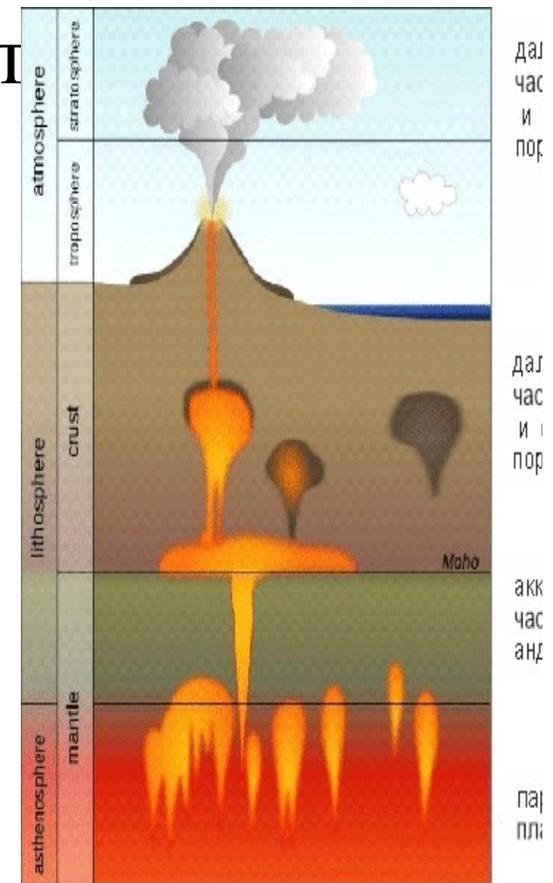


**Л.В. Сазонова**  
**Петрография магматических и**  
**метаморфических пород (краткий курс с**  
**углубленными практическими**  
**занятиями, группа 204)**  
**Сазонова Л.В.**  
**Лекция 2**

- Верны ли утверждения?  У каждой магматической породы есть родоначальная магма – первичный расплав, из которого эта порода образуется.
- Нет. Количество первичных магм ограничено. Большинство горных пород образуются на различных этапах эволюции магматических расплавов.
- Состав магмы в момент кристаллизации из нее горной породы полностью соответствует составу этой породы.
- Нет. Состав магмы и горной породы различаются, как минимум по содержанию летучих компонентов.
- Зная минеральный и химический состав горной породы, можно определить ее родоначальную магму.
- Да. Современные методики числовых расчетов и компьютерного моделирования позволяют реконструировать состав родоначальной магмы

# История магмы от зарождения до полного застывания

- Зарождение магмы – парциальное плавление субстрата
- Сегрегация магмы – отделение от субстрата
- Подъем магмы в верхний слой земной коры и медленная кристаллизация в магматическом очаге
- или излияние на поверхность быстрая кристаллизация и закалка



*Охлаждение и кристаллизация  
магматических расплавов.*

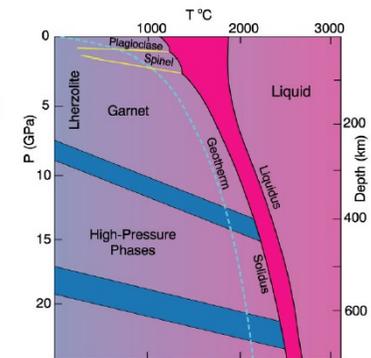
*Общие представления о диаграммах  
плавкости по принципу эвтектики и  
твердых растворов.*

*Влияние флюидной фазы на  
температуры ликвидуса и солидуса.*

*Первичная собственно магматическая  
кристаллизация*

# Кристаллизация расплавов

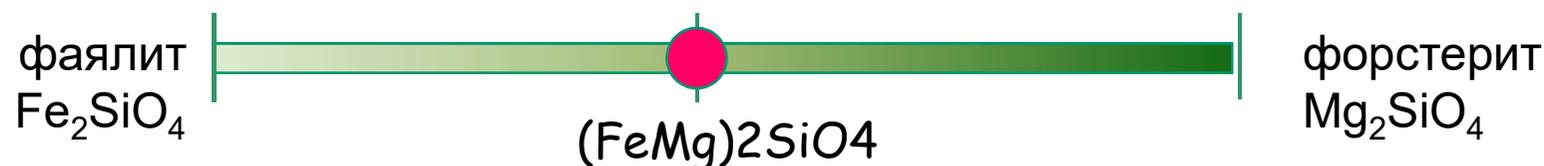
- Кристаллизация расплавов начинается при их охлаждении и достижении температуры ликвидуса, которая зависит от состава расплава, содержания в нем растворенных летучих компонентов и давления.
- Солидус определяет полное исчезновение расплава и переход твердому состоянию (образованию магматической породы).
- В упрощенном виде можно рассмотреть закономерности кристаллизации расплава, состоящего из двух компонентов.
- В этом случае процесс кристаллизации может описываться двумя типами магматических систем:
  - компоненты расплава способны образовывать непрерывную серию твердых растворов;
  - компоненты расплава не образуют твердые растворы, т.е. несмесимы в твердом состоянии. Кристаллизацию таких расплавов можно рассмотреть с помощью двух главных  $T-X$  (температура–состав) диаграмм фазовых отношений – так называемых диаграмм плавкости



# Твердые растворы

*Твёрдые растворы — это однородные твердые вещества, в которых концентрации компонентов могут быть изменены без нарушения однородности этого вещества.*

Например, оливин,  $(\text{Mg}, \text{Fe})_2\text{SiO}_4$ , - твердый раствор железистого ( $\text{Fe}_2\text{SiO}_4$ , фаялит, Fa) и магнезиального ( $\text{Mg}_2\text{SiO}_4$ , форстерит, Fo) оливинов. Фаялит и форстерит - конечные члены твердого раствора оливина.

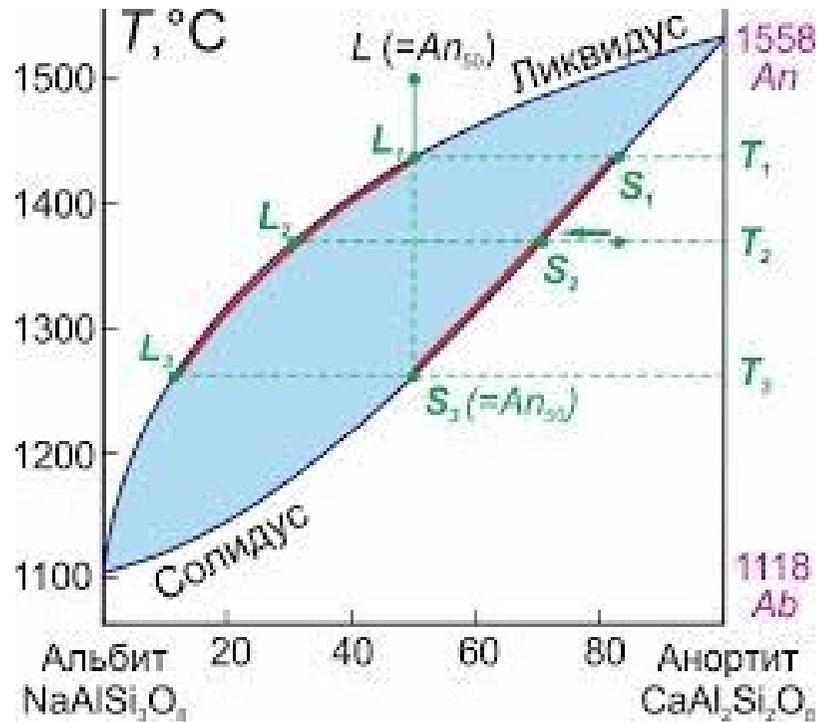


Для представления оливина с составом  $\text{MgFeSiO}_4$  можно использовать три набора компонентов:

- (1)  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Si}^{4+}$ ,  $\text{O}^{2-}$ ;
- (2)  $\text{MgO}$ ,  $\text{FeO}$ ,  $\text{SiO}_2$ ;
- (3)  $\text{Mg}_2\text{SiO}_4$ ,  $\text{Fe}_2\text{SiO}_4$ .

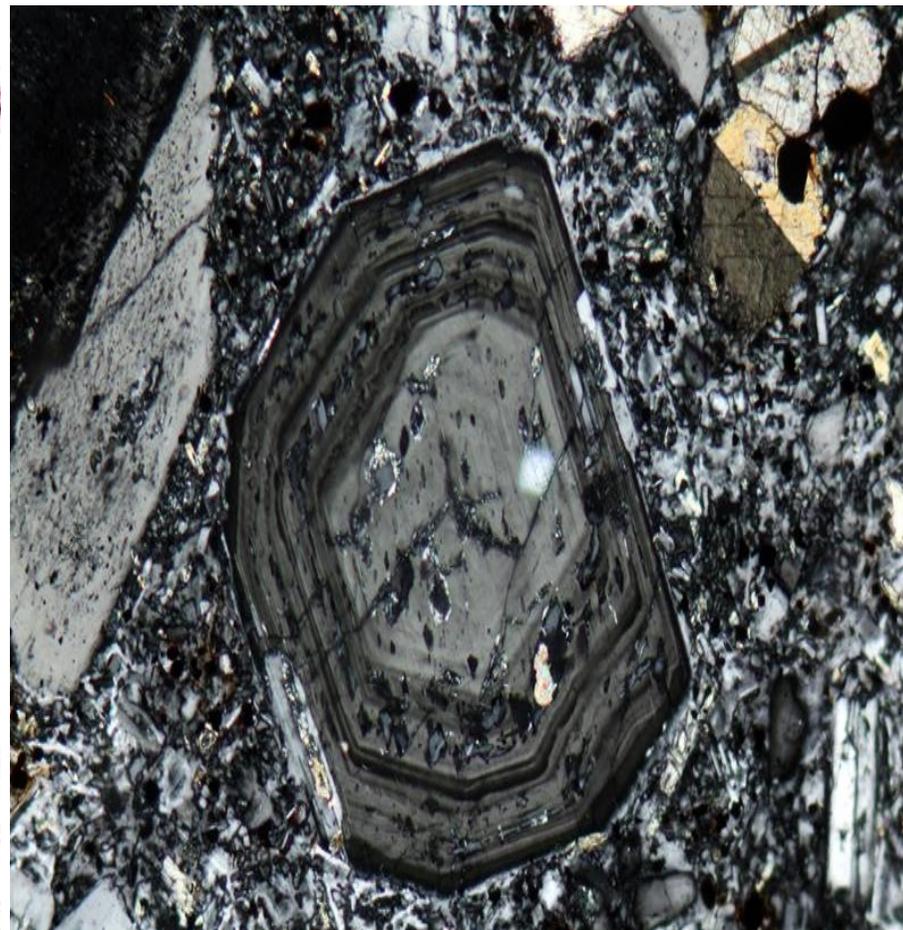
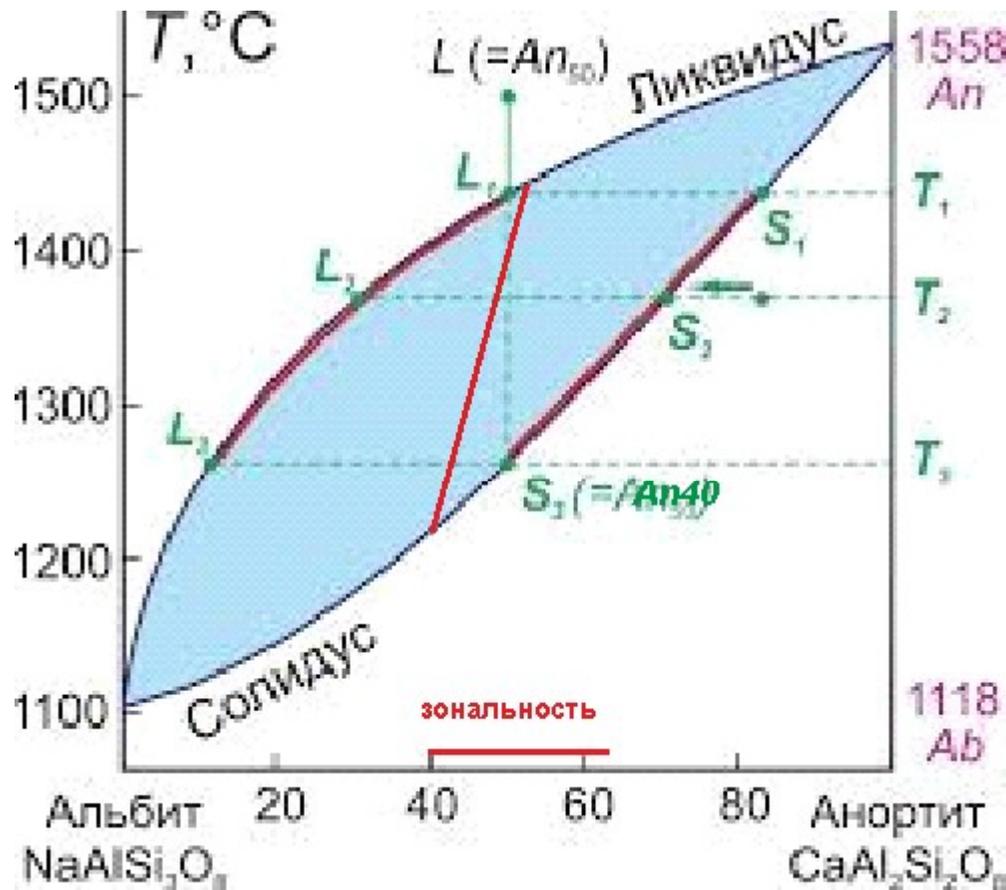
Но для того, чтобы охарактеризовать состав и особенности твердого раствора обычно обходятся минимальным количеством компонентов, т.е. набором (3) ( $\text{Fo}_{90}$  - в тв. р-ре оливина 90% Fo).

I – Кристаллизация с образованием непрерывной серии твердых растворов, иллюстрирует кристаллизацию природных плагиоклазов.

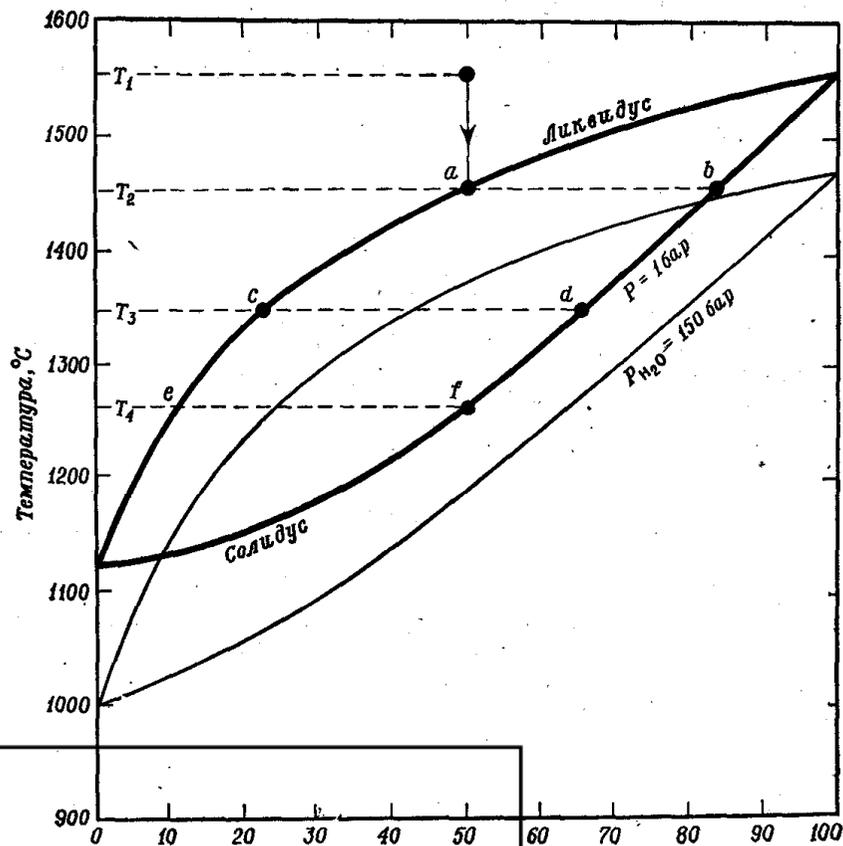


Важно! Состав твердой фазы всегда богаче анортитовым (более высокотемпературным) компонентом по сравнению с составом расплава (богаче альбитом). Данный тип диаграмм применим и к кристаллизации мафических минералов (богатый Mg компонент всегда более высокотемпературный!).

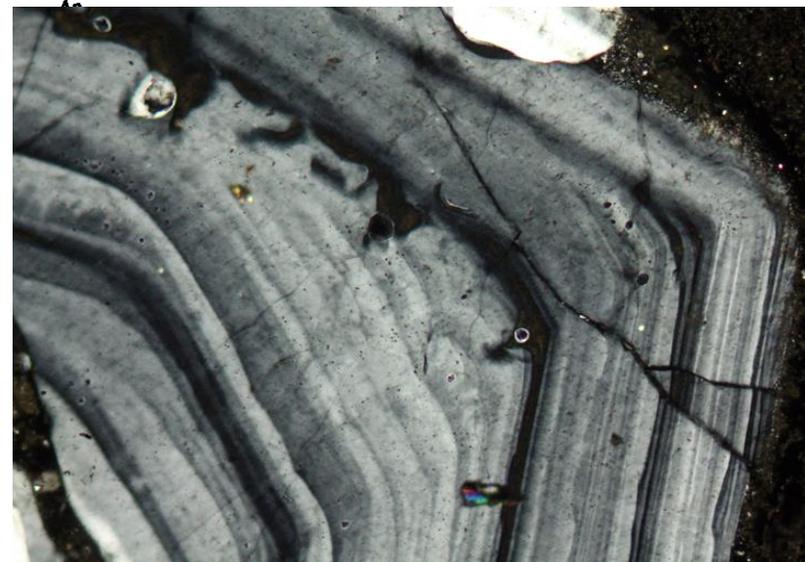
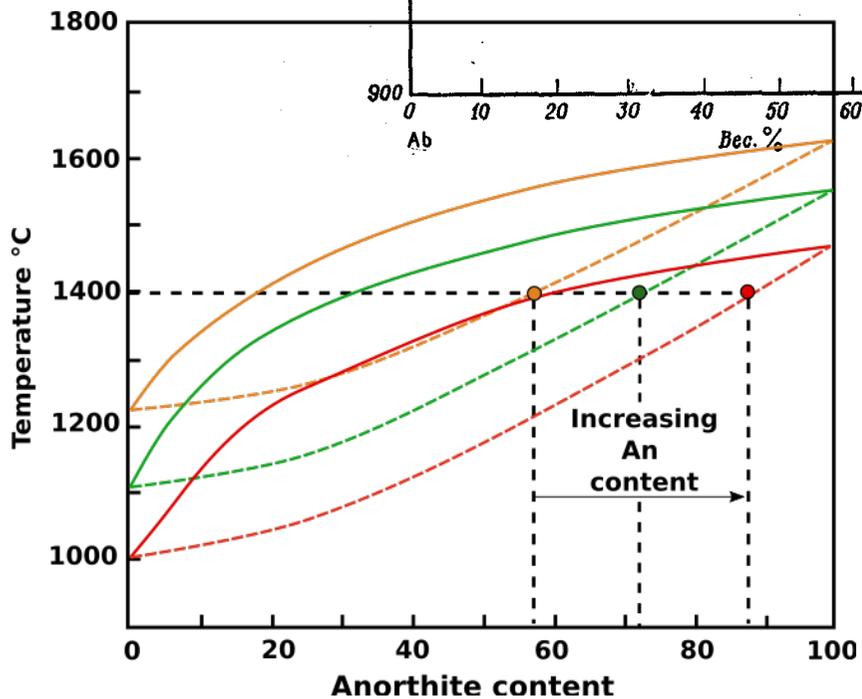
**I – Кристаллизация с образованием непрерывной серии твердых растворов,** иллюстрирует кристаллизацию природных плагноклазов



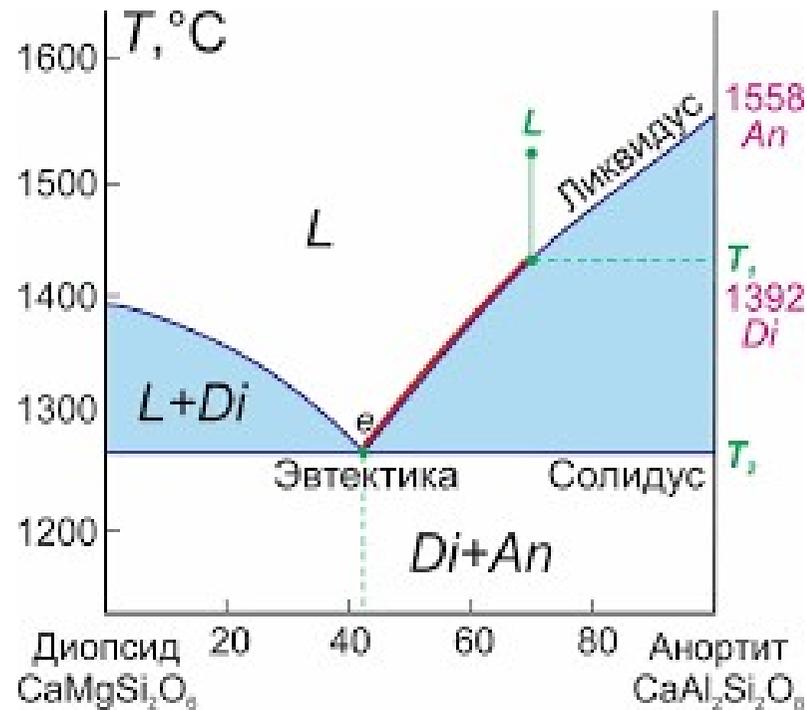
Быстрая кристаллизация способствует фракционированию высокотемпературного компонента твердого раствора (анортита), а расплав все больше по мере кристаллизации обогащается низкотемпературным компонентом (альбитом). В результате возникает так называемая прямая зональность минерала, которая 8 качественно характеризует скорость остывания расплава и его кристаллизации



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



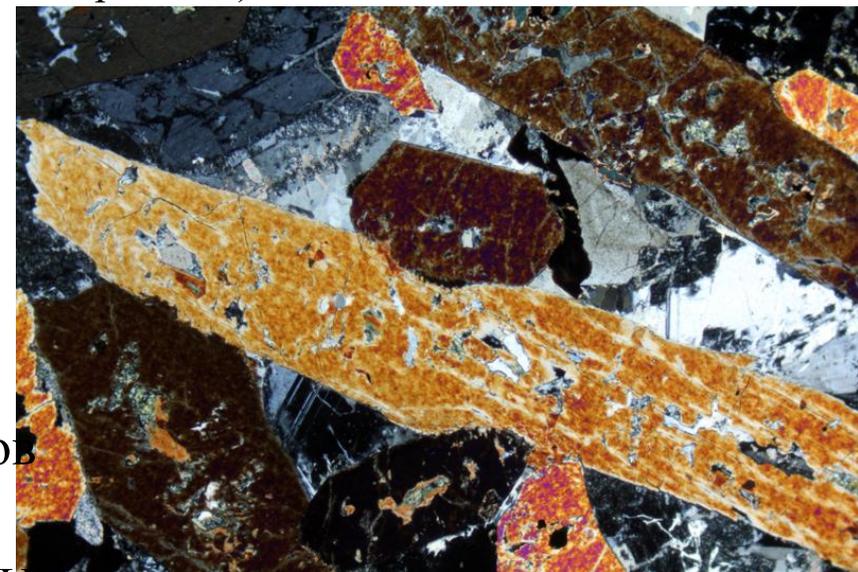
II – Диаграмма с простой эвтектикой, иллюстрирует кристаллизацию плагиоклаз-пироксеновой породы – габбро



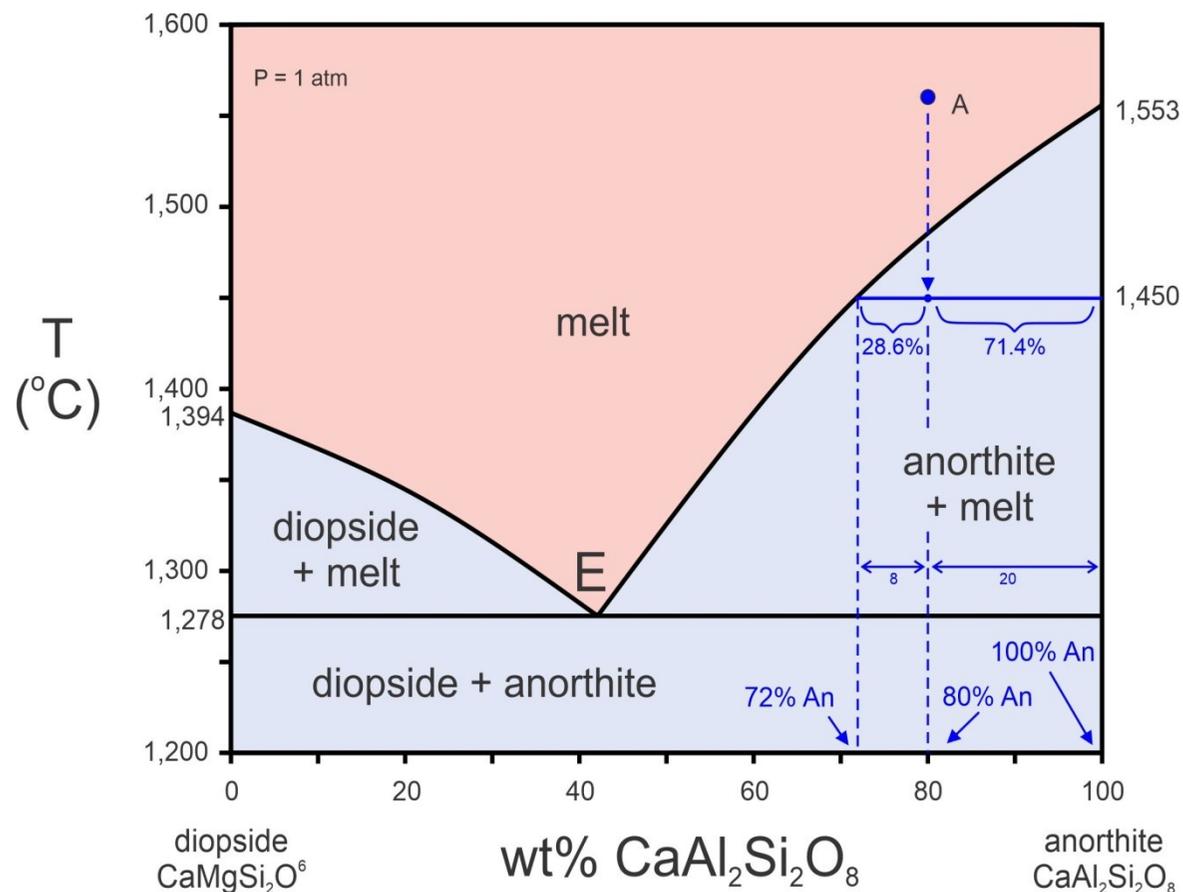
Данный тип диаграмм применим к кристаллизации в относительно простых системах с участием расплава и двух минералов. На таких диаграммах не учитывается образование твердых растворов для минералов системы. Этим отчасти объясняются слишком высокие температуры солидуса.



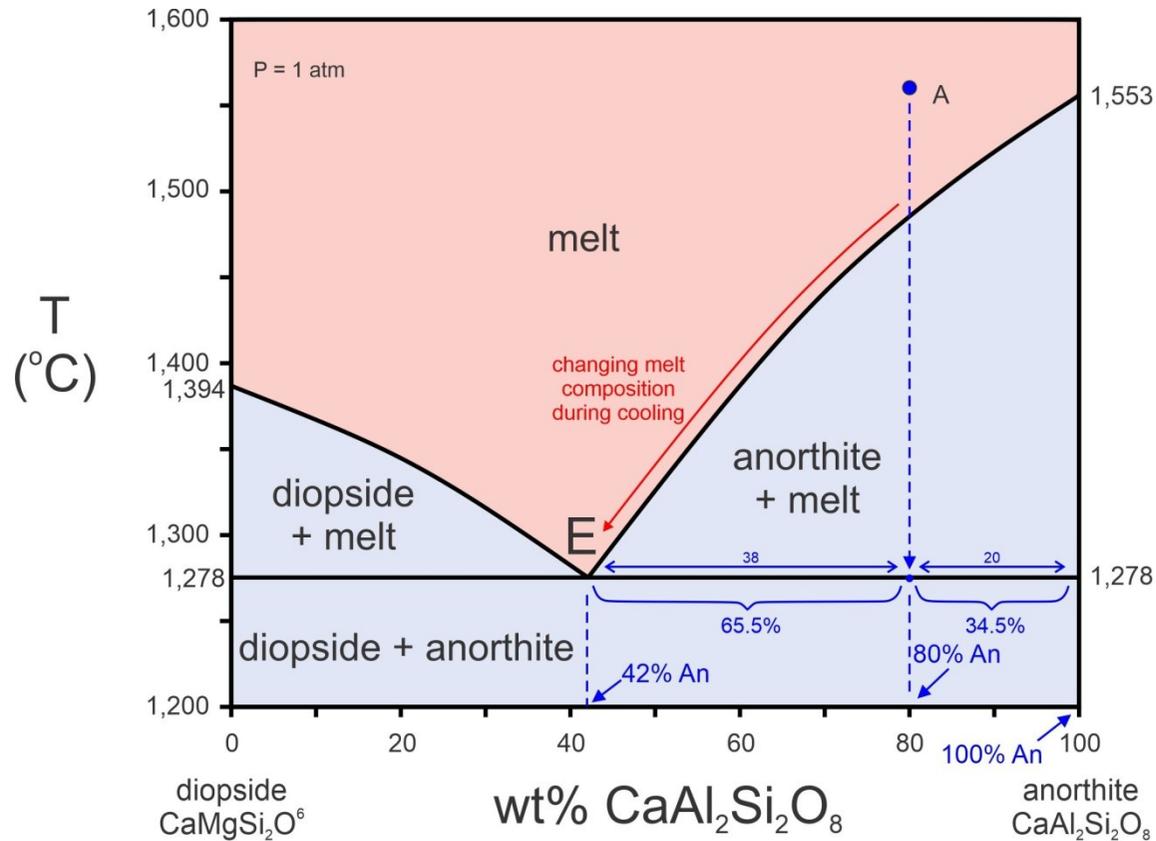
В этом случае, плагиоклаз – минерал на ликвидусе (он кристаллизуется раньше пироксена).



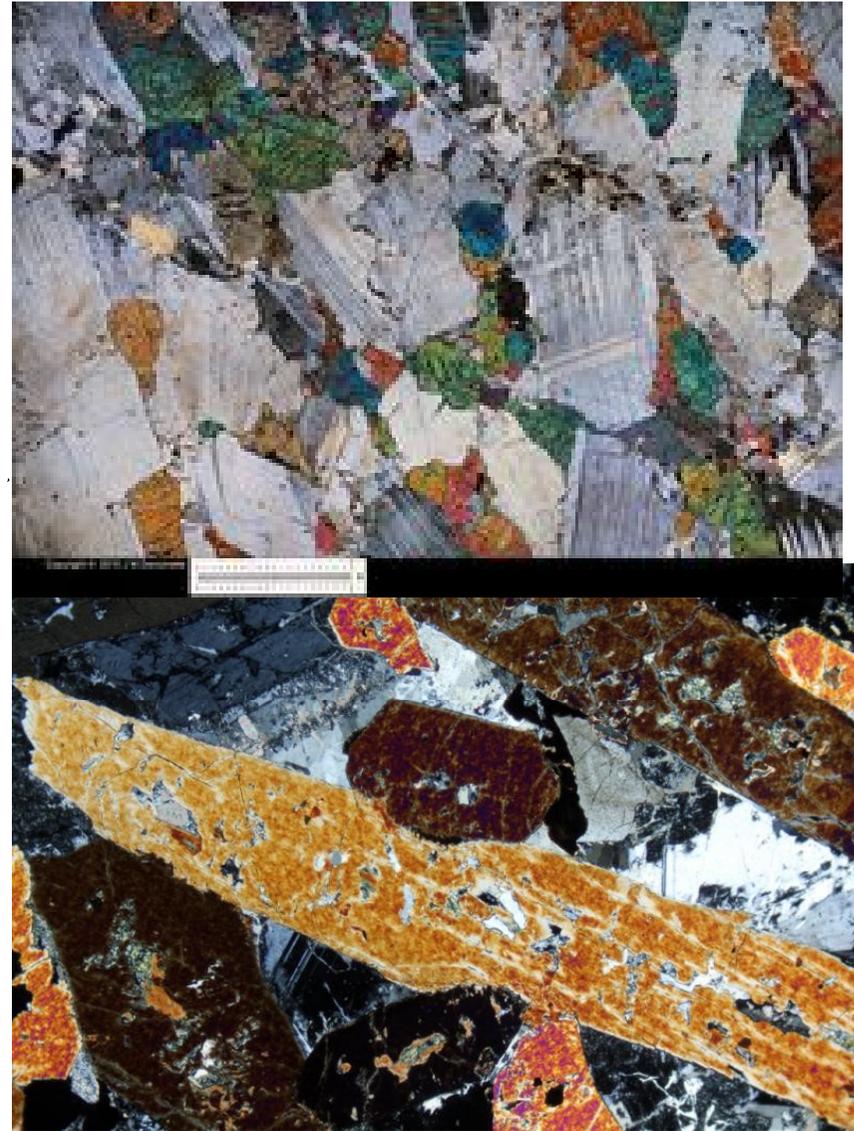
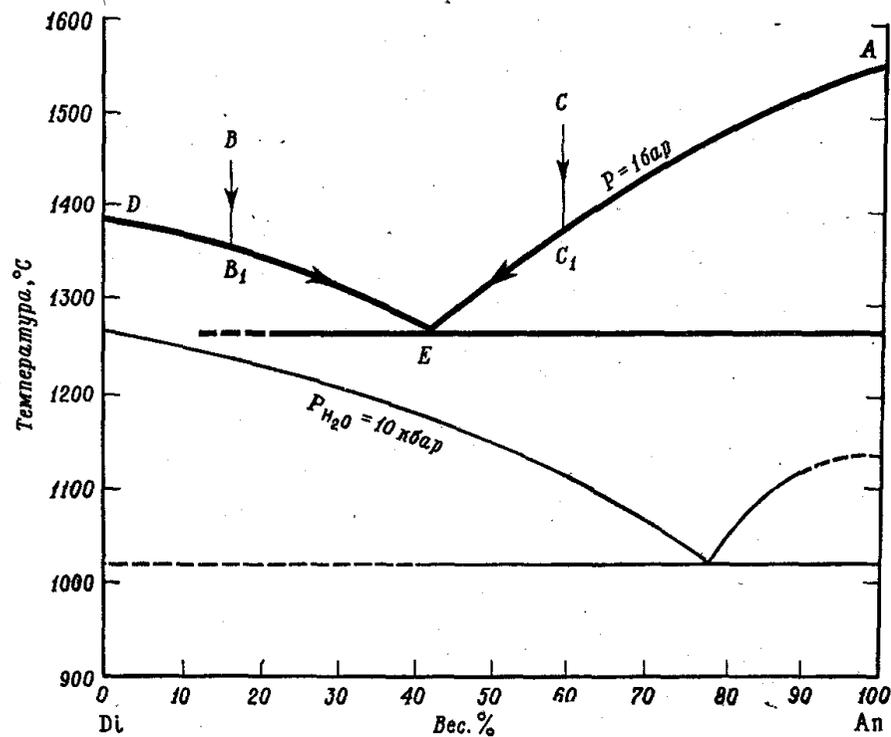
А здесь, пироксен – минерал на ликвидусе (он кристаллизуется раньше плагиоклаза).



Предположим, что расплав охлаждается от точки А до 1450 °С. Пересечение состава расплава с горизонтальной линией при 1450 оС находится в поле анортит + расплав. Горизонтальная линия в двухфазном поле пересекает ликвидус при составе 72 %  $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ . Это состав расплава при 1450 оС. И мы можем разделить эту горизонтальную линию на два сегмента — один от ликвидуса до исходного состава расплава — от 72% до 80%. Другой идет от исходного состава расплава к правой стороне диаграммы (от 80% до 100%). Эти длины пропорциональны количеству анортита и расплава, присутствующих при 1450 оС. Сумма двух длин составляет 28%. 8/28 составляет 28,6%, а 20/28 составляет 71,4%, поэтому мы имеем 28,6% кристаллов анортита и 71,4% расплава. Мы называем этот расчет правилом рычага.



Обратите внимание, что при охлаждении состав расплава следует за ликвидусом, в конечном итоге достигая эвтектики (красная стрелка). Когда это происходит, длина сегмента линии, представляющего количество присутствующего анортита, увеличивается по мере кристаллизации анортита. Когда температура, наконец, достигнет эвтектического уровня 1278 оС, небольшое количество оставшегося расплава будет иметь эвтектический состав. Мы можем применить правило рычага, используя отрезки линии от эвтектики до исходного состава расплава (от An42 до An80) и от исходного состава расплава (от An80 до An100) до правой части диаграммы. Эти два линейных сегмента составляют 38% и 20%, что в сумме составляет 58%.  $20/58 = 34,5\%$ , поэтому около 34,5% исходного расплава останется, как только температура достигнет эвтектики. Около  $2/3$  ( $38/58 = 65,5\%$ ) расплава кристаллизуется в анортит. Еще немного охладив – когда температура упадет ниже эвтектики – весь расплав кристаллизуется до 80% анортита и 20% диопсида.

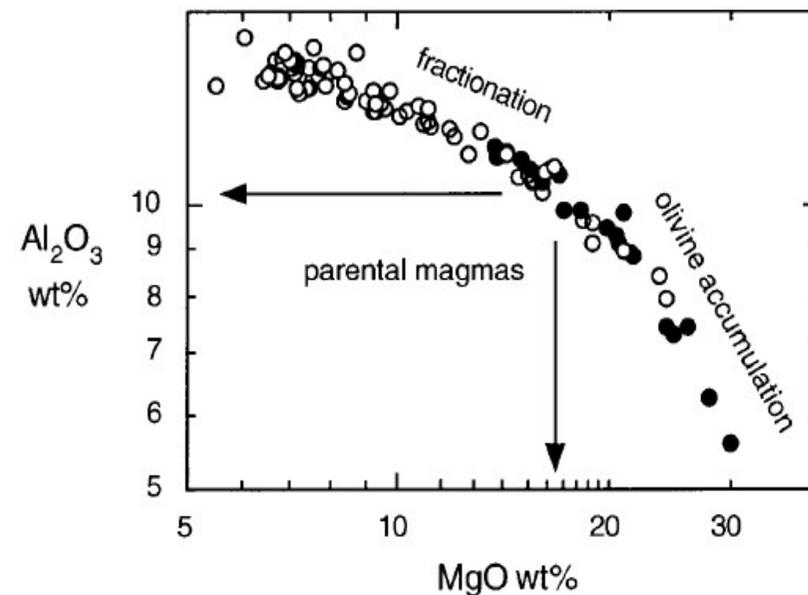


Фазовые взаимоотношения в системе диопсид-анортит. Показано понижение температуры эвтектики и изменение ее состава в результате увеличения давления паров воды (по Йодеру, 1969)<sup>3</sup>.

## Магматическая дифференциация или эволюция магмы.

Нельзя говорить, что каждая горная порода образовалась из своей магмы. Попадая в новые термодинамические условия верхних частей Земли, так называемая, материнская магма изменяет свой состав. Этот процесс носит название **магматической дифференциации или эволюции магмы или магматического фракционирования**. При этом исходная гомогенная масса дает фракции различного состава — жидкие или кристаллические.

Возникает ряд или **серия магматических пород**, характеризующихся систематическим химическим изменением, генетически связанных процессами дифференциации.

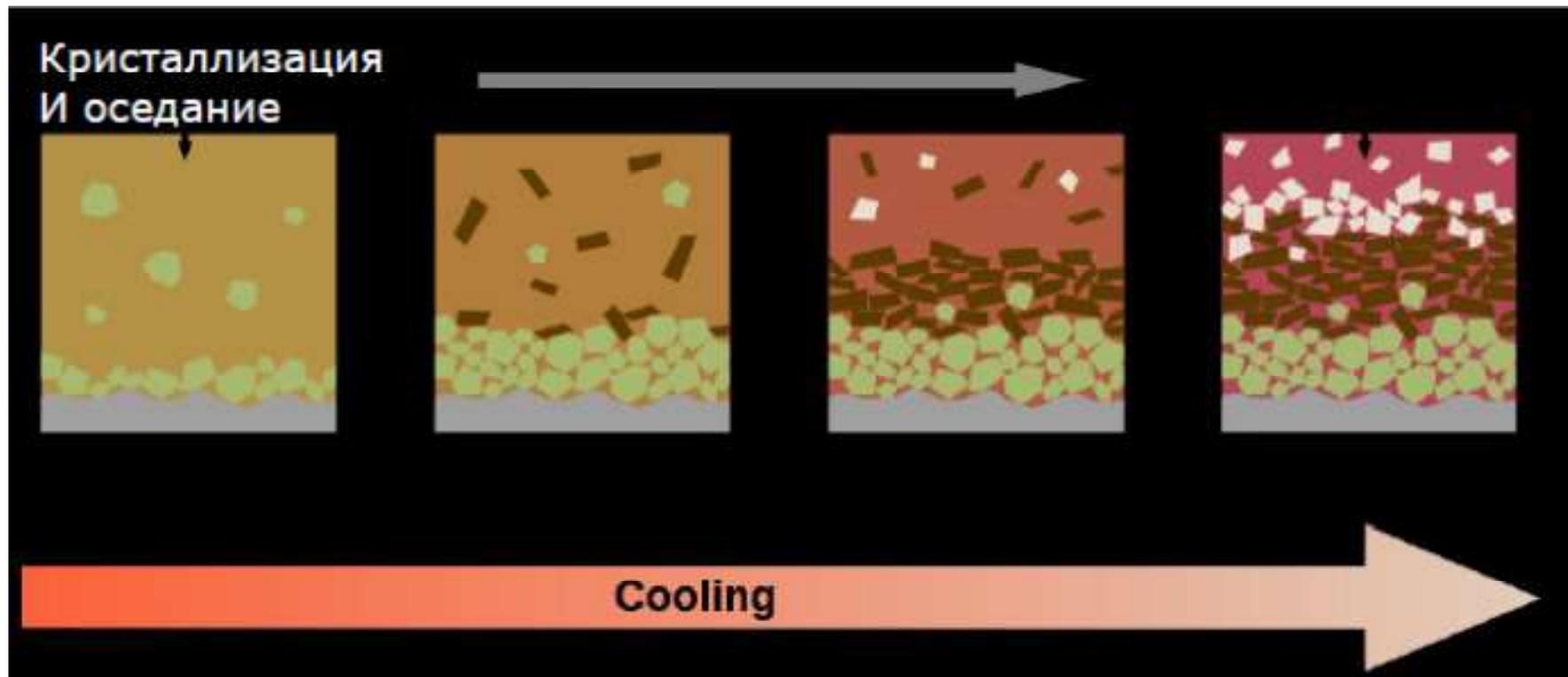


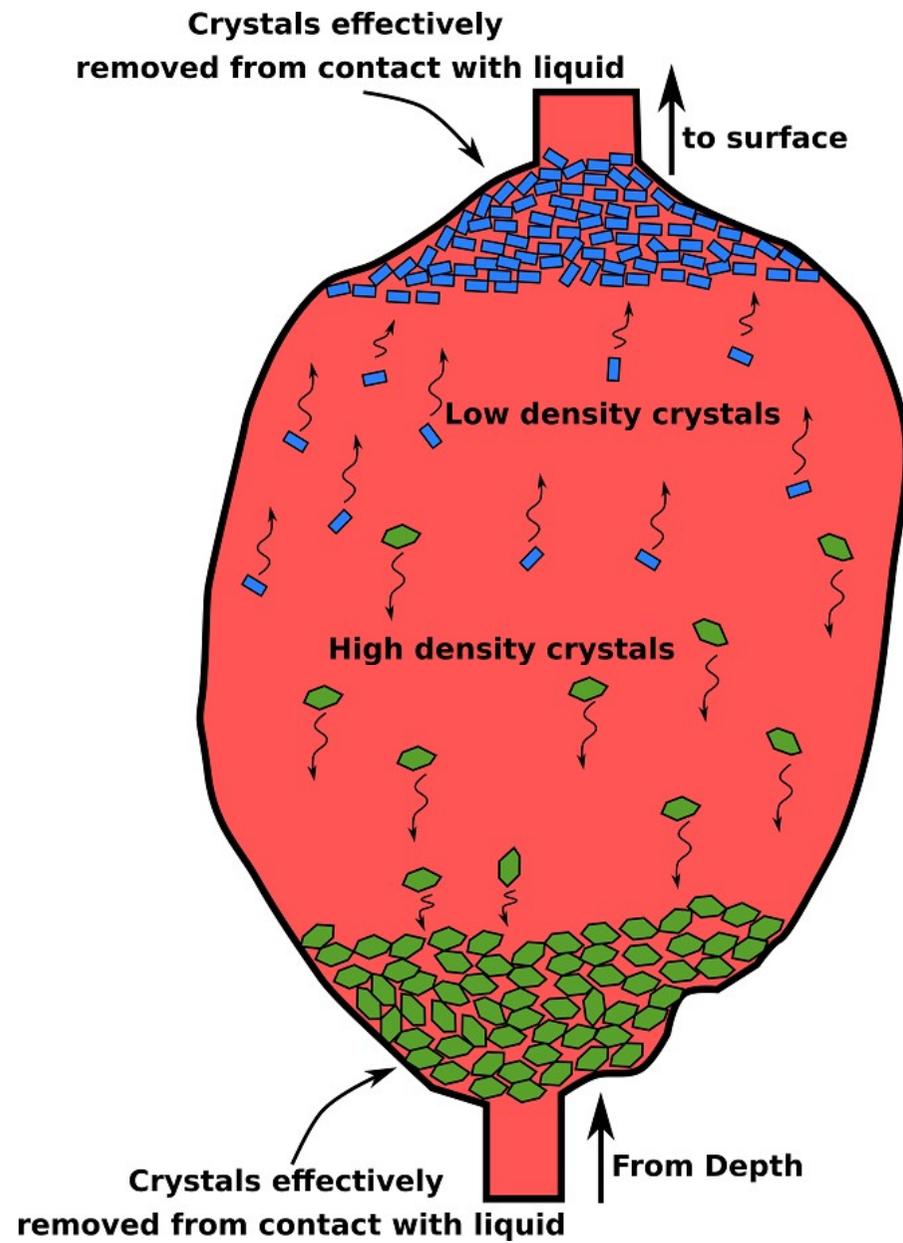
Эволюционные процессы, запечатленные в ассоциации горных пород, осуществляются по следующим главным механизмам:

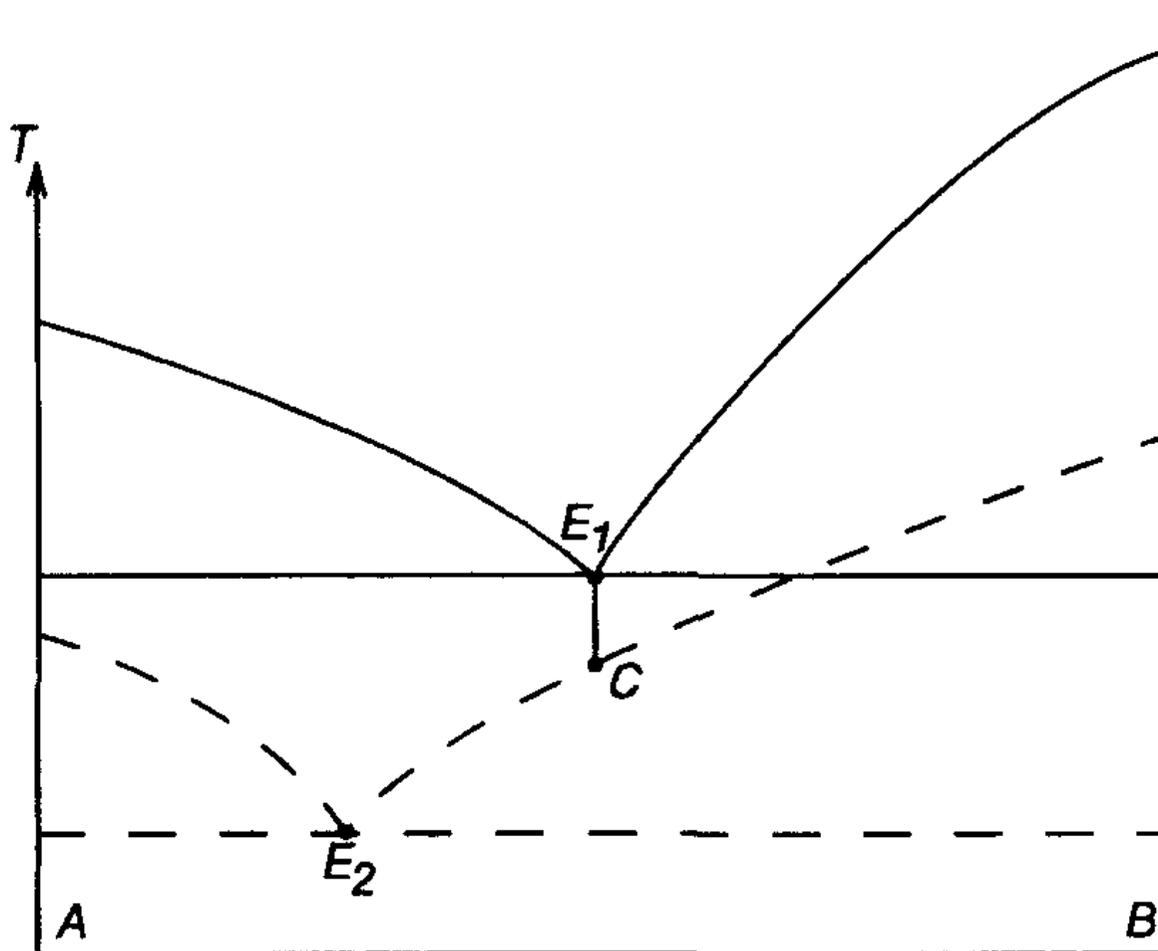
- 1) посредством кристаллизации магмы (кристаллизационная дифференциация),
- 2) в результате ликвации,
- 3) в результате частичной или полной ассимиляции твердых горных пород жидкой магмой,
- 4) в результате смешения самостоятельных магм.

# Кристаллизационная дифференциация

Кристаллы образуются из расплава и могут погружаться на дно магматической камеры, меняя тем самым состав первичного расплава. При этом кристаллизация и осаждение минералов должны происходить в определенной закономерной последовательности, так что при кристаллизационной дифференциации могут формироваться расслоенные комплексы



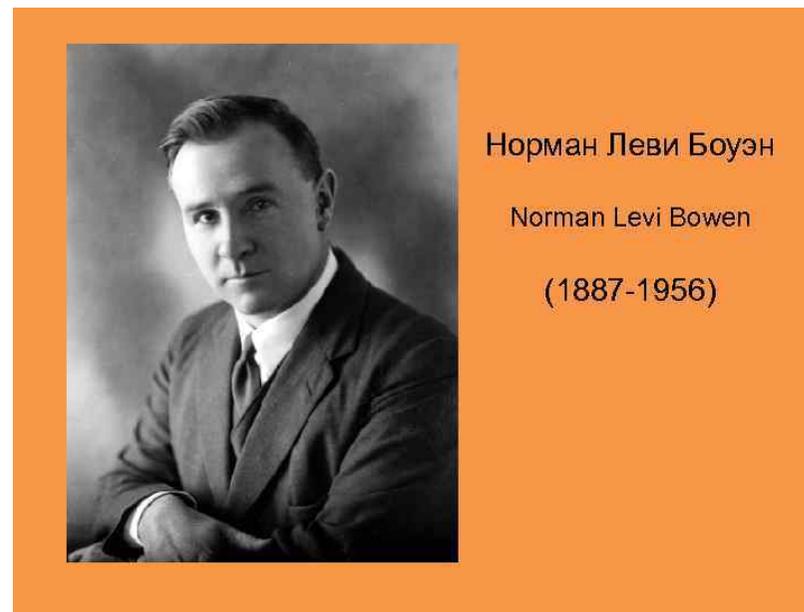




Если на глубине зарождается эвтектический расплав  $E_1$ , который поднимается к поверхности и начинает кристаллизоваться на меньшей глубине, где фазовые соотношения меняются, то из этого расплава начинают выделяться кристаллы  $B$ , а остаточный расплав стремится к составу  $E_2$ . Если механически отделить эти кристаллы, то жидкость  $E_2$  и будет представлять дифференциат первичного расплава  $E_1$

## Реакционный ряд Боуэна

Норман Леви Боуэн (1887–1956) – один из крупнейших петрологов XX века, заложивший основы экспериментальной петрологии магматических систем. В результате охлаждения магмы происходит кристаллизация минералов из расплава. При этом каждый выделившийся минерал стремится прийти в равновесие с жидкой фазой. Минералы вступают в реакцию с жидкой фазой и меняют свой состав.



Реакционный ряд Боуэна – эмпирически установленная последовательность кристаллизации минералов из магмы, представленная двумя рядами:

- прерывистый ряд смены мафических (темноцветных) минералов;
- непрерывный ряд силикатных (светлоцветных) минералов.

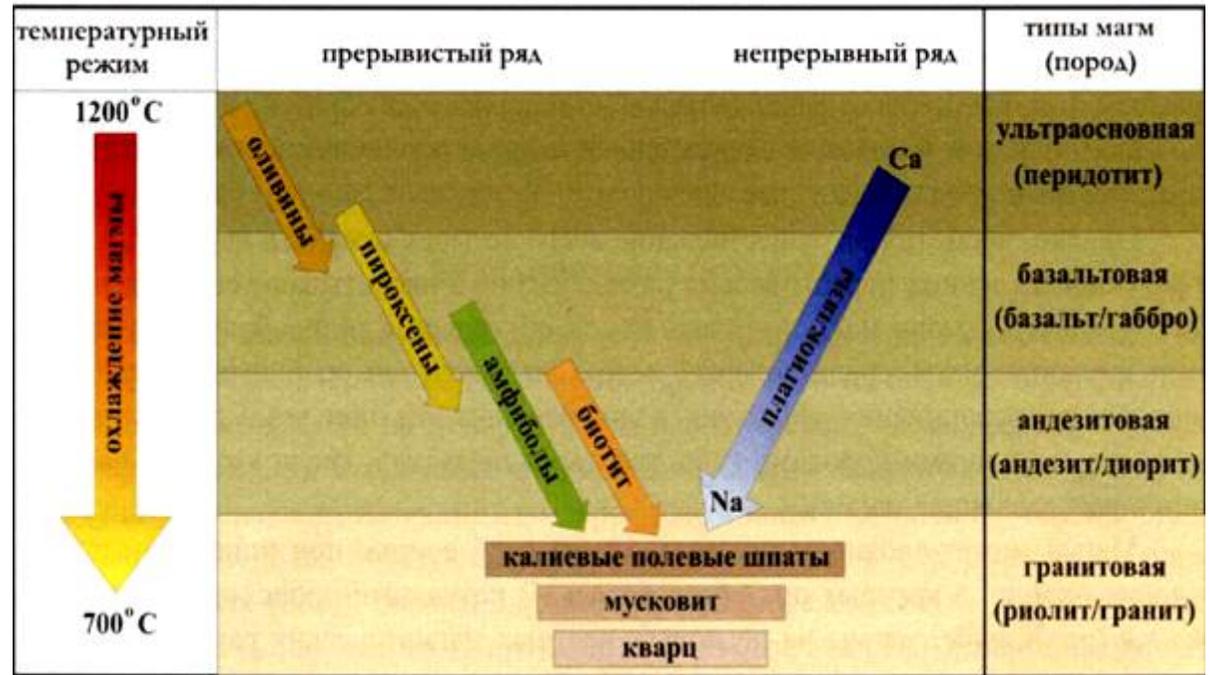
Важно! Совместная кристаллизация минералов двух рядов происходит с образованием эвтектик, соответствующих различным по содержанию SiO<sub>2</sub>

### РЕАКЦИОННЫЕ РЯДЫ БОУЭНА (схема)

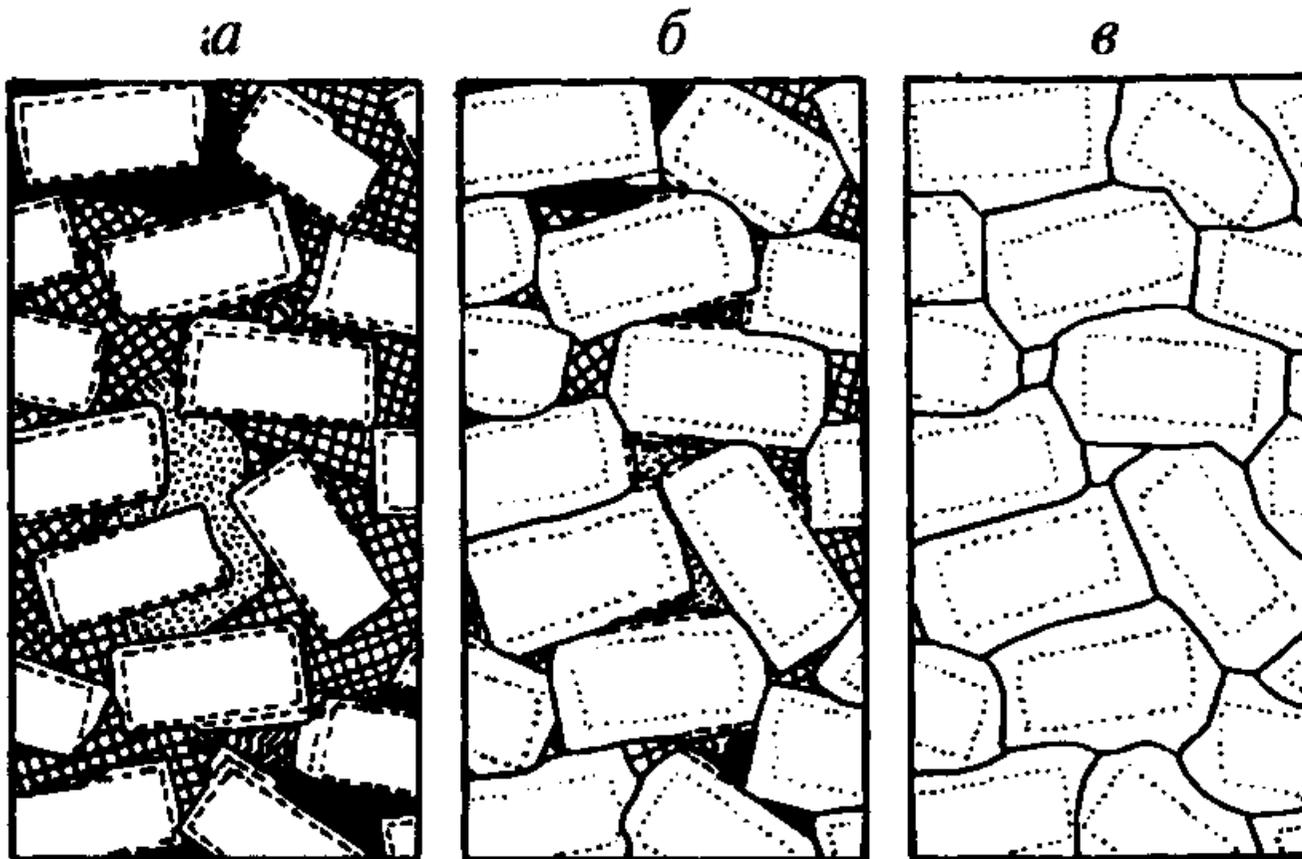


# Реакционный ряд Боуэна

Физико-химический смысл ряда Боуэна заключается в последовательном увеличении ее кремнекислотности при одновременном возрастании роли летучих компонентов. Кристаллизация магмы будет способствовать образованию все более кислых (т.е. обогащенных кремнеземом) пород на поздних стадиях. Тем самым, смена минералов по ряду Боуэна является наиболее ярким отражением процесса кристаллизационной дифференциации магматических расплавов.

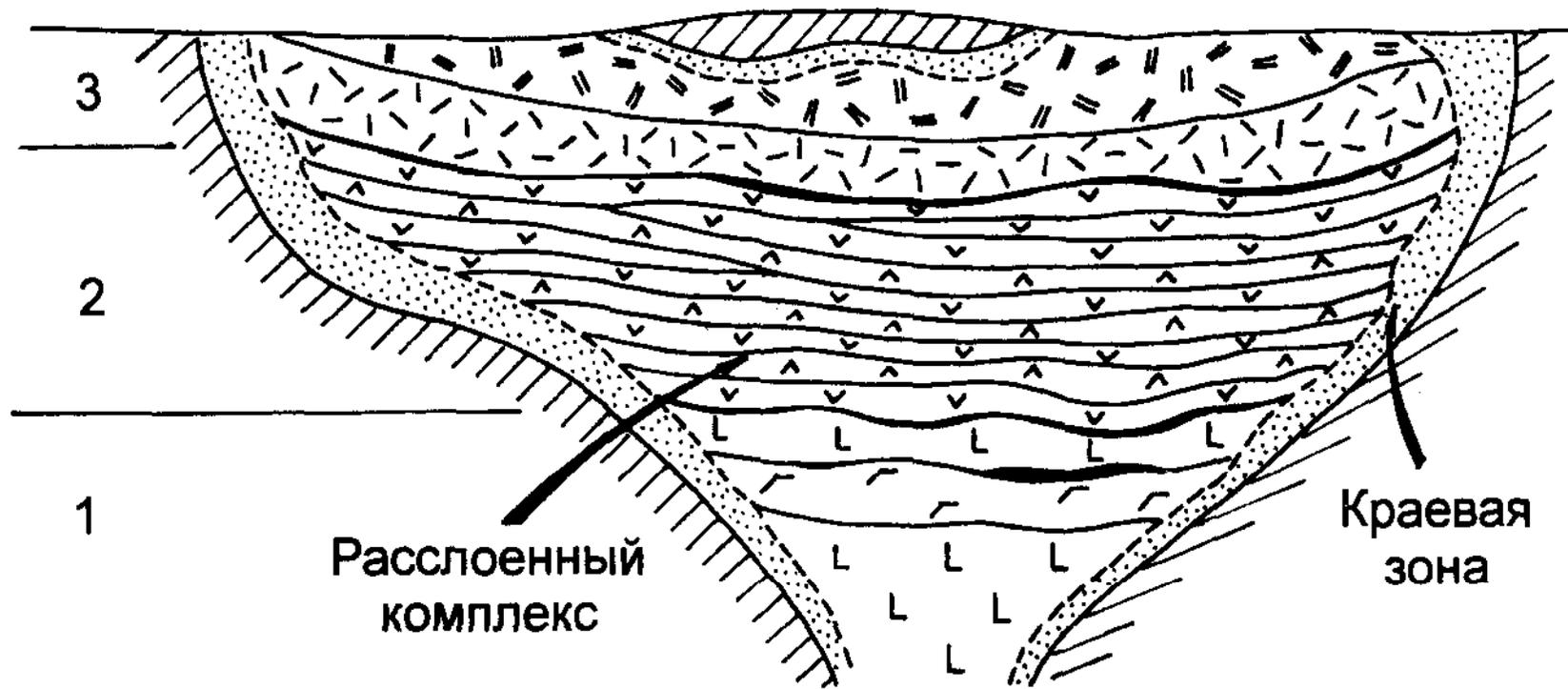


Предложенные Боуэном реакционные ряды кристаллизации в целом неплохо иллюстрируют эволюцию расплавов нормальной щелочности, однако могут нарушаться в зависимости от состава расплава, температуры, давления и других условий



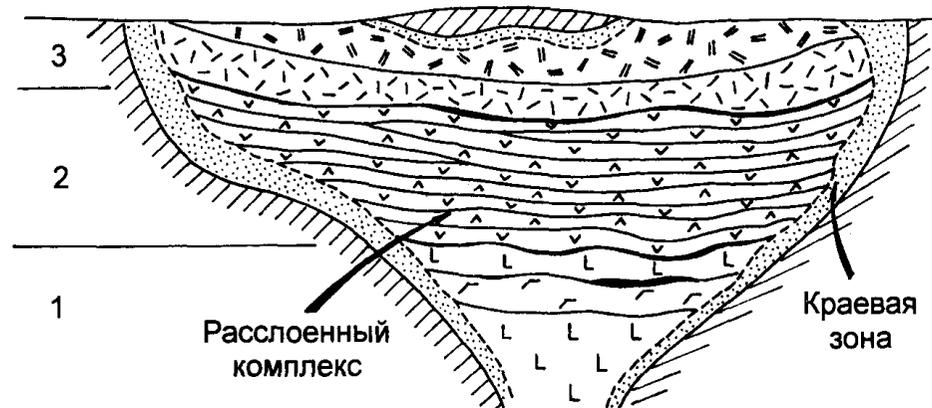
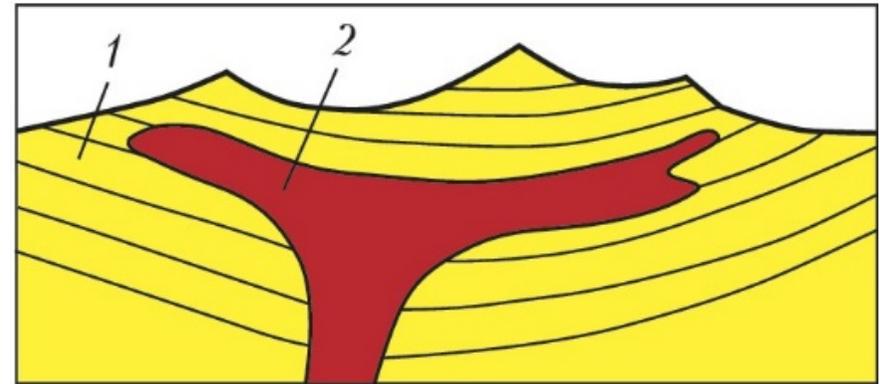
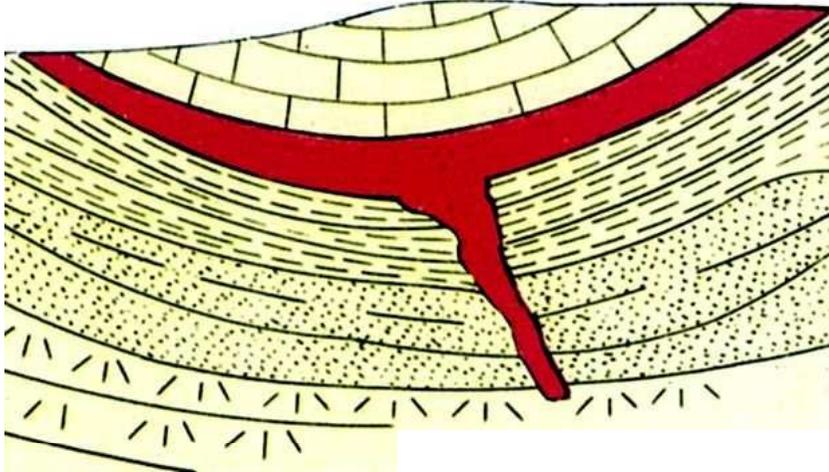
Типы  
кумулятивных  
структур: а —  
ортокумулятивная,  
б —  
мезокумулятивная,  
в —  
адкумулятивная.

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.



Расслоенные плутоны — принципиальная схема строения (разрез): 1 — ультрамафиты, 2 — габбро и нориты, 3 — феррогаббро и ферродиориты;

- Некоторые докембрийские плутоны имеют очень крупные размеры.
- Например, **Бушвельдский лополит** в Южной Африке (возраст 2 млрд лет) достигает 400 км в поперечнике, а его объем составляет около 105 км<sup>3</sup>;



- **массив Стиллоутер в Скалистых горах** на западе США (возраст 3.2 млрд лет) прослежен на расстоянии более 50 км, его объем оценивается в 104 км<sup>3</sup>; верхняя треть массива размыта.

• Имеются и расслоенные плутоны меньших размеров

Великая дайка Зимбабве в Африке (возраст 2.5 млрд лет) протягивается на 530 км при ширине от 5—6 до 12 км;





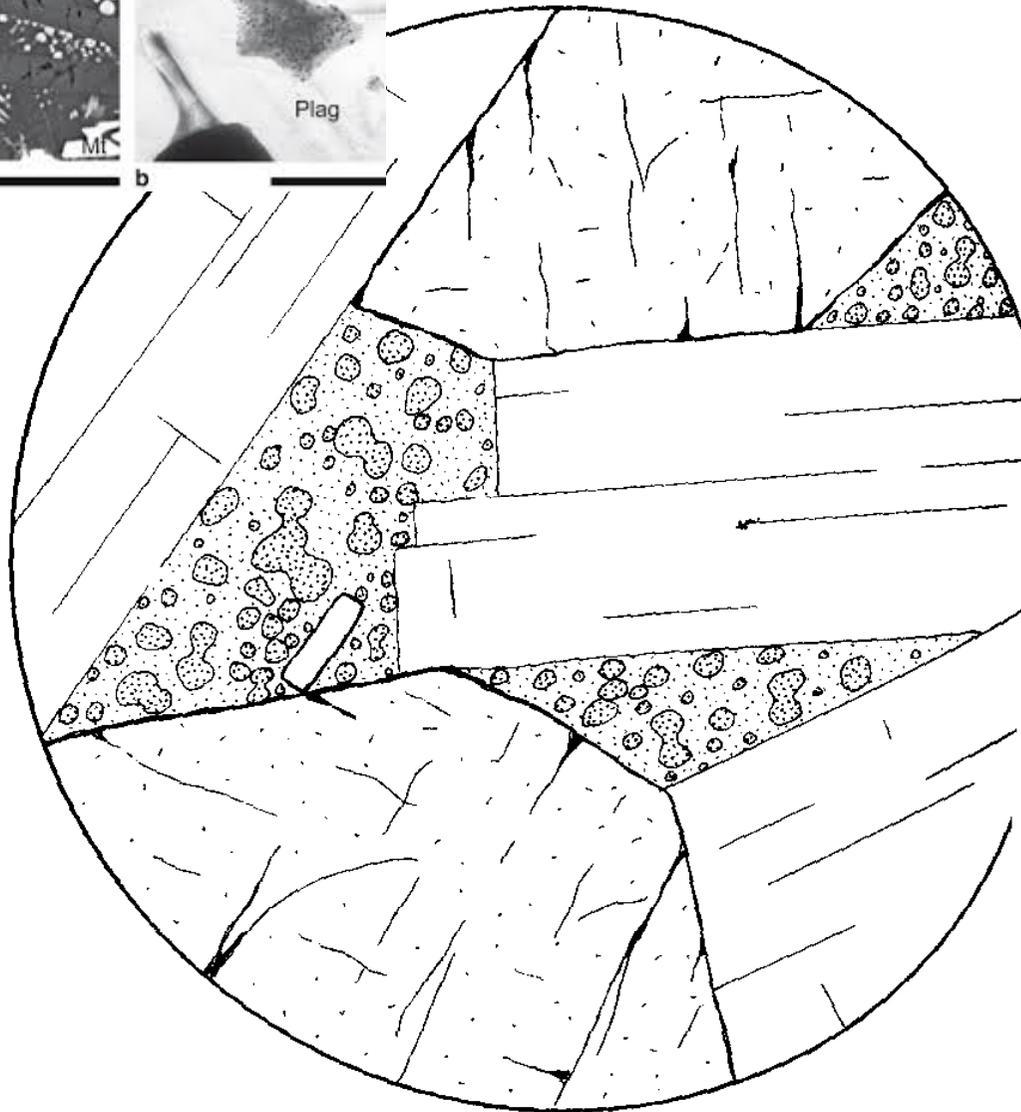
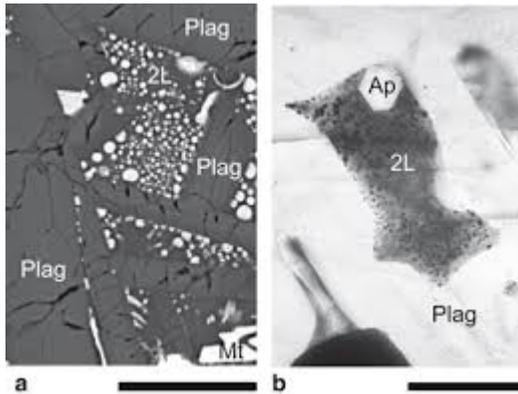
## Жидкостная несмесимость

Явление жидкостной несмесимости (ликвации) установлено в целом ряде природных образований и моделируется экспериментально.

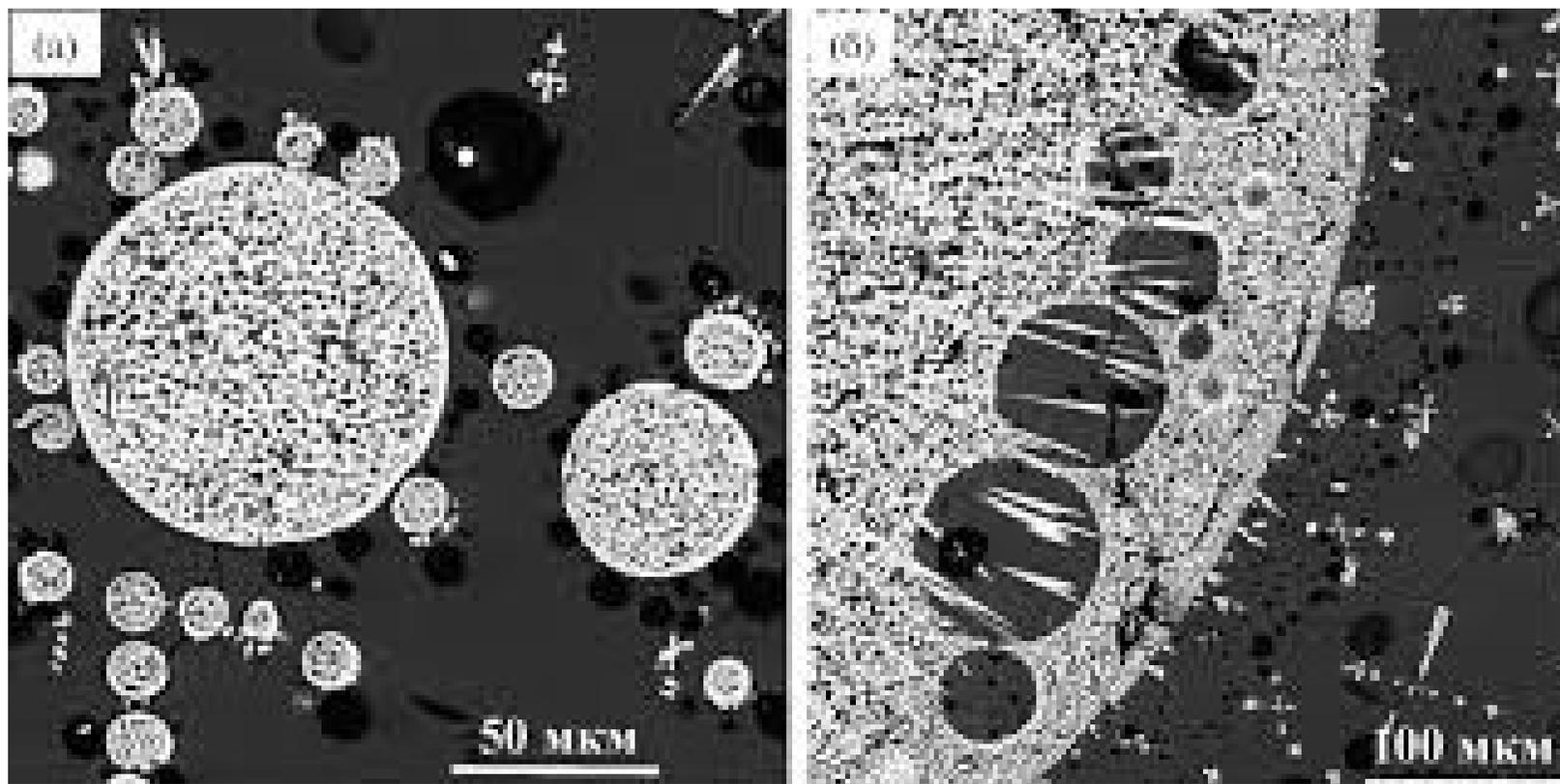
В некоторых породах широко распространены сульфидные (пирротин-пентландит халькопиритовые глобулы), отражающие сульфидно силикатную несмесимость.

Кроме того, проявления ликвации зафиксированы в системах силикат–карбонат (при относительно низких давлениях), силикат–хлорид и силикат–фосфат.

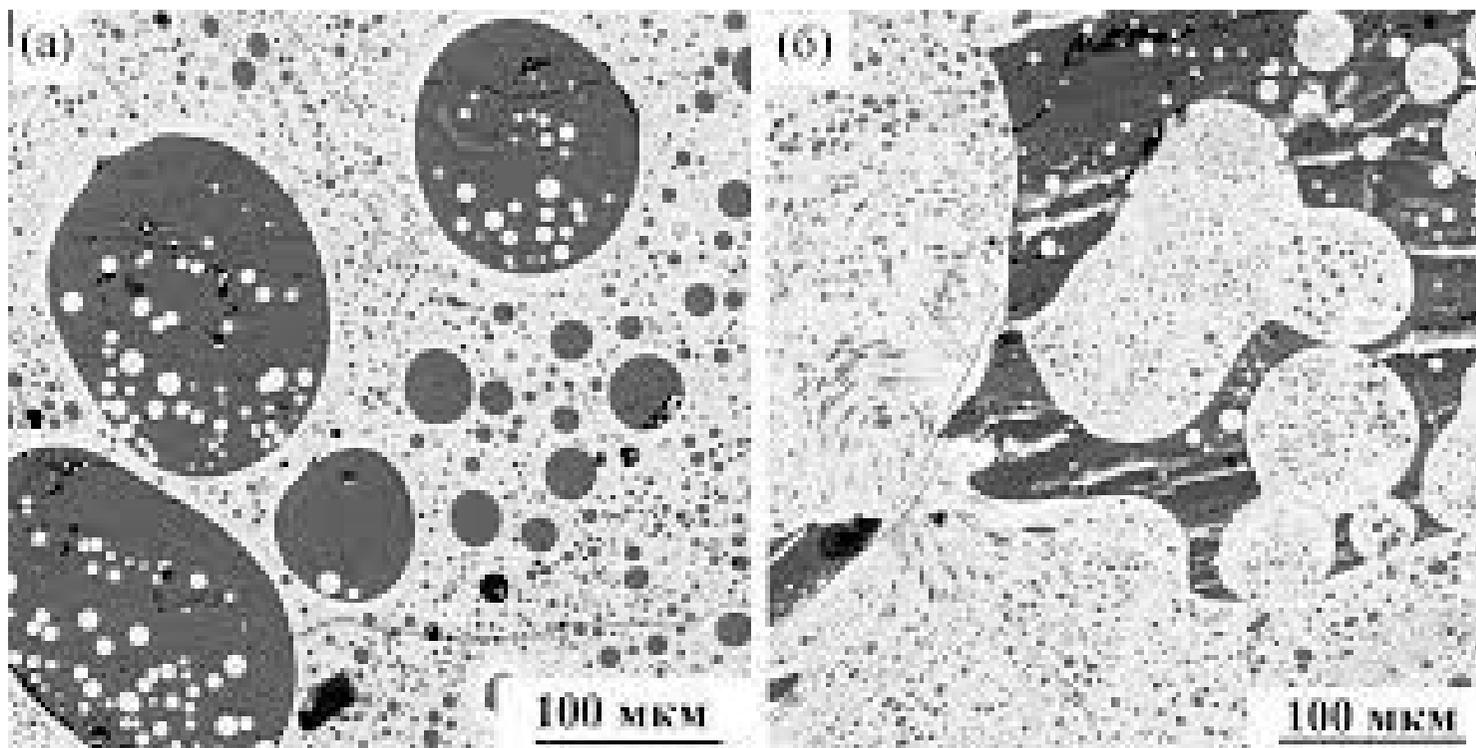
Известна жидкостная несмесимость и в чисто силикатных системах. Так, проявлением ликвации в толеитовых базальтах является присутствие мелких глобул богатого железом стекла в более кремнекислом стекле в интерстициях между крупными зернами плагиоклаза и пироксена



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

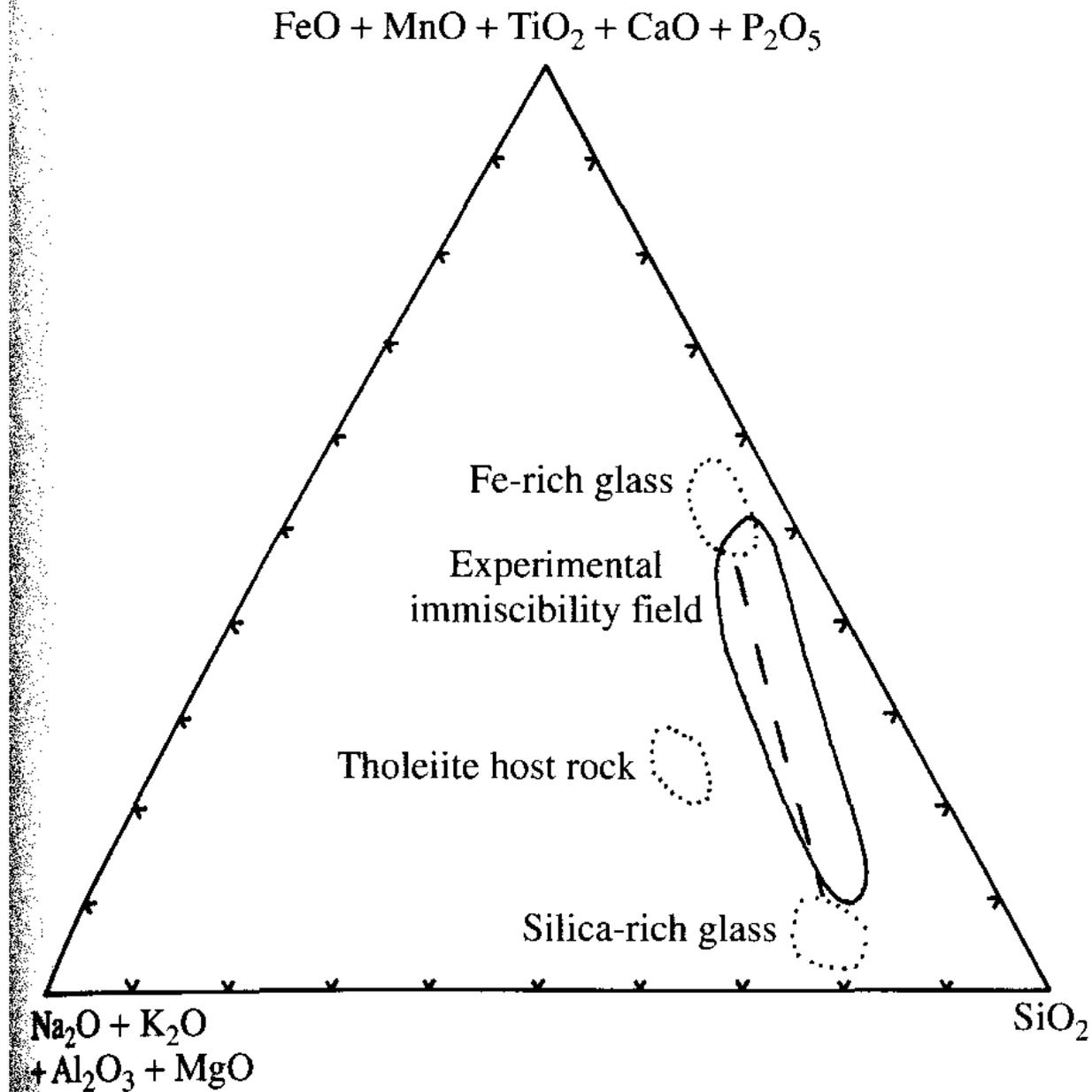


Жидкостная несмесимость между силикатным (темное) и фторидно-кальциевым (светлое) расплавами, полученная при  $T = 1250^{\circ}\text{C}$ ,  $P = 5.5$  кбар



Жидкостное расслоение силикатно-карбонатных расплавов при  $T = 1100^{\circ}\text{C}$  и  $P = 2$  кбар: (а) – со структурами «капля в капле», (б) – с флюидальными текстурами (светлое – силикатный расплав, темное – карбонатный расплав).

Состав  
несмешивающихся  
жидкостей в  
толеитовом  
базальте.

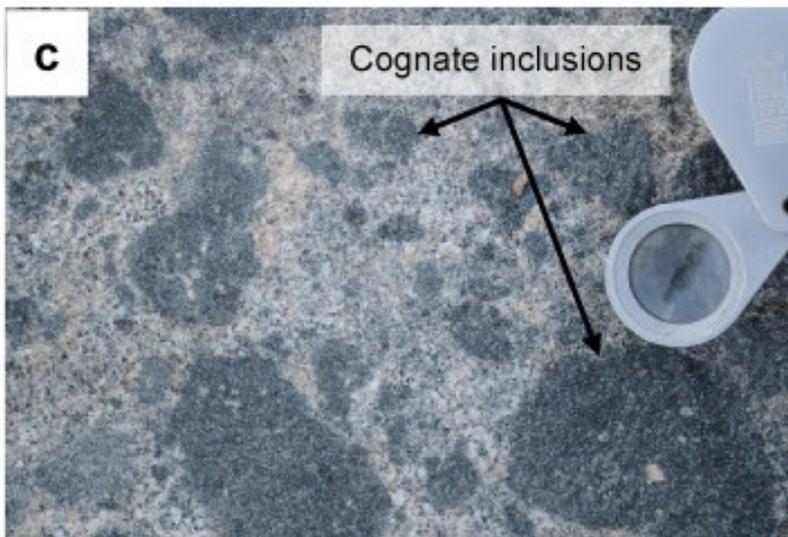


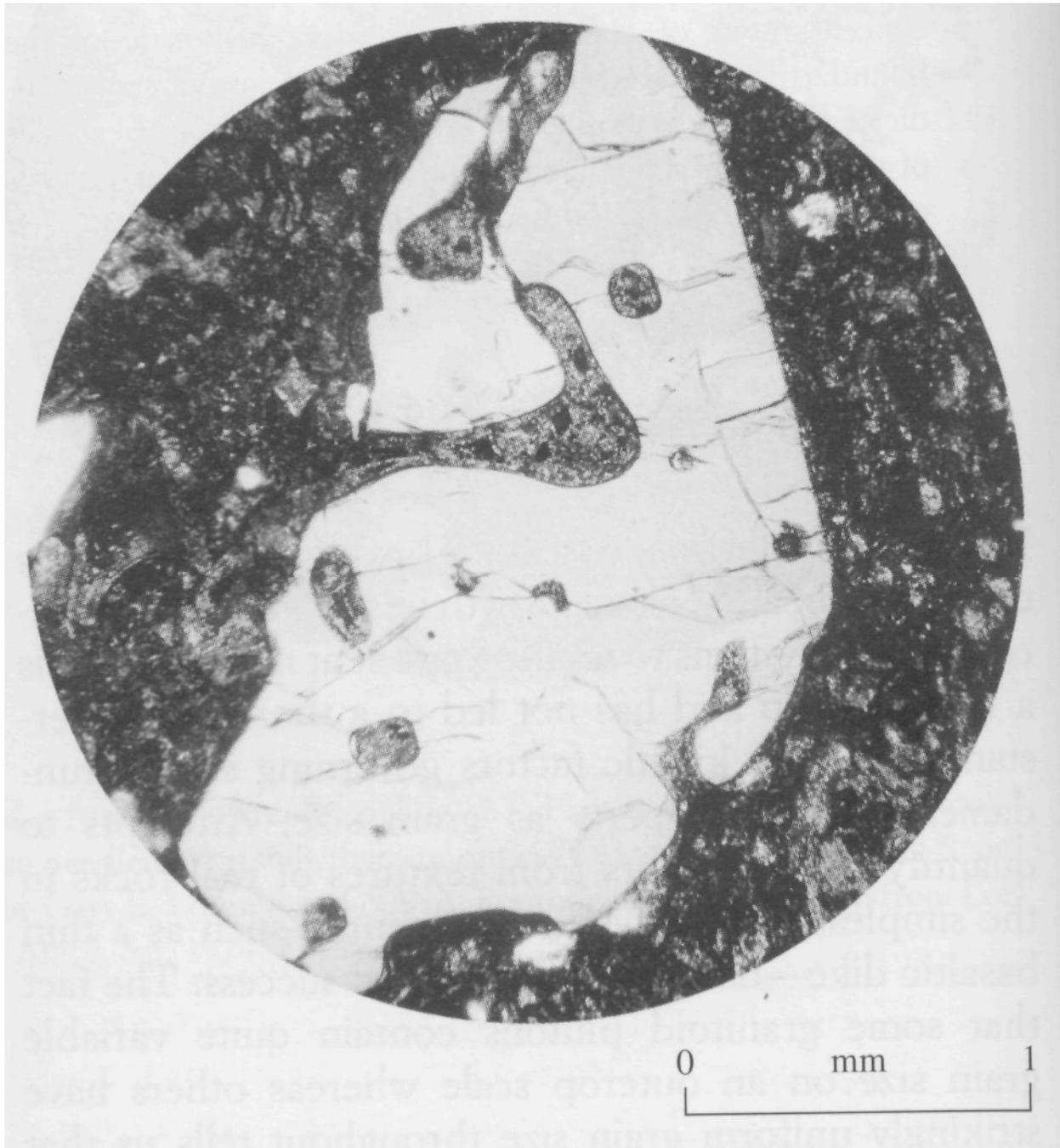
# АССИМИЛЯЦИЯ.

Под ассимиляцией понимают процесс полного усвоения и плавления постороннего материала (вмещающих пород, ксенолитов) в поднимающемся расплаве, с образованием гибридной магмы. Расплавляя и растворяя вмещающие породы, магма тем самым изменяет свой состав. Особенно резко изменяется состав первичной магмы, если она ассимилирует осадочные или метаморфические породы, существенно отличающиеся от неё по химическому составу. В таких случаях образуются новые разновидности магматических пород, мало сходные по составу с первичными магмами.



В результате этого процесса образуются горные породы, содержащие ксенолиты с самой различной степенью переработки: неизмененные, слабо измененные и полностью растворенные.





Частично  
резорбированное  
зерно кварца в  
афанитовой  
основной массе.  
Неровные границы  
зерна указывают на  
его частичное  
плавление в  
расплаве.

# Смешение

Смешение магм – процесс образования гибридных магматических пород за счет смешения двух или нескольких магм различного состава.

Признаки смешения:

- присутствие в породах «неравновесных» минералов;
- обратная или ритмичная зональность плагиоклазов и магнезиально-железистых минералов.

В иностранной литературе этот процесс описывается термином «magma mixing».

В случае простого механического смешения, когда в породе остаются неперемешанные фрагменты исходных магм, используется другой термин – «magma mingling».

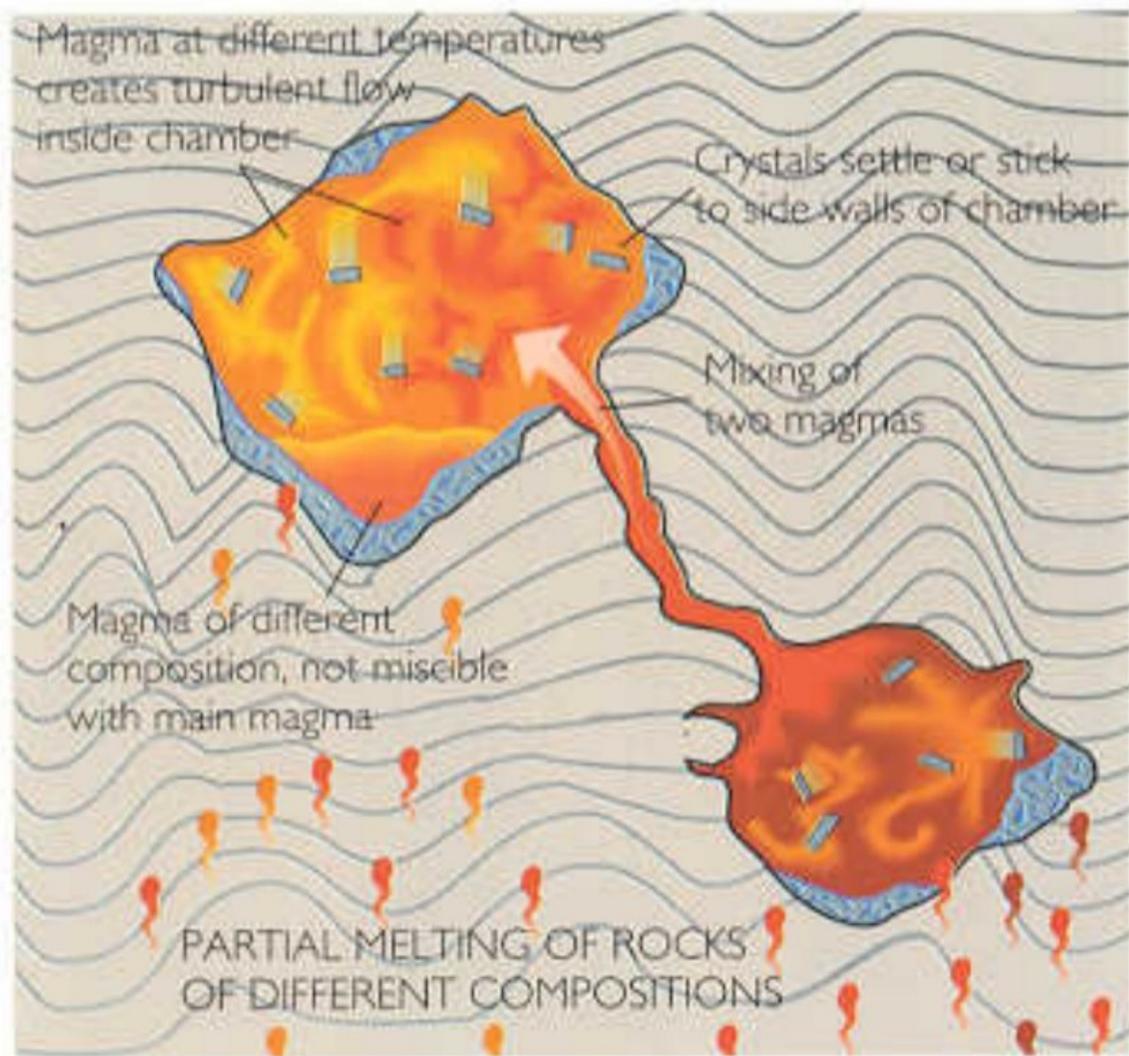


Figure 4.13, 4.14  
Press and Siever: *Understanding Earth*



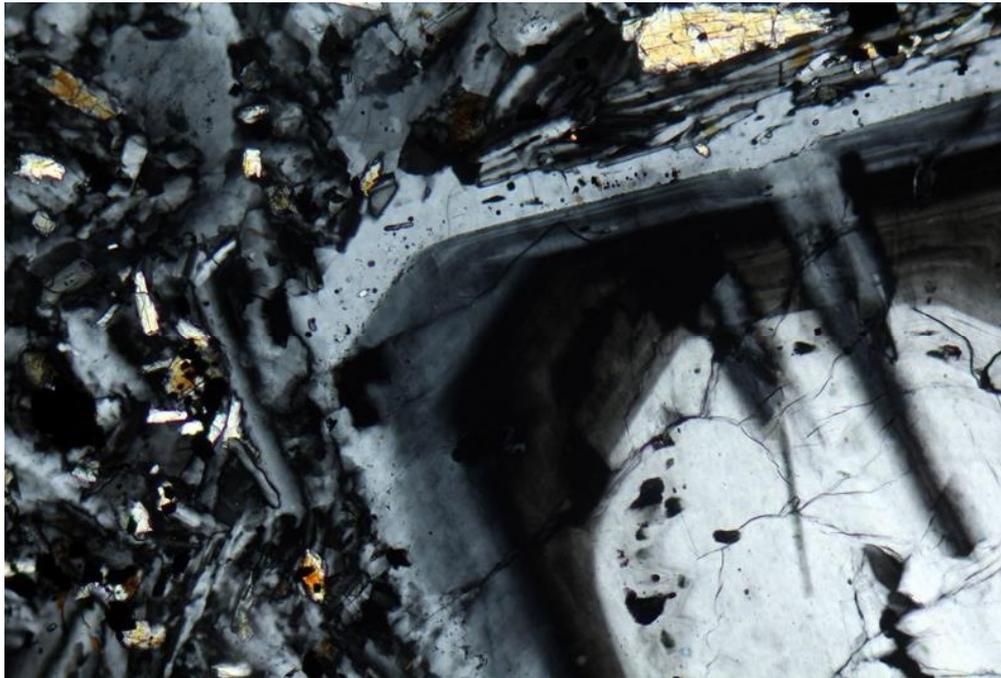
Примеры смешения основной и кислой магм с различной степенью перемешивания и гомогенизации. Текстуры течения дают возможность предполагать, что обе фазы были жидкими.

Результат механического смешения (минглинг)  
риолитовой (белое) и базальтовой магм.



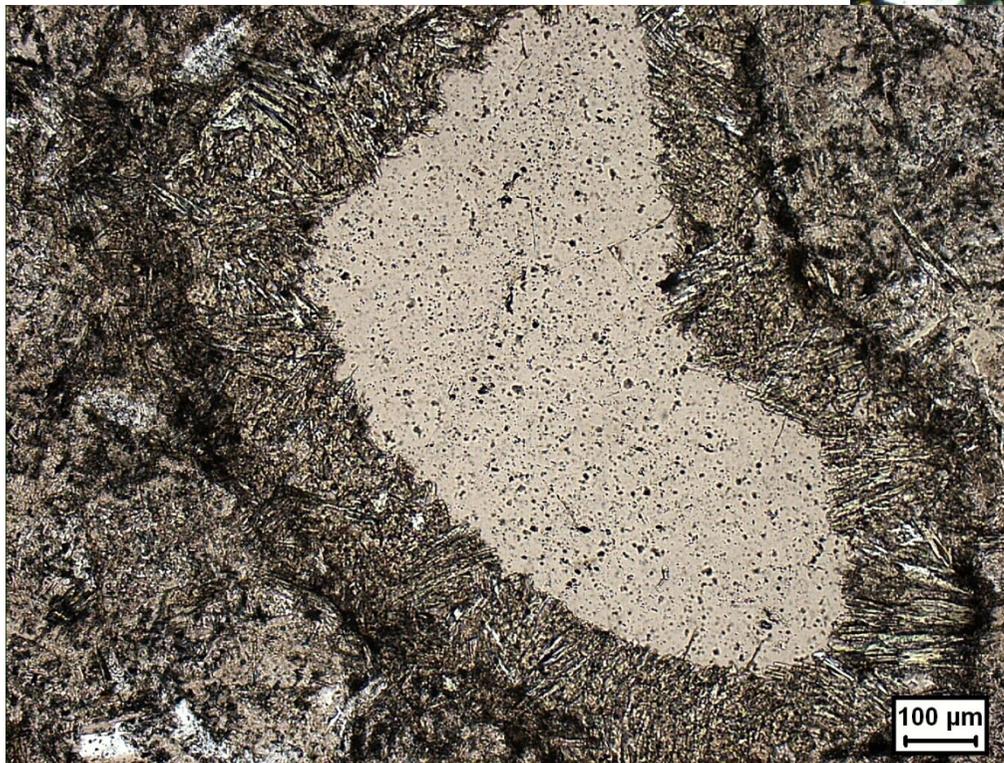
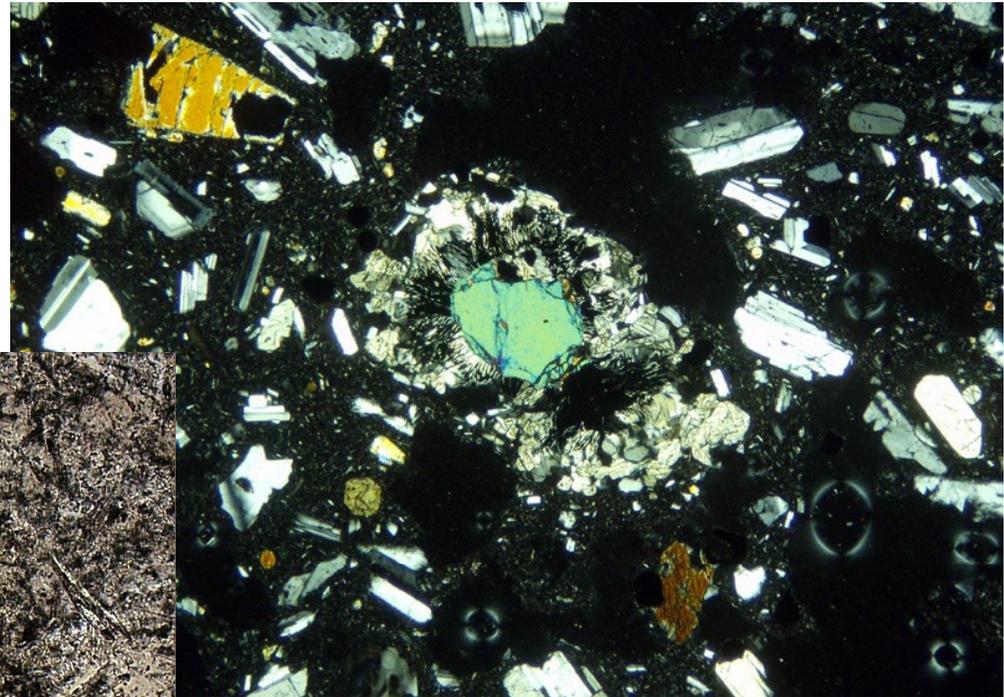
## Признаки смешения в породах

обратная или ритмичная зональность плагиоклазов и  
магнезиально-железистых минералов.



## Признаки смешения в породах

присутствие в породах  
«неравновесных» минералов  
С реакционными каймами



# Магматическое замещение