

# Метаморфизм и метасоматизм

- **Метаморфизм** - это преобразование минерального состава и строения твердых горных пород под влиянием изменившихся внешних условий. Процесс сводится к перекристаллизации ранее существовавших минералов, их химическому разложению и взаимодействию друг с другом с появлением новых, устойчивых уже в данных условиях минеральных фаз, а также изменением структур и текстур пород. Нижний температурный предел метаморфизма в земной коре принимается 100-200°C, верхний - 700-1000°C, при котором начинается плавление корового вещества. Выветривание пород и диагенез, т.е. уплотнение осадков, к метаморфизму не относятся.
- Главные параметры метаморфизма - **температура** и **давление**. Кроме того, важную роль играют **деформации** пород. Академик Н. Ениколопов показал, что только давление не приводит к перекристаллизации – материал просто разрушается. Но при наличии одновременных деформаций происходит его мгновенная перекристаллизация с формированием новых кристаллических фаз. Связано это с тем, что при деформациях кристаллическая решетка минералов испытывает сильные перегрузки и легко может быть преобразована в стабильные при новых условиях фазы.
- Кроме того, необходимым условием протекания метаморфических реакций является наличие **флюидной фазы**, представленной преимущественно водой и углекислотой.
- Своеобразные метаморфические процессы сопровождают **удары о поверхность Земли крупных метеоритов**.

## Температура

Температура ( $T$ ) увеличивается с глубиной в соответствии с геотермическим градиентом, который вблизи дневной поверхности варьирует от 10 до 60°C/км, составляя в среднем 25°C/км. Глубже геотермический градиент уменьшается так, что в основании континентальной земной коры (глубина ~ 40 км) температура не превышает 400--700°C.

Интервал температур, при которых происходит метаморфизм, с одной стороны, ограничен **стационарной геотермой (G)** - кривой, описывающей фоновое распределение температур с глубиной, а с другой - **линией солидуса гранита (S)**, имеющей отрицательный или положительный наклон в зависимости от степени насыщения водой.

При избытке воды возможный температурный интервал метаморфизма с глубиной сокращается практически до нуля, а в "сухих" условиях может достигать 400-700°C на глубине около 40 км.

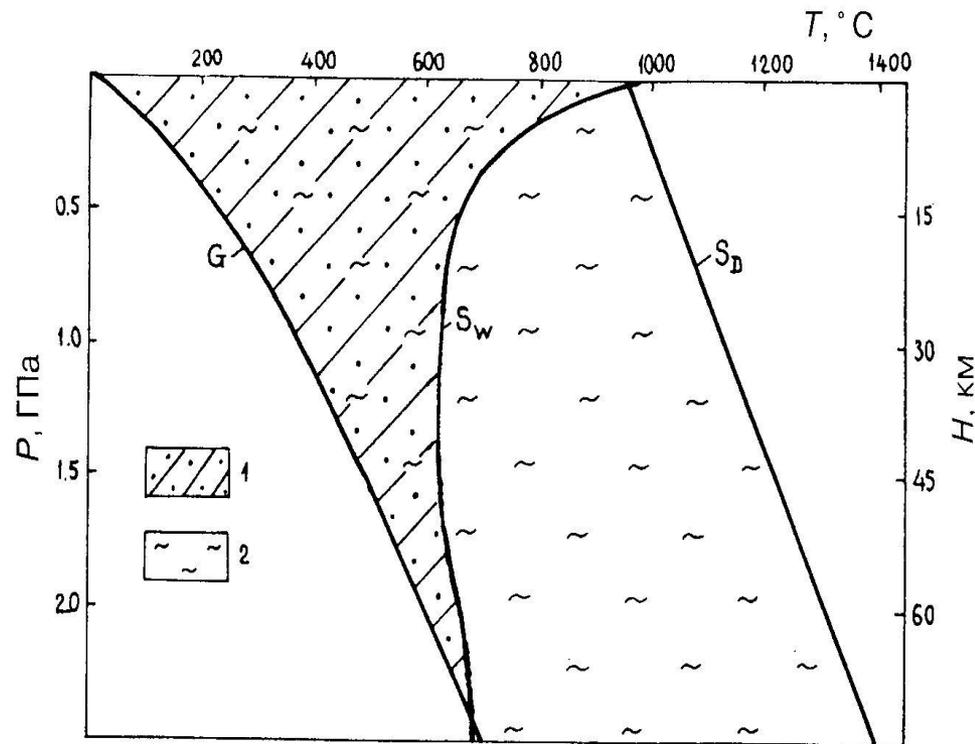
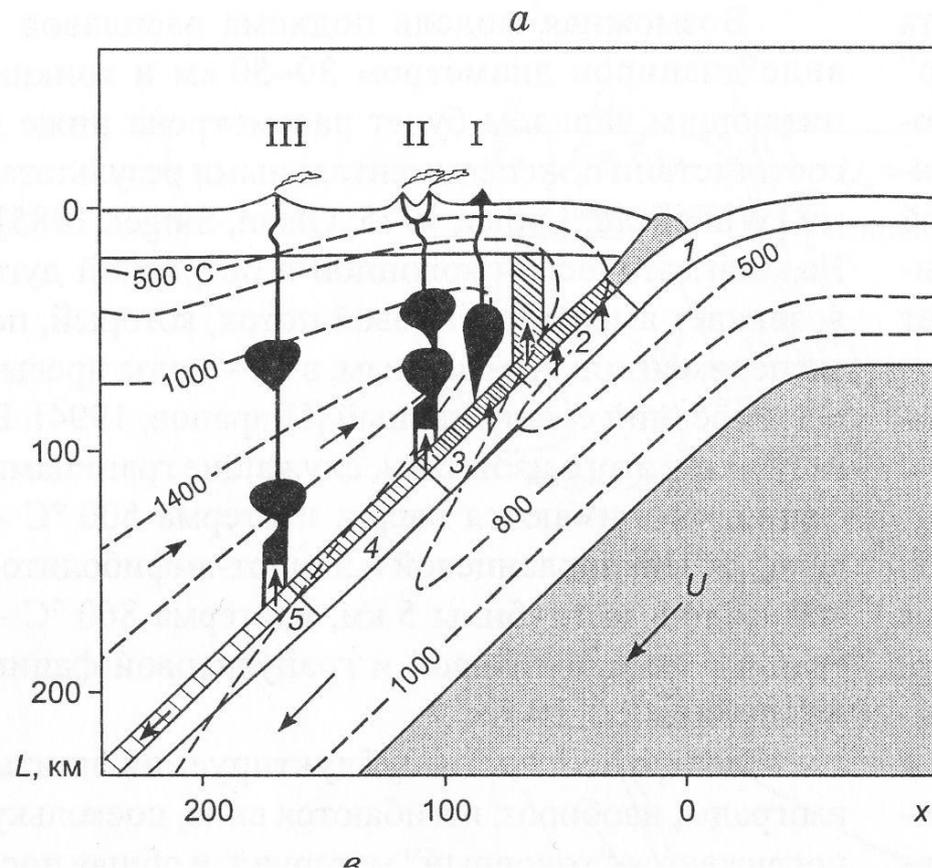


Рис. 1.1. P–T условия метаморфизма

G — стационарная геотерма, S<sub>D</sub> — солидус «сухого» гранитного вещества, S<sub>w</sub> — солидус гранита при насыщении расплава водой;

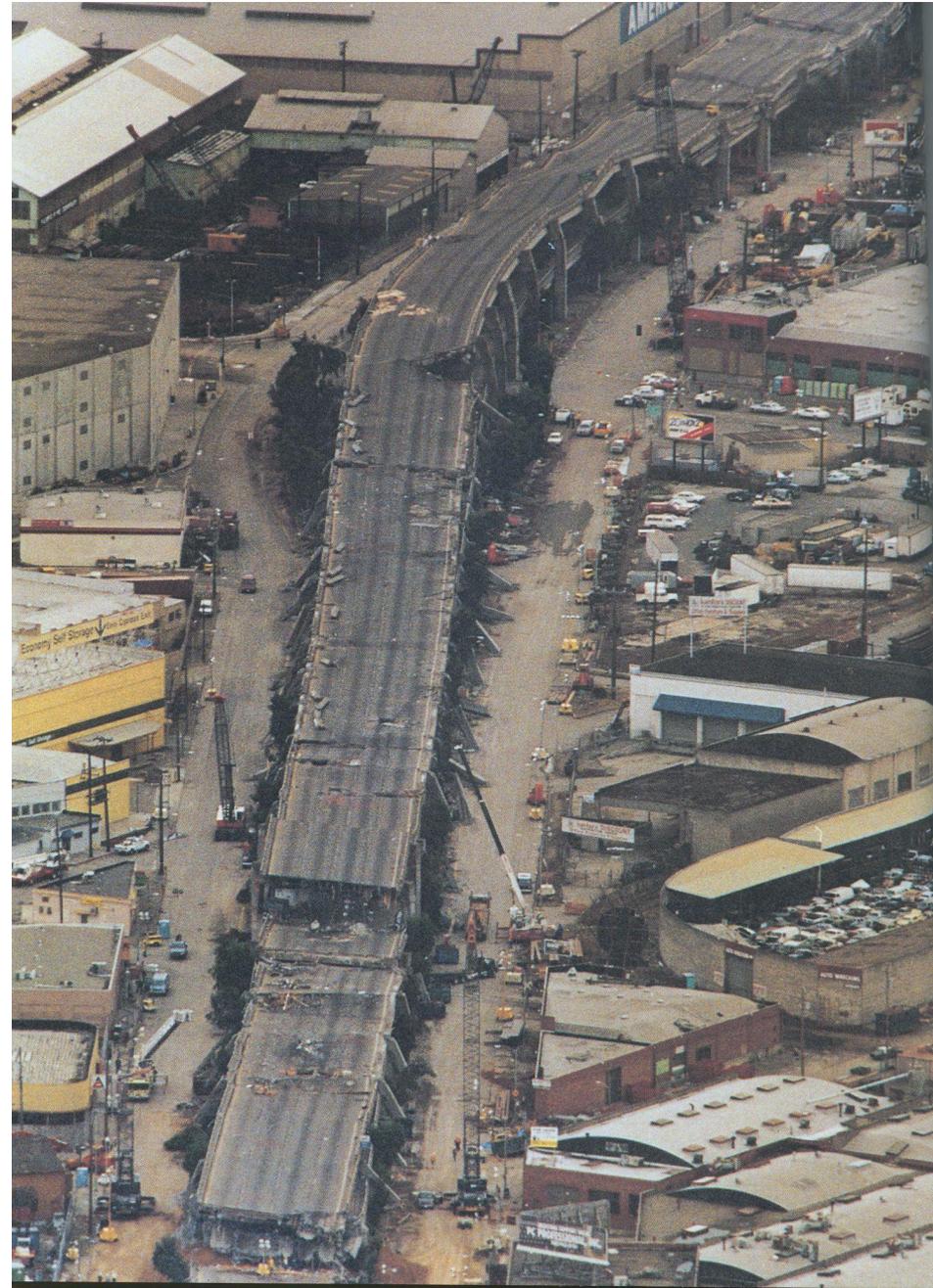
1 — область метаморфизма с участием водного флюида, 2 — область метаморфизма без участия водного флюида

- **Нагревание пород вдоль стационарной геотермы** может быть связано с их медленным погружением на ту или иную глубину. Достижение более высокой температуры требует дополнительного нагрева под влиянием магматических тел или **экзотермического эффекта** (фрикционного, или трения) при тектонических деформациях. Перегрев относительно стационарной геотермы возможен и в результате быстрого перемещения глубинных масс на более высокий уровень.
- Если породы, первоначально залегавшие на малых глубинах, погружаются настолько быстро, что не успевают достичь стационарного распределения температур, возникают отрицательные термические аномалии.
- Современные тектонические модели допускают ту и другую возможности. Например, подъем глубинных нагретых масс в виде мантийных плюмов, о которых мы уже говорили, а погружение относительно холодных пластин океанической коры считается характерным для зон субдукции.



# Давление

- Литостатическое давление ( $P$ ) в земной коре обусловлено весом вышележащих пород; при этом вес 3.5 км литосферы равен 1 кбар. Поскольку прочность горных пород не превышает 0.3-1.0 кбар, значительные отклонения от литостатического давления в недрах Земли, которые сохранялись бы в течении длительного времени, невозможны.
- Как только разность напряжений достигает 0.3-1.0 кбар, породы испытывают деформацию скалывания, в процессе которой давление выравнивается. На поверхности это выражается в землетрясении.
- Равновесный минеральный состав пород зависит от литостатического давления и температуры. Когда говорят о  $P$ - $T$  условиях кристаллизации, имеются в виду именно такое давление и температура на той или иной глубине. Эти параметры используются и во всех термодинамических расчетах.



## • **Значение флюидной фазы**

- Геологические данные, результаты экспериментов и теоретический анализ показывают, что метаморфические процессы протекают с участием воды, углекислоты или их смеси, к которым могут добавляться другие летучие компоненты. Критическая точка воды имеет температуру  $374^{\circ}\text{C}$  и давление  $22\text{ МПа}$  ( $0.022\text{ кбар}$ ), для углекислоты соответствующие параметры равны  $31^{\circ}\text{C}$  и  $7,4\text{ МПа}$  ( $0.0074\text{ кбар}$ ).
- При  $P$ - $T$  условиях, характерных для образования большей части метаморфических пород,  $\text{H}_2\text{O}$  и  $\text{CO}_2$  находятся в надкритическом состоянии. По плотности и другим физическим свойствам надкритическая водная и углекислая фазы близки к жидкостям. Надкритические "жидкообразные" фазы, состоящие из  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}_2$  и других летучих компонентов, обычно называют **флюидом**, или **флюидной фазой** (англ. *fluid* - жидкость).

- При метаморфизме водные и углекислые флюиды играют двойную роль. Во-первых, они служат средой, в которой возможен относительно быстрый массоперенос компонентов, принимающих участие в химических реакциях между твердыми фазами, а также способствуют перекристаллизации и пластическим деформациям. Другими словами, флюидные фазы выступают как **кинетический фактор**, ускоряющий развитие метаморфических процессов. Во-вторых, вода и уголекислота сами принимают участие в реакциях гидратации-дегидратации и карбонатизации--декарбонатизации.
- Парциальное давление (летучесть)  $H_2O$  и  $CO_2$  являются важными **термодинамическими факторами**, определяющими направление и температуру реакций.
- Количество воды в земной коре с глубиной уменьшается. Если неконсолидированный свежий осадок на дне моря или озера примерно наполовину состоит из воды, то в процессе уплотнения объемная доля воды снижается до 30%, а в ходе диагенеза становится еще меньше. Глинистые породы содержат, например, около 5 мас.%  $H_2O$ . Если такие породы нагреть до 700--800°C, то из них будет удалена не только почти вся межзерновая влага, но и та вода, которая первоначально была заключена в глинистых минералах. Следовательно, метаморфизм, связанный с нагреванием горных пород, сопровождается их дегидратацией. Рост давления приводит к выжиманию поровой влаги, а при достижении определенного предела и к разложению гидроксил-содержащих минералов.

- **Деформации как фактор метаморфизма**
- Различают **упругую** деформацию твердых тел, исчезающую после снятия нагрузки, и **пластическую** деформацию, которая приводит к необратимому изменению формы и размеров тел. **Упругая деформация** может завершиться хрупким разрушением, а **пластическая** - переходить в течение материала.
- Горные породы испытывают как упругие, так и пластические деформации, причем в области повышенных температур и давлений последние преобладают.
- Необратимые **пластические деформации** затрагивают как кристаллическую решетку отдельных минералов (скольжение, излом слоев решетки и др.), так и агрегаты минеральных зерен. При этом меняется размер, форма, ориентировка, взаимное расположение зерен, а иногда и их состав. Необратимая деформация является одним из важных факторов, определяющих развитие метаморфических процессов.

# Типы метаморфизма

В зависимости от преобладания того или иного геологического фактора выделяют несколько типов метаморфизма.

## Типы

Метаморфизм погружения

Метаморфизм нагревания

Метаморфизм гидратации

Дислокационный  
метаморфизм

Ударный метаморфизм

## Факторы

Увеличение давления,  
циркуляция водных растворов

Рост температуры

Взаимодействие горных пород  
с водными растворами

Тектонические деформации

Падение крупных метеоритов,  
мощные эндогенные взрывы  
(?)

# Метаморфизм погружения

сопровождает погружение на глубину осадочных и вулканических пород при низких геотермических градиентах, не превышающих 10-20°C/км (рис.).

Во многих случаях температура метаморфизма не достигает даже средней континентальной геотермы; дополнительные источники тепла отсутствуют.

Метаморфизм протекает с участием водных растворов с повышенной активностью  $Na^+$ . Этими растворами, вероятно, служат соленые морские воды, которые были захоронены в вулканогенно-осадочных толщах.

Метаморфизму погружения предшествует **диагенез** рыхлых осадков, т.е. их превращение в горную породу. Иногда кроме диагенеза и метаморфизма выделяют промежуточную ступень преобразования, называемую **катагенезом**. Между катагенезом и метаморфизмом нет резкой грани, и катагенез по сути дела является начальной стадией метаморфизма погружения.

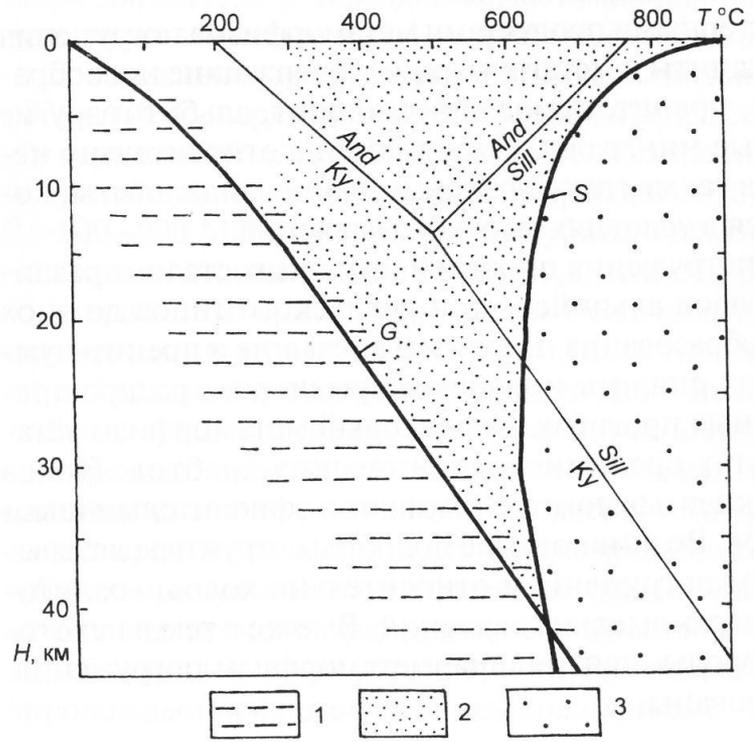


Рис. 1.4. P-T условия метаморфизма погружения и нагревания (принципиальная схема)  
1 — область метаморфизма погружения, 2, 3 — области метаморфизма нагревания (2 — при наличии водного флюида, 3 — в отсутствии водного флюида); G — средняя стационарная геотерма, S — солидус гранитного расплава, насыщенного водой; прямые линии разграничивают области устойчивости андалузита (And), силлиманита (Sill) и кианита (Ky)

- **Метаморфизм погружения** вулканогенных и осадочно-вулканогенных пород сопровождается выносом кальция и калия и привносом натрия, который фиксируется в цеолитах, альбите, щелочных амфиболах и пироксенах.
- Наиболее характерными продуктами метаморфизма погружения являются **метавулканыты** и **метаосадки**, содержащие новообразованные цеолиты, пренит, хлорит, альбит и другие низкотемпературные минералы, устойчивые на относительно небольшой глубине, а также глаукофановые сланцы и эклогиты, которые формируются в условиях высокого давления.
- Таким образом, главными факторами, определяющими развитие метаморфизма погружения являются:
  - 1) рост давления;
  - 2) относительно низкая температура, часто не превышающая стационарной геотермы;
  - 3) фильтрация водных растворов, обогащенных натрием.

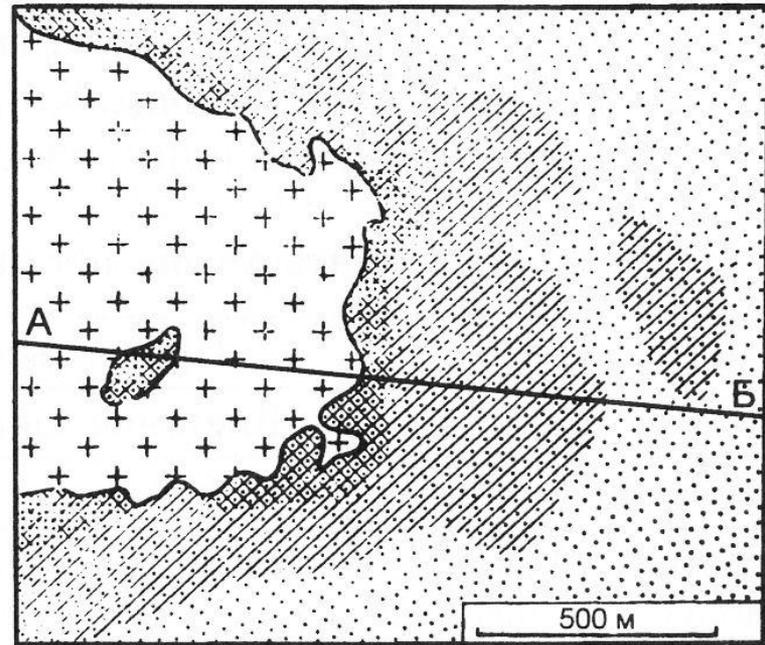
**Метаморфизм нагревания** протекает при температурах, значительно (нередко на сотни градусов) превышающих стационарную геотерму.

На малых глубинах ( $H \leq 3-7$  км,  $P < 100-200$  МПа) проявлен **контактовый метаморфизм**, обусловленный аномальным температурным полем вокруг отдельных интрузивных тел (рис). Контактво-метаморфизованные породы называются **роговики**.

На большей глубине получает развитие **региональный метаморфизм**, охватывающий большие объемы горных пород. Региональный метаморфизм является следствием тектонического перемещения крупных блоков корового и мантийного материала.

Различают региональный метаморфизм **низкого и высокого давления**. К метаморфизму низкого давления относят процессы, происходившие на глубине не более 15 км при  $P-T$  условиях, допускающих переход от андалузита к силлиманиту (полиморфные модификации  $Al_2O_3 \cdot SiO_2$ ), имеющий место при  $P \leq 3.8$  кбар,  $T = 400-800^\circ C$ ;

Метаморфизм высокого давления начинает развиваться в поле устойчивости кианита (высокобарическая модификация  $Al_2O_3 \cdot SiO_2$ ).



Разрез по линии АБ

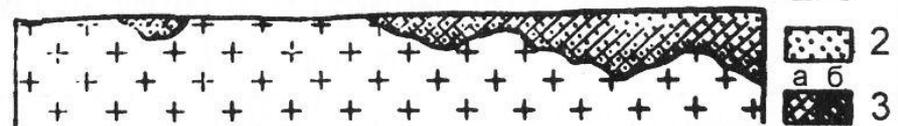


Рис. 4.3. Схема строения контактового ореола гранодиоритового плутона

1 — гранодиориты, 2 — вмещающие песчаники и глинистые сланцы, 3 — контактовые роговики: а — биотитовые с андалузитом, б — биотитовые с силлиманитом

Минимальная температура метаморфизма нагревания составляет 300-400°C, верхний температурный предел соответствует солидусу горных пород. Когда температура достигает солидуса, метаморфизм нагревания переходит в частичное плавление.

На малых глубинах - это **контактовый анатексис** под влиянием высокотемпературных интрузивов, а на большей глубине --**региональный ультраметаморфизм**.

Малоглубинный контактовый анатексис приводит к образованию частично расплавленных пород, а более глубинный ультраметаморфизм сопровождается формированием **мигматитов**



- Метаморфизм нагревания глинистых пород сводится к последовательной дегидратации минералов, устойчивых при разной температуре. Вместо глинистых минералов сначала появляются серицит и хлорит, затем мусковит и биотит, а при большем нагреве слюды разлагаются с появлением безводных минералов: ортоклаза, силлиманита, кордиерита, граната, пироксена.
- Преобразование вулканитов основного состава, богатых кальцием, выражается в появлении эпидота, актинолита, хлорита, кальцита, альбита на низшей ступени метаморфизма, среднего плагиоклаза и роговой обманки при более высокой температуре, и ассоциации основной плагиоклаз + пироксен +/- гранат при максимальном нагреве.

- Что очень важно - смена минеральных парагенезисов происходит с сохранением валового химического состава исходной породы. В ходе метаморфизма уменьшается лишь содержание воды, которая освобождается в результате дегидратации. **Изохимический характер** метаморфизма нагревания в отношении других компонентов обусловлен малым количеством флюидной фазы и диффузионным механизмом массопереноса.
- Расстояние, на которое переносятся компоненты, соизмеримо с размером зерен, так что в метаморфических комплексах может сохраняться тонкое переслаивание пород, имевших разный исходный состав. Этим метаморфизм нагревания отличается от метаморфизма погружения, который происходит с **привносом и выносом** компонентов вследствие взаимодействия твердых фаз с фильтрующимся водным раствором. При метаморфизме нагревания масса воды ограничена тем запасом, который заключен в гидроксил-содержащих минералах, а высокие температуры и давление препятствуют свободной миграции флюида. По мере увеличения температуры количество флюидной фазы становится все меньше, а ее состав изменяется в сторону обогащения углекислотой.

# • **Метаморфизм гидратации**

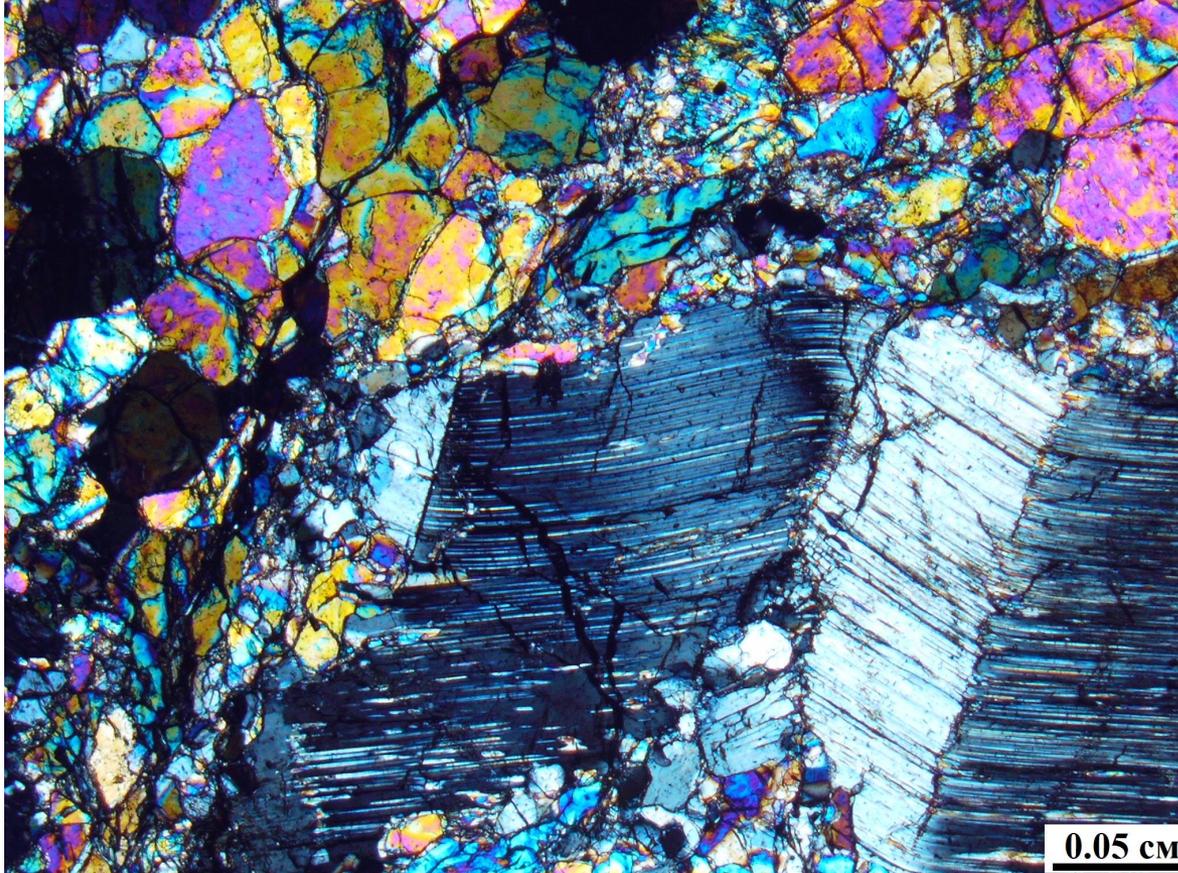
- Метаморфизм, вызванный повышением температуры, называют **прогрессивным**. Поскольку скорость метаморфических реакций выше скорости тепло- и массопереноса, то на каждом локальном участке достаточно быстро устанавливается равновесие, которое соответствует максимальной температуре, достигнутой в ходе прогрессивного метаморфизма.
- Однако когда температура начинает снижаться, то реакции, направленные в противоположную сторону, как правило, не происходят, и высокотемпературные минеральные парагенезисы сохраняются в метастабильном состоянии неопределенно долгое время, не испытывая регрессивного изменения. Необратимость метаморфических реакций обусловлена малой скоростью диффузии в твердых телах, особенно при низкой температуре.

- **Регрессивное** (ретроградное) преобразование ранее возникших метаморфических пород при относительно низких температурах и давлениях (этот процесс иначе называют **диафторезом**) требует дополнительных условий. Чаще всего он развивается под воздействием водного флюида, поступающего из внешнего или внутреннего источника при наличии деформаций, обеспечивающих пути его миграции.
- Такими источниками могут быть:
  - 1. Вода, сохранившаяся в метаморфических породах в виде межзерновых пленок или включений при дегидратация тех или иных минералов;
  - 2. Гранитный расплав, возникающий в результате прогрессивного ультраметаморфизма, охлаждение и затвердевание которого сопровождается отделением водного флюида;
  - 3. Привнос воды извне вдоль зон повышенной проницаемости.

- Таким образом, фильтрация водного флюида является главным фактором ретроградного метаморфизма. В отличие от метаморфизма нагревания, приводящему к дегидратации минералов, в результате **метаморфизма гидратации** безводные или относительно маловодные минералы, наоборот, сменяются кристаллическими фазами, обогащенными гидроксиллом, или молекулярной водой. Типичными примерами метаморфизма гидратации может служить серпентинизация ультрамафитов, амфиболизация пироксен-плагиоклазовых и гранат-пироксен-плагиоклазовых пород или появление позднего мусковита в кварц-полевошпатовых породах.

## • **Дислокационный метаморфизм**

- Интенсивные хрупкие и пластические деформации вблизи разрывных нарушений, особенно около надвигов, в зонах скалывания и смятия приводят к дроблению и перекристаллизации пород, т.е. к **дислокационному метаморфизму**.
- В результате дробления пород возникают **тектонические брекчии**, состоящие из обломков различной величины, сцементированных тонкообломочным материалом. Если величина обломков достаточно мала, дробленную породу называют **катаклазитом** (греч. **cataclas--** дробление). Иногда вдоль поверхностей сместителей породы оказываются растертыми в тонкий материал, представляющий **глинку трения**.
- При повышенных температурах и давлениях, деформации происходят с малой скоростью, имеют пластический характер и не сопровождаются разрывами сплошности пород. В этих условиях дислокационный метаморфизм сводится главным образом к перекристаллизации. При этом границы минеральных зерен перемещаются таким образом, что градиенты давления уменьшаются, и поле напряжений становится более однородным. В направлении максимального сжатия размеры зерен сокращаются, а в перпендикулярном направлении увеличиваются. В результате возникают ориентированные сланцеватые и полосчатые текстуры.

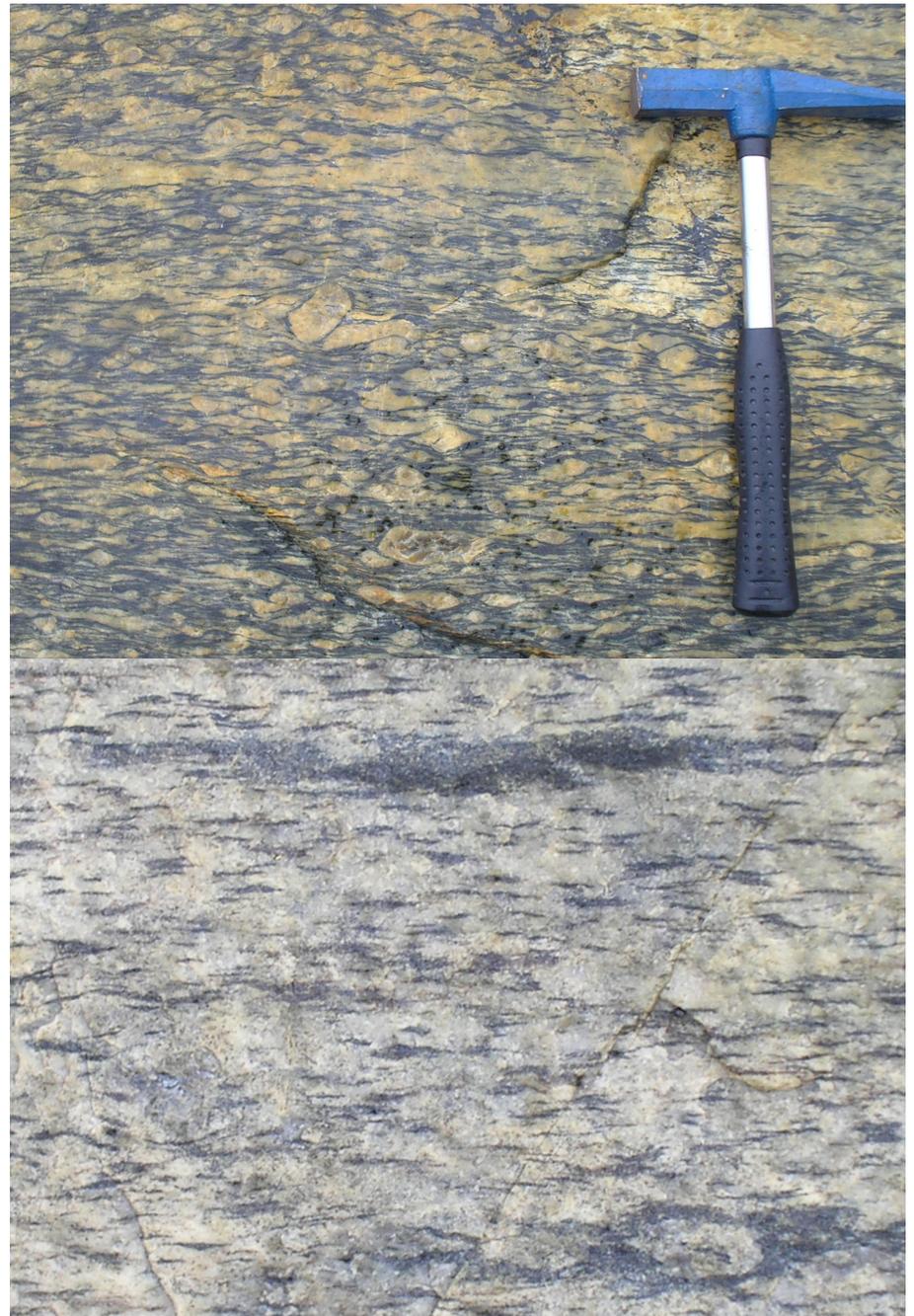


- Перекристаллизация в условиях неравномерного давления, вызывающего деформации скалывания, часто приводит к уменьшению размеров зерен и формированию мелко- и тонкозернистых минеральных агрегатов. Если такие агрегаты возникают по краям крупных кристаллов, образуется **порфирокластическая** структура

В зонах интенсивного расщепления количество неперекристаллизованных реликтовых зерен может уменьшиться до нуля. В результате появляются очень тонкозернистые породы - **милониты** (греч. *mylon* - мельница).

Ранее полагали, что милониты представляют тонко раздробленный (растертый) материал; однако, как выяснилось, главным механизмом формирования этих пород является перекристаллизация в ходе пластической деформации; сейчас их называют **бластомилонитами**.

Зоны скалывания могут испытывать нагрев за счет выделения теплоты трения. Повышение температуры способствует перекристаллизации, а в ряде случаев даже приводит к локальному плавлению пород. Как уже говорилось, одним из наиболее распространенных примеров такого плавления являются **мигматиты**.



# Ударный метаморфизм

Ударный (импактный) метаморфизм вызван падением на Землю крупных метеоритов. На фронте ударной волны и после ее прохождения образуются **аутигенные** (неперемещенные) и **аллогенные** (перемещенные) **брекчии**, **тагамиты** (расплавленные породы) и **зювиты** (аналоги вулканогенно-обломочных пород).

Главным фактором ударного метаморфизма является мгновенное повышение давления до 50-70 ГПа и температуры до 2000-3000°C. Такие экстремальные условия приводят к появлению специфических структур пород (конусы разрушения и т.п.) и преобразованию кристаллической решетки минералов с появлением **диаплектовых** стекол. К другим характерным признакам ударного метаморфизма относятся находки стишовита (высокобарического кварца) и алмазов, огромное месторождение которых находится в Попигайском ударном кратере на севере Сибири.

Одним из крупнейших метеоритных кратеров, как мы уже знаем, находится в Аризоне (США). Он имеет диаметр 1219 метров, глубину 229 метров, а край кратера поднимается над равниной на 46 метров.



**Astrogeology Box 15.1 Figure 1**  
**Meteor Crater in Arizona.**

© Tom Fridmann/Industrial Visuals.

- **СОСТАВ И СТРОЕНИЕ МЕТАМОРФИЧЕСКИХ ГОРНЫХ ПОРОД**

- ***Минеральный состав***

- Многие породообразующие и акцессорные минералы в равной мере распространены в магматических, осадочных и метаморфических породах (кварц, слюды, полевые шпаты, циркон и многие другие). Вместе с тем, имеются минералы, свойственные преимущественно метаморфическим породам, например, андалузит, силлиманит, кианит, ставролит, эпидот и др.
    - В метаморфических породах различают реликтовые и равновесные минералы, а также минералы позднего диафтореза. ***Реликтовыми*** называют минералы исходных осадочных и магматических пород, которые сохранились в метастабильном состоянии в изменившихся условиях.
    - В ходе прогрессивного метаморфизма нагревания реликтовые минералы обычно сохраняются лишь на низкотемпературных стадиях, а при высоких температурах исчезают практически бесследно.

# ***Понятие о минеральном парагенезисе***

- ***Равновесные минералы*** образуются при максимальных значениях тех интенсивных параметров, которые являются определяющими факторами прогрессивного метаморфизма. В отличие от минералов магматических пород, которые кристаллизуются в определенной последовательности в интервале температур или давлений, равновесные минералы метаморфических пород формируются одновременно при максимальной температуре и могут рассматриваться как ***минеральная ассоциация (парагенезис)***, устойчивая при соответствующих этой температуре  $P$ -- $T$ -- $X$  условиях.
- Химический состав метаморфических пород в отношении нелетучих компонентов, отражает состав исходного материала - ***протолита***.
- Различают метаморфические ***ортопороды*** - продукты преобразования магматических пород (вулканических и интрузивных), и ***парапороды*** - результат метаморфизма осадочных пород.

# Структуры и текстуры метаморфических пород

**Структура** характеризует особенности строения горных пород, обусловленные формой зерен, а также их абсолютными и относительными размерами. Поскольку метаморфические породы формируются в результате перекристаллизации протолита в твердом состоянии, структуры этих пород называют **бластическими** (греч. *blastos*---рост, росток).

По форме зерен различают следующие разновидности бластических структур (рис): **гранобластовая** (агрегат изометричных зерен, например, кварца или кальцита); **лепидобластовая** (агрегат листоватых или чешуйчатых кристаллов, представленных чаще всего слюдой); **нематобластовая** (агрегат игольчатых или длиннопризматических кристаллов: актинолита, силлиманита и др.); **фибробластовая** (агрегат волокнистых кристаллов, например, волокнистой разновидности силлиманита - фибролита).

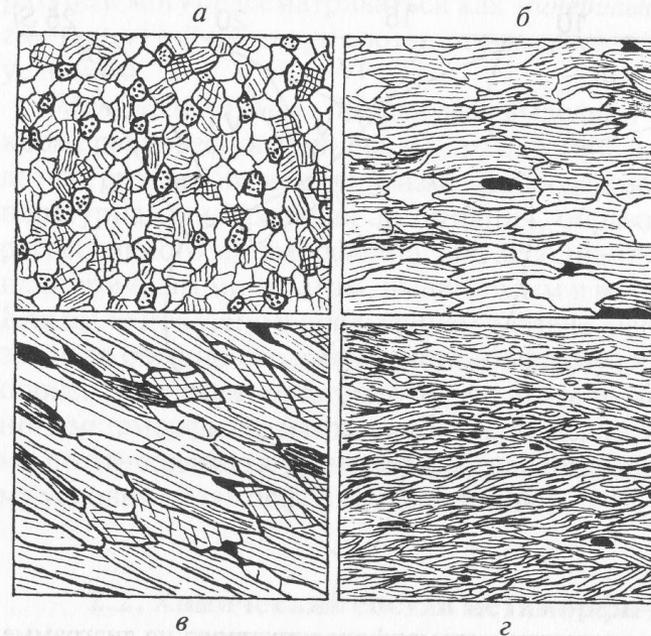


Рис. 2.2. Структуры метаморфических пород, различаемые по форме зерен: гранобластовая (а), лепидобластовая (б), нематобластовая (в), фибробластовая (г)

По относительным размерам зерен выделяются такие структуры метаморфических пород (рис.): **гомеобластовая** (агрегат зерен одинакового размера); **гетеробластовая** (агрегат зерен разных размеров); **порфиробластовая** (крупные кристаллы – **порфиробласты** - резко выделяются на фоне более мелкозернистой основной ткани породы); **пойкилобластовая** (порфиробласты содержат мелкие вростки минералов из основной ткани породы); ее разновидностью является **ситовидная** (обилие мелких вростков одного минерала в крупных кристаллах другого минерала).

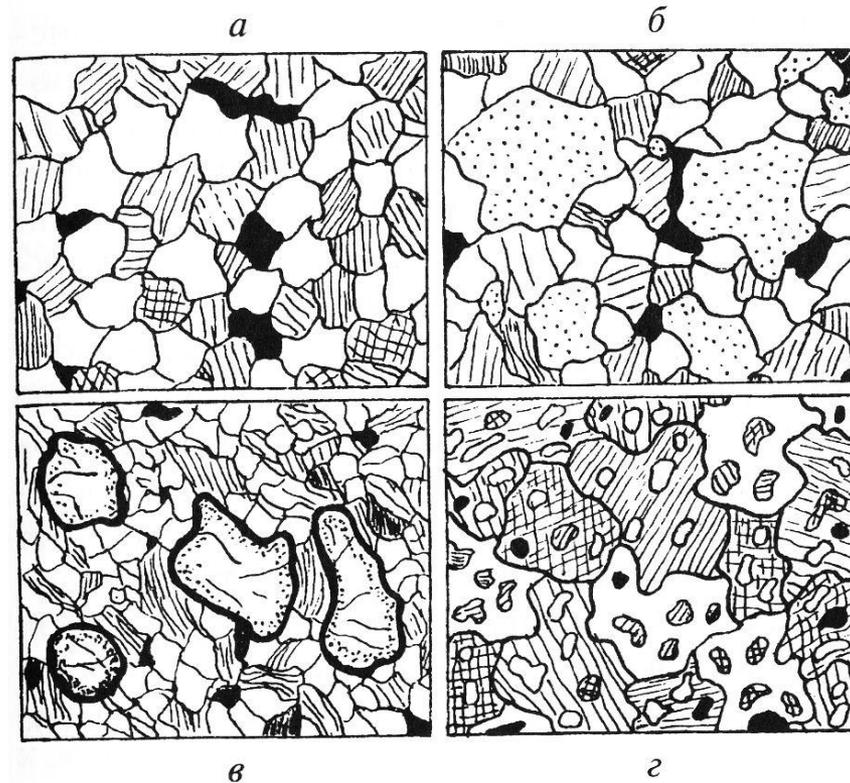


Рис. 2.3. Структуры метаморфических пород, различаемые по относительному размеру зерен: гомеобластовая (а), гетеробластовая (б), порфиробластовая (в), ситовидная (г)

**Текстура** отражает распределение минеральных зерен в пространстве. Для контактово-метаморфических пород типична **массивная** текстура с более или менее равномерным распределением минеральных зерен по всему объему.

Породы, возникшие в результате регионального метаморфизма, а также при дислокационном метаморфизме, обычно обладают **директивными** текстурами с преимущественной ориентировкой вытянутых или уплощенных кристаллов вдоль определенных линий или поверхностей.

Наиболее распространенные разновидности ориентированных текстур, свойственные метаморфическим породам, являются **сланцеватая** (обусловлена плоскостной ориентировкой листоватых, чешуйчатых, пластинчатых минералов, главным образом, слюд); **гнейсовая**, или **гнейсовидная** (обусловлена ориентировкой вытянутых минералов, например, роговой обманки); **полосчатая** (разные минералы, которые обычно отличаются по цвету, сосредоточены в отдельных полосах); **линзовидно-полосчатая** (минералы разного состава скапливаются в виде вытянутых линз); **плойчатая** (поверхности сланцеватости или полосы смяты в мелкие складки).

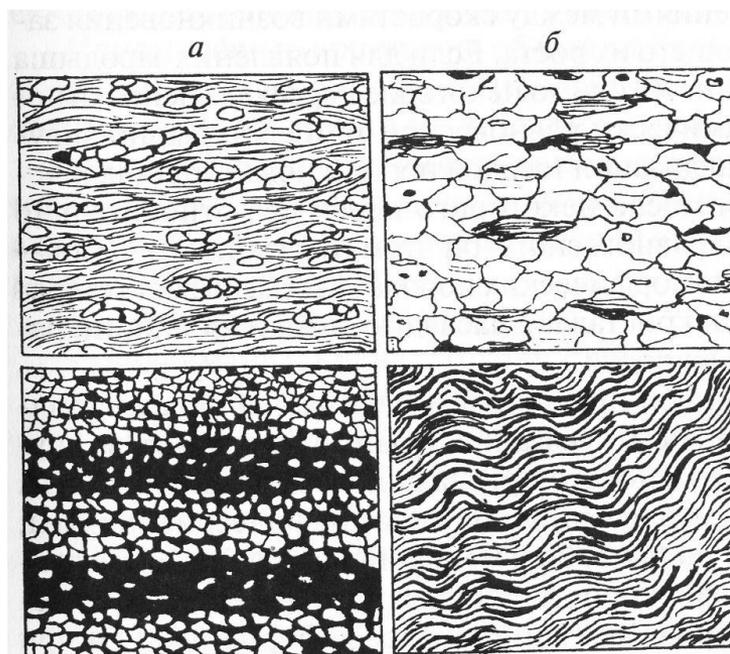


Рис. 2.4. Текстуры метаморфических пород: сланцеватая (а), гнейсовидная (б), полосчатая (в), плойчатая (г)

- **КЛАССИФИКАЦИЯ МЕТАМОРФИЧЕСКИХ ГОРНЫХ ПОРОД**
  - **Минеральные фации метаморфизма**

Метаморфические породы, в отличие от магматических, не рационально классифицировать по химическому составу, поскольку он в значительной мере отражает состав протолита, а не условия метаморфизма. Мало пригодной оказывается и классификация по минеральному составу, так как разные исходные породы, преобразованные в одних и тех же условиях, состоят из разных минералов.

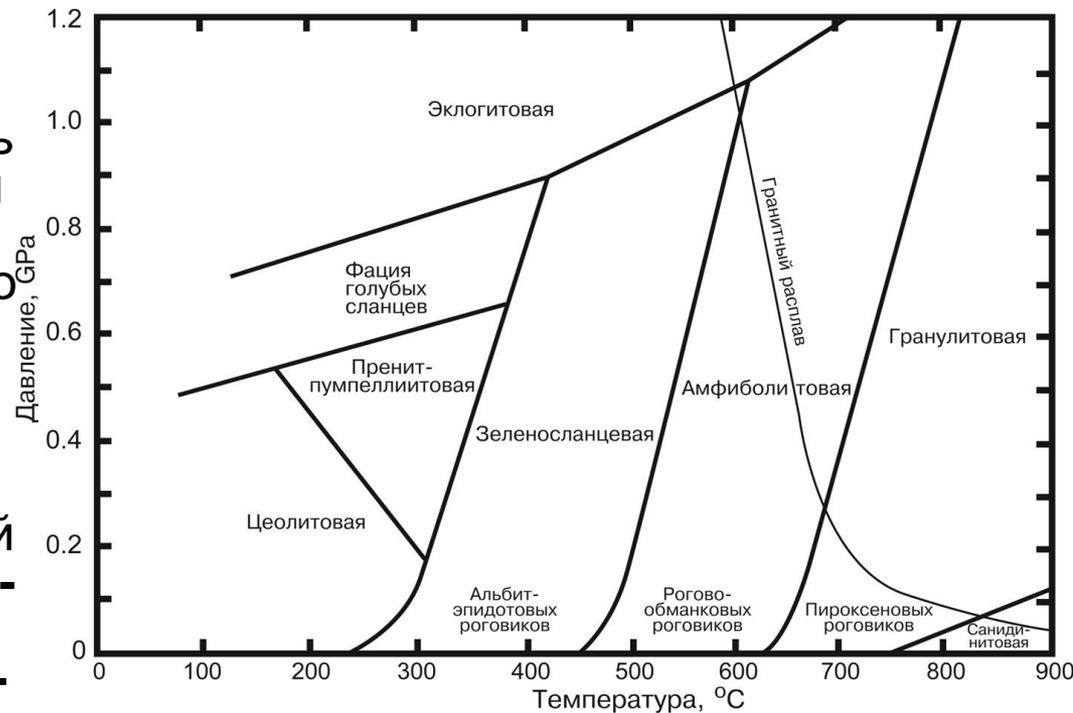
Поэтому в основу систематики метаморфических пород положены не химический или минеральный составы, рассматриваемые по отдельности, а **соотношения** между химическим составом исходной породы и минеральными ассоциациями (парагенезисами), возникающими в процессе метаморфизма. Такой подход привел к выделению **минеральных фаций метаморфизма**. Это понятие было введено в геологию знаменитым финским исследователем П. Эскола в 1915 г.

**Минеральная фация метаморфизма** -- это совокупность метаморфических пород разного химического состава, которые сформированы в одних и тех же условиях, соответствующих определенным интервалам температуры ( $T$ ), давления ( $P$ ) и определенному количеству и составу флюидной фазы ( $X$ ). Породы одного исходного химического состава, метаморфизованные в условиях одной и той же фации, имеют один и тот же минеральный состав.

# Систематика минеральных фаций метаморфизма

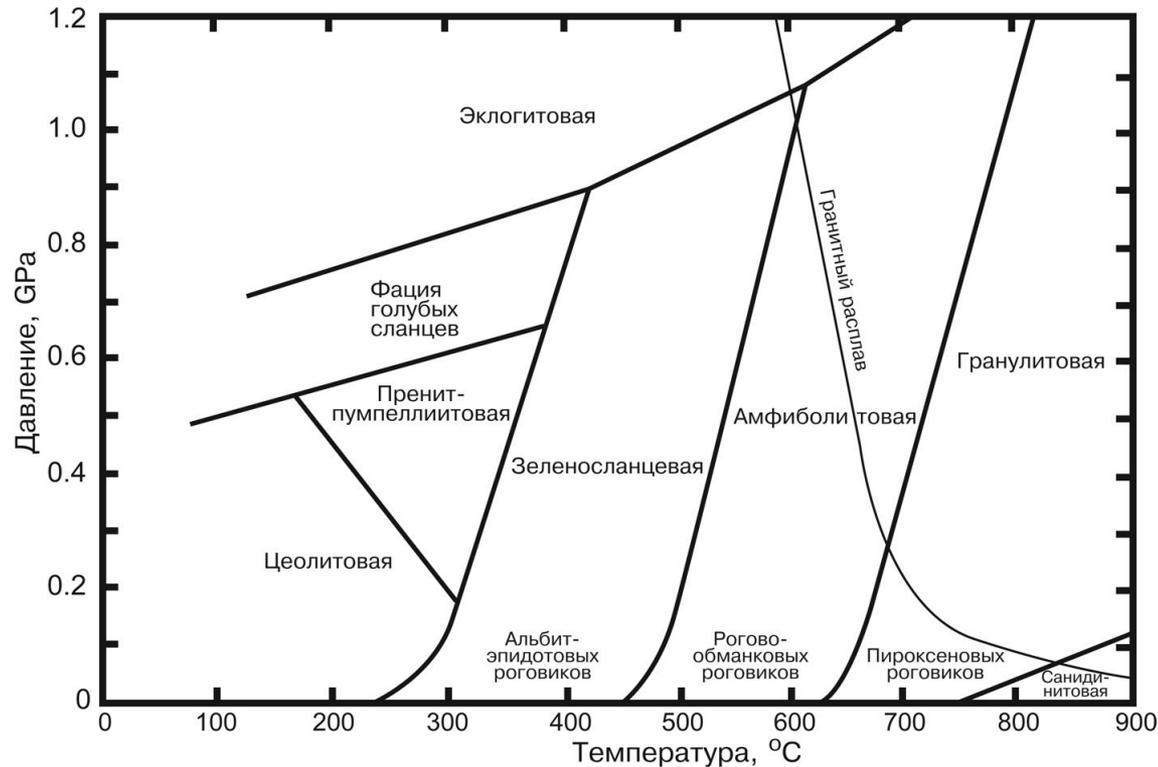
Изменение внешних условий вызывает различные метаморфические реакции. В зависимости от того, какие из этих реакций выбрать в качестве граничных, можно создать разные классификационные схемы минеральных фаций метаморфизма. Наиболее простая и достаточно универсальная классификация приведена на рис.

Выделены фации **метаморфизма погружения** (область низких геотермических градиентов в левой части схемы) и фации **метаморфизма нагревания** (правая часть схемы), в том числе фации **контактового метаморфизма** при низких давлениях и регионального метаморфизма при умеренных и высоких давлениях. Каждая из фаций характеризуется типичной для нее диаграммой "состав - парагенезис".



## • **Фаши метаморфизма погружения**

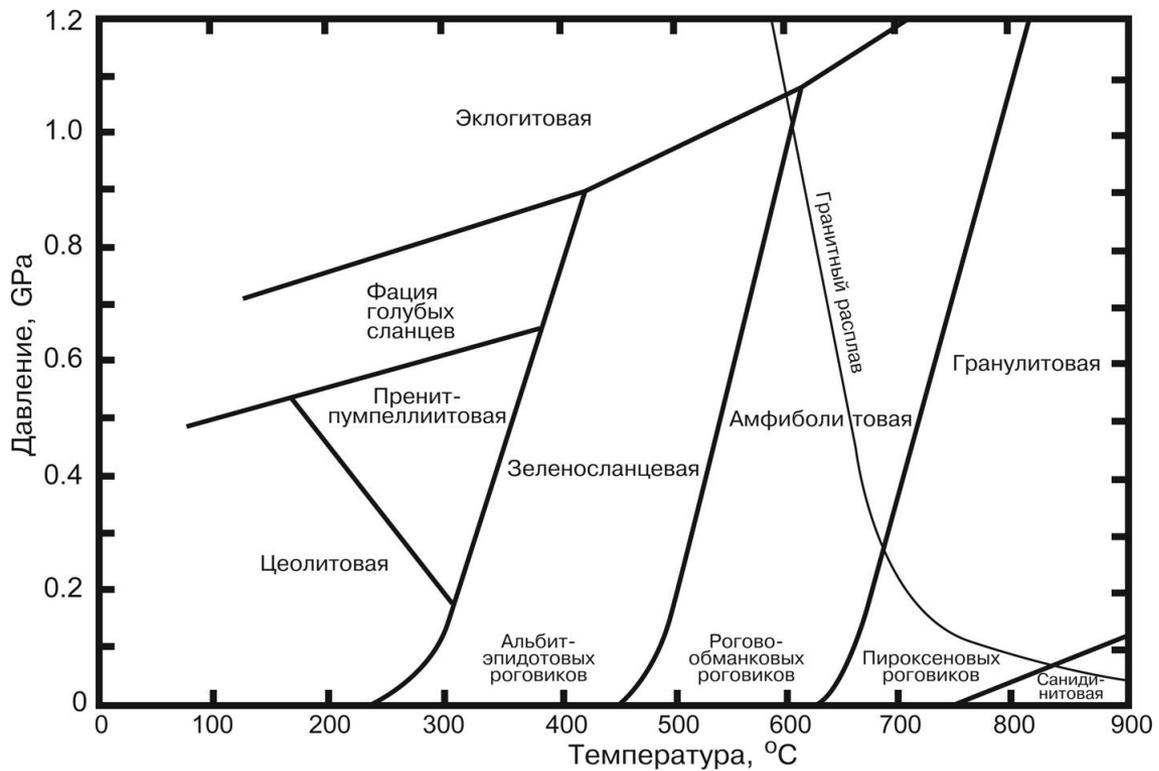
- Главными интенсивными параметрами, определяющими минеральные парагенезисы, возникающие при метаморфизме погружения, являются давление и состав флюидной фазы. Выделяют четыре фаши метаморфизма погружения: **цеолитовую, пренит-пумпеллиитовую, голубых сланцев (лавсонит-глаукофановую) и эклогитовую**, отражающие последовательное увеличение давления. Типичные минеральные парагенезисы, свойственные породам разных фаций метаморфизма погружения, показаны в левой части рисунка.



# • **Фашии регионального метаморфизма**

- В области умеренных давлений (от 200 до 800--900 МПа) выделяются три фации регионального метаморфизма нагревания: **зеленых сланцев, амфиболитовая и гранулитовая**. Фацию зеленых сланцев относят к низшей ступени метаморфизма, амфиболитовую - к средней, а гранулитовую фацию - к высшей ступени.
- Переход от одной фации регионального метаморфизма к другой по мере роста максимальной температуры сопровождается реакциями дегидратации с образованием минералов, содержащих все меньше воды, а также снижением железистости цветных минералов (биотита, кордиерита, граната и др.) и возрастанием основности плагиоклаза. Нижняя граница фации зеленых сланцев определяется дегидратацией глинистых минералов (каолинита, монтмориллонита) и появлением вместо них пиррофиллита и хлорита. Дегидратация последних двух минералов фиксирует переход к амфиболитовой фации. В ***P--T*** условиях амфиболитовой фации среди слюд устойчивы биотит и флогопит. Переход от амфиболитовой фации к гранулитовой сопровождается дегидратацией биотита с образованием минеральной ассоциации ортоклаз + кордиерит (гранат) + ортопироксен.

- Температура амфиболитовой фаций метаморфизма может оказаться выше, чем солидус гранитного расплава, насыщенного водой. Поэтому при  $P \geq 300 - 500$  МПа дегидратация слюд и амфиболов, первоначально содержащихся в породах с кварцем, приводит к появлению гранитного расплава (мигматитов). Дальнейшее нагревание способствует увеличению доли расплава и снижению концентрации в нем воды.
- Метаморфизм кварц-полевошпатовых пород в условиях гранулитовой фации возможен лишь при отсутствии свободной воды, т.е. в тех случаях, когда протолит изначально был лишен мусковита и биотита или после того, как из частично расплавленной породы был удален магматический расплав, содержащий воду. Изучение микровключений в минералах показывает, что в условиях гранулитовой фации флюидная фаза нередко представлена чистой углекислотой.



Высокобарический метаморфизм магматических пород основного состава (базальтов и габбро) в обстановке высокого давления ( $P > 800$  МПа) приводит к образованию **эклогитов**, состоящих из граната и Na-содержащего клинопироксена – омфациита. Согласно экспериментальным данным, давление и температура формирования эклогитов могут зависеть от состава метаморфизируемых пород (рис.).

Эклогиты являются одной из самых тяжелых разновидностей пород – их плотность составляет  $3.4 \text{ г/см}^3$ ; она близка или даже немного превышает плотность верхнемантийных перидотитов. Таким образом, эклогиты – это высокобарические породы, возникающие при относительно низких температурах, и в настоящее время, по-видимому, формируются в нижних частях субдуцируемых плит, где существуют соответствующие условия.

Эклогитам в настоящее время придается особое значение, поскольку судя по ксенолитам в кимберлитах, они являются существенной разновидностью пород верхней мантии; иногда они содержат алмазы..

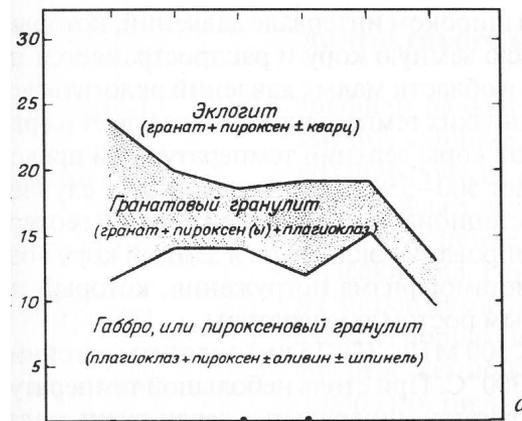
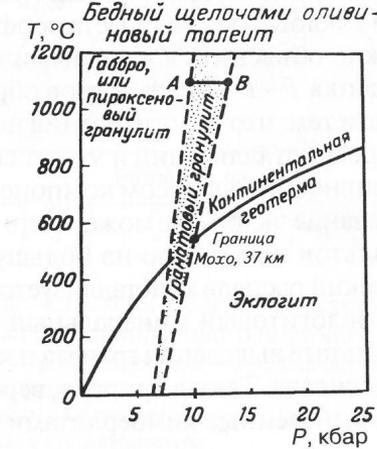
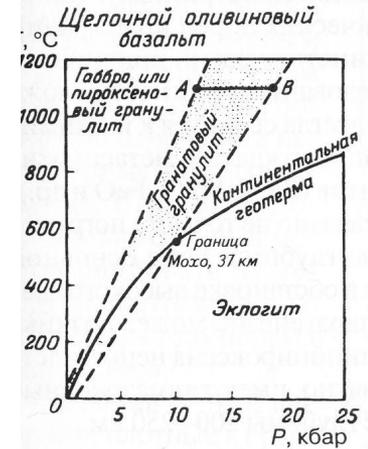
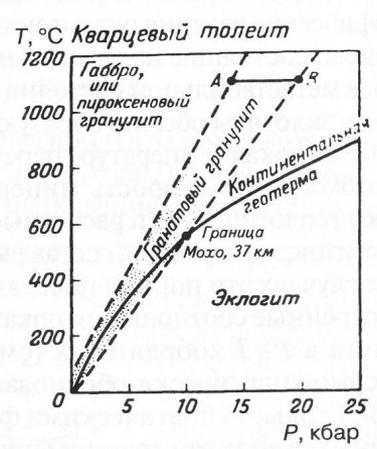
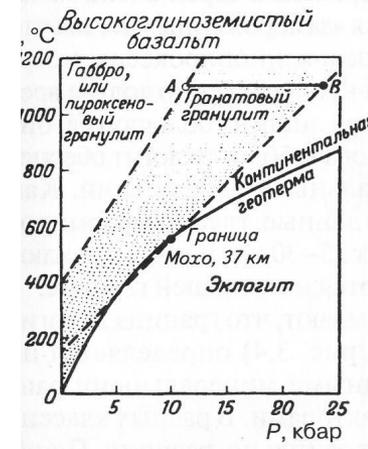


Рис. 4.2. P–T условия устойчивости эклогитов, по А. Рингвуду и Д. Грину, 1966 г. а – минеральные ассоциации базитов, полученные в эксперименте при 1100 °С; б – предполагаемые области устойчивости габбро, гранатового гранулита и эклогита, отрезок АВ – экспериментальные данные при 1100 °С



# • МЕТАСОМАТИЗМ

- **Метасоматизм** - это процесс взаимодействия горных пород с фильтрующимися сквозь них жидкими или флюидными фазами: многокомпонентными водными растворами (флюидами), карбонатными, силикатными и другими расплавами. При этом сохраняется твердое состояние горных пород, но, в отличие от метаморфизма, их химический состав меняется вследствие растворения ранее существующих минералов и отложения на их месте новых. Продукты метасоматоза называются ***метасоматическими горными породами***, или ***метасоматитами***. Большое практическое значение имеют околорудные метасоматиты, пространственно сопряженные с рудной минерализацией.

# Метасоматическая жила, о-в Хедостров, Белое море



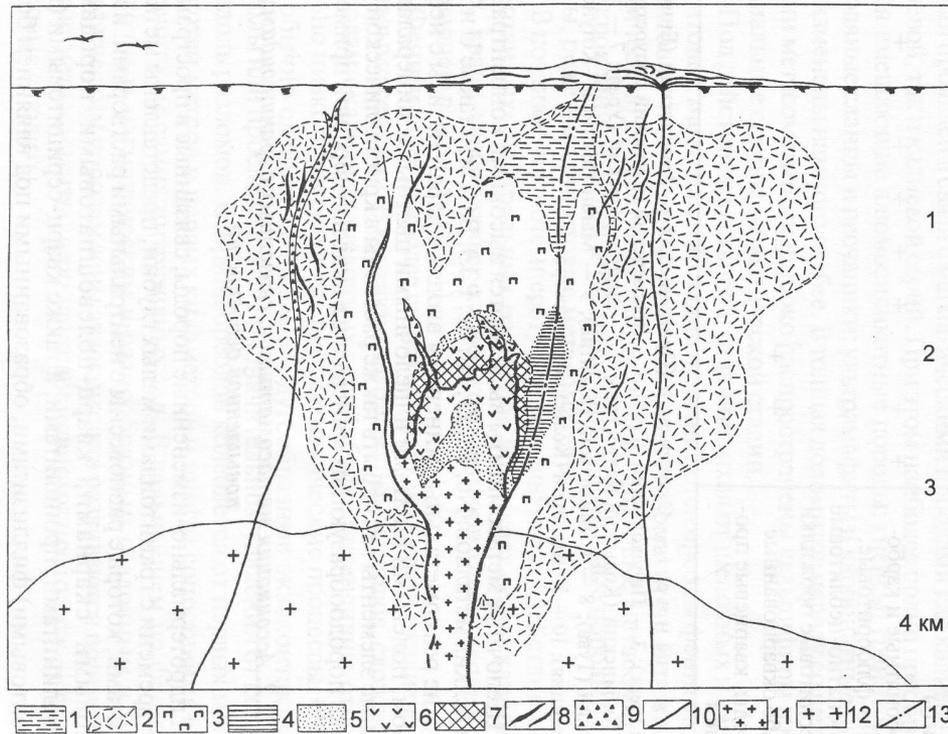


Рис. 6.2. Принципиальная схема метасоматической зональности медно-порфирового месторождения (разрез, по В.С.Попову [1977])

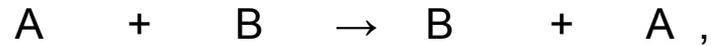
1–4 — поздняя серия метасоматитов и руд: 1 — аргиллизиты, 2 — пропилиты, 3 — кварц-серицитовые (мусковитовые) филлизиты с пиритом, 4 — позднее рудное тело; 5–7 — ранняя серия метасоматитов и руд: 5 — пропилиты, 6 — кварц-калишпатовые метасоматиты и калиевые пропилиты, 7 — раннее рудное тело; 8 — поздние кварц-карбонатные жилы с полиметаллической минерализацией; 9 — гидротермальные брекчии, 10 — поздние дайки, в том числе подводящие каналы для пострудных эффузивов; 11 — шток гранодиорит-порфиров и других интрузивных пород с порфировой структурой; 12 — полнокристаллические гранитоиды; 13 — разрывные нарушения

- **Различие и сходство метасоматоза и метаморфизма**
- Процессы метасоматоза и метаморфизма протекают при повышенной температуре с сохранением твердого состояния горных пород и невозможны без участия флюидной фазы. Поэтому до недавнего времени метасоматоз считали частным случаем метаморфизма. Однако существуют и важные различия между этими процессами, которые становятся особенно ясными при сравнении метасоматоза и регионального метаморфизма нагревания.

- 1. Метасоматоз происходит с изменением содержания в горных породах многих компонентов, поэтому химический состав метасоматитов существенно отличается от состава исходных горных пород (протолита). Региональный метаморфизм нагревания сопровождается изменением концентраций только летучих компонентов:  $H_2O$  и  $CO_2$ , а содержания остальных компонентов остаются постоянными.
- 2. Метасоматоз развит более локально по сравнению с региональным метаморфизмом. Он, как правило, приурочен к зонам разломов и другим проницаемым структурам, вдоль которых происходит фильтрация водных растворов. Вместе с тем, ореолы слабой гидротермальной переработки горных пород могут достигать значительных размеров.
- 3. Поскольку растворение одних минералов и отложение других происходит одновременно, то для слабо пористых пород в процессе метасоматоза сохраняется постоянство объема (правило Линдгрена). Поэтому метасоматиты обычно наследуют текстурно-структурные особенности исходных пород. Метаморфизм же, как правило, протекает с изменением объема, а первичные структурные признаки сохраняются лишь в редких случаях, главным образом, при низкотемпературных изменениях.
- 4. В результате метасоматоза происходит значительное сокращение числа породообразующих минералов вплоть до образования мономинеральных пород, что не типично для регионального метаморфизма. Согласно академику Д.С. Коржинскому, вынос компонентов происходит в определенной последовательности в зависимости от их **подвижности** в данных конкретных условиях, в результате чего возникает в целом симметричная **метасоматическая зональность**.

5. Если при высокотемпературном региональном метаморфизме главную роль играет диффузионный способ переноса компонентов через малоподвижные поровые растворы или пленочные воды, обусловленный градиентами концентраций химических компонентов, то при метасоматозе вещество переносится инфильтрационным (конвективным) путем, т.е. текущим раствором, который просачивается через толщу пород в направлении, определяемом градиентом давления.

6. Метасоматоз сводится к процессам замещения и реакциям ионного обмена:



минерал раствор минерал раствор

Примером такой реакции может служить замещение ортоклаза мусковитом:



минерал раствор минерал минерал раствор

При региональном же метаморфизме нагревания преобладают реакции термического разложения, прежде всего дегидратация и декарбонатизация.

7. Вследствие непрерывного изменения состава гидротермального раствора при его взаимодействии с теми горными породами, сквозь которые он фильтруется, возникает **метасоматическая колонка**. Каждой зоне этой колонки соответствует определенный состав породы и раствора. Во **внутренней (тыловой)** зоне колонки, расположенной вблизи путей интенсивной фильтрации раствора, метасоматические преобразования проявлены наиболее полно, и состав метасоматитов почти целиком определяется составом раствора. Во **внешней (фронтальной)** зоне горные породы испытывают лишь слабые изменения, связанные с воздействием в значительной мере отработанного раствора.

Для регионального метаморфизма нагревания подобная зональность не характерна.

## • Типоморфные признаки метасоматических горных пород

- Наиболее характерным признаком метасоматитов является ***псевдоморфное замещение*** одних минералов другими. Псевдоморфозы могут быть весьма разнообразными. При этом могут сохраняться все особенности строения первичных кристаллов, включая линейные дефекты, зональность, секториальность, штриховку и др. Иногда детали первичного строения исчезают и остаются лишь внешние формы кристаллов. Кроме псевдоморфоз часто наблюдается замещение пород в целом с сохранением их структурных и текстурных особенностей.
- Тончайшие псевдоморфозы этого типа обнаружены, например, в метасоматических кварцитах, образованных по известнякам, в которых видны органические остатки с полным сохранением видовых признаков. Описан исторический факт, когда шведский рудокоп провалился в щель рудника и был извлечен оттуда через 60 лет. За это время его тело и одежда были полностью замещены сульфидом железа - пиритом.

- Характерным признаком метасоматических пород являются теньевые реликты первичных минералов, возникновение которых обусловлено различной растворимостью минералов в процессе замещения, а также анизотропией свойств отдельных кристаллов. Например, часто сохраняются реликты магнетита, гематита, пирита, циркона, рутила, графита, реже граната, клинопироксена. Жильные тела, нередко возникающие при метасоматическом замещении, можно отличить от магматических образований по смене минерального состава при пересечении различных вмещающих пород.
- Околорудным метасоматитам свойственно увеличение пористости (в отдельных случаях в 3-10 раз), понижение магнитной восприимчивости и низкая корреляционная связь физических свойств минералов по сравнению с неизмененными горными породами.
- **Рудоотложение** в метасоматитах чаще всего представляет собой относительно локальное и кратковременное событие, которое может происходить синхронно с метасоматическими преобразованиями пород, занимая определенное положение в зональности метасоматических тел. Реже оруденение формируется позднее главного объема метасоматитов, но генетически связано с теми же гидротермальными растворами.
- **Биметасоматоз** часто возникает на границе контрастных сред, например, вдоль контактов гранитного интрузива и вмещающих известняков. Здесь происходит интенсивный обмен компонентами, в результате чего возникают **скарны**.

# ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Горные породы, вовлекаясь в тектонические процессы, испытывают различные трансформации, связанные с изменением температуры, давления, а также воздействию флюида и расплавов. При этом их первичный минеральный состав становится неустойчивым, заменяясь новыми минералами, равновесными в новых условиях. Эти трансформации описываются в терминах метаморфизма и метасоматизма.
2. Метаморфизм - это преобразование минерального состава и строения твердых горных пород под влиянием изменившихся внешних условий. Процесс сводится к перекристаллизации ранее существовавших минералов, их химическому разложению и взаимодействию друг с другом с появлением новых, устойчивых минералов, структур и текстур.
3. Выделяют метаморфизм погружения (увеличение давления), нагревания (повышение температуры), гидротермальный, или ретроградный (взаимодействие с водными растворами), дислокационный (тектонические деформации) и ударный (падение крупных метеоритов).
4. Химический состав горных пород при метаморфизме существенно не меняется, в отличие от минерального, где появляются новые минеральные фазы, типичные для новых условий.

5. Классификация метаморфических пород производится по парагенезисам новообразованных минералов, отражающих  $P$ - $T$  условия метаморфизма, т.е. Фацию метаморфизма.
6. Минеральная фация метаморфизма -- это совокупность метаморфических пород разного химического состава, которые сформированы в одних и тех же условиях, соответствующих определенным интервалам температуры ( $T$ ), давления ( $P$ ) и определенному количеству и составу флюидной фазы ( $X$ ). Породы одного исходного химического состава, метаморфизованные в условиях одной и той же фации, имеют один и тот же минеральный состав.
7. В области умеренных давлений (от 200 до 800--900 МПа) выделяются четыре фации регионального метаморфизма нагревания: **зеленых сланцев, эпидот-амфиболитовая, амфиболитовая и гранулитовая**. Фацию зеленых сланцев относят к низшей ступени метаморфизма, эпидот-амфиболитовую и амфиболитовую - к средней, а гранулитовую фацию - к высшей ступени. В области высоких давлений выделяют эклогитовую фацию.

8. Метасоматизм - это процесс взаимодействия горных пород с фильтрующимися сквозь них жидкими или флюидными фазами: многокомпонентными водными растворами (флюидами), карбонатными, силикатными и другими расплавами. При этом сохраняется твердое состояние горных пород, но, в отличие от метаморфизма, их химический состав меняется вследствие растворения ранее существующих минералов и отложения на их месте новых.
9. Таким образом, в настоящее время процессы трансформации горных пород, описываемые как метаморфизм и метасоматизм рассматриваются как динамические процессы, тесно связанные с тектонической эволюцией земной коры, магматическими явлениями, широкомасштабной фильтрацией флюидных фаз разного происхождения. При их изучении все более явно выступают черты сложного многообразного процесса, изменяющего  $P$ - $T$ - $X$  условия существования твердых горных пород в земной коре и подкоровых глубинах.

# • Вопросы для зачета по курсу "Петрология и минералогия"

- 1. Основные принципы классификации магматических горных пород
- 2. Внутриплитный магматизм
- 3. Плавление в литосфере и его причины; понятия ликвидуса и солидуса
- 4. Кристаллизационная дифференциация магм
- 5. Главные геодинамические обстановки, магматизм, связь магматизма и тектоники
- 6. Подъем магм и его причины; возможности подъема «сухих» и водонасыщенных магм
- 7. Современный магматизм на границах литосферных плит
- 8. Земная кора континентов и океанов
- 9. Магматизм в современных конструктивных обстановках
- 10. Вещественный состав мантийных пород, деплетированная мантия, реститы
- 11. Тектоно-магматические ситуации в рамках модели тектоники плит, магматизм и тектоника
- 12. Понятие метаморфических фаций
- 13. Эволюция магматизма в истории Земли
- 14. Магматизм в современных деструктивных обстановках (зоны субдукции)

- 17. Земная кора континентов и океанов
- 18. Особенности магматизма раннего докембрия
- 19. Континентальные покровные базальты (траппы)
- 20. Метаморфизм, что это такое
- 21. Мантийные плюмы
- 22. Формирование крупных расслоенных интрузивов
- 23. Континентальные рифты, строение и магматизм
- 24. Понятие метаморфизма; метаморфические фации
- 25. Главные опасности, связанные с вулканической деятельностью.
- 26. Понятие метасоматизма; его отличия от метаморфизма
- 27. Первичная магматическая расслоенность и ее происхождение
- 28. Главные породообразующие минералы
- 29. Внутреннее строение Земли
- 30. Структуры и текстуры горных пород
- 31. Две модели образования Земли