

МЕТАМОРФИЧЕСКИЕ ГОРНЫЕ ПОРОДЫ



Джеспилит («тигровое железо»), Хамерслей, Зап. Австралия

<http://www1.newark.ohio-state.edu/Professional/OSU/Faculty/jstjohn/BIFs/BIFs.htm>

Мы переходим к процессам, которые, за редким исключением, не сопровождаются плавлением и кристаллизацией расплавов, а происходят **в твердом состоянии.**

Литература по курсу «Петрография с кристаллооптикой» (метаморфизм)

1. Конспекты лекций и материалы практических занятий.

2. Маракушев А.А., Бобров А.В. Метаморфическая петрология. М.: Изд-во МГУ. 2005.
3. Петрография. Т. 3. Под ред. А.А.Маракушева. М.: МГУ. 1986.
4. Перчук А.Л., Сафонов О.Г., Сазонова Л.В., Тихомиров П.Л., Плечов П.Ю., Шур М.Ю. Основы петрологии магматических и метаморфических процессов. М.: ИД «КДУ». 2015.
5. Маракушев А.А., Бобров А.В., Перцев Н.Н., Феногенов А.Н. Основы кристаллооптики и породообразующие минералы. М.: Юрайт. 2016.
6. Шур М.Ю. Петрография. Руководство к практическим занятиям. М.: МГУ. 2005 (*и более поздние издания*).

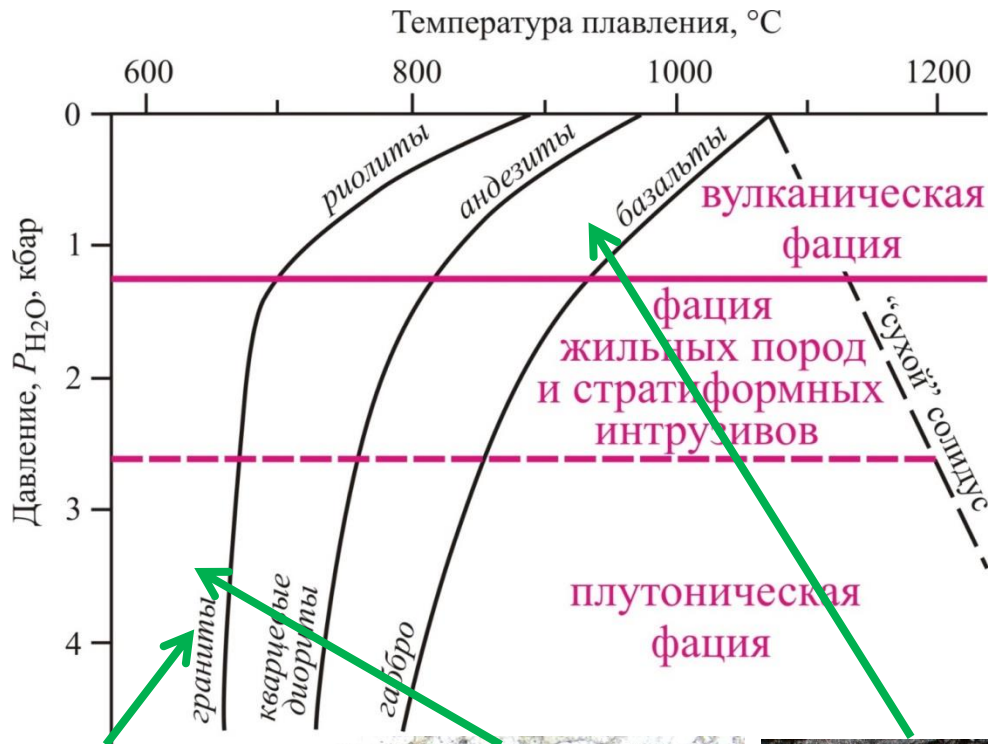
Консультация – чт (18-30–20-00, ауд. В1913-лев)

Лекция № 26

Определение, главные типы и факторы метаморфизма

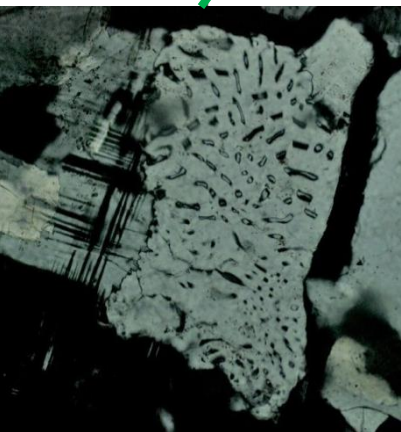
Метаморфизм (от др.-греч. μετα-μορφομαι — подвергаюсь превращению, преображаюсь) — преобразование осадочных, магматических и ранее метаморфизованных пород в твердом состоянии. Это преобразование происходит под воздействием температуры, давления и при участии летучих компонентов.

Ранее...

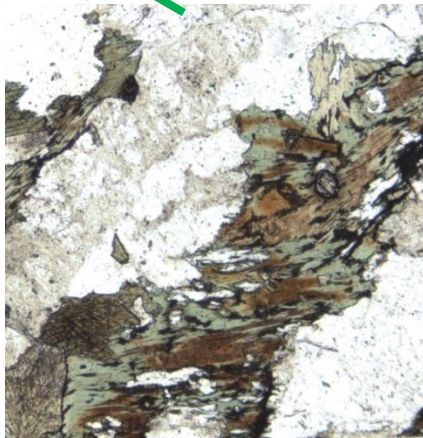


За пределами солидуса начинаются вторичные «дометаморфические» преобразования пород:

- ☐ образуются низкотемпературные водосодержащие минералы;
- ☐ возникают новые структуры.



Мирмекиты



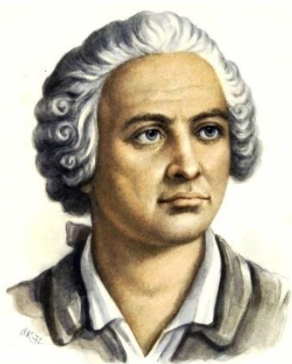
Хлорит по биотиту



Соссюрит по плагиоклазу

Автометаморфизм

Немного истории



М.В. Ломоносов «О слоях земных» (1763):

Ил или глина превращаются в твердый камень в результате длительного слеживания и «подземного огненного действия» с последующим «проникновением вод минеральных».

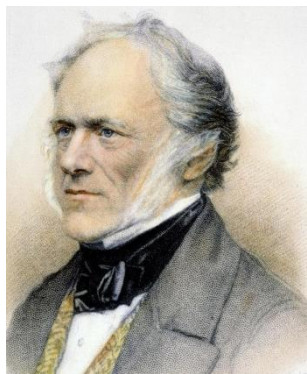
англ. Джеймс Хаттон (James Hutton) **«Теория Земли» (1775):**

Горные породы изменяются под действием внутреннего тепла Земли.



А. Буе (1820):

Термин «метаморфизм»



шотл. Чарльз Лайель (Charles Lyell) **«Основы геологии» (1833):**

Термин «метаморфические породы».



фр. Эли де Бомон (Elie de Beaumont) **(1846):**

Метаморфизму подвергаются как осадочные, так и магматические породы.

Главные типы метаморфизма

☐ эндогенный

Связан с энергией, возникающей в недрах Земли.

☐ космогенный

Результат ударного процесса, приводит к образованию *импактитов*.

☐ региональный

Охватывает значительную территорию и вызывает сильные изменения в структуре пород и их минеральном составе. Температура и давление играют *одинаково важную роль*.

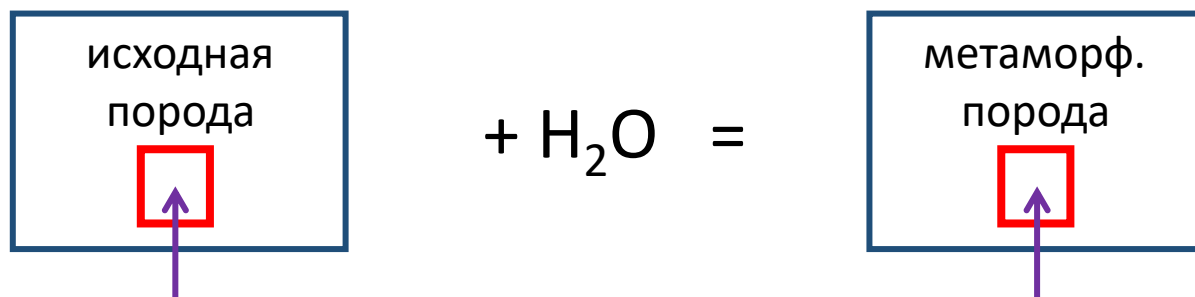
☐ локальный

Охватывает сравнительно небольшие площади. Развитие процесса обычно контролируется **только одним фактором** – температурой или давлением. Например, *контактовый метаморфизм* (температура), *дислокационный метаморфизм* (давление).

Факторы метаморфизма

Метаморфизм происходит под воздействием на исходные породы физико-химических факторов – **температуры и давления**, с участием летучих компонентов (флюидов).

Общий вид метаморфической реакции:

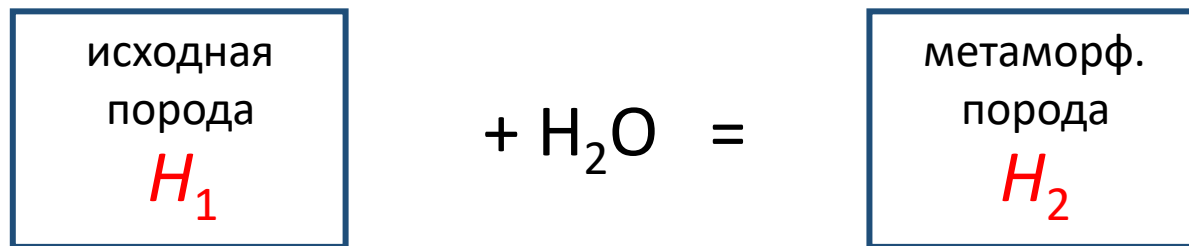


фактор метаморфизма, определяющий физико-химический эффект метаморфической реакции

Рассмотрим влияние основных физико-химических факторов на ход метаморфического процесса.

Температура

Определяет **тепловой эффект** метаморфической реакции (изменение *ЭНТАЛЬПИИ* в ходе метаморфизма):



$$\Delta H = H_2 - H_1$$

- ❑ Если $\Delta H > 0$, то процесс является *эндотермическим*, т.е. на его протекание затрачивается тепло.
- ❑ Если $\Delta H < 0$, то процесс является *экзотермическим*, т.е. в ходе его происходит выделение тепла.

Типы метаморфизма, связанные с изменением температуры

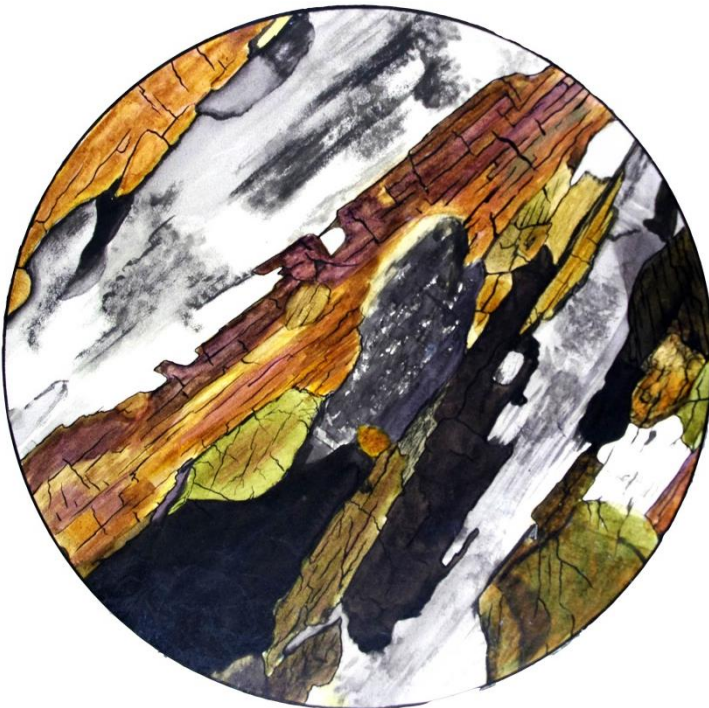
☐ прогрессивный

Происходит с повышением температуры ($\Delta H > 0$).

☐ регрессивный

Происходит с понижением температуры ($\Delta H < 0$).

Но не все так просто...



Амфиболит ($Pf + Hbl$).

Относится к ряду метабазитов и может образоваться в результате метаморфизма

- ☐ базальтов или габбро (регрессивный процесс);
- ☐ глинисто-карбонатных осадочных пород (прогрессивный процесс).

Вывод: для определения характера метаморфизма нужно знать исходную породу!

Типы метаморфизма, связанные с изменением температуры

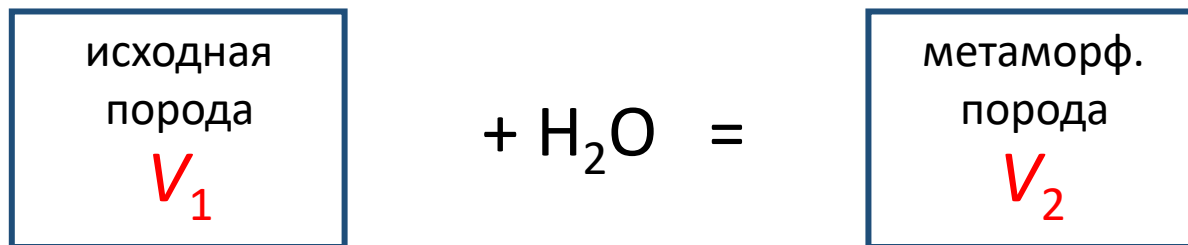
Бывают и более сложные случаи.

Полиметаморфизм – многоэтапное преобразование горных пород, вызванное наложением процессов **метаморфизма** (прогрессивного или регрессивного) на уже метаморфизованные породы.

Диафторез (от греч. *diaphthéiro* – разрушаю), **повторный метаморфизм** горных пород, при котором горные породы, образовавшиеся в условиях глубинного высокотемпературного метаморфизма, подвергаются затем низкотемпературному метаморфизму и превращаются в породы низких ступеней метаморфизма (филлиты, зелёные сланцы и др.), сохраняющие следы бывшего более глубокого метаморфизма.

Литостатическое давление

Литостатическим называется **всестороннее** давление, задаваемое весом вышележащих толщ. Определяет **глубину протекания** и **объемный эффект** метаморфической реакции (изменение *объема* в ходе метаморфизма):

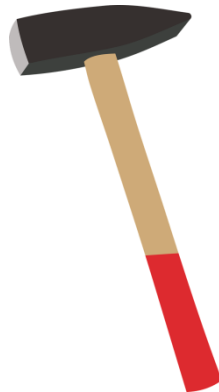


$$\Delta V = V_2 - V_1$$

- ❑ Если $\Delta V > 0$, то процесс протекает с **понижением давления**.
- ❑ Если $\Delta V < 0$, то процесс происходит с **увеличением давления**.

Давление при метаморфизме

- ❑ **Литостатическое давление (P_s)** – главная составляющая давления в большинстве метаморфических процессах, происходящих на глубине.
- ❑ **Флюидное давление ($P_{фл}$)** определяется участием флюидной фазы в метаморфическом процессе и имеет особое значение в реакциях с участием летучих соединений (H_2O , CO_2 и др.).
- ❑ **Стрессовое давление** имеет направленный характер и **не является фактором метаморфизма**, так как не его воздействие *не приводит к фазовым превращениям* (метаморфическим реакциям).



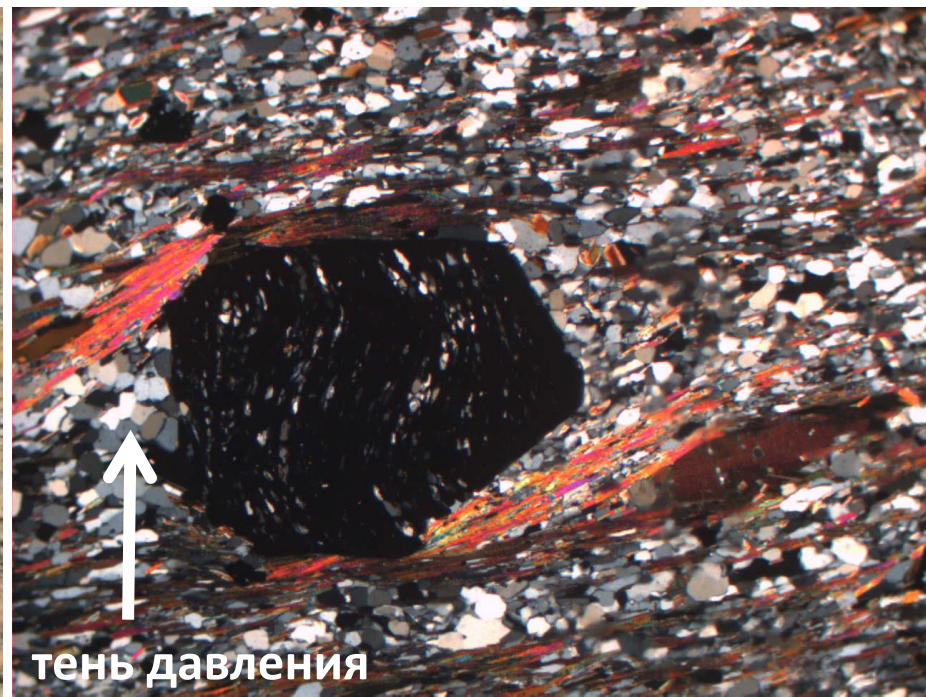
В аппарате всестороннего давления Pb испытает серию полиморфных превращений. В частности, при 400 ГПа он становится в 250 раз прочнее своего низкобарного полиморфа и в 10 раз прочнее стали.

Роль стрессового давления

- ❑ Формирование ориентированных текстур (минералы вытягиваются перпендикулярно стрессу).
- ❑ Улучшение проницаемости породы флюидными компонентами $\Rightarrow$ **метаморфическая дифференциация.**



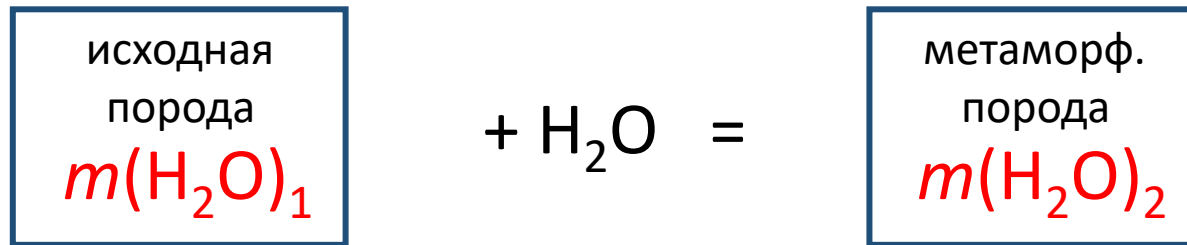
Биотитовый гнейс, Чашковские горы,
Ю. Урал



Гранат-слюдяной сланец, Salangen, Норвегия

Флюидное давление

Флюидное давление определяется участием летучих компонентов в метаморфической реакции, и ее протекание может быть представлено следующей реакцией:

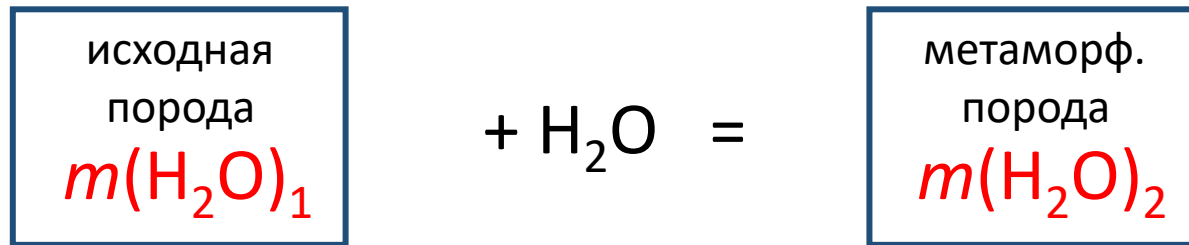


$$\Delta m(\text{H}_2\text{O}) = \Delta m(\text{H}_2\text{O})_1 - \Delta m(\text{H}_2\text{O})_2$$

- ❑ Если $\Delta m(\text{H}_2\text{O}) > 0$, то метаморфизм связан с гидратацией, т.е. образованием водосодержащих минералов.
- ❑ Если $\Delta m(\text{H}_2\text{O}) < 0$, то происходит дегидратация, т.е. разложение водосодержащих минералов.

Флюидное давление

Флюидное давление определяется участием летучих компонентов в метаморфической реакции, и ее протекание может быть представлено следующей реакцией:



$$\Delta m(\text{H}_2\text{O}) = \Delta m(\text{H}_2\text{O})_1 - \Delta m(\text{H}_2\text{O})_2$$

Количественная оценка влияния летучих компонентов на метаморфическую реакцию часто производится с помощью его **химического потенциала** $\mu(\text{H}_2\text{O})$ (в зарубежной литературе – **активности** $a(\text{H}_2\text{O})$):

$$\mu(\text{H}_2\text{O}) = RT \ln p(\text{H}_2\text{O}).$$

ФЛЮИДНОЕ vs. ЛИТОСТАТИЧЕСКОЕ ДАВЛЕНИЕ

Всегда $P_s \geq P_{\text{фл}} > p(\text{H}_2\text{O}), p(\text{CO}_2) \dots$

□ Если $P_s > P_{\text{фл}}$, то происходит фильтрация флюидов с глубины. Часто они осуществляют транспортировку петрогенных элементов $\Rightarrow$ **состав породы меняется.**

□ Если $P_s \approx P_{\text{фл}}$, то движение флюидов с глубины останавливается $\Rightarrow$ **состав породы сохраняется.**

□ **ИЗОХИМИЧЕСКИЙ**

Состав породы при метаморфизме **не изменяется**. Допускается миграция флюидных компонентов, а при высоких температурах ($>700^\circ\text{C}$) – щелочей.

□ **АЛЛОХИМИЧЕСКИЙ**

Происходит **изменение состава породы.**

Метасоматоз – крайнее проявление аллохимического метаморфизма, при котором снимаются практически все ограничения на изменение состава пород.

Взаимоотношение факторов метаморфизма

1. Давление vs. Температура

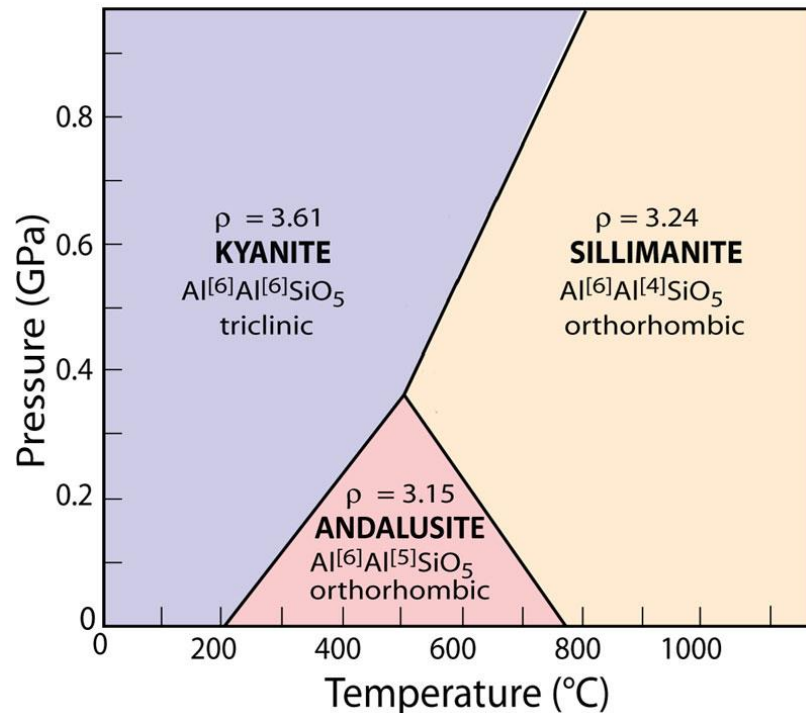
Связь между ними определяется уравнением Клаузиуса–Клапейрона:

$$\frac{dP}{dT} = \frac{\Delta H}{T\Delta V}$$

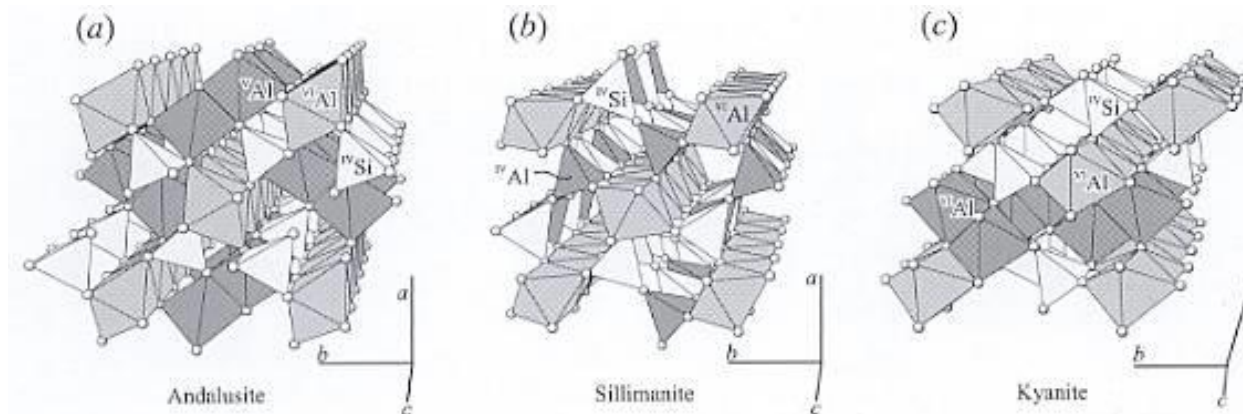
Пример – полиморфные модификации Al_2SiO_5
(*андалузит, силлиманит, кианит*).

Каждый из этих минералов занимает свое поле на *P–T* диаграмме и однозначно характеризует условия метаморфизма.

Андалузит, силлиманит, кианит



Кианит (наиболее плотный минерал) образуется при самом высоком давлении, а **силлиманит** – наиболее высокотемпературная фаза.



КЧ (окружение) Al:
 Ky – 6;
 Sil – 6+4;
 And – 5+4.

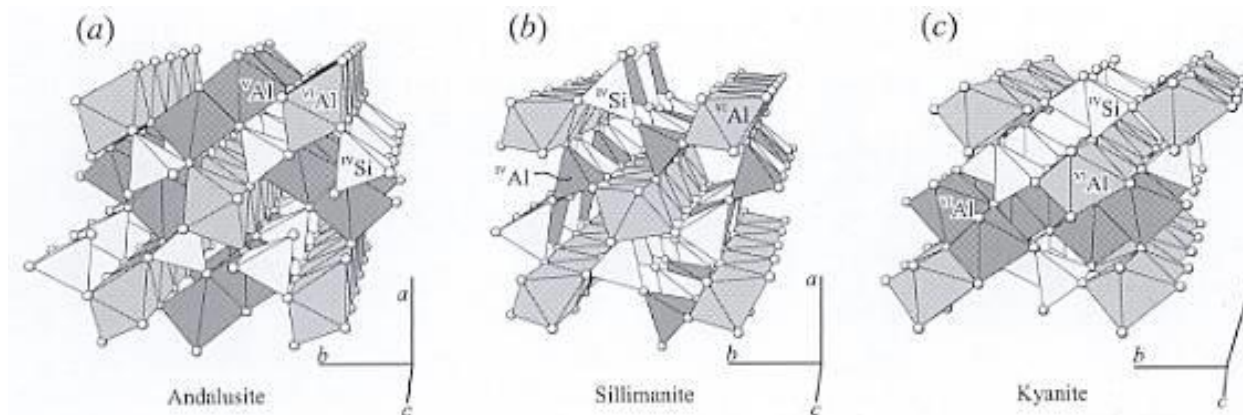
Андалузит, силлиманит, кианит

Кристаллохимическое правило:

С возрастанием давления (увеличением глубины) происходит увеличение координационных чисел химических элементов.



Кианит (наиболее плотный минерал) образуется при самом высоком давлении, а **силлиманит** — наиболее высокотемпературная фаза.



КЧ (окружение) Al:

Ky — 6;

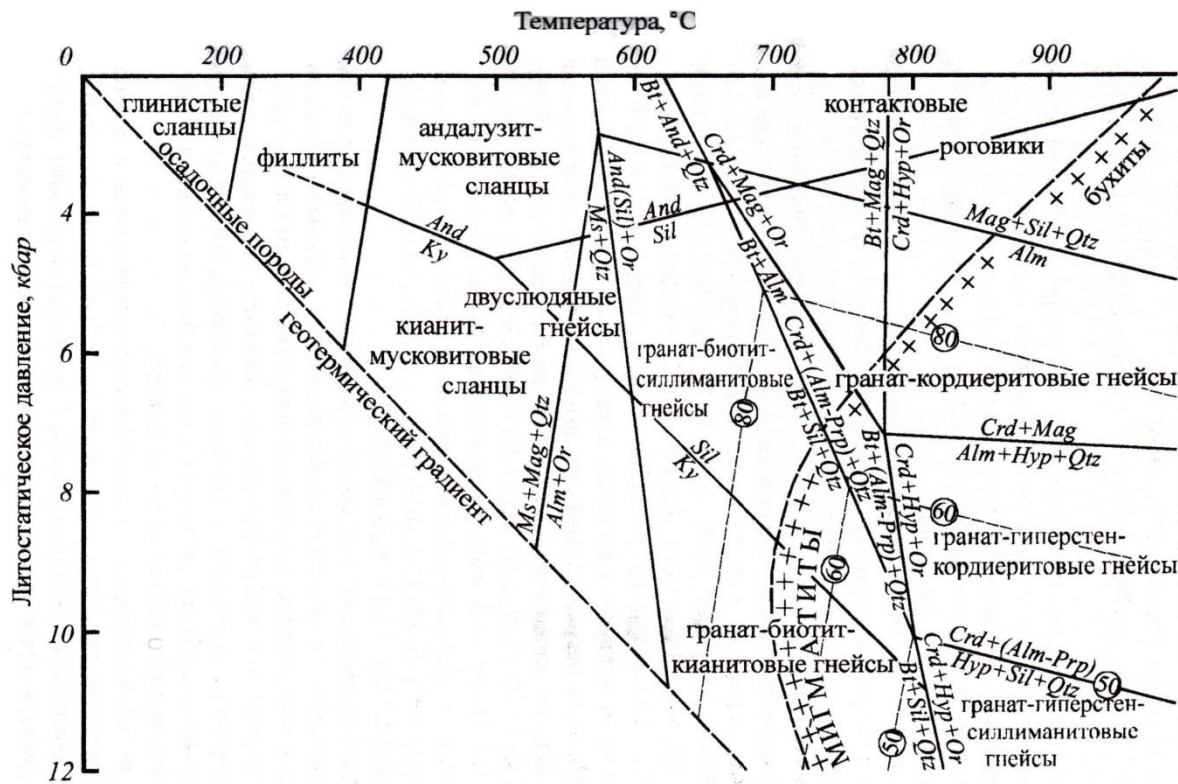
Sil — 6+4;

And — 5+4.

**Температура и парциальное давление летучих -
противоположно действующие факторы.**

Взаимоотношение факторов метаморфизма

3. Литостатическое давление vs. Парциальное давление летучих



С глубиной стабильность водных минералов должна расширяться в область более высоких температур. Но, на самом деле, это не так...

Метаморфические преобразования на глубине происходят при умеренном значении флюидного давления, поэтому линии реакций с участием летучих идут почти вертикально.