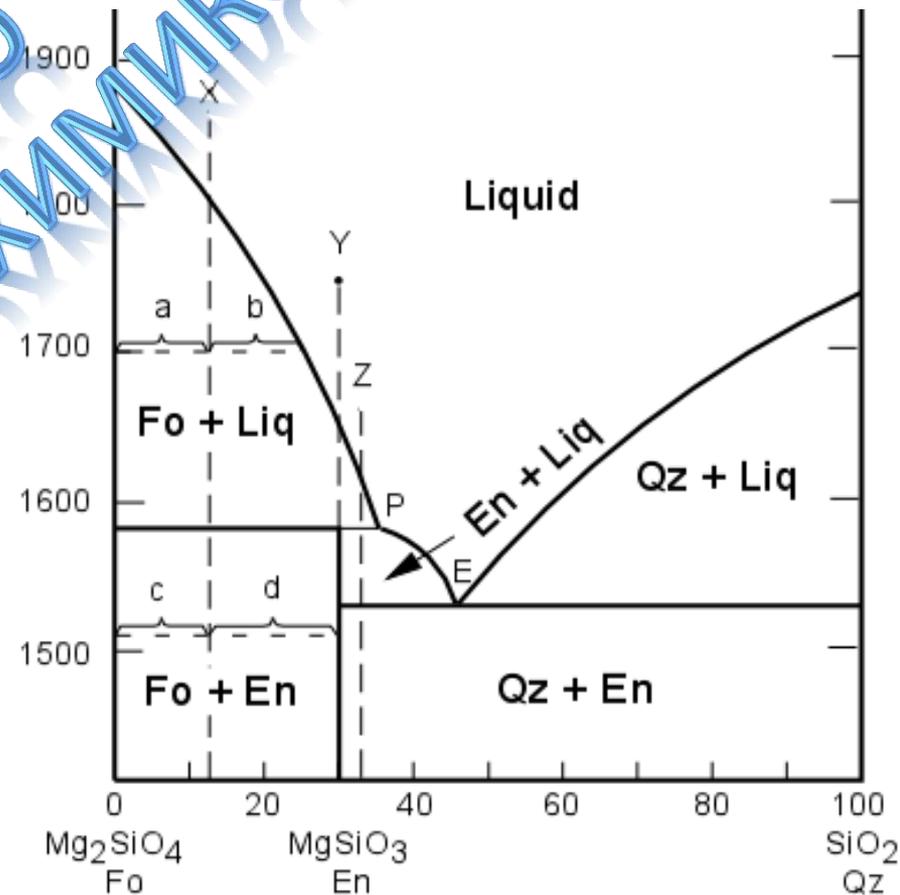
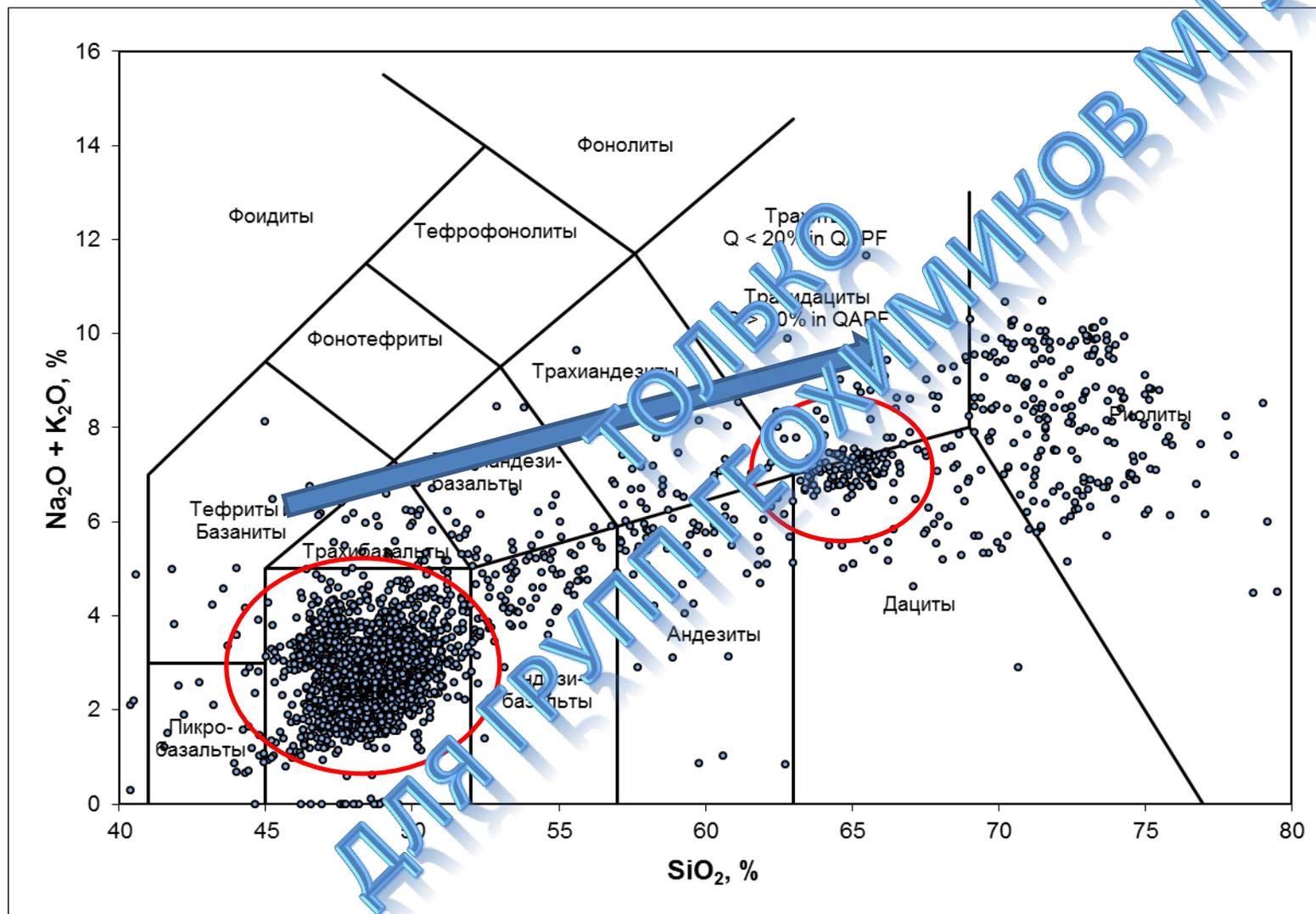


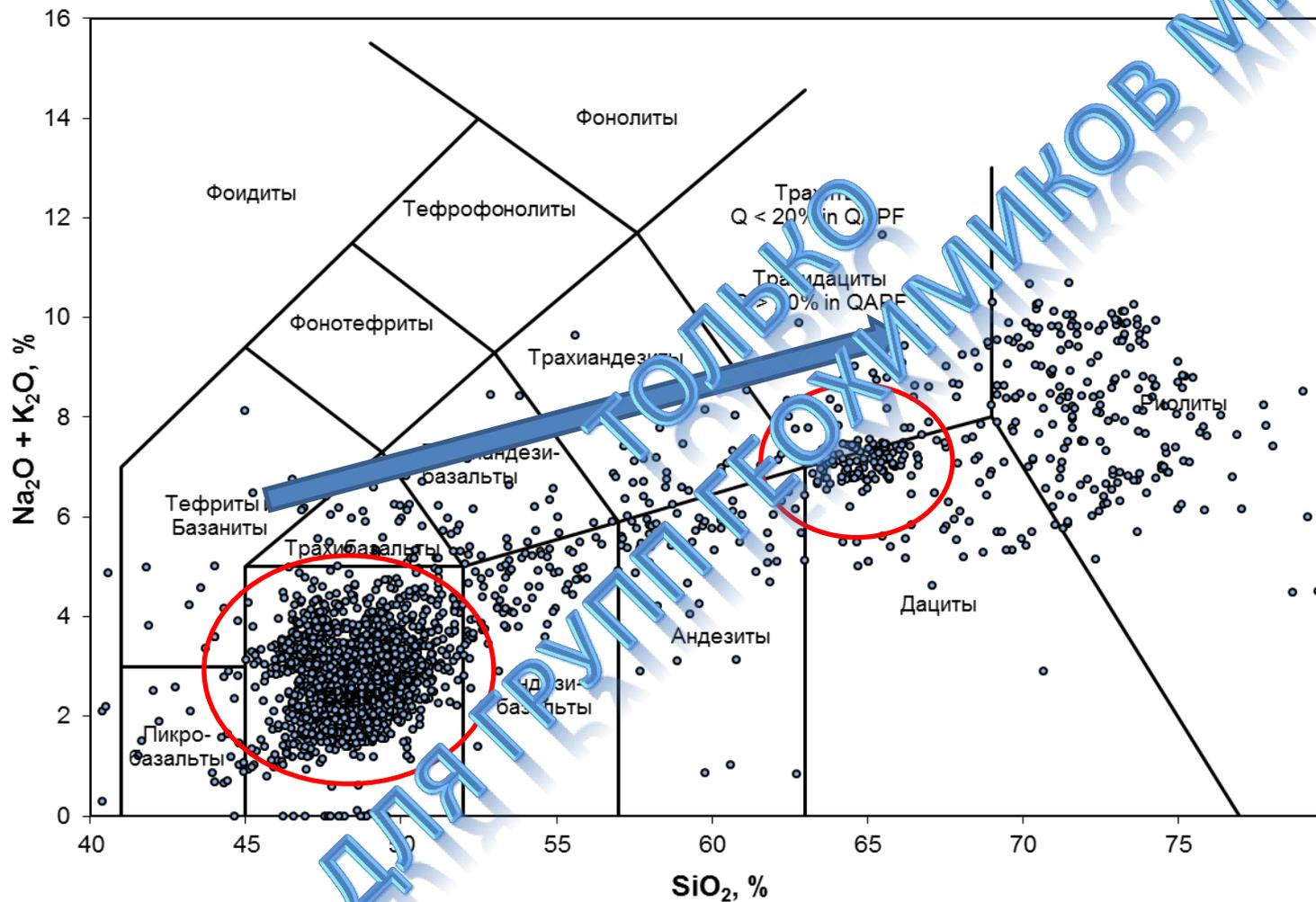
Figure 2

# Причины разнообразия магматических пород

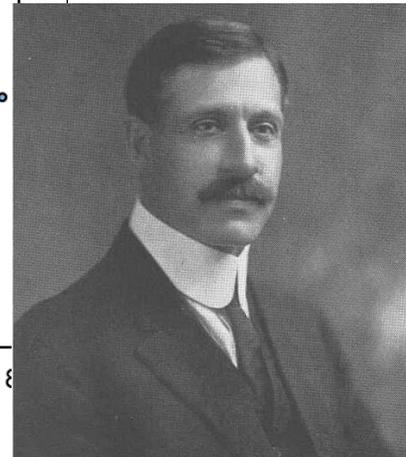


Составы магматических пород Исландии  
(типичная толеитовая серия)

# Феннер и Боуэн, Исландия, 1920-е годы



NORMAN L. BOWEN  
(1887 - 1956)



Fenner Clarence Norman  
(1870-1949)

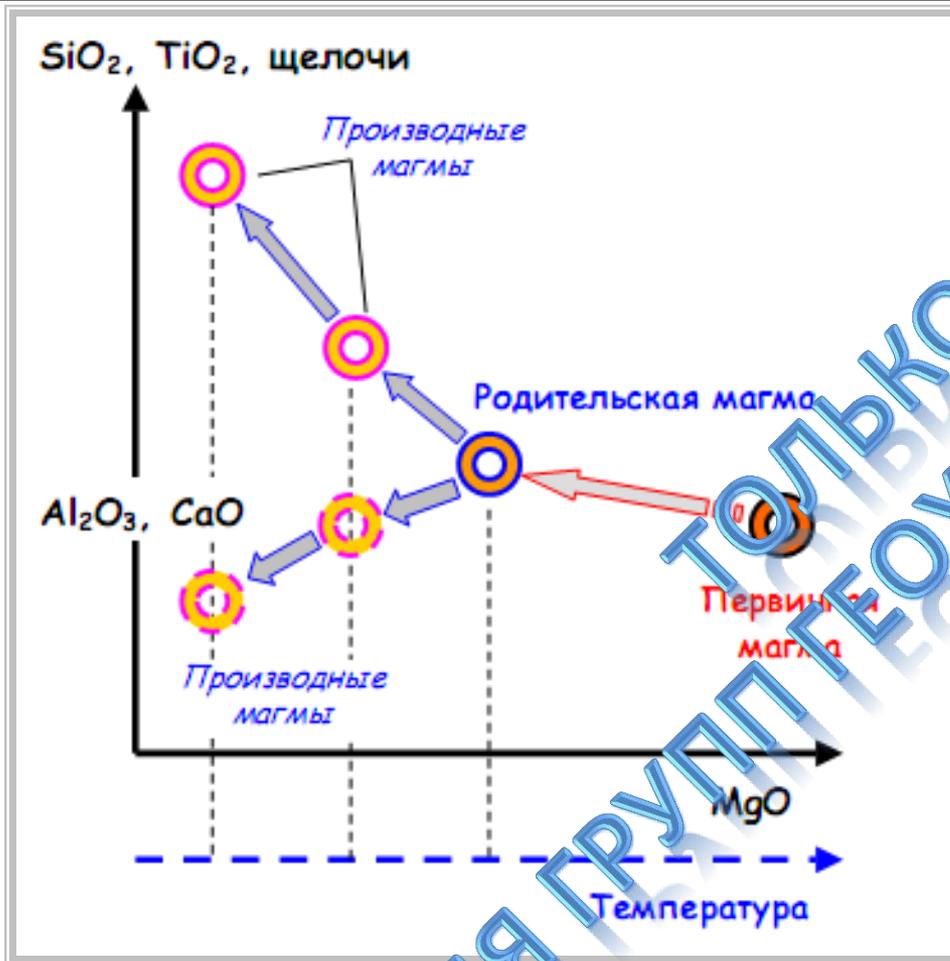
Составы магматических пород Исландии  
(типичная толеитовая серия) – смешение или дифференциация?

# Реакционный и непрерывный ряды Боуэна



NORMAN L. BOWEN  
(1887 - 1956)

# Первичная, родительская и производная магмы



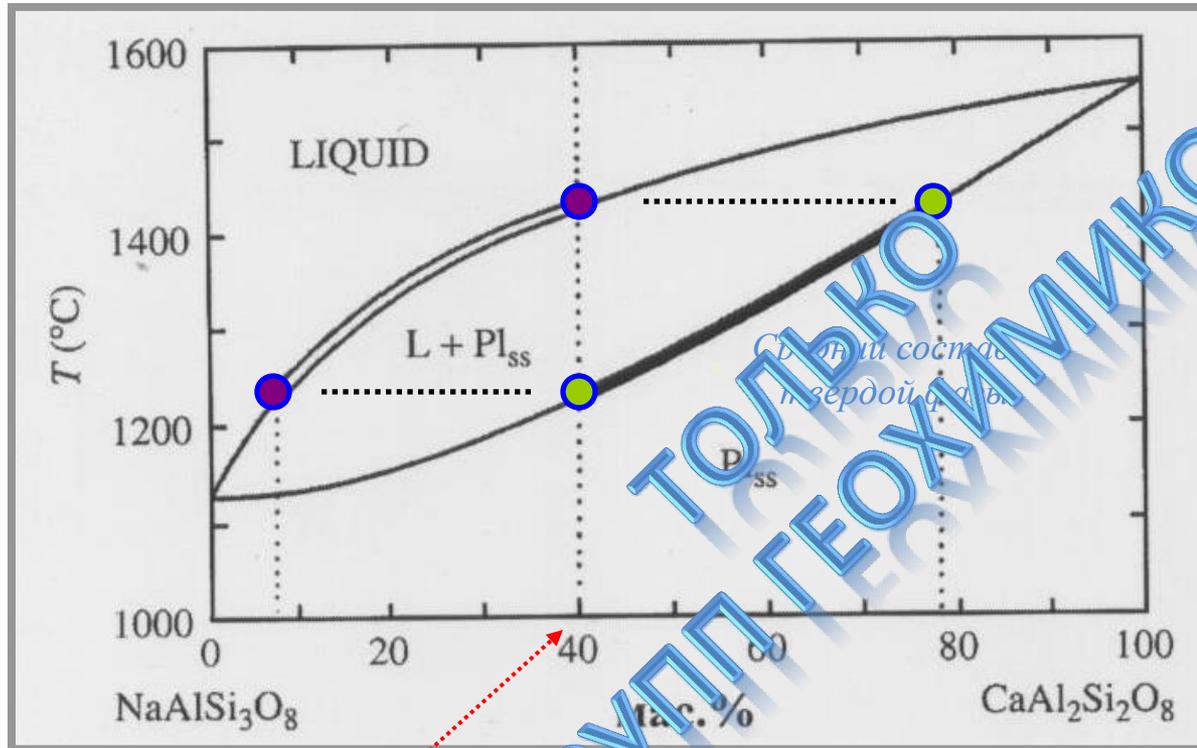
Исходной или родоначальной (*parental*) называется магма, при дифференциации которой сформировалась данная серия или ассоциация магматических пород

Примитивные расплавы

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

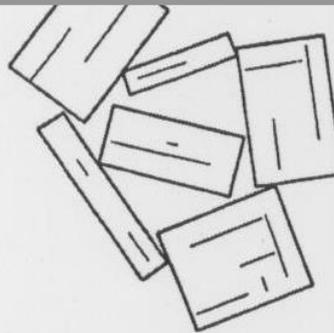
ДЛЯ ГРУПП ГЕОХИМИКОВ В МГУ

# Равновесная кристаллизация в системе Ab-An



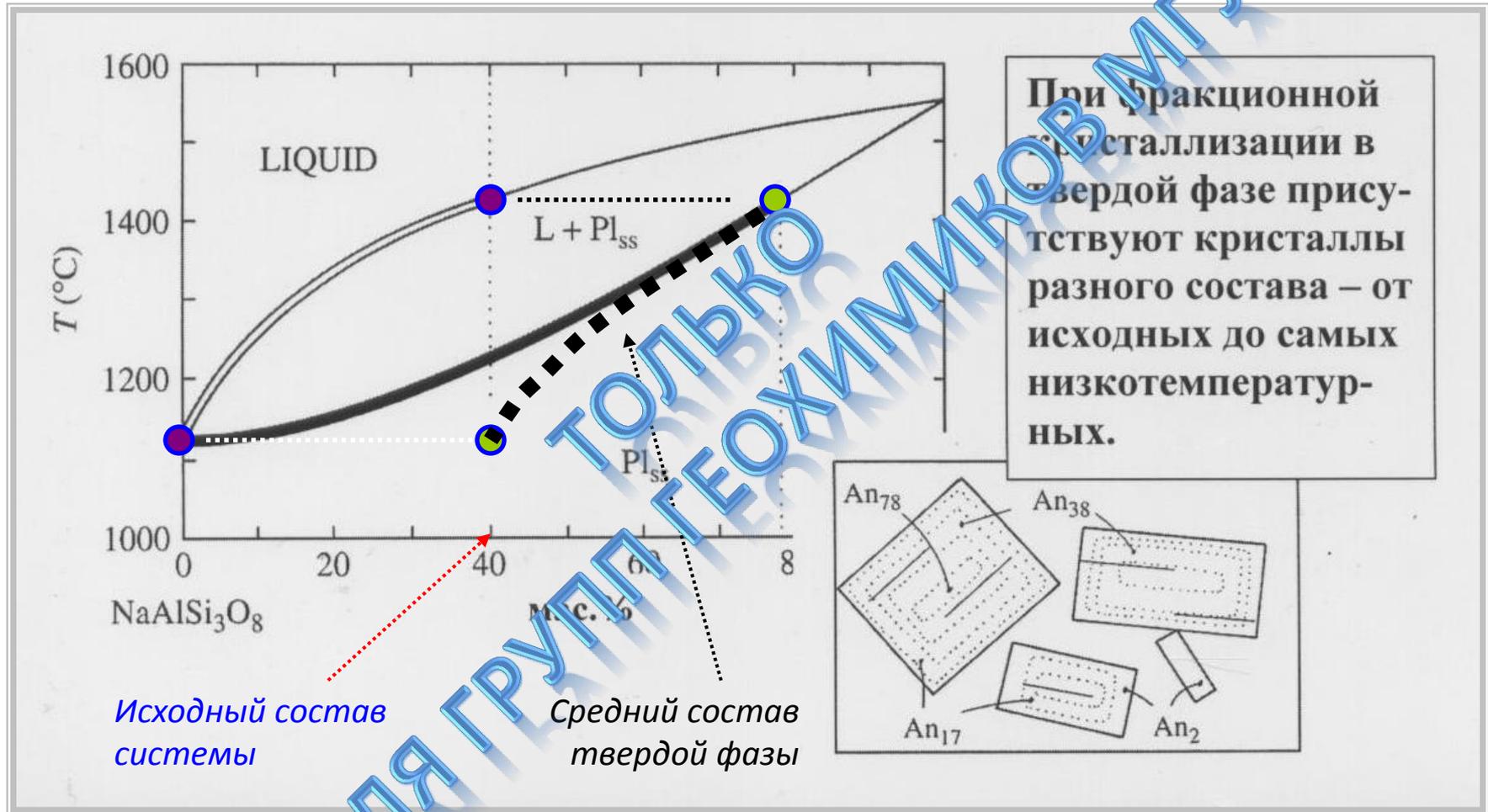
“Средний” состав Pl на каждой стадии кристаллизации постоянный и отвечает равновесию со всем объемом остаточного расплава

Исходный состав системы



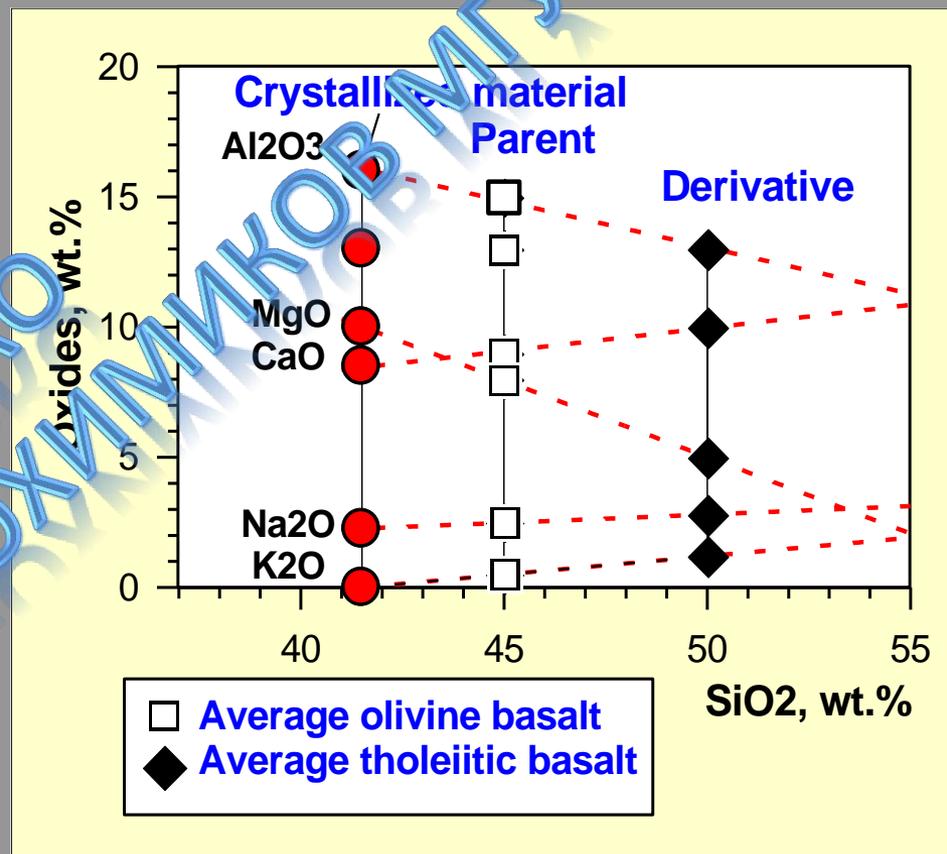
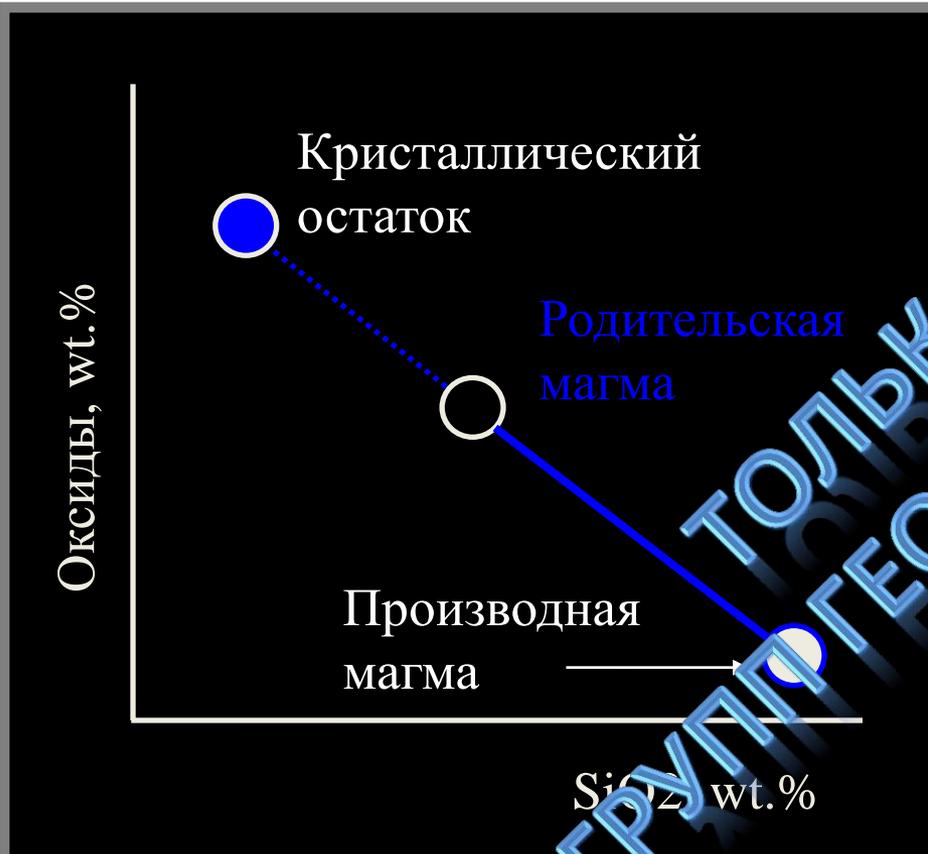
В результате равновесной кристаллизации процесс завершается образованием однородных кристаллов (An40).

# Фракционная кристаллизация в системе Ab-An



“Средний” состав ранее выделившегося *PI* на разных стадиях кристаллизации разный, хотя состав (бесконечно малого количества) *PI*, кристаллизующегося в данный момент и отвечает равновесию со всем объемом остаточного расплава

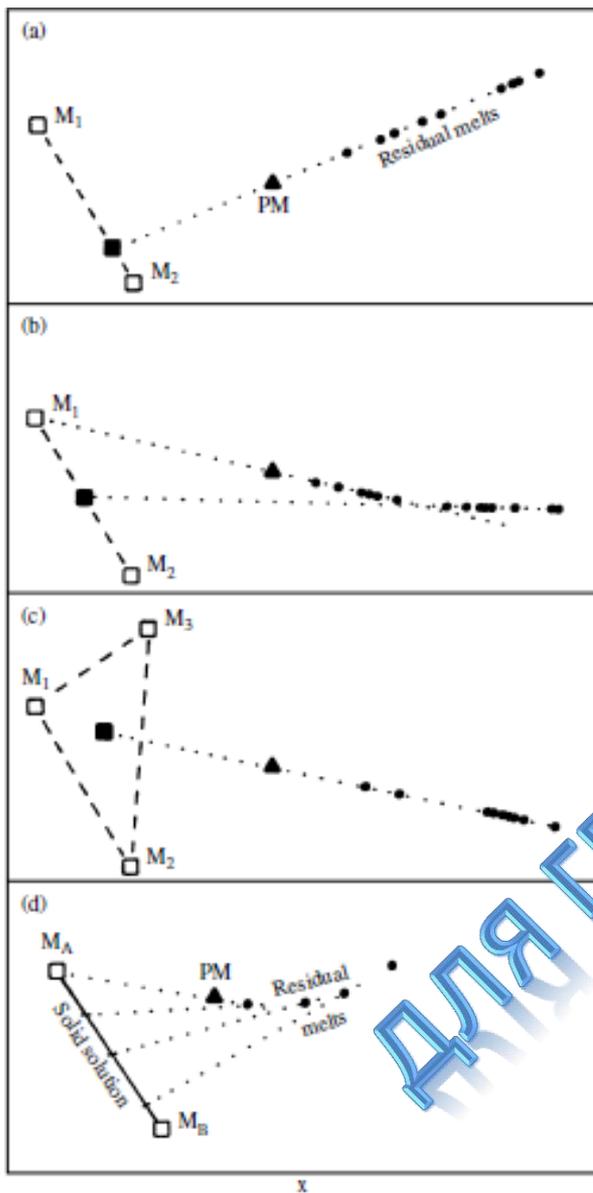
# Диаграммы вычитания



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

Производный расплав = Родительский расплав - Кристаллический материал (удаленный)

# Диаграммы вычитания для нескольких минералов

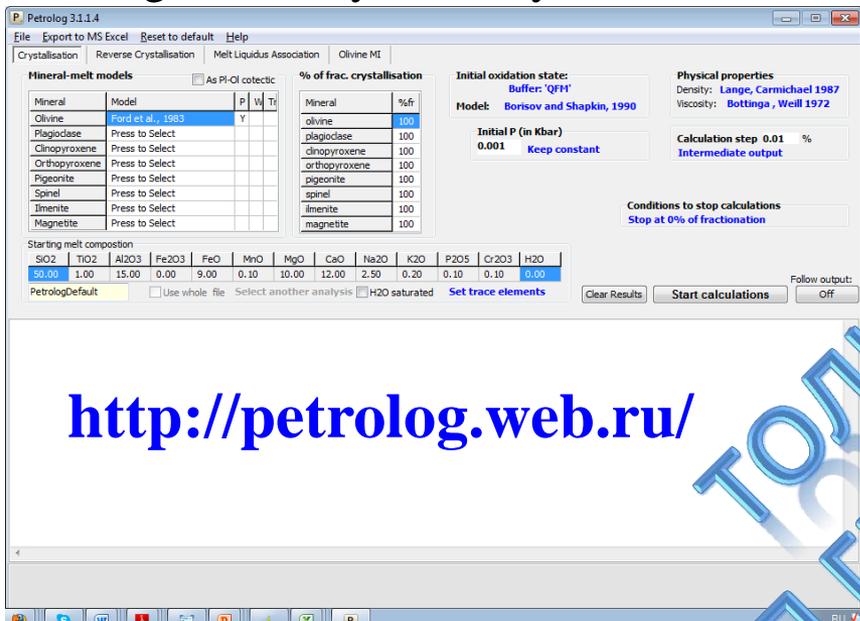


	Базальт	Стекло
$SiO_2$	51.1	66.5
$TiO_2$	1.5	1.3
$Al_2O_3$	14.3	13.9
FeO	10.4t	1.9t
MgO	8.1	0.1
CaO	9.2	0.9
$N_2O$	3.1	3.3
$K_2O$	1.1	7.0
Total	99.0	94.9
Q	0.0	19.0
Or	6.5	41.2
Ab	26.2	27.7
An	21.5	2.4
Di	19.2	0.7
Hy	13.1	0.0
Ol	5.9	0.0
Mt	4.5	0.7
Il	3.2	2.4

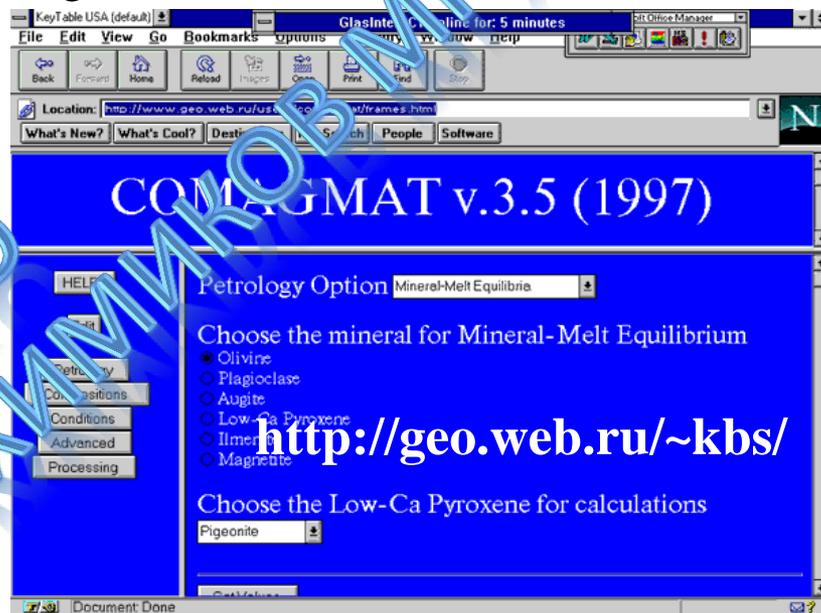
Santa Clara Lava Flow Near St. George, Utah

# Программы для моделирования

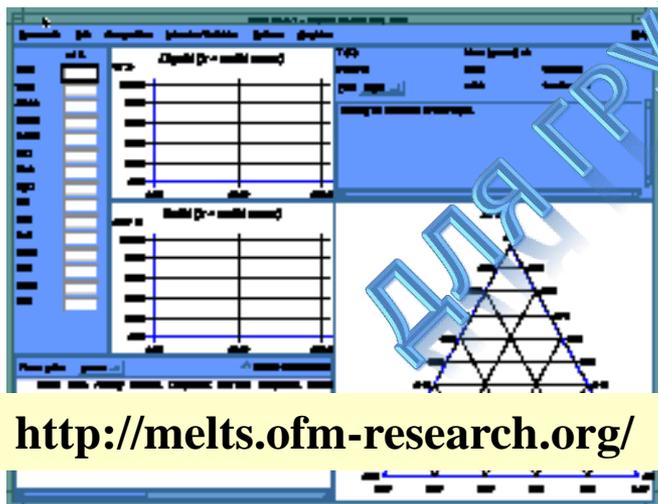
Petrolog-III : Danyushevsky, Plechov, 2011



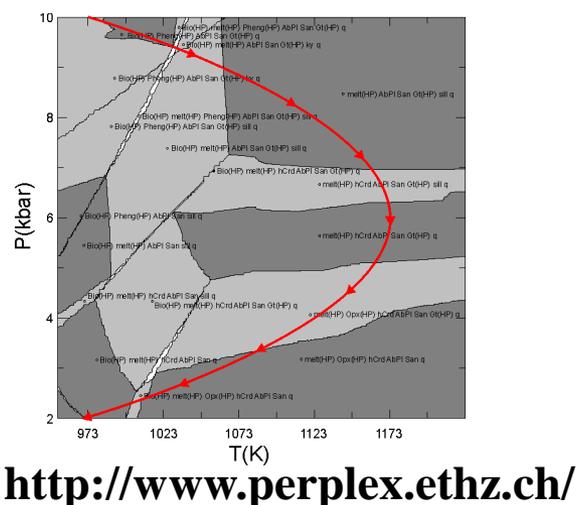
Comagmat: Ariskin et al.



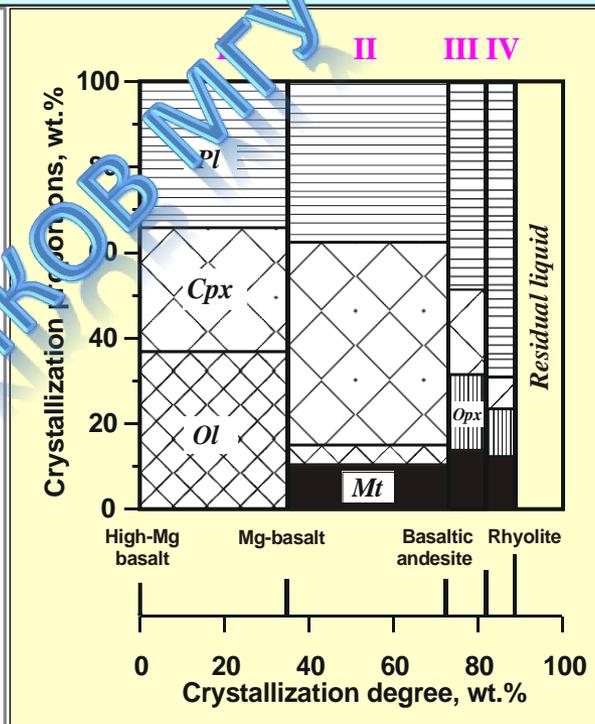
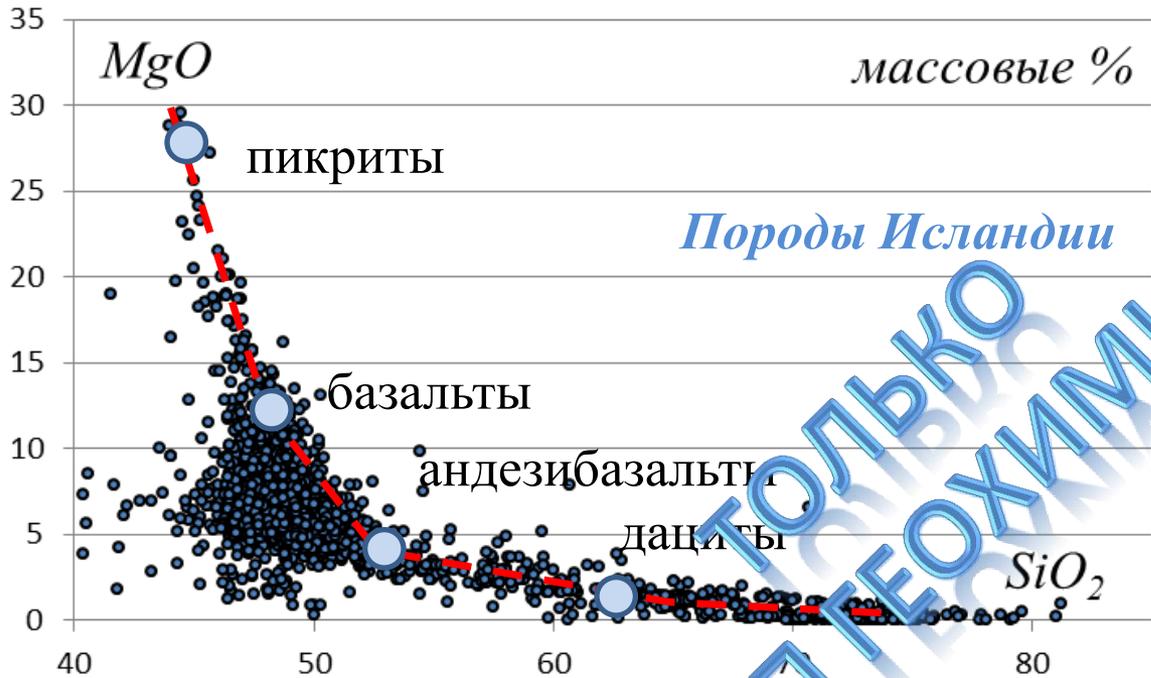
MELTS: Ghiorso, Sack, 1995



Perplex: Connolly, 1994



# Типичные тренды дифференциации



Стадия	Родит. → Производ.	Минералы
I	Пикриты → Базальты	<i>Ol + Pl + Cpx</i>
II	Базальты → Андезибаз.	<i>Ol + Pl + Cpx + Mt</i>
III	Андезибаз. → Дациты	<i>Pl + Cpx + Mt + Opx</i>
IV	Дациты → Риолиты	<i>Pl + Cpx + Mt + Opx</i>

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

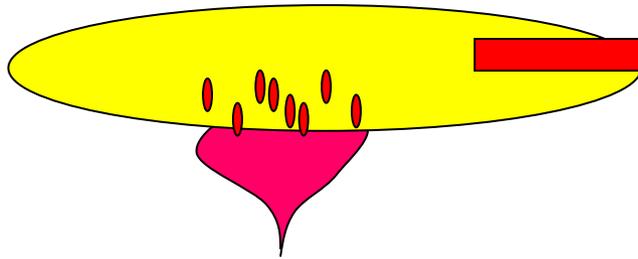
# Физическое смешение магм (magma mingling)



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)



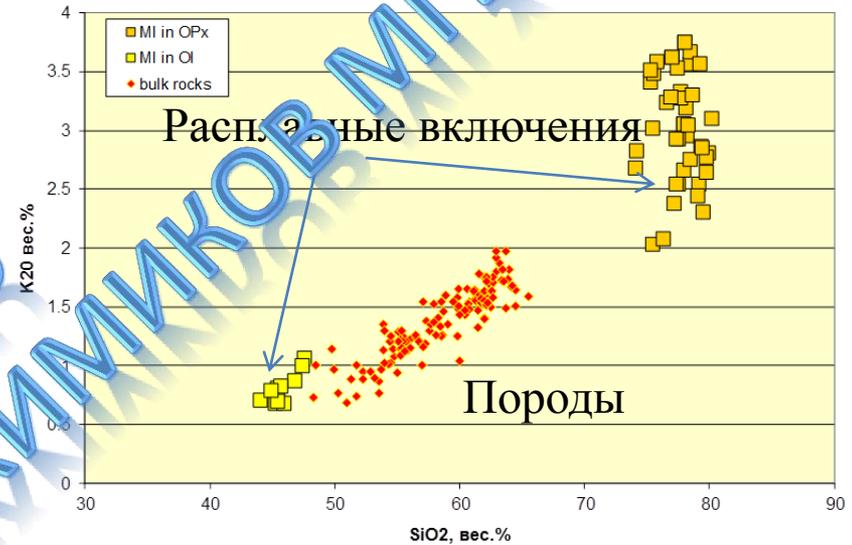
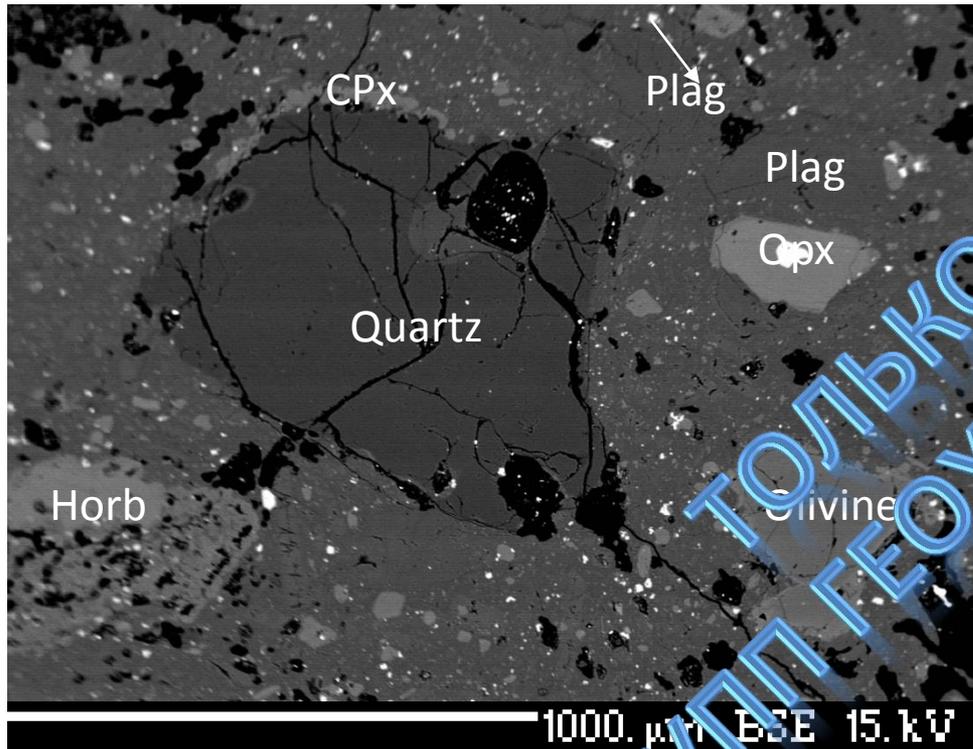
- Фрагментация на отдельные глобулы
- Кристаллизация, гомогенизация



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

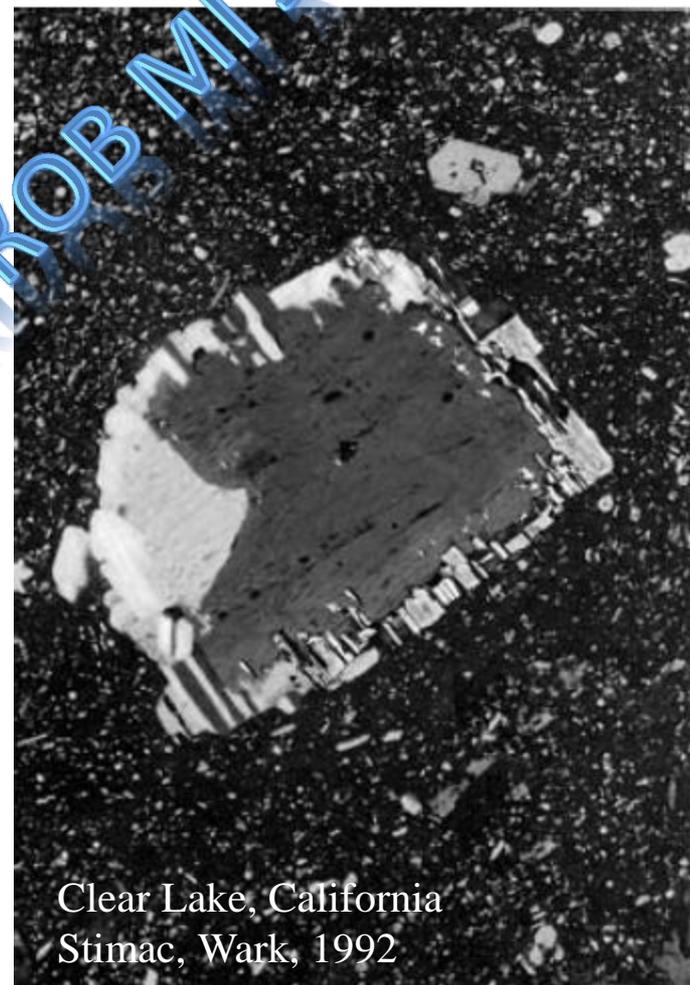
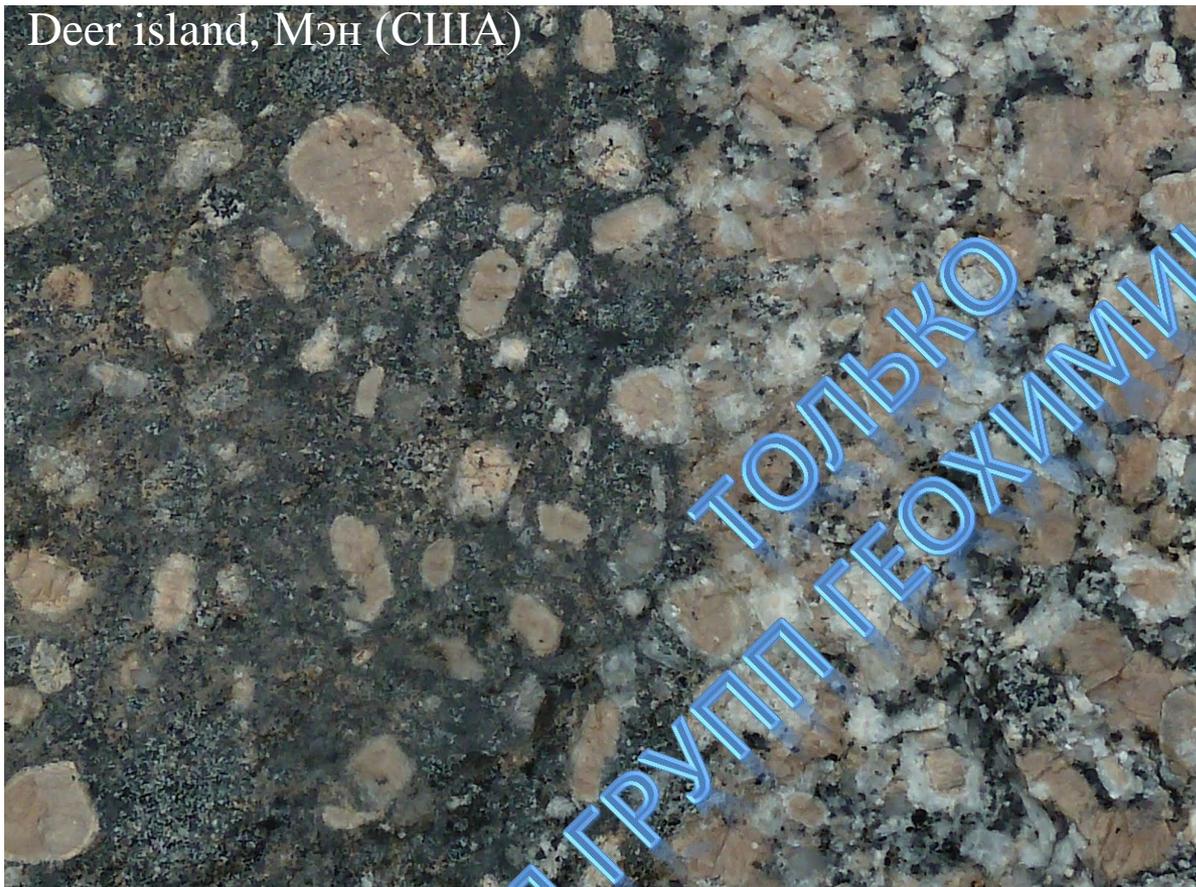


- 1) Контрастные ассоциации вкрапленников с реакционными взаимоотношениями
- 2) Контрастные составы расплавов
- 3) Сложная, ритмичная зональность вкрапленников



# Петрологические признаки смешения

Deer island, Мэн (США)

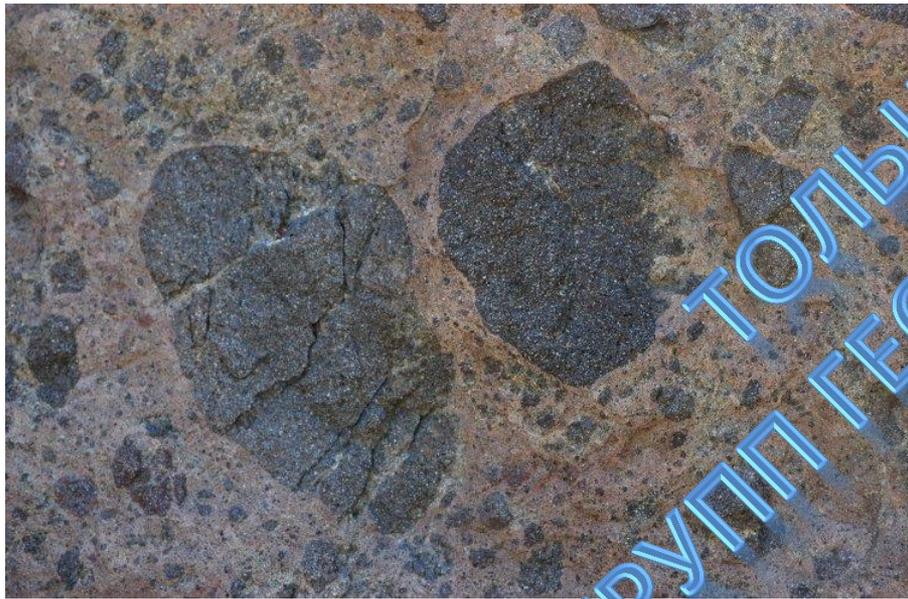


Clear Lake, California  
Stimac, Wark, 1992

Каймы плагиоклада 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. (2000)

# 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 рифидитовой (Бунзен, 1851)
- Ассимиляция вмещающих пород и смешение магм (Левинсон-Лессинг, 1899)
- Ликвация (Durocher, 1857, Rosenbusch, 1889)
- Многообразие эвтектик (Teall, 1888, Vogt, 1903)
- Существование разнообразных слэбов 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.

# Основные типы дифференциации

## Закрытая система

Отделение кристаллов и расплава

Гравитационное осаждение

Сепарация в потоке

Фильтр-прессинг

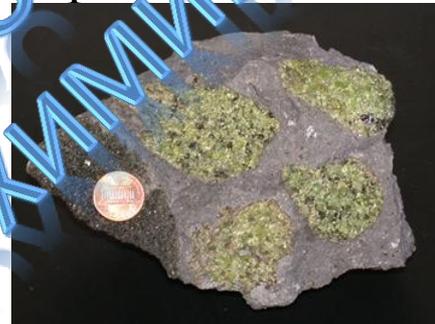
Отделение 2-х расплавов (ликвация)

Отделение флюида и расплава

## Открытая система

Ассимиляция

захват магмой кусочков вмещающих пород изначально в твердом состоянии



Смешение двух или более контрастных магм

