

# Магмы, их состав и механизмы эволюции

---

Лекция 26 февраля 2010 г.  
По курсу «Петрография с кристаллооптикой»

профессор, д.г.-м.н.  
Павел Юрьевич Плечов

# Вопросы экзаменационных билетов, которых касается данная лекция

---

- Последовательность кристаллизации минералов (реакционный и непрерывный ряды Боуэна). Условия магматической кристаллизации водных минералов.
- Главные механизмы дифференциации магматических расплавов (кристаллизационное фракционирование, жидкостная несмесимость, флюидно-

## Базовые определения

Магма от греч. μάγμα – тесто, густая мазь. В XVIII веке слово употреблялось в фармацевтике для желатина и густых мазей. В геологии впервые упомянуто Deodat de Dolomieu в 1794 г. для описания растворов, остающихся после выпаривания.

---

Несколько неполных определений:

- Магма - представляет собой природный, чаще всего силикатный, огненно-жидкий расплав, возникающий в земной коре или в верхней мантии (Русская Википедия)
  - Магма - расплавленная, преимущественно силикатная масса глубинных зон Земли; расплав соединений большого числа химических элементов, в котором преобладают кислород, кремний, алюминий, железо, магний, кальций, натрий и калий. (БСЭ)
  - Магма – расплавленная порода, которая находится под поверхностью Земли и может также существовать на других планетах. (English Wikipedia)
  - Магма – флюидо-силикатный расплав сложного состава (Емельяненко, Яковлева, 1985)
-

# Базовые определения

**Магма - смесь магматического расплава, кристаллов и/или их сростков и флюидной фазы, способная к перемещению.**

---

- Магматический расплав – жидкая часть магмы. Магматических расплавов в магме может быть несколько. Они необязательно должны быть алюмосиликатными. Для земных условий доказано существование алюмосиликатных, карбонатных, фосфатных, сульфидных магматических расплавов.
- Магма – многофазная среда, кроме расплава (или нескольких расплавов) в ней могут находиться кристаллы и их сростки, ксенолиты вмещающих пород, пузырьки газа.
- Соотношения расплава и кристаллов определяет способность к перемещению всей массы целиком. 99% расплава + 1% кристаллов – магма, 1% расплава + 99% кристаллов – не магма.

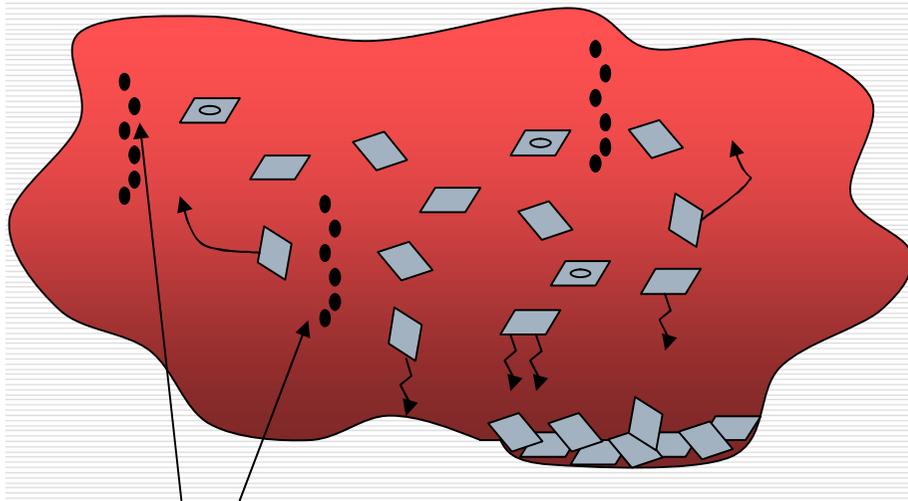
---

Фаза - устойчивая по химическому составу область системы, имеющая границу раздела (фазовую границу).

# Базовые определения

Флюид (от лат. fluidis — «текучий») — вещество, поведение которого при деформации может быть описано законами механики жидкостей. По этому определению магма тоже является флюидом

Флюидные (летучие) компоненты – химические соединения с низкой температурой кипения (<100 С при 1 атм). К распространенным флюидным компонентам в магмах относятся  $H_2O$ ,  $CO_2$ ,  $H_2$ ,  $CH_4$ ,  $Cl_2$ ,  $F_2$ ,  $HCl$ ,  $HF$ ,  $SO_2$ ,  $N_2$ ,  $NH_3$ ,  $He$ ,  $Ar$ . Это элементы-газы (водород, кислород, азот, галогены, инертные газы) и их соединения друг с другом и серой.



Газовые пузырьки

Летучие компоненты могут быть растворены в магме и могут находится в виде самостоятельной **флюидной фазы** (например, пузырьки газа в магме). Растворимость летучих компонентов в магме резко падает с уменьшением давления, т.е. при подъеме магма дегазирует.

Во флюиде, отделяющемся от магмы, может содержаться большое количество растворенных рудных компонентов.

## Жизнь магмы от рождения до смерти

До 20-30-х XX века считалось, что магма слагает одну из внутренних оболочек Земли - мантию. Достаточно канала или трещины, чтобы она начала подниматься к поверхности. С появлением геофизики (сейсмологии) было доказано, что мантия Земли твердая.

---

- Зарождение магмы – плавление субстрата
- Сегрегация магмы – отделение от субстрата
- Подъем магмы и кристаллизация
- Кристаллизация магмы в магматическом очаге
- Полная кристаллизация или излияние на поверхность и закалка

Под каждым активным вулканом располагается «фабрика-конвейер» по производству, транспортировке и кристаллизации магмы.

# Главные типы магм в условиях земной коры

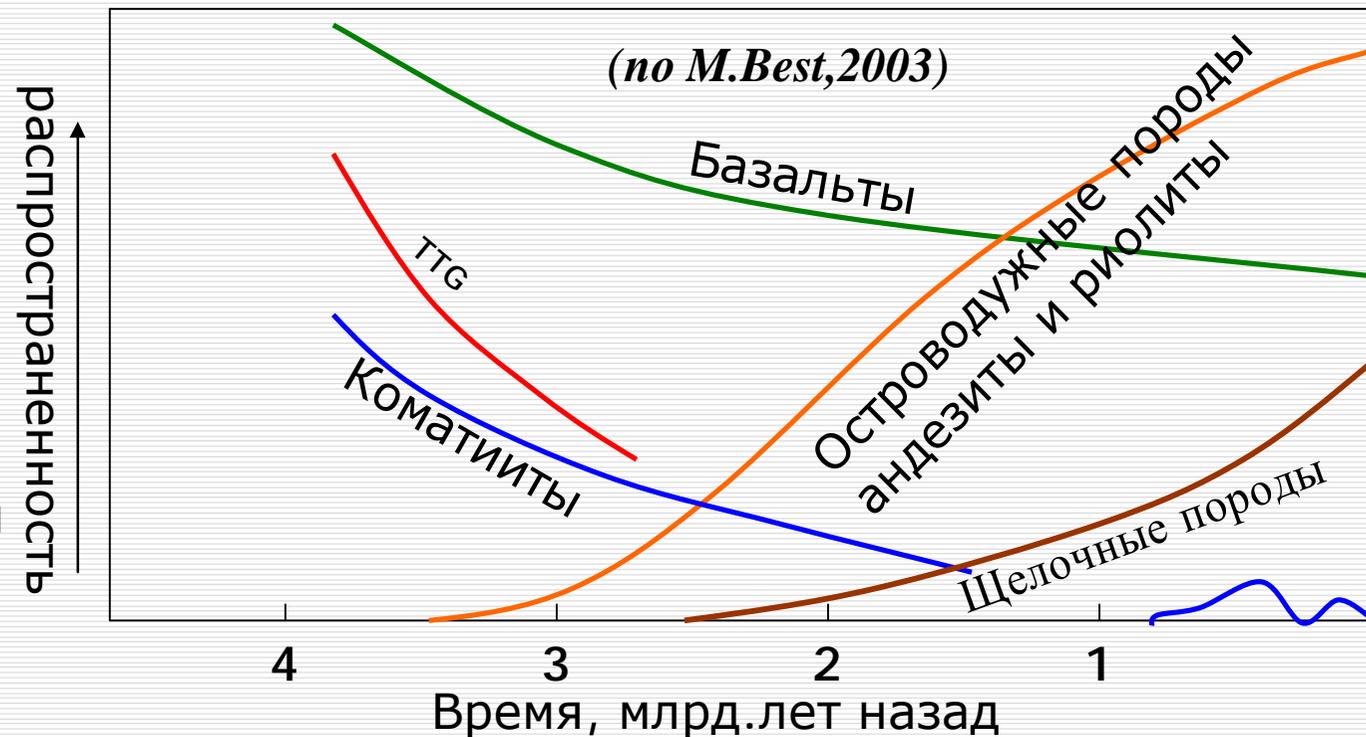
Подавляющее большинство магм в земной коре имеет силикатный состав ( 30 мас.% < SiO<sub>2</sub> < 85 мас.%).

## Силикатные:

- Коматиитовая
- Базальтовая
- Андезитовая
- Риолитовая
- Щелочные

## Несиликатные:

- Карбонатитовая
- Фоскоритовая
- Сульфидная
- и другие



Внешнее ядро Земли по современным представлениям жидкое, т.е. состоит из магмы. Его состав преимущественно металлический (Fe, Ni). В пределах земной коры металлические магмы не зафиксированы.

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

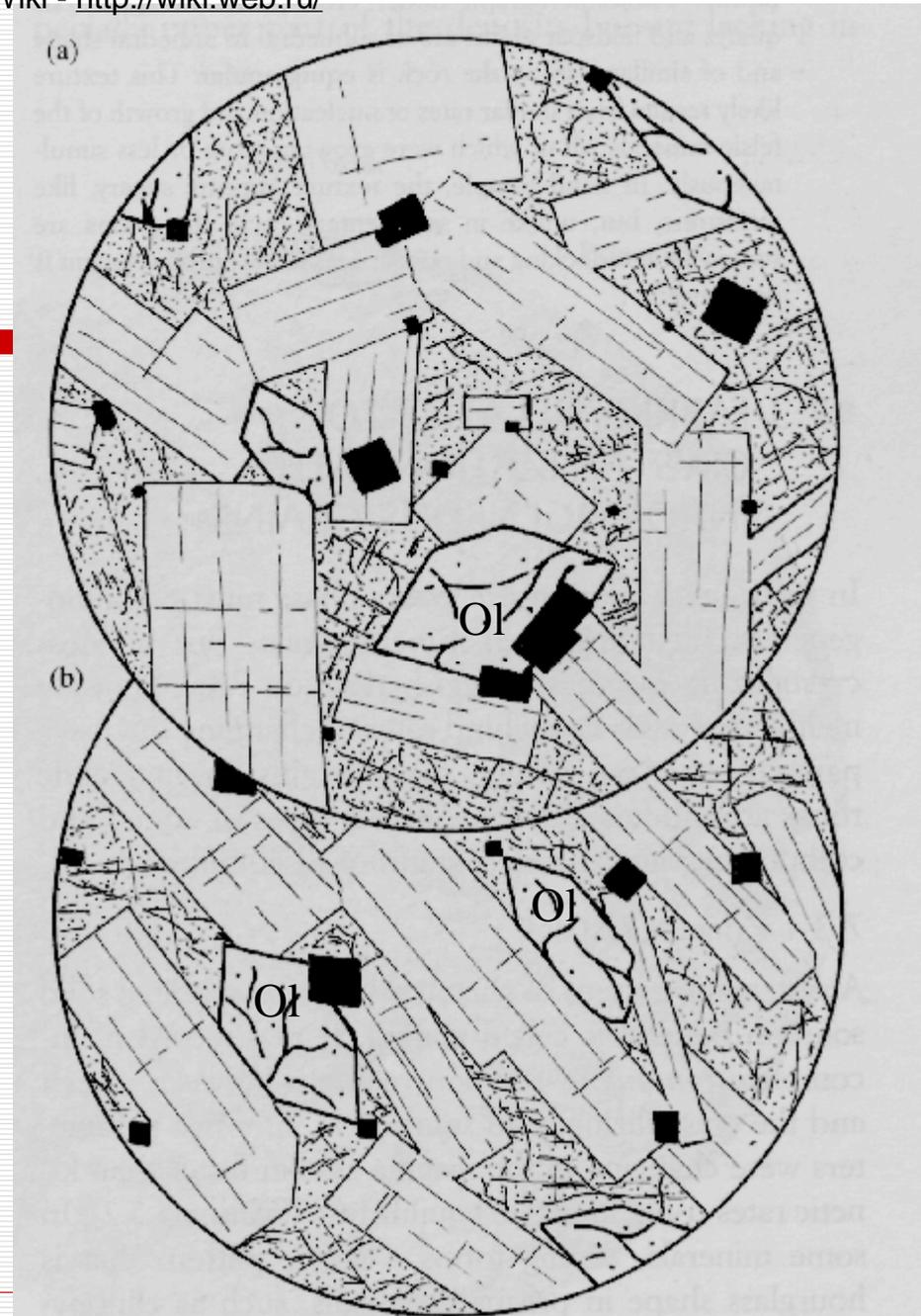
Франц Юльевич Левинсон-Лессинг (1861-1939) предложил для объяснения разнообразия пород комплексную модель ассимиляции, повторного плавления, дифференциации и многообразия эвтектик, наиболее прогрессивную на то время.

# Порядок кристаллизации

---

При определении порядка кристаллизации используются 3 основных приема:

1. **Принцип относительного идиоморфизма**
2. Принцип относительных размеров
3. Агрегатный принцип

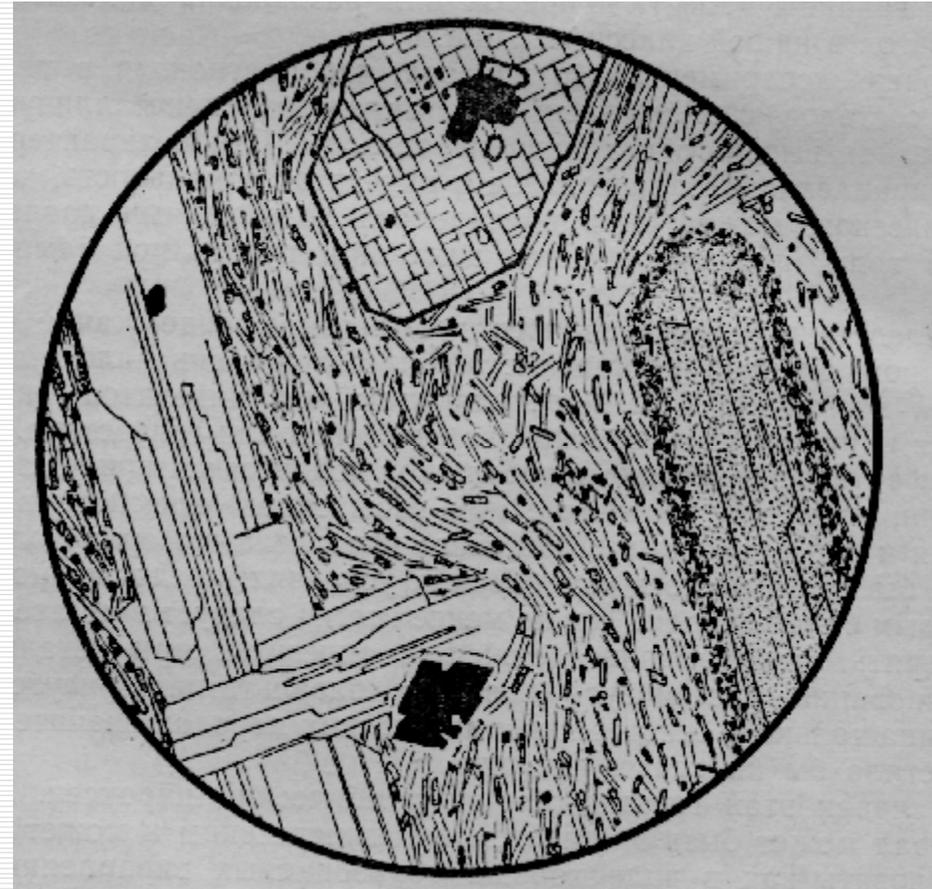


# Порядок кристаллизации

---

При определении порядка кристаллизации используются 3 основных приема:

1. Принцип относительного идиоморфизма
2. **Принцип относительных размеров**
3. Агрегатный принцип



---

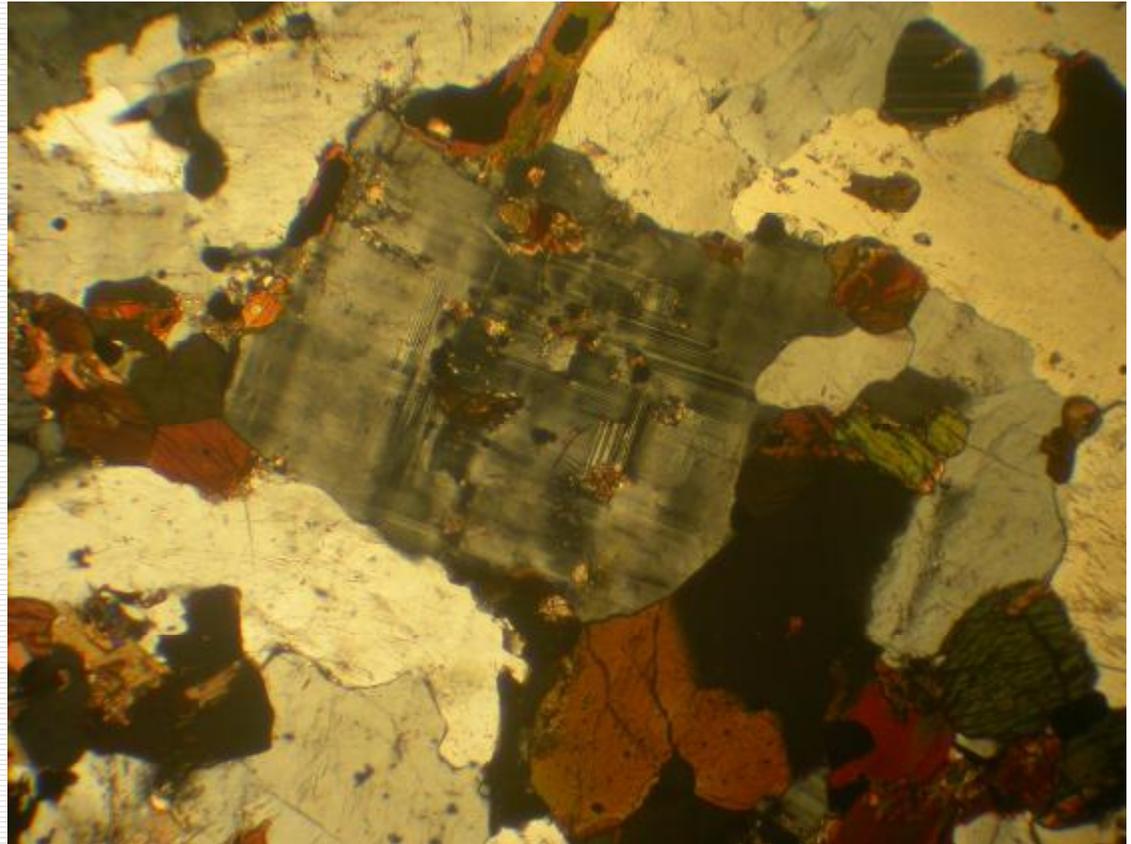
Принцип относительных размеров может быть обманчив, так как разные минералы могут иметь разную скорость роста.

# Порядок кристаллизации

---

При определении порядка кристаллизации используются 3 основных приема:

1. Принцип относительного идиоморфизма
2. Принцип относительных размеров
3. **Агрегатный принцип**

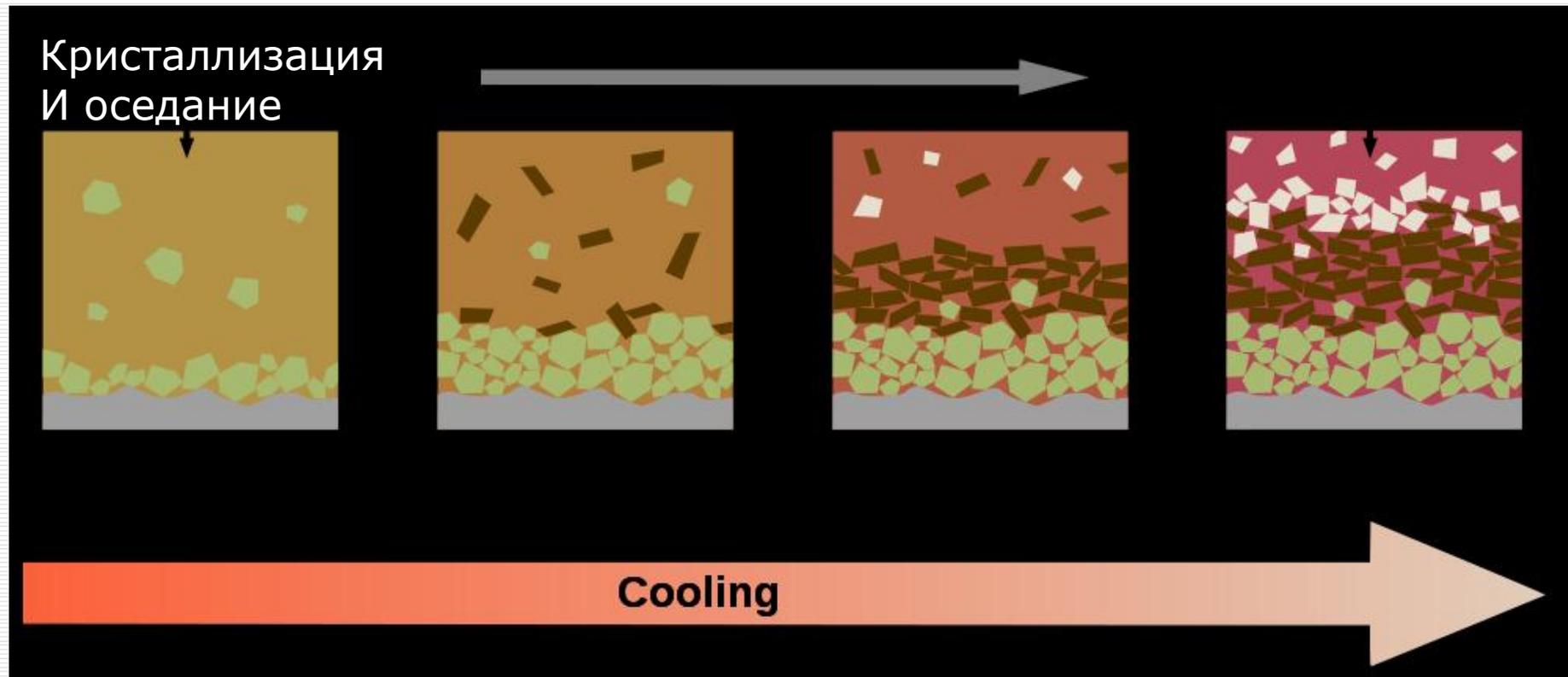


---

Роговая обманка и микроклин образовались позже плагиоклаза в этой породе.

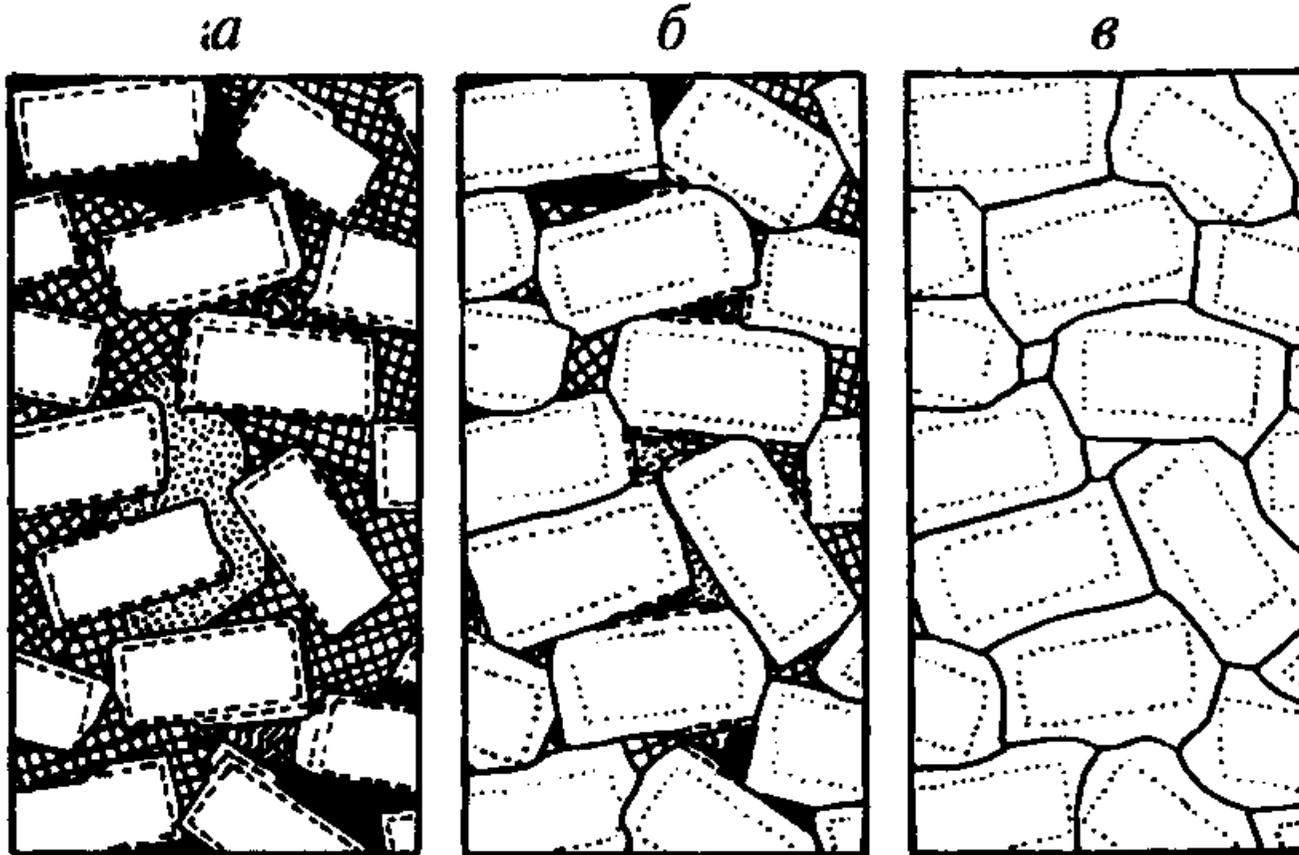
# Кристаллизационная дифференциация (кристаллизационное фракционирование)

Предложена Н.Боуэном (1913) как основной механизм эволюции магм



При кристаллизационной дифференциации могут формироваться расслоенные комплексы

Возможно не только оседание кристаллов, но и их всплывание. Всплывание кристаллов лейцита в магме Везувия было впервые предложено Ф.Ю.Левинсон-Лессингом (1899) для объяснения происхождения лейцититов



Типы  
кумулятивных  
структур:

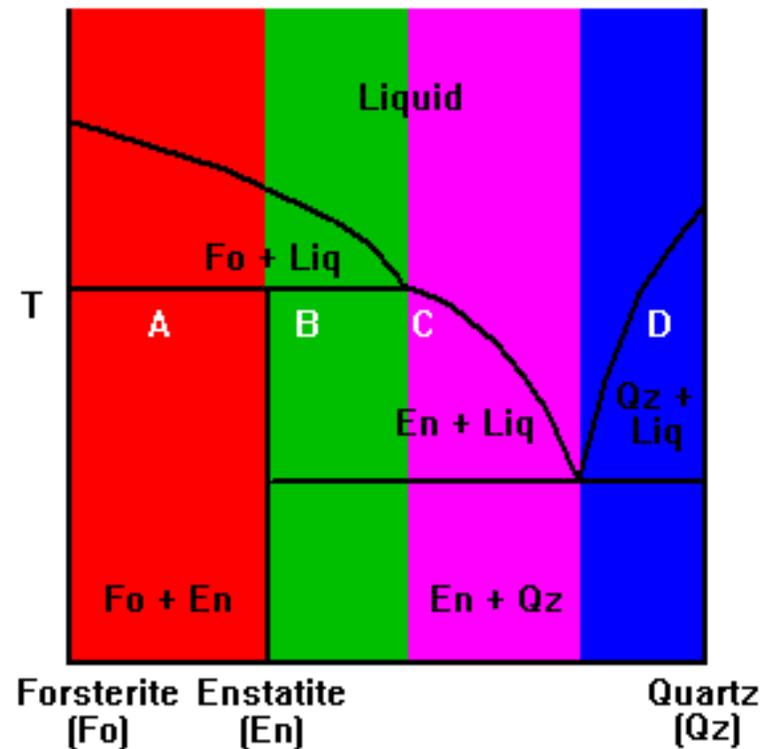
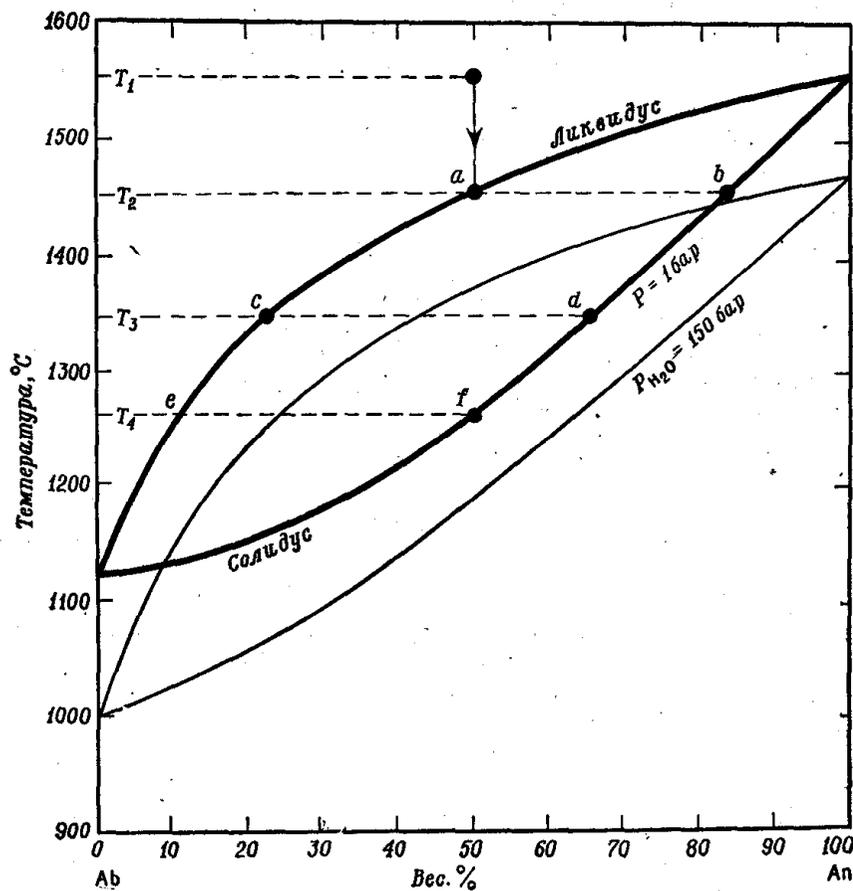
а– ортокумулятивная,  
б– мезокумулятивная,  
в – адкумулятивная.

В процессе кристаллизационной дифференциации первичные магмы разделяются на *дифференциаты* — остаточные расплавы и *кумуляты* — скопления кристаллических фаз. Самым распространенным механизмом формирования кумулатов является гравитационное осаждение ранних кристаллических фаз (оливин, пироксен, хромовая шпинель) вблизи подошвы магматических камер.

Слайд из лекций Л.В.Сазоновой

# Физические эксперименты в магматических системах

Норман Леви Боуэн предложил использовать метод закалки для экспериментов с магматическими системами. Магматический расплав при закалке превращается в стекло, которое можно проанализировать.



Фазовая диаграмма кристаллизации плагиоклазов в отсутствие воды (жирные линии) и при давлении паров воды 150 бар (тонкие линии) (по Боуэну и Йодеру)

Фрагмент фазовой диаграммы MgO-SiO<sub>2</sub> (Bowen&Andersen,1914)

# Реакционный и непрерывный ряды Боуэна



# Основные факторы, влияющие на порядок кристаллизации

---

1. Состав исходного расплава

2. Давление

комнатное – 1 атм  $\approx 760$  мм ртутного столба (торр)  $\approx 1$  бар  $\approx 0.1$  МПа)

литостатическое –  $P(\text{Па, кг/мс}^2) = \rho gh$ ,

$$g = 9,780327 [1 + 0,0053024 \sin^2(\phi) - 0,0000058 \sin^2(2\phi)] - 3,086 \cdot 10^{-6} h_i \approx 9.8 \text{ м/с}^2$$

$$\rho \sim 2600-3500 \text{ кг/м}^3,$$

$1 \text{ кбар} \approx 1000 \text{ атм} \approx 100 \text{ МПа} \approx 0.1 \text{ ГПа} \approx 3.5 \text{ км}$

3. Содержание летучих компонентов

(мас.%) или

парциальное давление (доля от литостатического)

# 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)

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

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	$\sqrt[3]{(\text{Na})(\text{Al})(\text{Si})}$

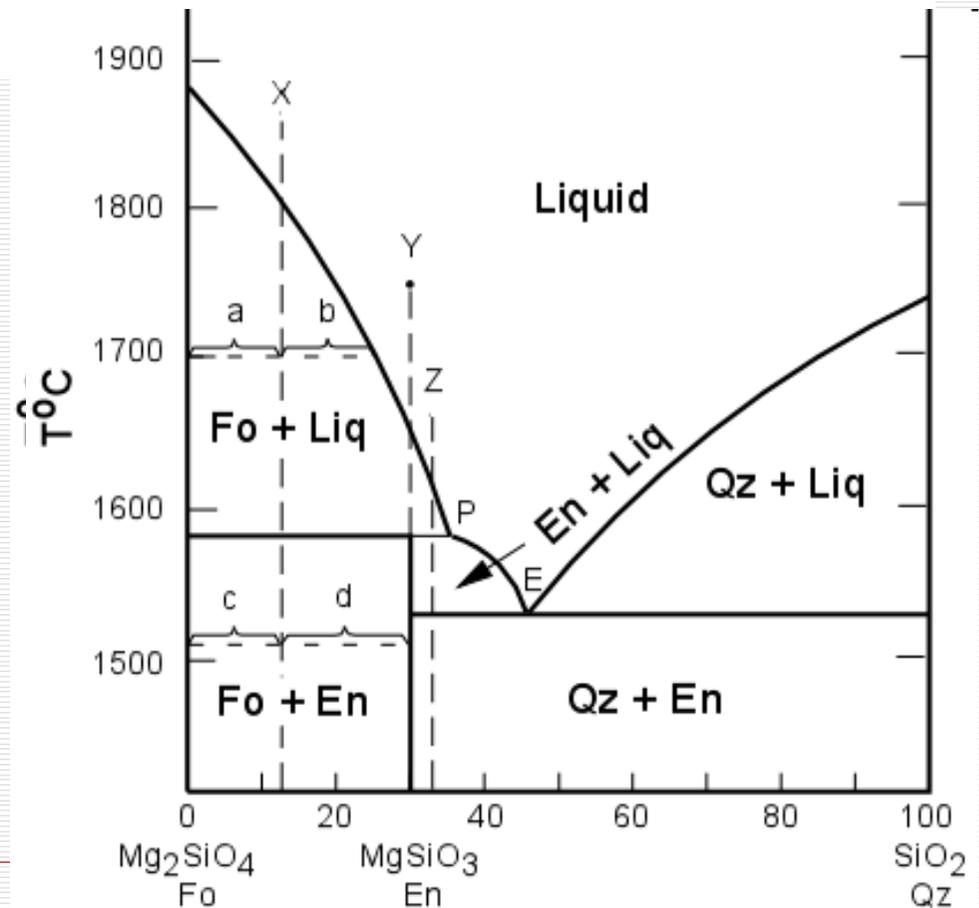
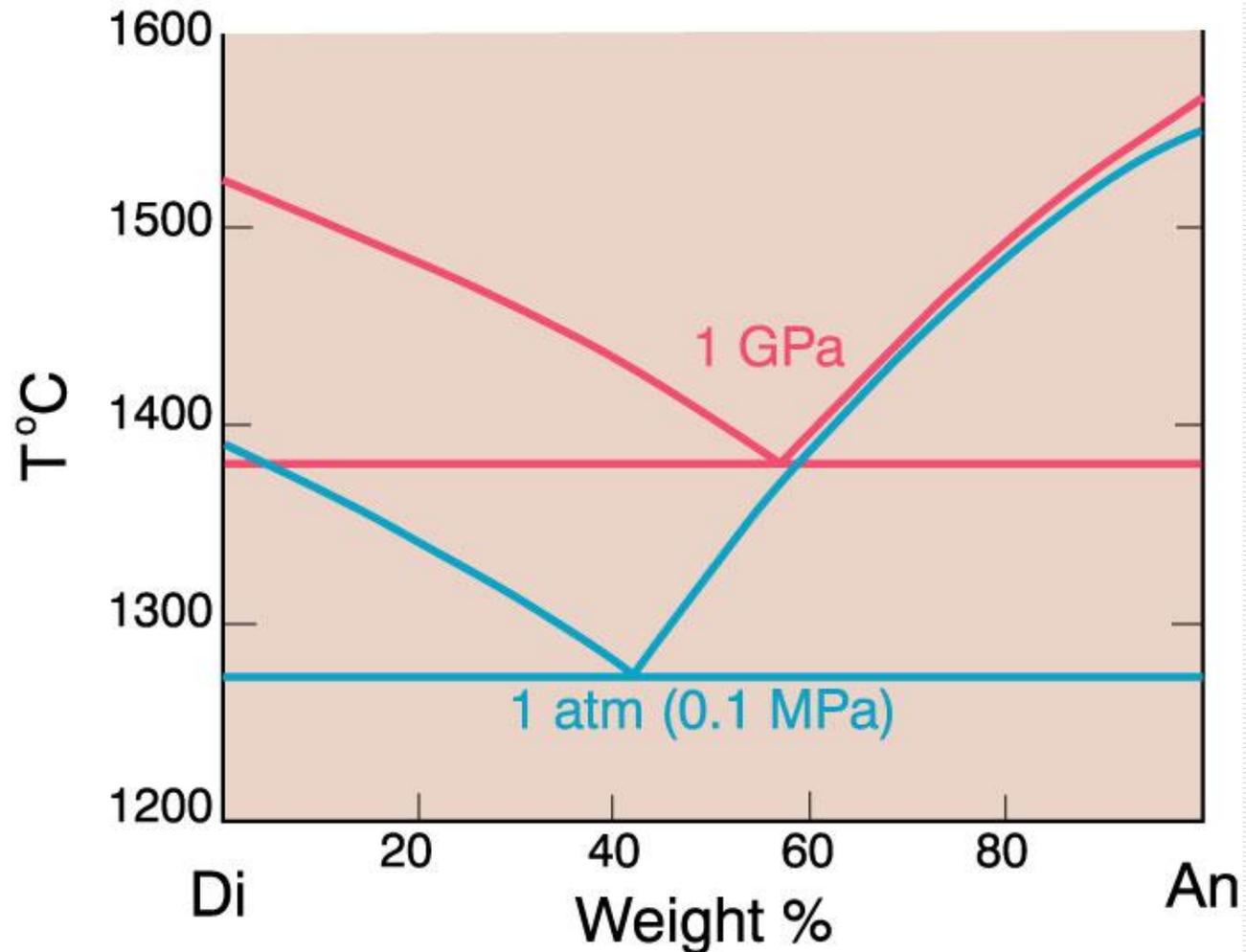


Figure 2

# Эффект давления

В среднем,  
поправка на давление  
+ 5 градусов на кбар  
(50°/GPa).  
Для клинопироксена  
> 10°/kbar  
Для плагиоклаза  
< 2°/kbar

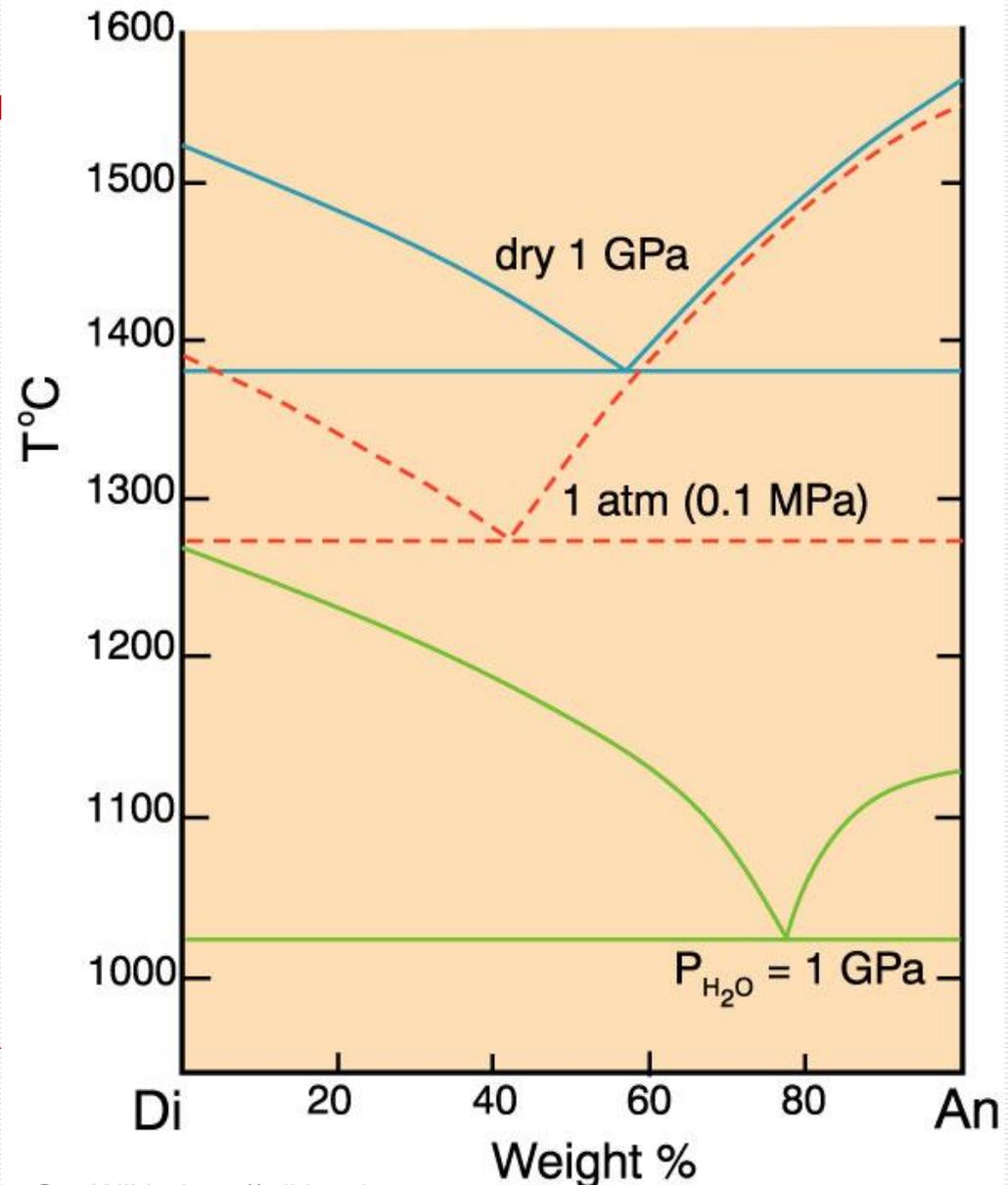


Система диопсид-анортит. Данные для 1 GPa  
Presnall *et al.* (1978). *Contr. Min. Pet.*, 66, 203-220.

# Влияние воды на температуру

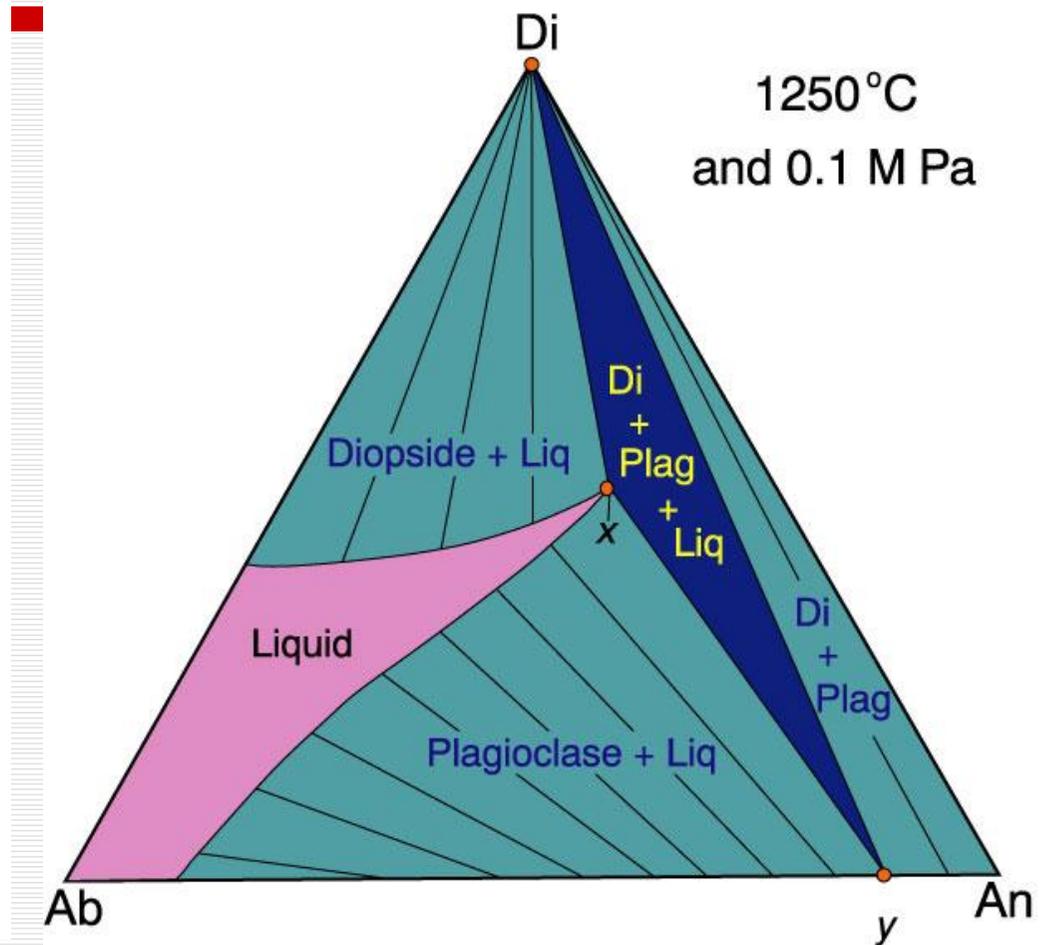
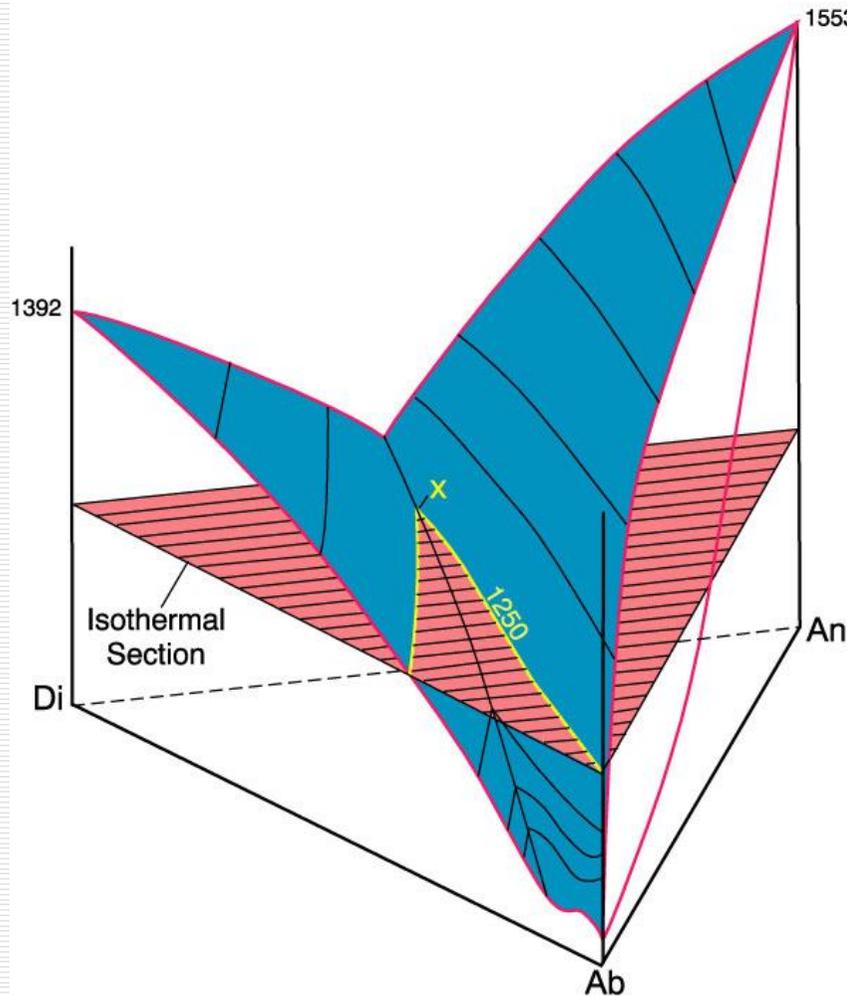
Вода по разному влияет на ликвидусные температуры различных минералов:  
На оливин почти не влияет  
На CPx ~15K/kbar  
На Pl ~ 40-60K/kbar

Система диопсид-анортит. Данные для  $P_{H_2O} = 1 \text{ GPa}$  из Yoder (1965),  
Данные для dry 1 GPa Presnall et al. (1978). Contr. Min. Pet., 66, 203-220.



# Трёхмерная проекция

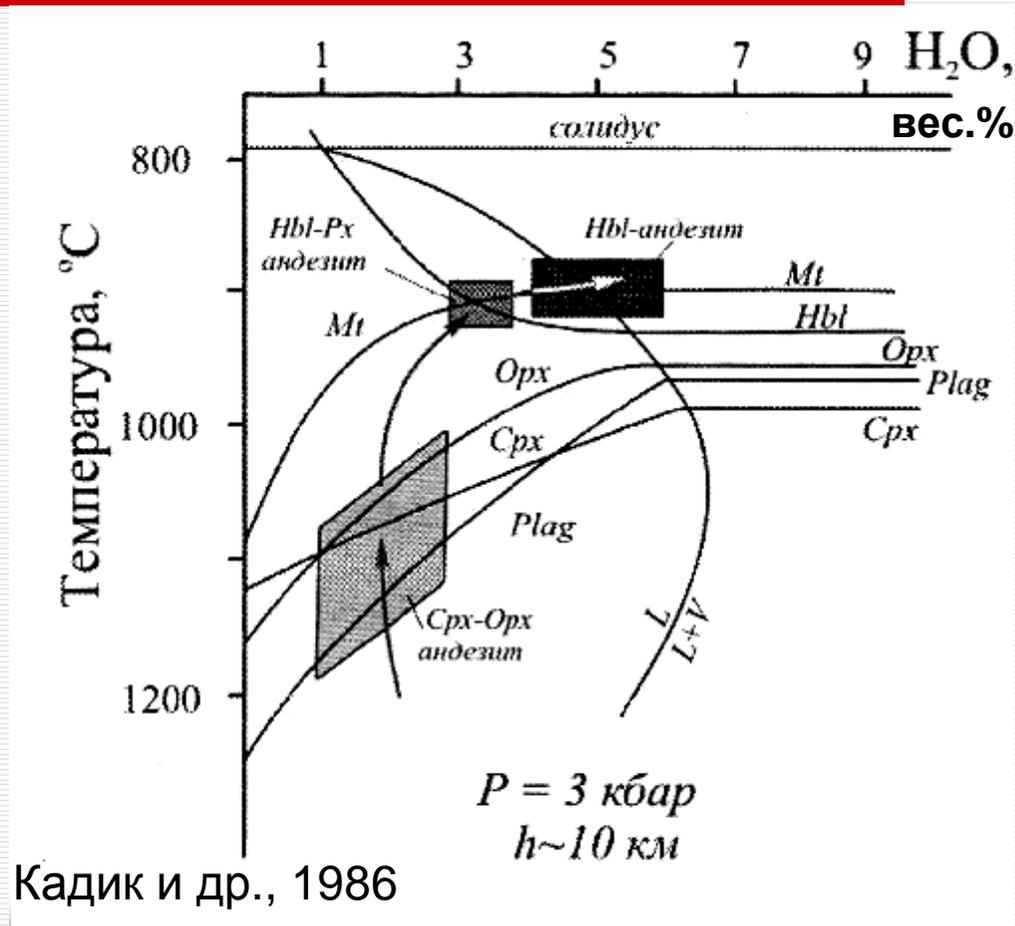
# Изотермическое сечение



Получение изотермического сечения для системы диопсид-альбит анортит при 1250°C (и 0.1 МПа) Morse (1994), *Basalts and Phase Diagrams*. Krieger Publishers.

# Условия появления водных минералов

Главными водными минералами в магматических системах являются амфиболы и биотиты



Экспериментальная диаграмма для андезита влк. Безымянный, Камчатка

# Ликвация и жидкостная несмесимость

Термин ликвация (от лат. *liquatio* — разжижение, плавление) ввел Агриколла (Георг Пауэр) в книге *De Re Metallica*, 1556 при описании технологии разделения меди и серебра, применявшейся немецкими горняками с XV века. Термин распространен в металлургии.

**Ликвация** – процесс разделения расплава на две или более несмешивающихся жидкости.

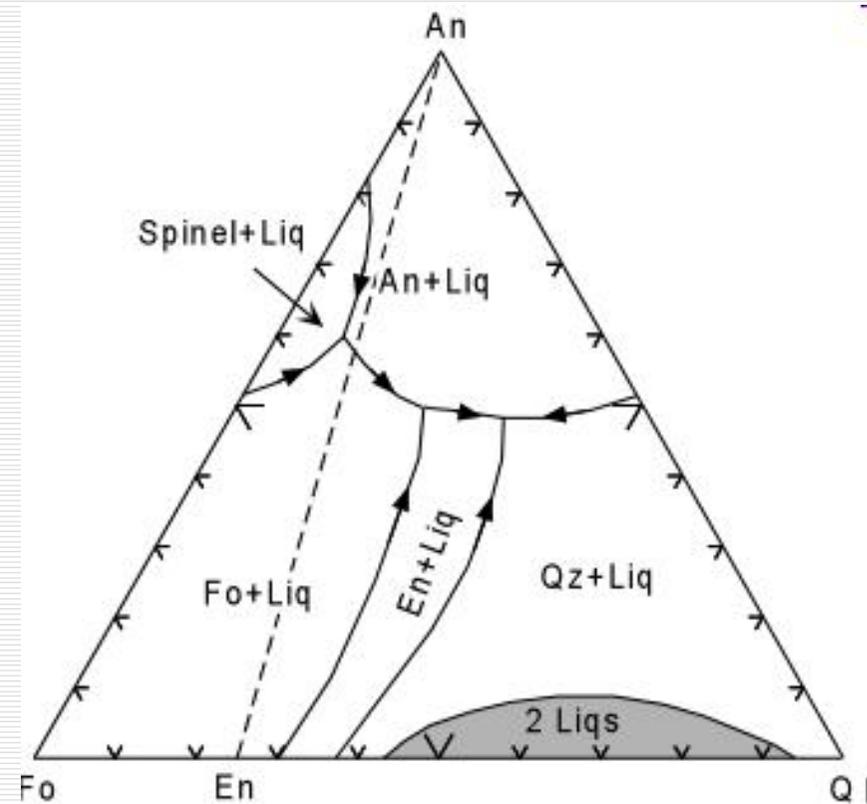
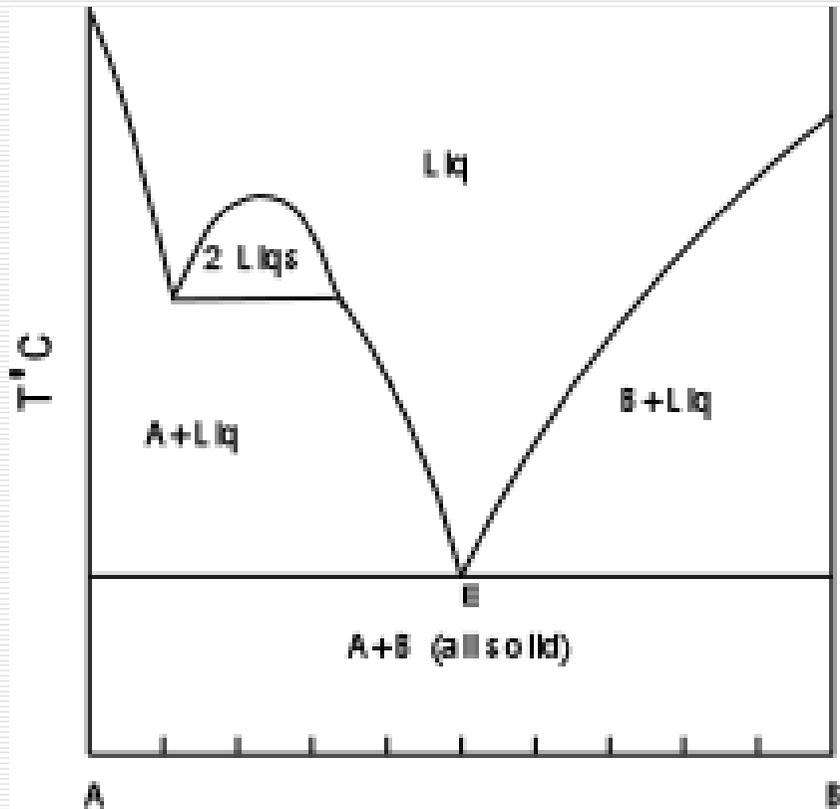
**Жидкостная несмесимость** – сосуществование двух несмешивающихся жидкостей.



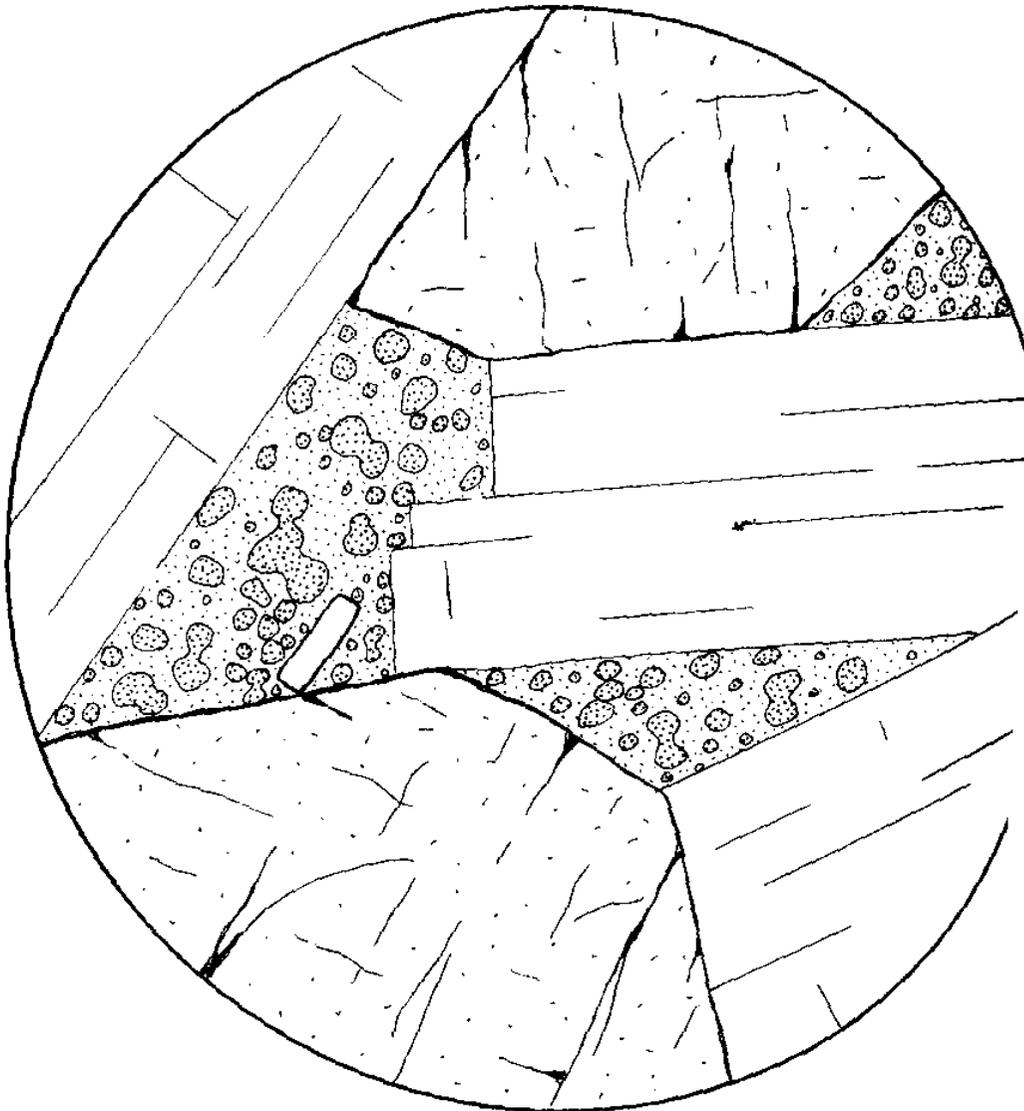
В примере с водой и маслом есть жидкостная несмесимость, но нет ликвации

# Ликвация на экспериментальных диаграммах

Купол расслоения зависит от температуры и состава системы. Чем ниже температура и экстремальней состав системы, тем выше вероятность появления ликвации. Типична ликвация контрастных по составу жидкостей, например силикатной и солевой.



Ликвация известна для силикатно-сульфидных, силикатно-карбонатных систем, высокожелезистых силикатных (исландиты, лунные породы), фтористых щелочных магм



Явление ликвации в базальте. В интерстициях между крупными зернами плагиоклаза и пироксена располагаются мелкие глобулы богатого железом стекла в более кремнекислом стекле.

Слайд из лекций Л.В.Сазоновой

# Жидкостная несмесимость и смешение магм

Термодинамическая несмесимость – две жидкости не могут перемешаться при данных температуре и давлении. Если их пытаться смешать, они будут отделяться друг от друга. Пример: масло и вода.

---

Кинетическая несмесимость – две жидкости могут полностью смешаться при данных температуре и давлении. Для этого им нужно время.

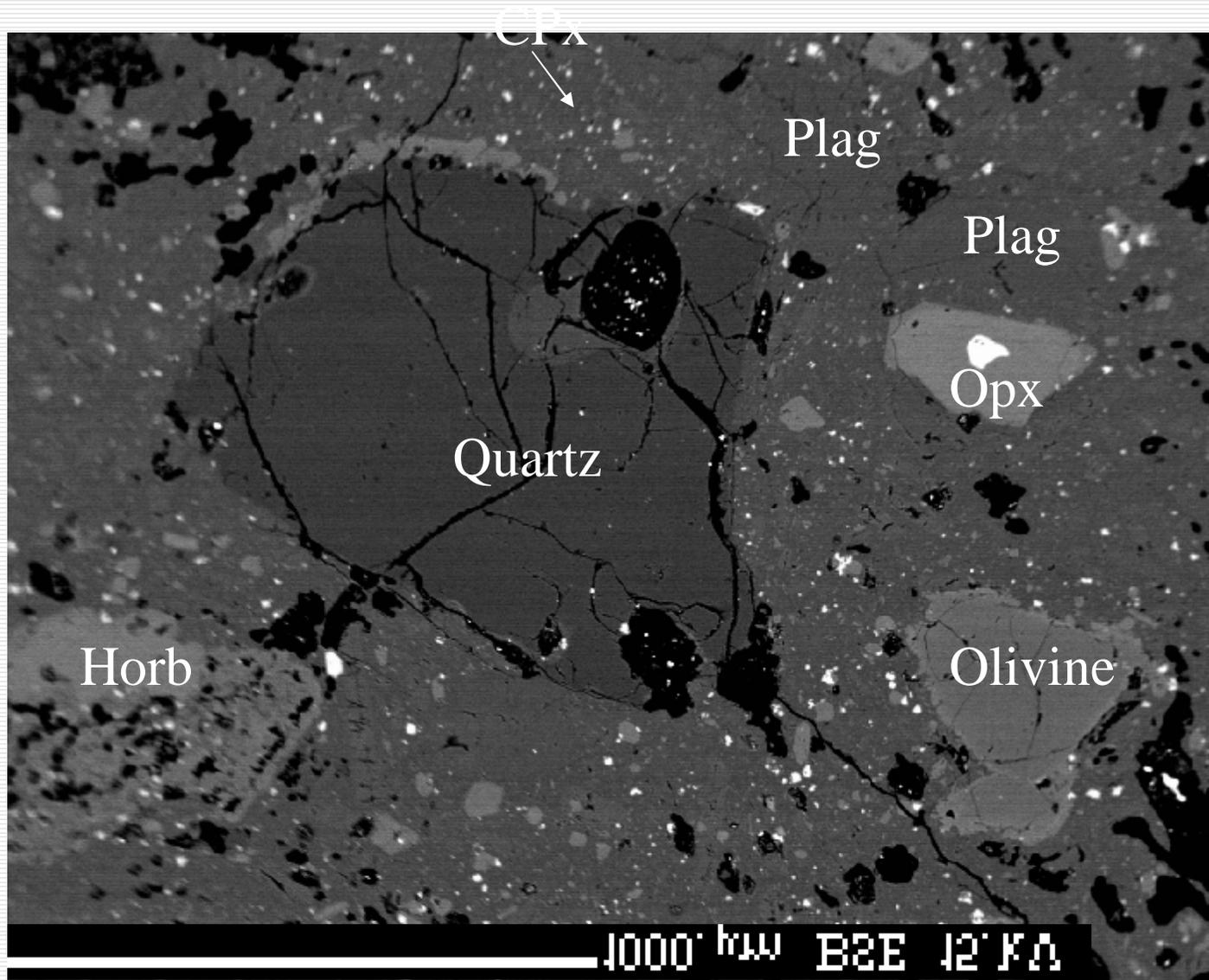


North Peak Village in the Sunapee Lake area, western New Hampshire (photo by Tim Allen, NEIGC 2003)



Кран с подсветкой воды в зависимости от температуры

# Признаки смешения магм



Смешение магм характерно для островодужных андезитовых вулканов  
В качестве примера приведен вулкан Кизимен, Камчатка

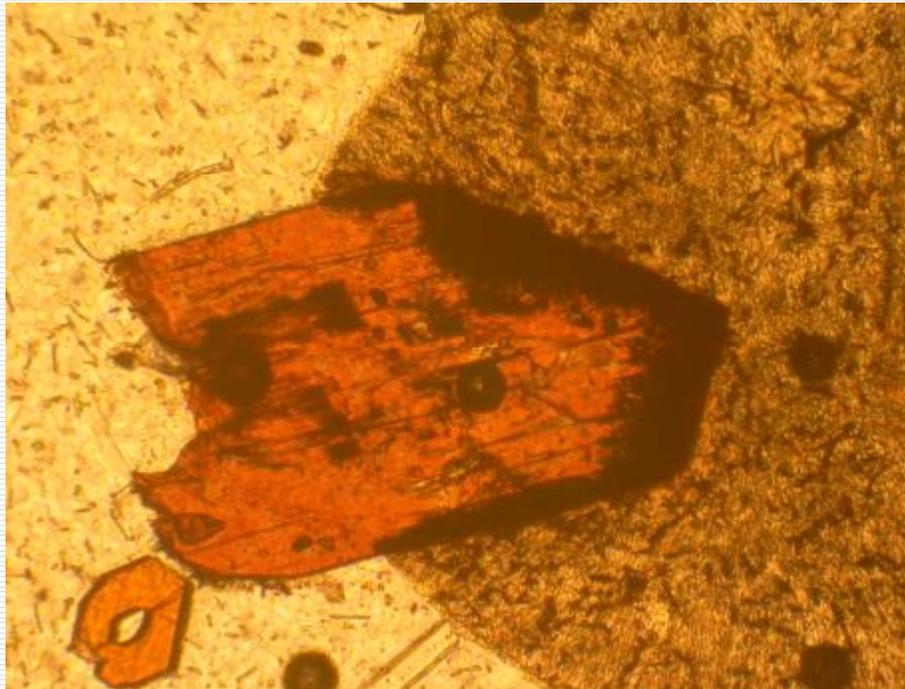
# Кизимен, признаки смешения



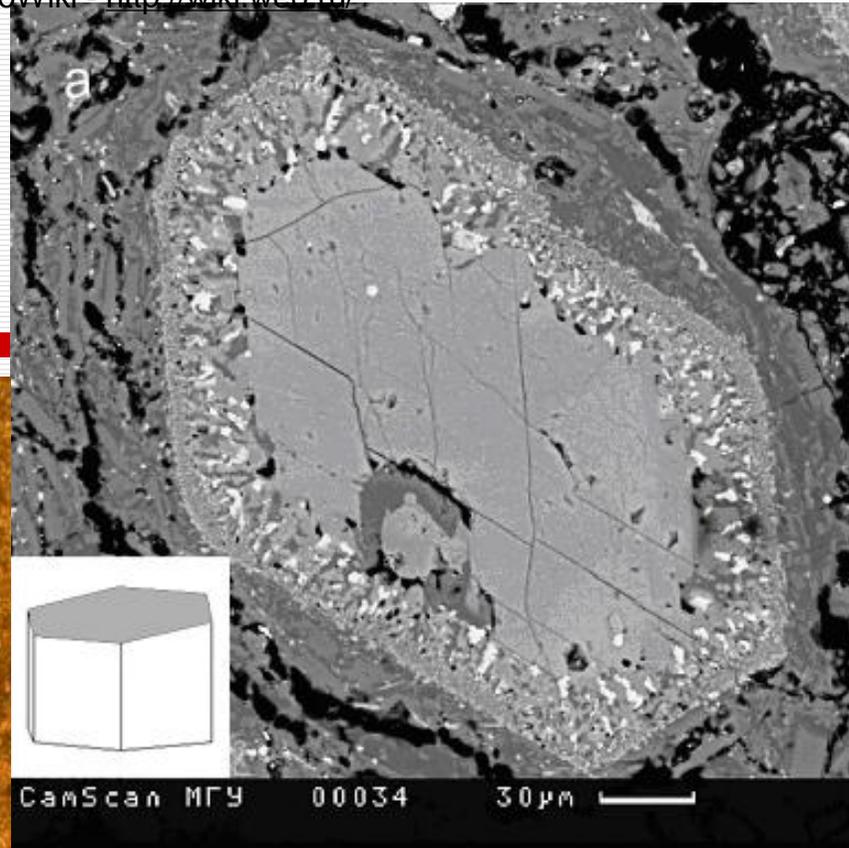
Churikova et al., 2002

JUL 4 2001

# Реакционные каймы

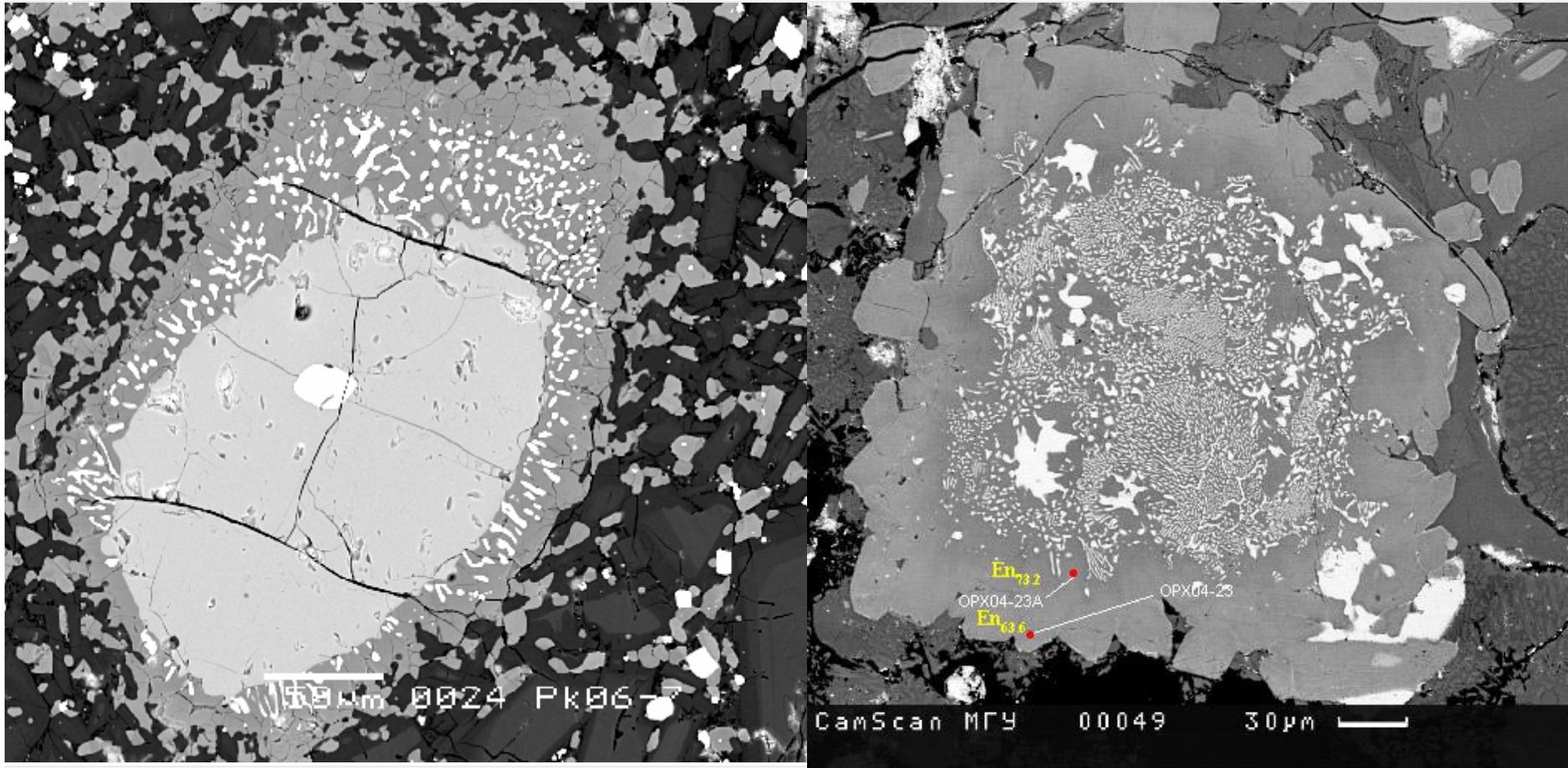


Вулкан Кизимен, кристалл роговой обманки на границе двух расплавов



Реакционные каймы вокруг роговой обманки в лавах влк. Безымянный

# Оливин=Ортопироксен+Магнетит



**Вулкан Карымский**

**Вулкан Кизимен**

Реакционные каймы вокруг оливина, привнесенного магмой основного состава в кислый магматический очаг

## Причины разнообразия магм, предложенные после 1917 года

---

- Флюидо-магматическое взаимодействие и флюидный транспорт
  - Зонная плавка
  - Фильтрация расплавов и переуравновешивание
  - Кристаллизация граничного слоя интрузивов
  - Фракционное и неравновесное плавление и кристаллизация
-