

# МЕТАМОРФИЧЕСКИЕ ПОРОДЫ

[Что такое метаморфизм](#)

[Давление](#)

[Региональный метаморфизм](#)

[Индекс минералы](#)

[Метаморфизм и размер зерен](#)

[Контактовый метаморфизм](#)

[Метаморфизм и флюиды](#)

[Катакластический метаморфизм](#)

[Геотермальный градиент](#)

[Метаморфические фации](#)

[Заключение](#)

# ВВЕДЕНИЕ

Метаморфические породы это породы, которые подверглись определенным изменениям в твердом состоянии. Этот модуль рассказывает как и почему горные породы подвергаются метаморфизму. Будут рассмотрены следующие темы:

- Что такое метаморфизм?
- Каковы причины метаморфизма?
- Разновидности метаморфизма.
- Как выглядят метаморфические породы?
- Что могут рассказать минералы метаморфической породы о том, в каких условиях они образовались?



# Метаморфические горные породы

возникают в глубоких зонах земной коры путем преобразования магматических и осадочных, а также других метаморфических горных пород под влиянием высоких температур и давлений.

Совокупность процессов, приводящих к изменению горных пород в недрах земли, называется

# Факторы метаморфизма (РТХ)

– *Высокое давление (Р-фактор)*

– *Высокие температуры (Т-фактор)*

– *Состав газовых и водных растворов (Х-фактор)*, если они участвуют при метаморфизме, то меняется *состав пород*

# **При метаморфических процессах происходят**

- Обезвоживание ГП**
- Перекристаллизация ГП**
- Изменение минерального  
состава**
- Разнообразные  
метасоматические явления**

# МЕТАМОРФИЗМ СЛАНЦЕВ



Сланец

## Метаморфизм



Гнейс

Многие горные породы, которые сегодня обнажаются на поверхности Земли, миллионы лет назад находились в недрах земной коры. Для близповерхностных зон коры характерны относительно низкие температуры и давление. Однако, с глубиной температура и давление увеличиваются. Когда горные породы погружаются на глубокие уровни земной коры, они испытывают действие высоких температур и давлений. Как показано на следующих слайдах, изменение окружающей температуры и

давления вызывает изменение самих горных пород – они подвергаются метаморфизму. На верхней фотографии горная порода, которая называется сланец. Сланец это осадочная горная порода, которая образуется в верхних горизонтах коры при уплотнении глины. Когда сланцы погружаются на глубокие горизонты земной коры, они подвергаются метаморфизму – сланец превращается в гнейс (нижняя фотография).

# МЕТАМОРФИЗМ БАЗАЛЬТОВ



Базальт

## Метаморфизм

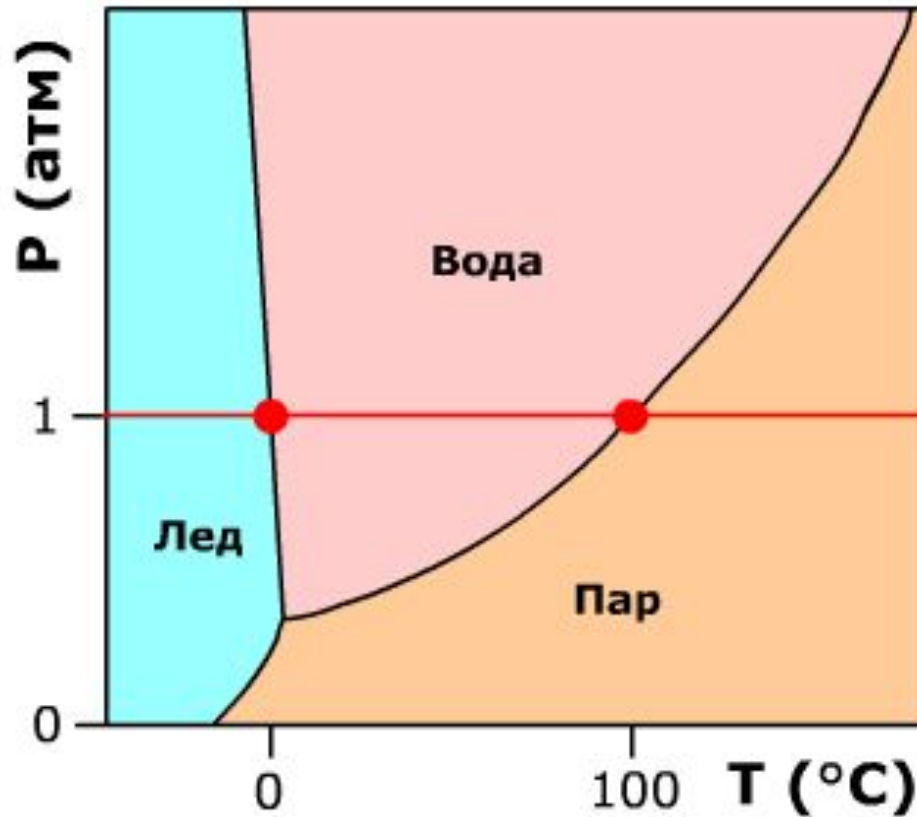


Эклогит

Базальт (верхняя фотография) это магматическая горная порода, которая образуется при кристаллизации лавы на поверхности Земли. Если базальт погружается на глубину около 50 км, он подвергается

метаморфизму – образуется эклогит (нижняя фотография). Базальт и эклогит имеют близкий химический состав, однако они сильно отличаются по минеральному составу.

# ФАЗОВАЯ ДИАГРАММА ДЛЯ ВОДЫ

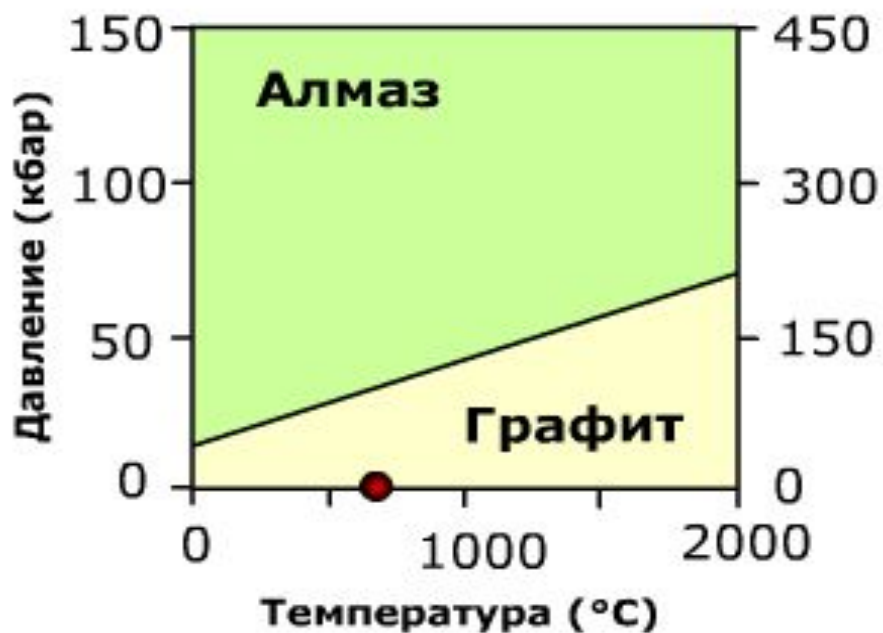


Давление и температура являются наиболее важными параметрами, которые определяют условия стабильности минералов. На этом рисунке фазовая диаграмма системы, включающей один химический компонент –  $H_2O$ . При давлении 1 атмосфера лед стабилен при температурах ниже  $0^{\circ}C$ . При температурах выше

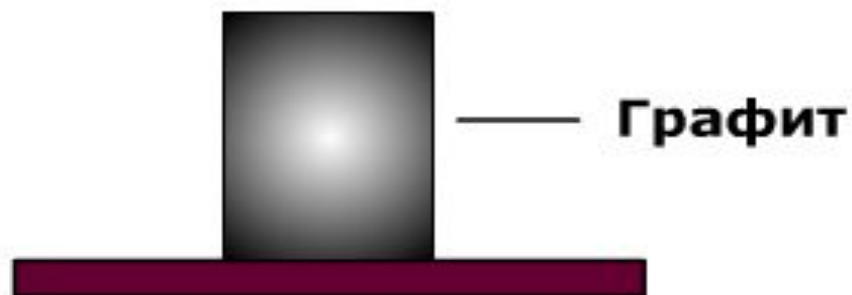
$0^{\circ}C$  (также при давлении 1 атмосфера) лед становится нестабильным – он плавится. Таким образом, температура определяет, является ли лед (а лед это минерал) стабильным, или нет. Это справедливо и для других минералов – условия их стабильности определяются температурой.



# ФАЗОВАЯ ДИАГРАММА ДЛЯ УГЛЕРОДА



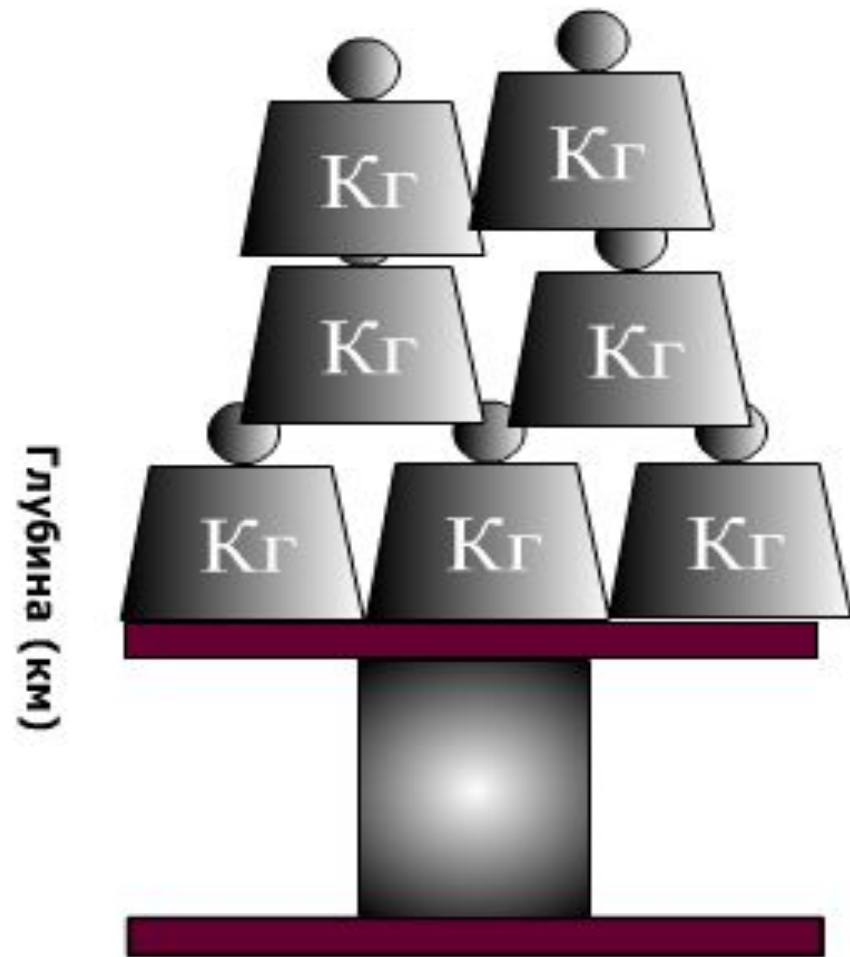
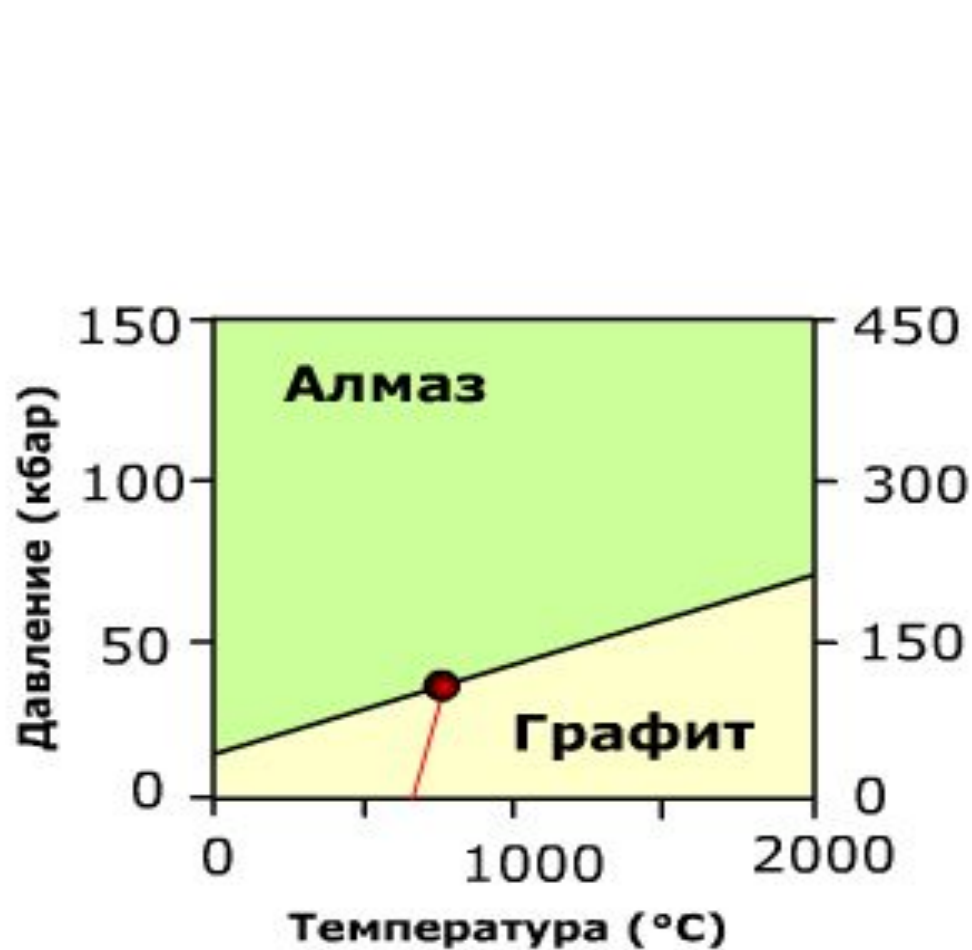
Глубина (км)



Большинство минералов, которые встречаются в природе, являются стабильными только в определенных диапазонах температуры и давления. На рисунке слева фазовая диаграмма для углерода (C). Линия на этой диаграмме разделяет поля устойчивости графита и алмаза. При давлениях и температурах ниже разделительной линии стабилен графит, а выше

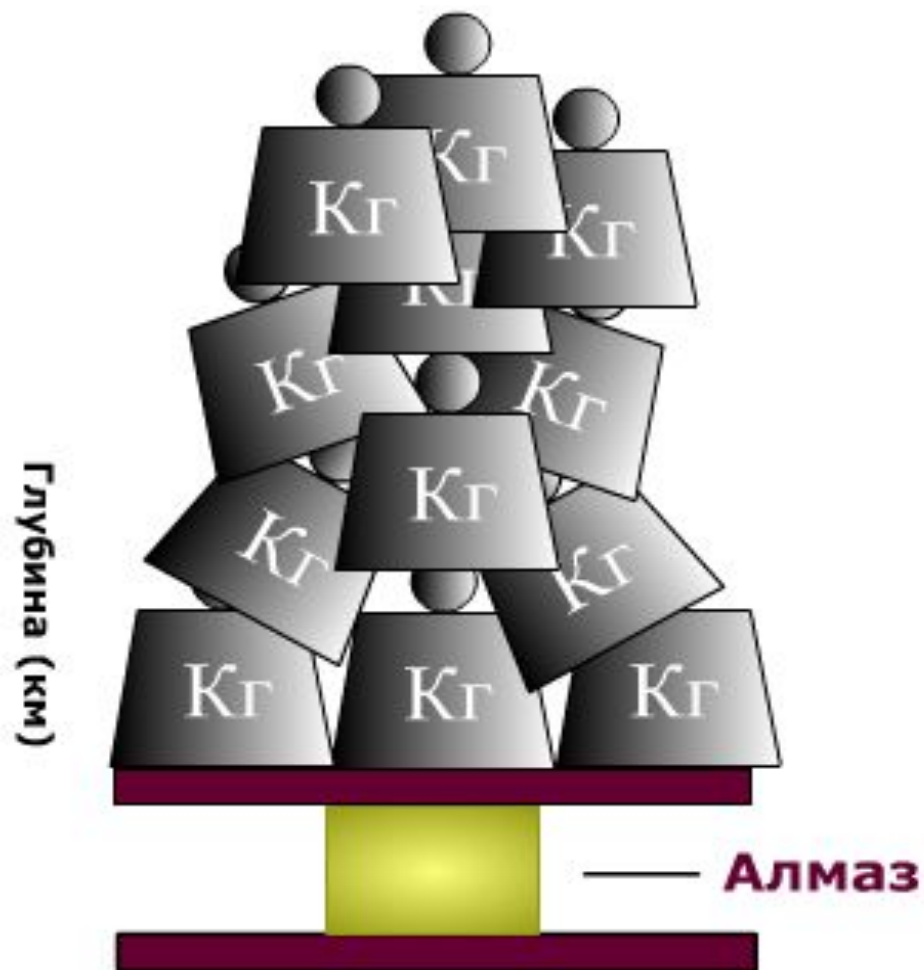
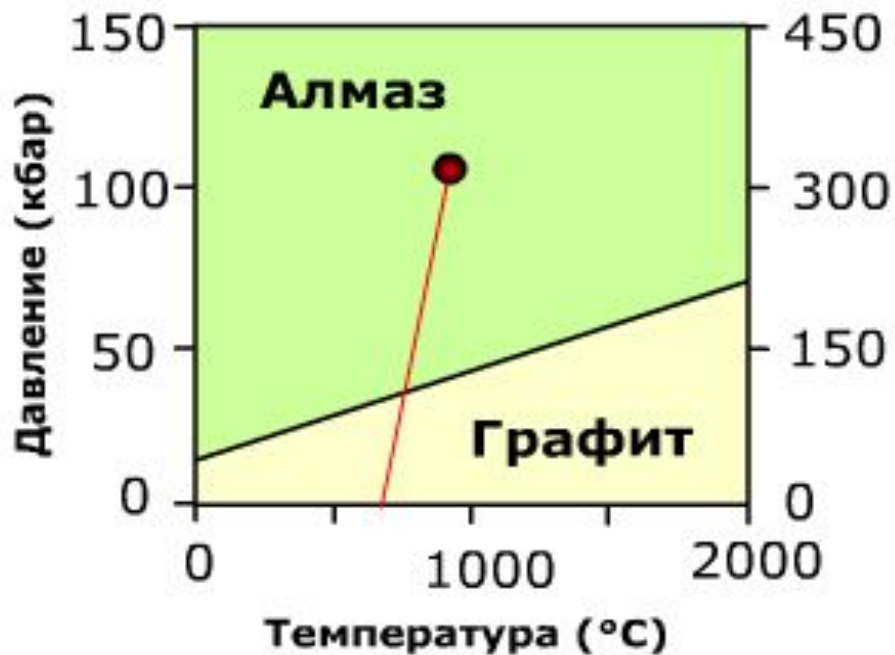
– алмаз. При давлении 1 атмосфера и температуре 700°C (красный кружок) атомы углерода образуют структуру графита. Серый прямоугольник на правой диаграмме представляет кристалл графита. На следующих слайдах показано превращение графита в алмаз.

# ФАЗОВАЯ ДИАГРАММА ДЛЯ УГЛЕРОДА



Кристалл графита погружен на глубину 130 км.  
На этой глубине кристалл испытывает давление  
около 40 кбар.

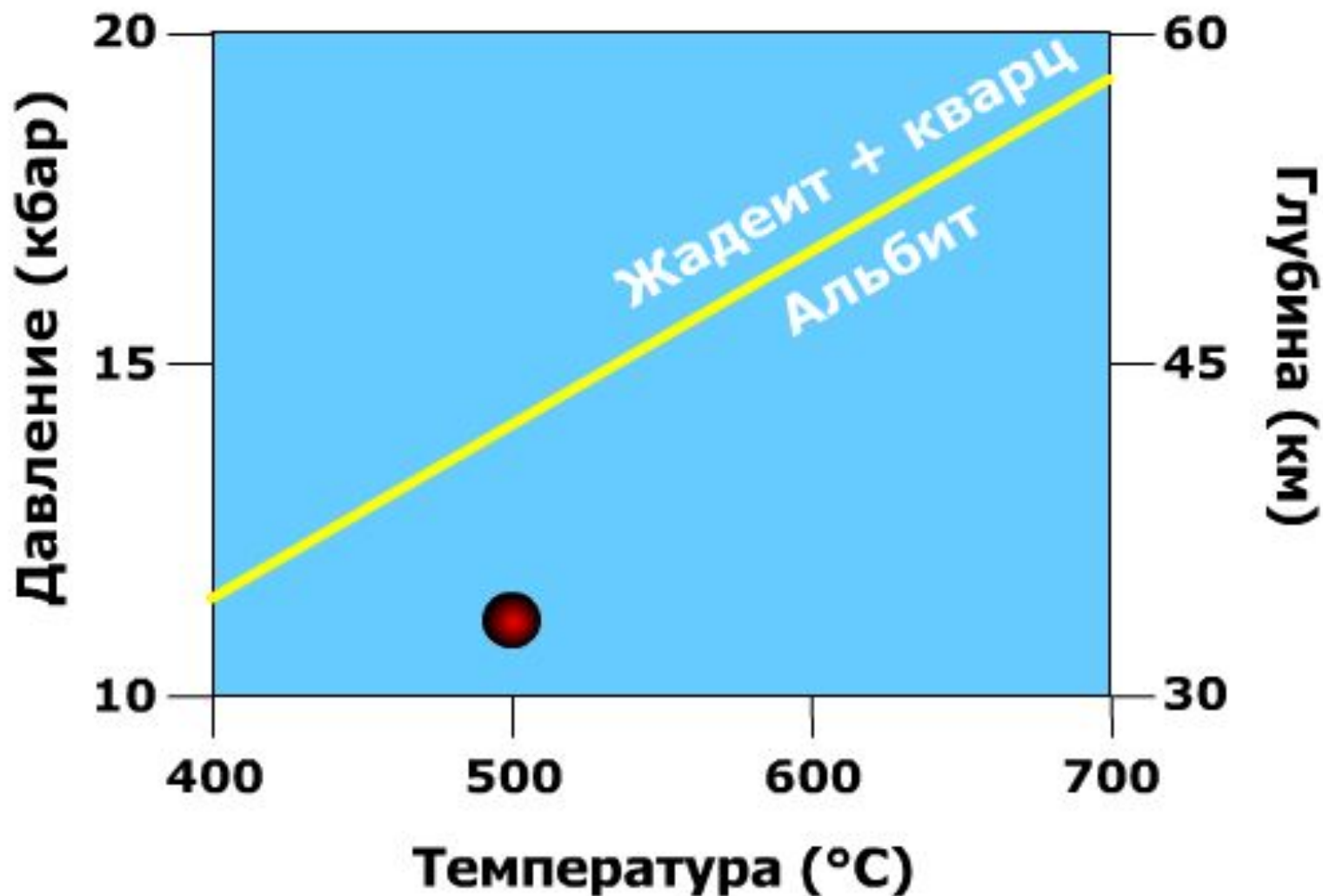
# ФАЗОВАЯ ДИАГРАММА ДЛЯ УГЛЕРОДА



Если давление будет расти, структура графита станет неустойчивой. Атомы углерода образуют структуру с более плотной упаковкой –

структуру алмаза. Превращение графита в алмаз это метаморфическая реакция, которая происходит при изменении давления.

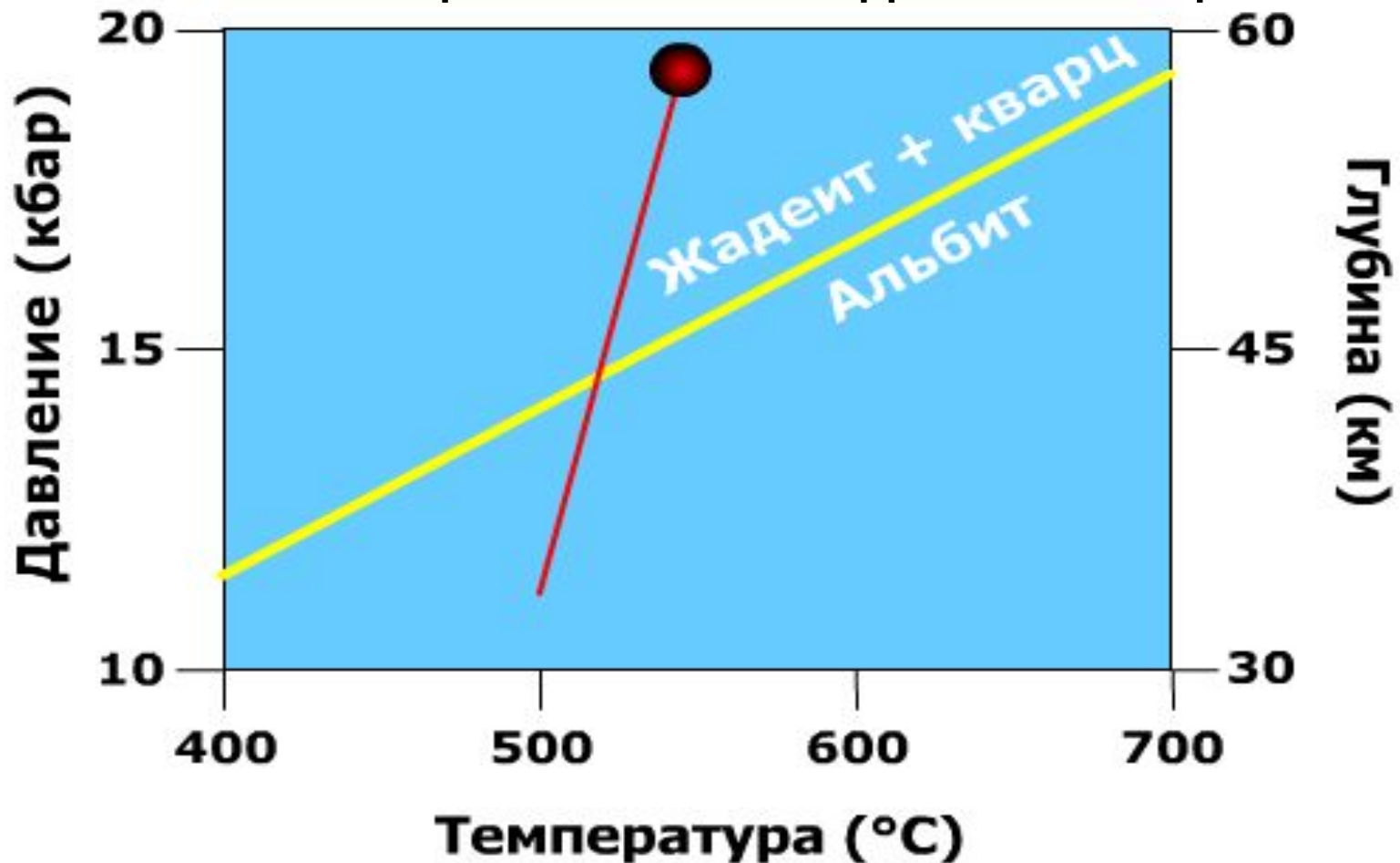
## РЕАКЦИЯ АЛЬБИТ = ЖАДЕИТ + КВАРЦ



В большинстве метаморфических реакций участвуют несколько минералов. Желтая линия на этой диаграмме показывает давления и температуры, при которых минералы альбит, жадеит и кварц находятся в состоянии

химического равновесия, то есть все минералы стабильны. При низких давлениях, на пример, при 11 кбар и 500°C (красный кружок), стабилен альбит, а жадеит не стабилен. Формула альбита **NaAlSi<sub>3</sub>O<sub>8</sub>**.

## РЕАКЦИЯ АЛЬБИТ = ЖАДЕИТ + КВАРЦ



Если альбит погружается на более глубокие горизонты коры, давление становится слишком высоким и его структура становится неустойчивой. В этом примере структура альбита разрушается на глубине 42 км при температуре 520°C. При этом происходит следующая реакция:

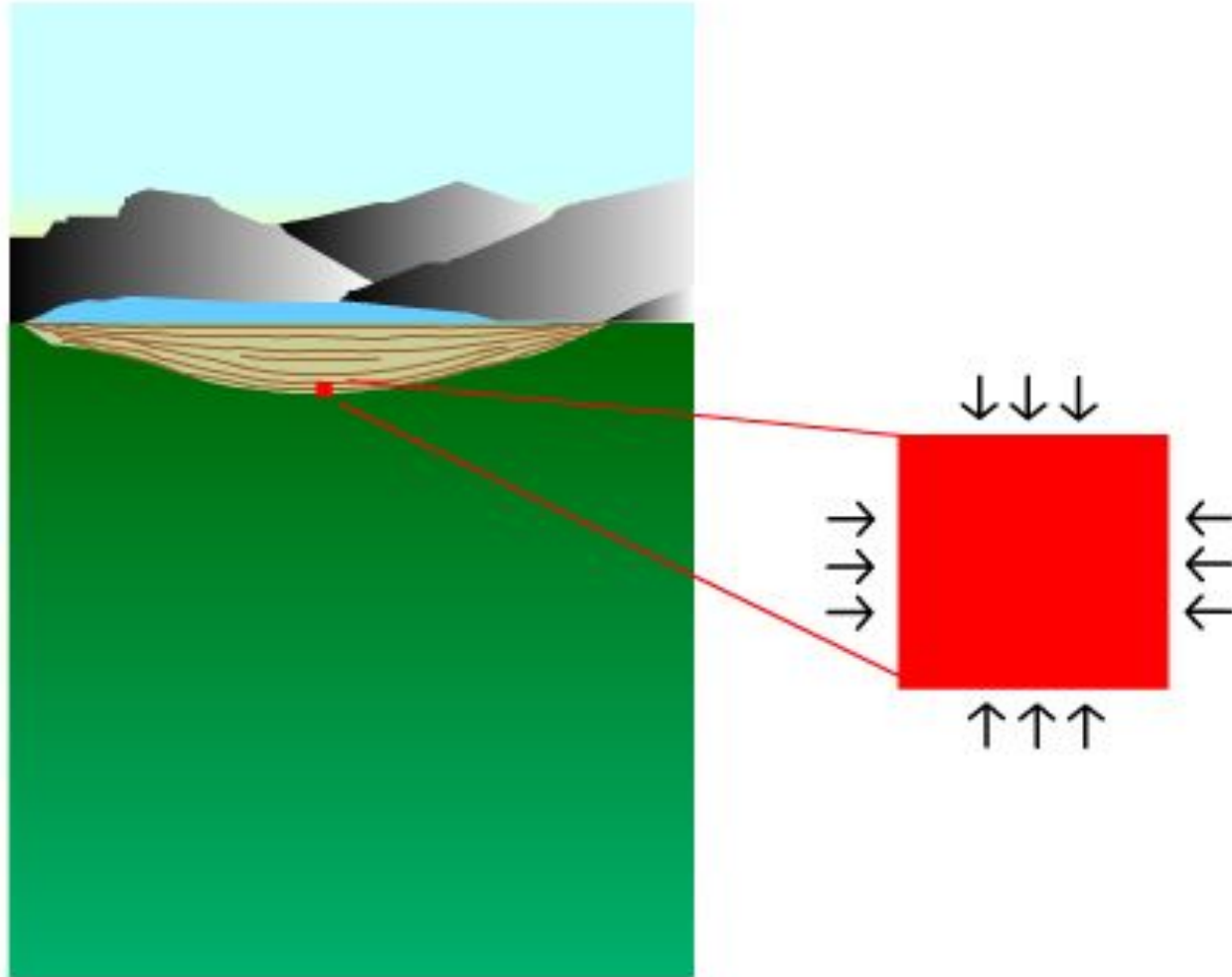


Или

### Альбит = Жадеит + Кварц

Реакция происходит потому, что для атомов Na, Al, Si и O при высоких давлениях энергетически более выгодно входить в структуру двух минералов: жадеита и кварца.

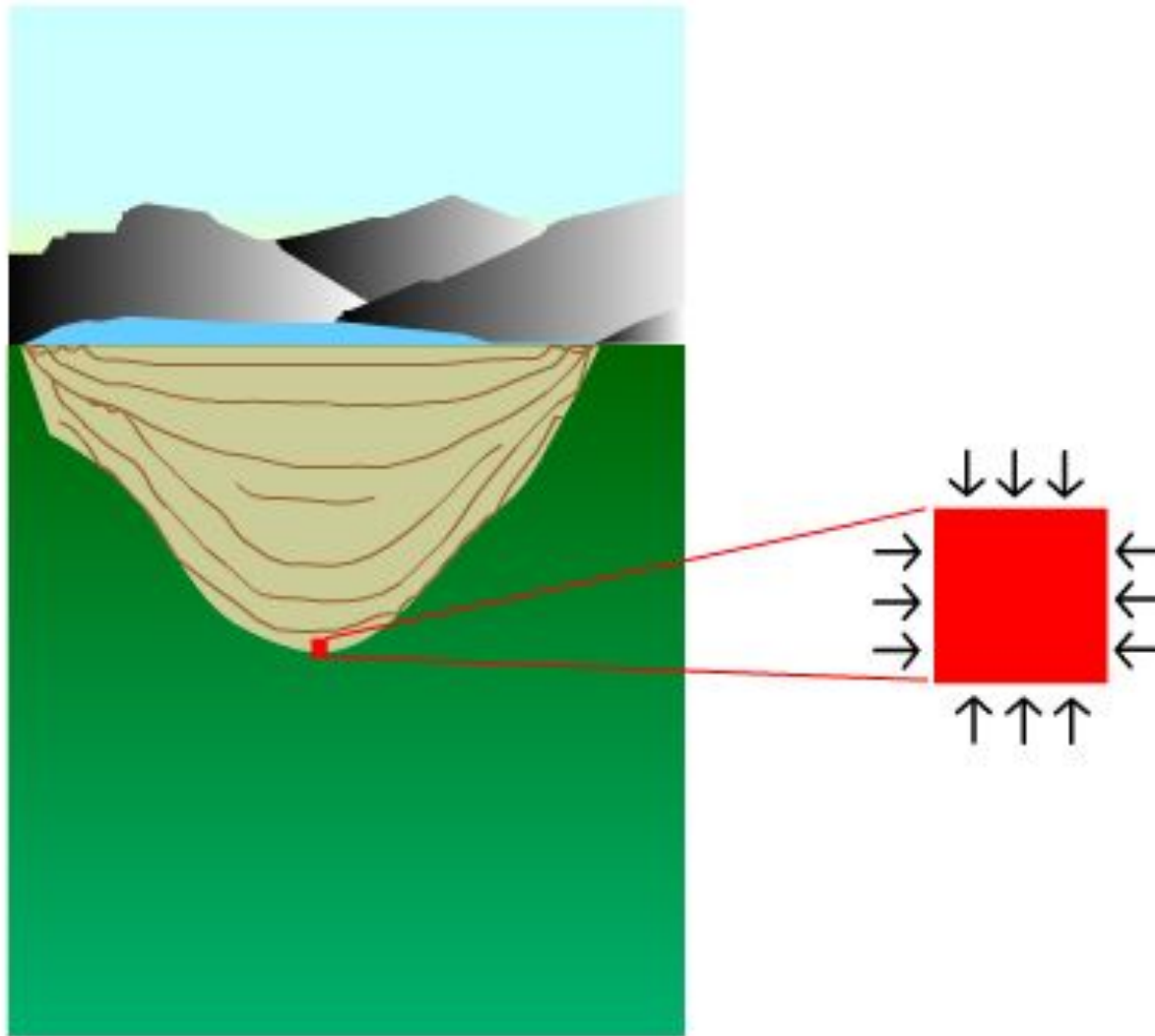
# Региональный метаморфизм – главный фактор ЛИТОСТАТИЧЕСКОЕ ДАВЛЕНИЕ



Ныряльщик, находящийся на глубине 50 м под поверхностью воды, испытывает давление соответствующее весу 50-метровой колонны воды. Силы, которые действуют на тело ныряльщика, одинаковы во всех направлениях. Такое давление называется литостатическим.

Подобным образом, порода погруженная на глубину 5 км испытывает литостатическое давление, соответствующее весу 5-км колонны горных пород, которое приблизительно равно  $13,500 \text{ кг/см}^2$ .

# ЛИТОСТАТИЧЕСКОЕ ДАВЛЕНИЕ



На дне мирового океана непрерывно накапливаются осадки. Через миллионы лет наиболее ранние слои осадков оказываются погребены под многокилометровой толщей более

поздних осадков. Давление, которое действует на осадки, увеличивается с глубиной их захоронения. Увеличение давления приводит к сжатию осадков.

# НАПРАВЛЕННОЕ ДАВЛЕНИЕ



**Однородная порода**



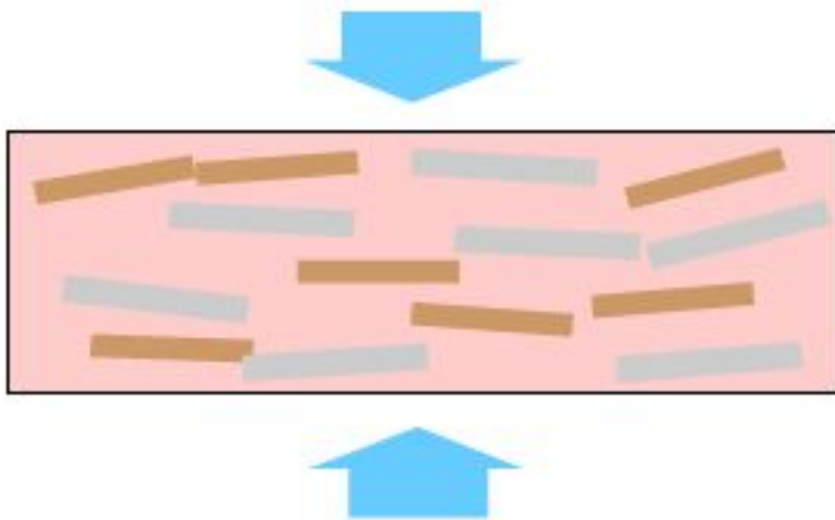
Гранит

Направленное давление связано с силой, действующей в определенном направлении. Направленное давление приводит к деформации горных пород. Если массивная однородная

порода подвергается действию направленного давления, она приобретает гнейсовидную или сланцеватую структуру, как показано на следующих слайдах.



# НАПРАВЛЕННОЕ ДАВЛЕНИЕ



**Гнейсовидная порода**



Гранит



Гранито-гнейс

Серые и коричневые фигуры на левом рисунке представляют удлиненные зерна минералов в первоначально однородной породе. Когда порода подвергается направленному давлению, минералы, которые образуют удлиненные кристаллы, располагаются в породе под прямым углом к направлению давления. В результате

порода приобретает директивную (гнейсовидную или сланцеватую) структуру. На фотографии справа образец гранито-гнейса. Такие породы образуются, когда гранит подвергается действию направленного давления.

# НАПРАВЛЕННОЕ ДАВЛЕНИЕ



На этой фотографии смятый в складки прослой кварцита в гранат-сланцевом сланце. Складки образуются в результате действия

направленного давления, как показано на следующих слайдах.

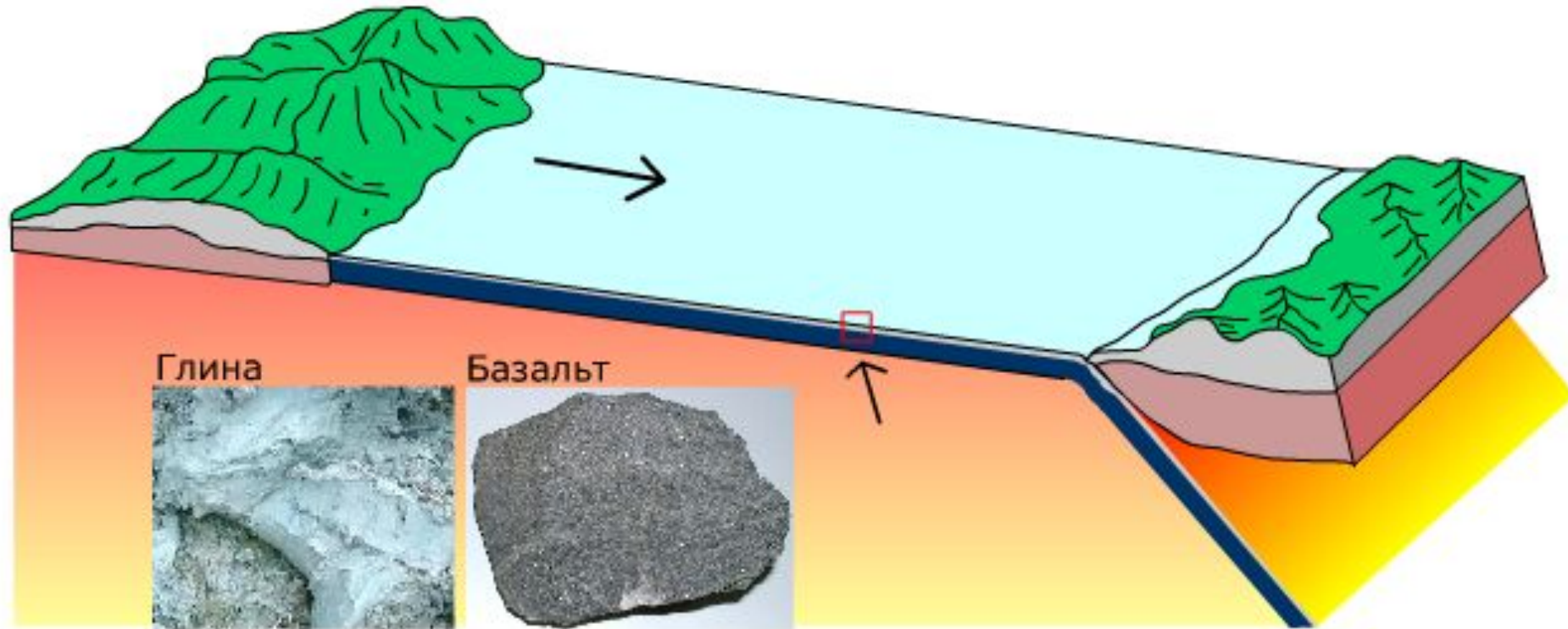
# НАПРАВЛЕННОЕ ДАВЛЕНИЕ



Когда порода подвергается действию направленного давления (или сжатию) она деформируется. В результате деформации образуются складки. О формировании складок и

других структур, связанных с деформацией рассказывает модуль Деформации горных пород – структурная геология.

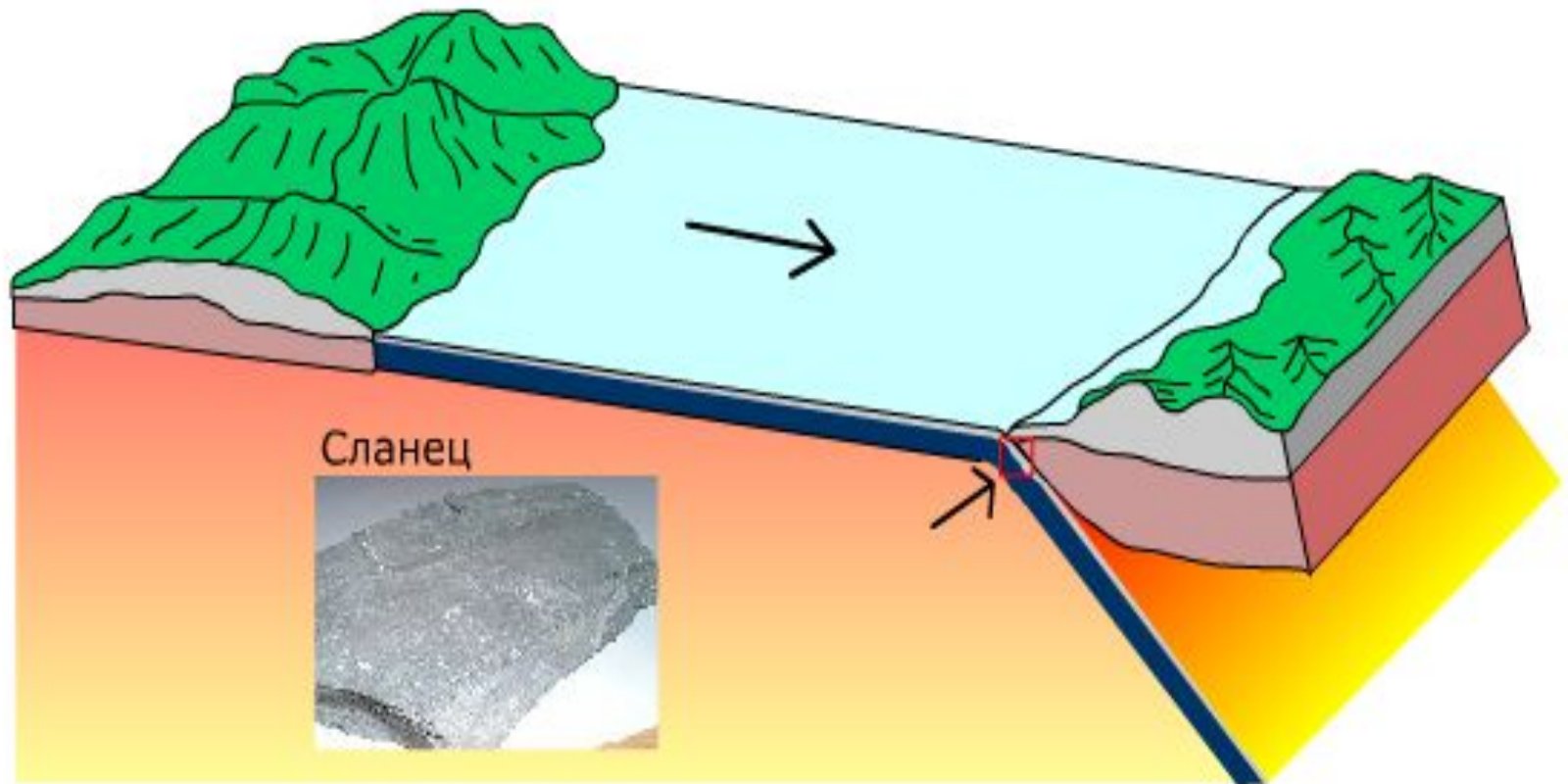
# РЕГИОНАЛЬНЫЙ МЕТАМОРФИЗМ



Метаморфизм, который затрагивает крупные блоки земной коры, называется региональным. В зонах субдукции крупные блоки океанической коры погружаются на большие глубины. В результате увеличения температуры и давления субдуцирующая кора подвергается метаморфизму. Верхняя часть океанической

коры сложена базальтами. На базальтах обычно залегают глубокоководные осадки. На этой анимации показаны метаморфические преобразования глины и базальта, при их погружении на большие глубины в зонах субдукции.

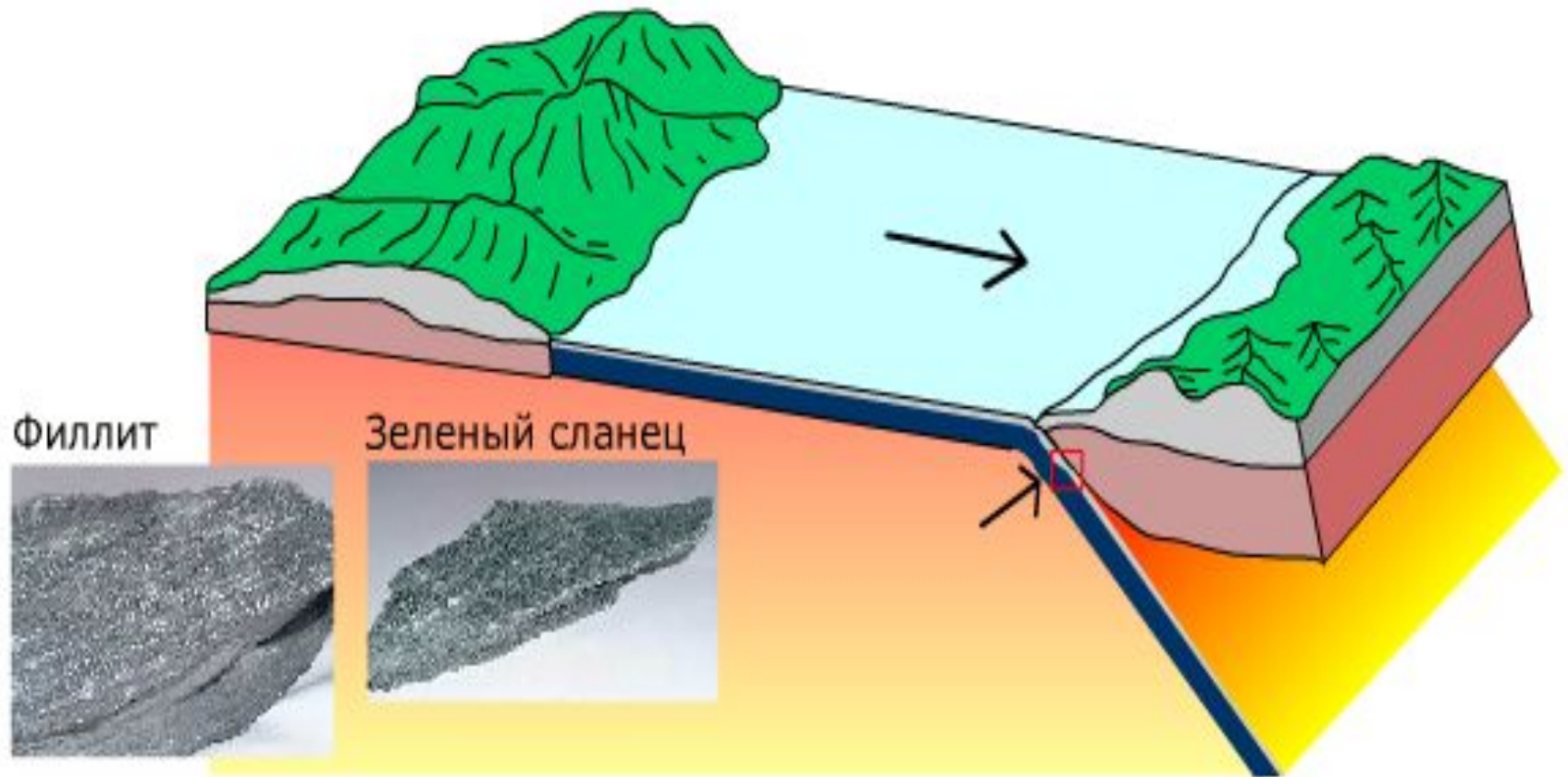
# РЕГИОНАЛЬНЫЙ МЕТАМОРФИЗМ



На глубинах 4-5 км глины подвергаются слабому метаморфизму, который называется диагенезом.

В результате диагенеза глина превращается в сланец.

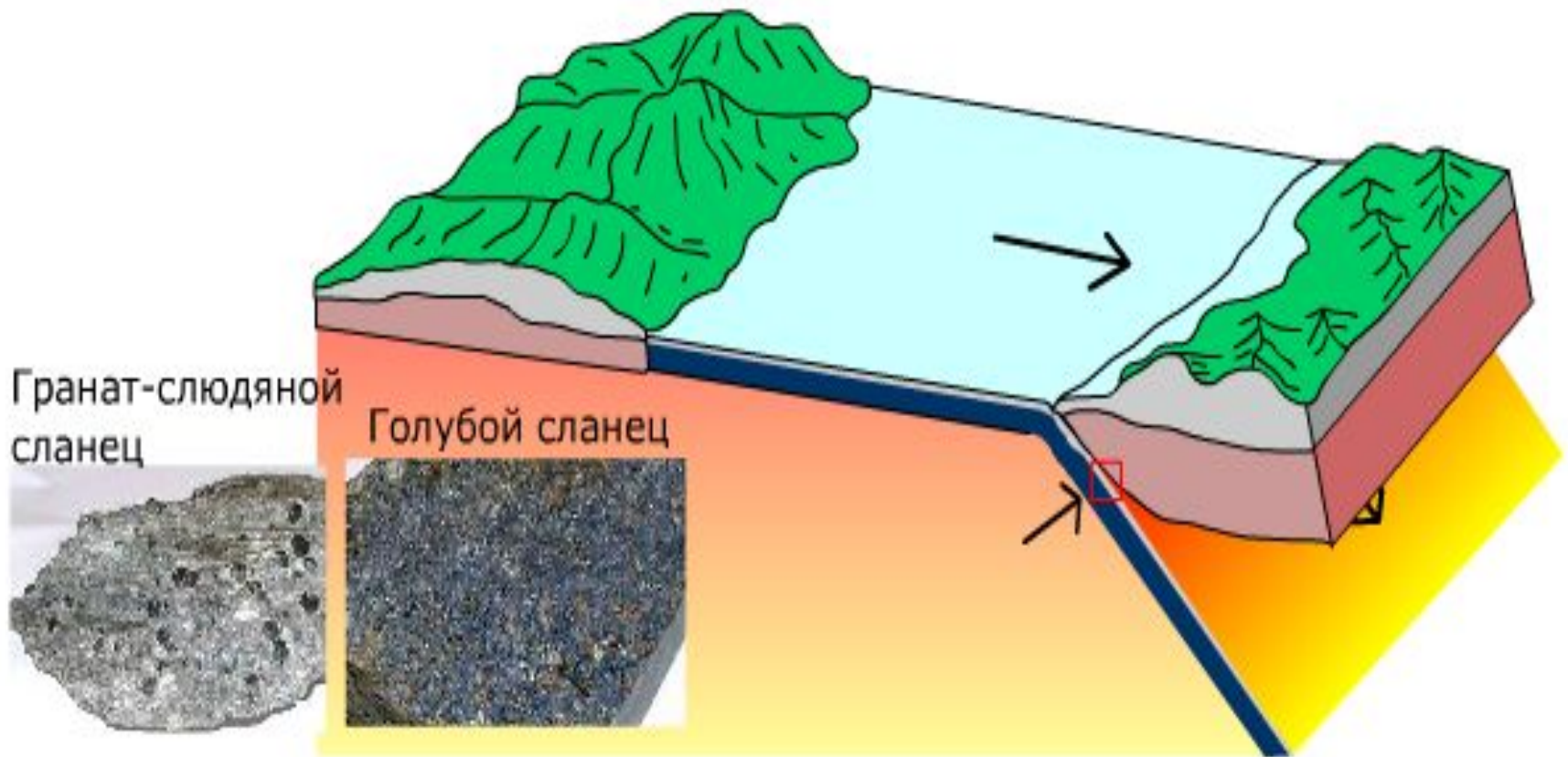
# РЕГИОНАЛЬНЫЙ МЕТАМОРФИЗМ



Когда породы погружаются на глубины 5-10 км, они подвергаются дальнейшим метаморфическим преобразованиям. Базальт

превращается в зеленый сланец, а сланец превращается в филлит. Такой метаморфизм называется метаморфизмом низких ступеней.

# РЕГИОНАЛЬНЫЙ МЕТАМОРФИЗМ



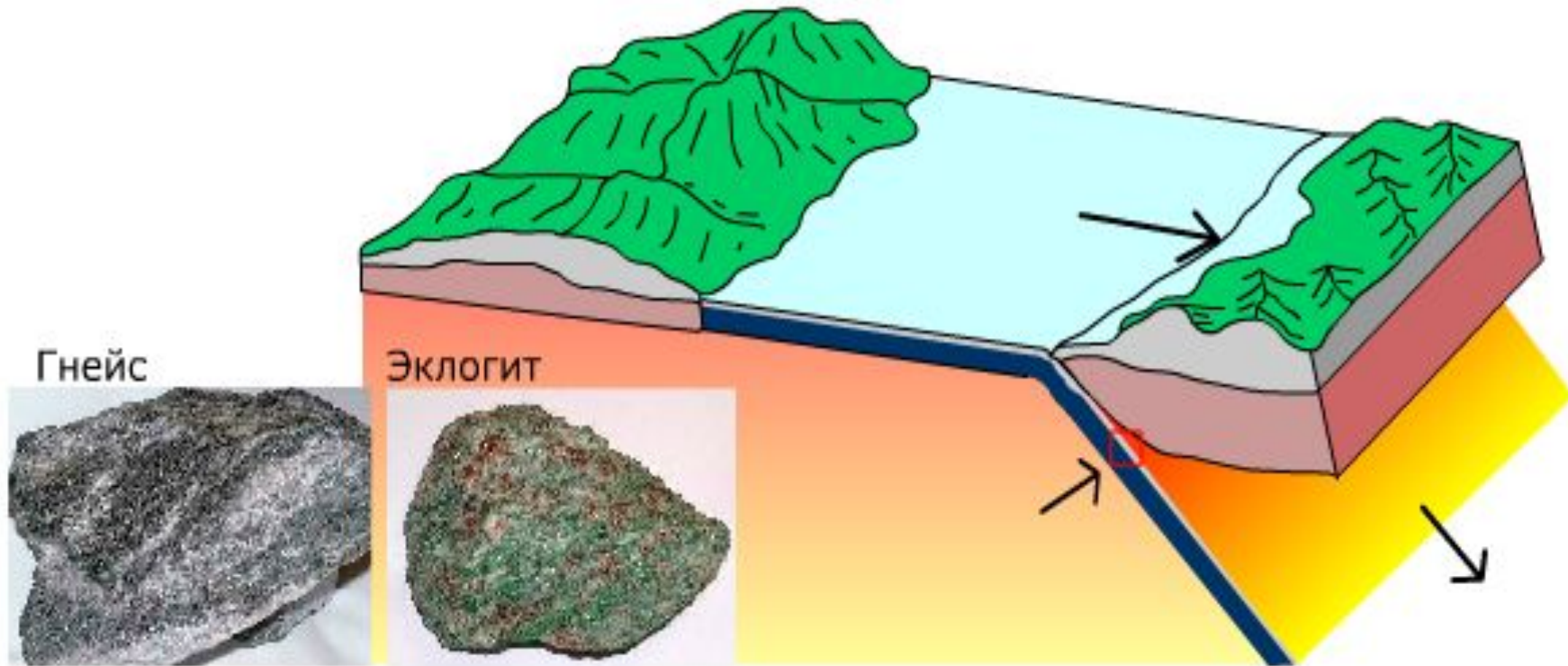
Гранат-слюдяной  
сланец

Голубой сланец

На глубине 10-20 км породы продолжают подвергаться метаморфическим преобразованиям. Зеленый сланец

превращается в голубой сланец, а филлит – в гранат-слюдяной сланец. Такой метаморфизм называется метаморфизмом средних ступеней.

# РЕГИОНАЛЬНЫЙ МЕТАМОРФИЗМ



Гнейс

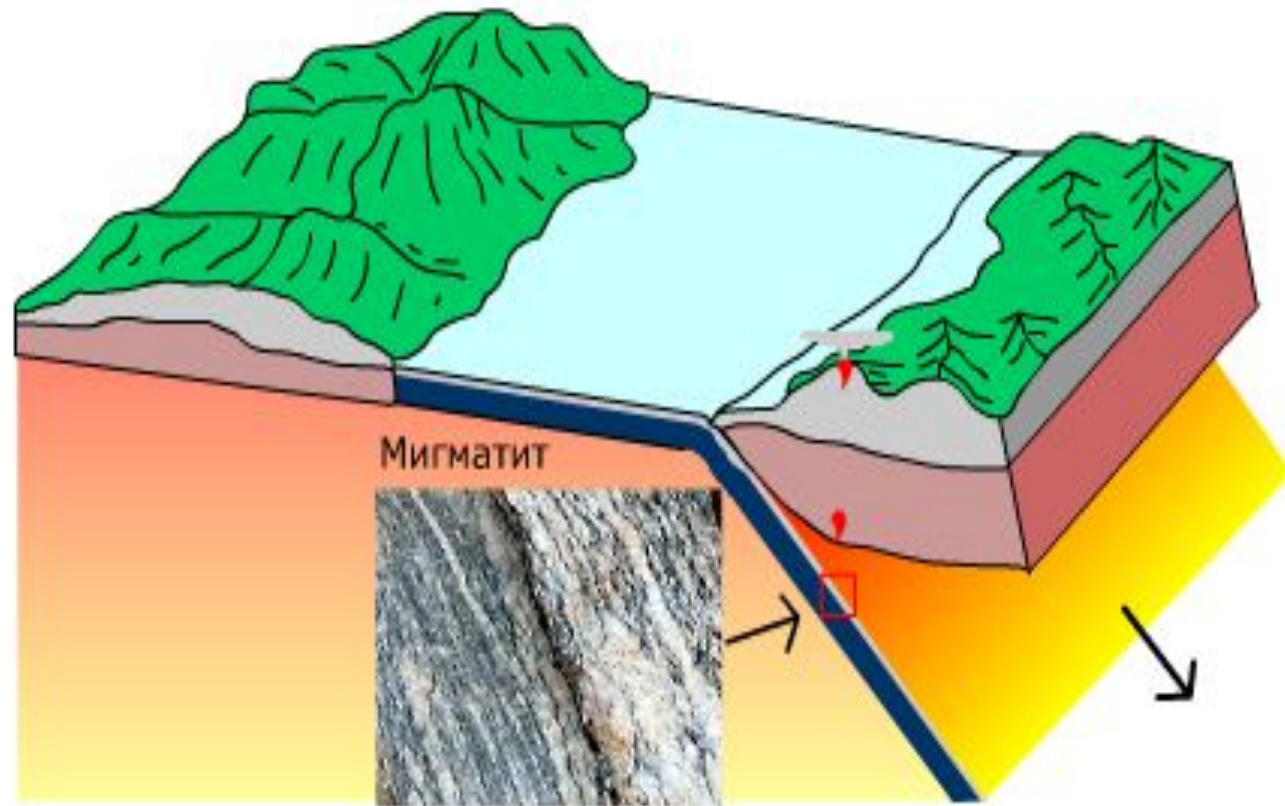
Эклогит



На глубине около 20 км гранат-сланцев превращается в гнейс. На глубине около 40 км голубой сланец превращается в эклогит.

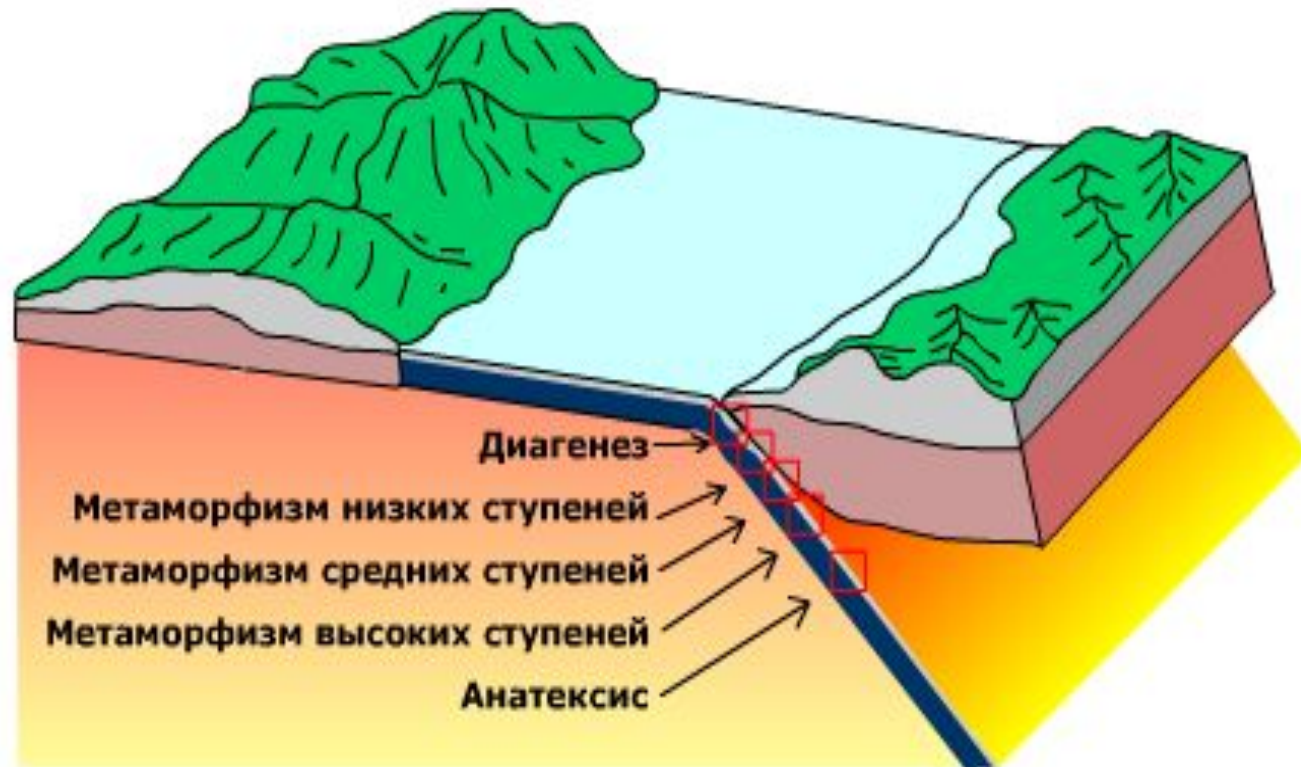


# РЕГИОНАЛЬНЫЙ МЕТАМОРФИЗМ



Если породы погружаются на большие глубины, они начинают плавиться. Породы, прошедшие стадию частичного плавления, называются мигматитами.

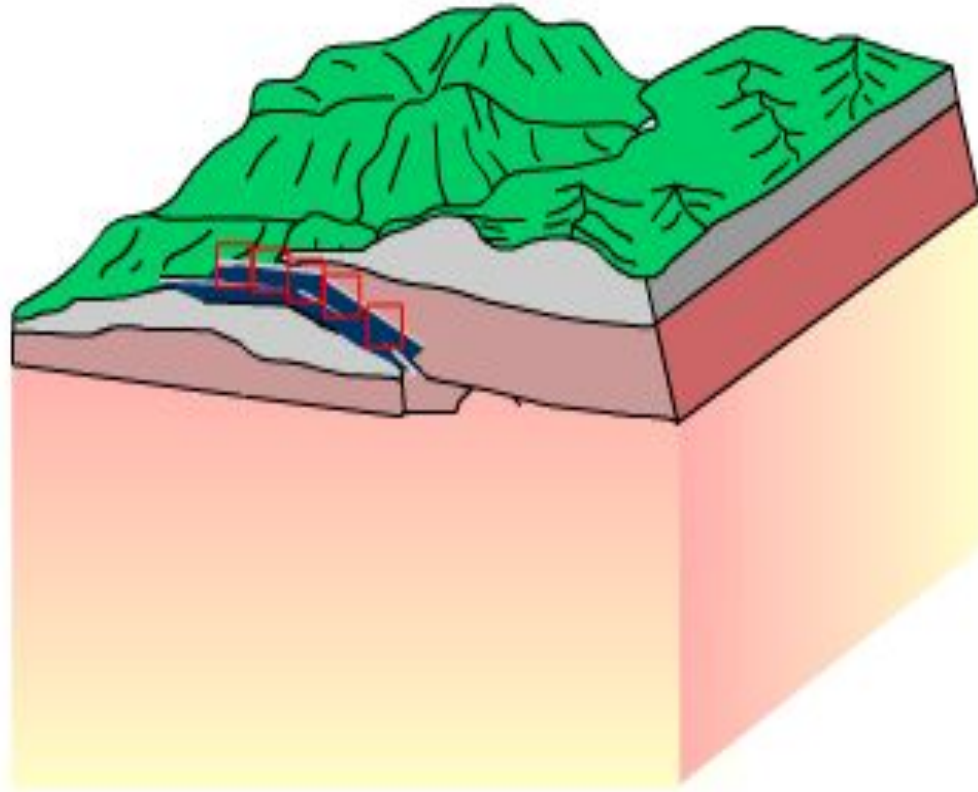
# РЕГИОНАЛЬНЫЙ МЕТАМОРФИЗМ



На этом рисунке показано, как степень метаморфизма повышается с глубиной в зоне субдукции. В верхних частях зоны субдукции породы проходят стадию диагенеза и подвергаются метаморфизму низких ступеней.

Степень метаморфизма повышается с глубиной, пока породы не начнут подвергаться анатексису (то есть, частичному плавлению – см. модуль Магматизм и магматические породы).

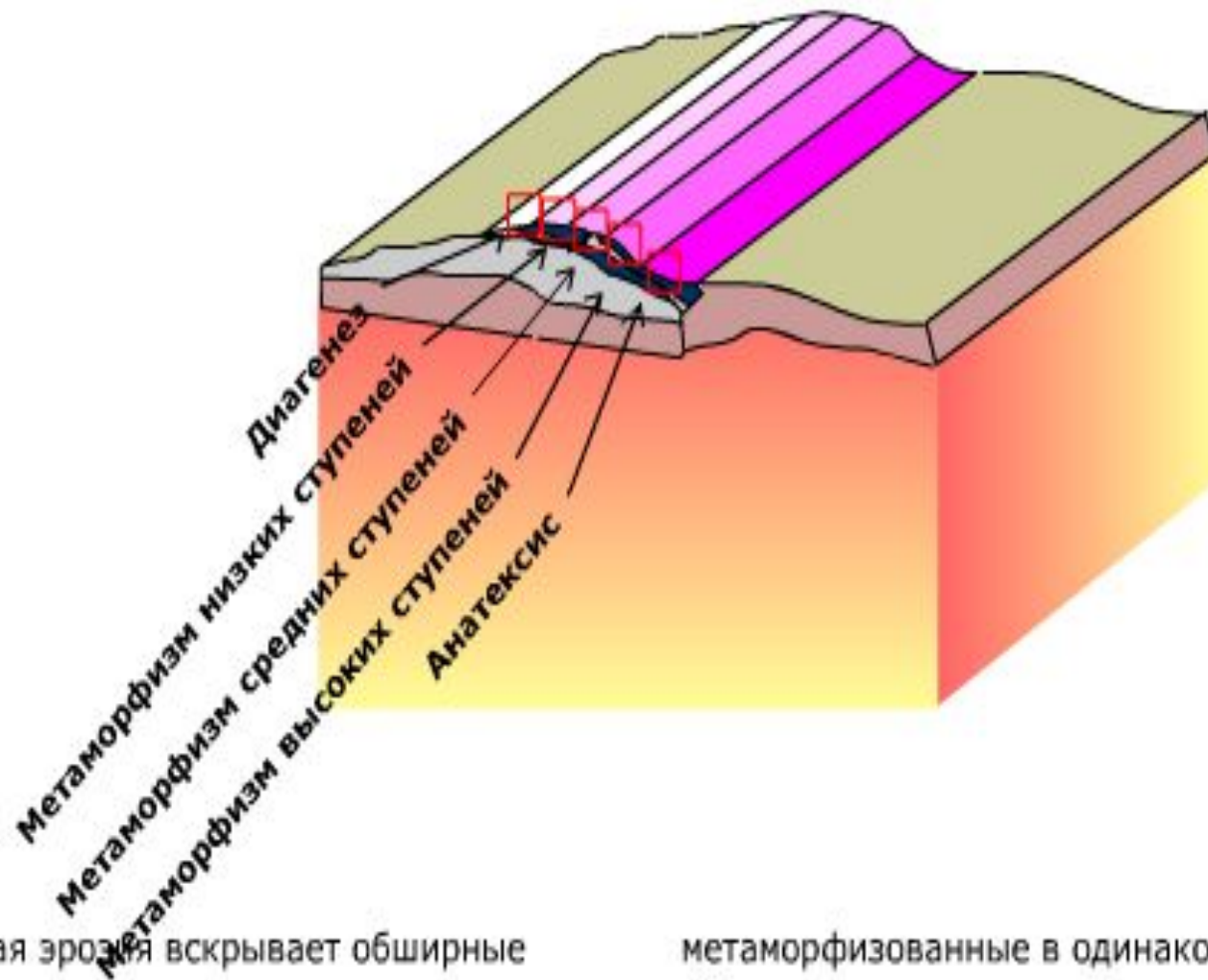
# РЕГИОНАЛЬНЫЙ МЕТАМОРФИЗМ



На этой анимации показано, как породы испытавшие региональный метаморфизм в глубинах земной коры могут оказаться на поверхности через миллионы лет после этого.

При континентальной коллизии глубоко погруженные породы могут быть надвинуты на менее глубинные породы.

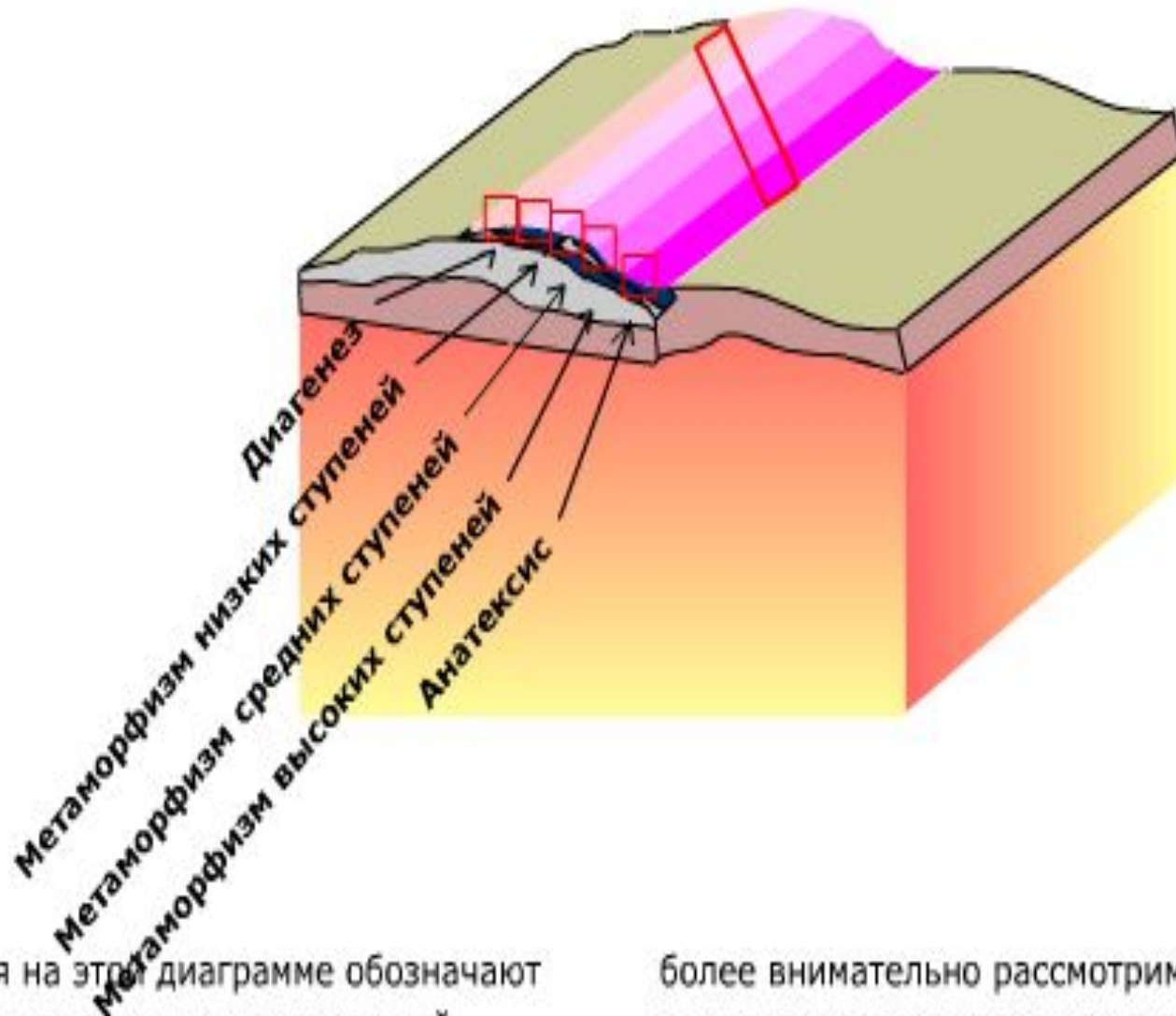
# РЕГИОНАЛЬНЫЙ МЕТАМОРФИЗМ



Последующая эрозия вскрывает обширные площади, сложенные породами, которые миллионы лет до этого испытали региональный метаморфизм в зонах субдукции. Породы

метаморфизованные в одинаковых условиях обычно слагают серию параллельных зон, например характерна зональность от метаморфизма низких до средних ступеней.

# ИНДЕКС МИНЕРАЛЫ или типоморфные минералы



Диagenез  
Метаморфизм низких ступеней  
Метаморфизм средних ступеней  
Метаморфизм высоких ступеней  
Анатексис

Розовые поля на этой диаграмме обозначают блоки коры, испытавшие региональный метаморфизм в зоне субдукции. Теперь давайте

более внимательно рассмотрим породы, которые находятся в пределах красного прямоугольника.

# ИНДЕКС МИНЕРАЛЫ – ТИПОМОРФНЫЕ МИНЕРАЛЫ

Метаморфизм низких ступеней

**200°С**

Метаморфизм средних ступеней

Метаморфизм высоких ступеней

**800°С**



Сланец



Филлит



Гранат-слюдяной  
сланец



Гнейс



Мигматит

На этом рисунке пять разных горных пород, которые образуются при метаморфизме глин. Глинистые осадки также называют пелитовыми. Сланец (на фото слева) это осадочная горная порода, которая образуется из глины в результате диагенеза (начальной стадии

метаморфизма). Справа от сланца показаны породы последовательно образующиеся из глины в результате метаморфизма все более высоких ступеней: филлит, гранат-слюдяной сланец, гнейс и мигматит.

# Индекс (или типоморфные) минералы

- Минералы, образующиеся лишь в определенном диапазоне физико-химических условий (Т, Р, и др.) и характерные для пород, которые возникли при конкретных условиях.
- Т.е. по ним можно делать выводы об условиях образования горных пород.

# ИНДЕКС МИНЕРАЛЫ

Метаморфизм низких ступеней

**200°C**

Метаморфизм средних ступеней

Метаморфизм высоких ступеней

**800°C**

Кварц



Сланец



Филлит



Гранат-сланец



Гнейс



Мигматит

Давайте рассмотрим подробнее минеральный состав этих метаморфических пород. Некоторые минералы, например кварц, стабильны в широком диапазоне температур. Поэтому все

горные породы на этих фотографиях содержат кварц. Следовательно, присутствие кварца в породе не несет информации о температурных условиях ее образования.



# ИНДЕКС МИНЕРАЛЫ

Метаморфизм низких ступеней

**200°C**

Метаморфизм средних ступеней

Метаморфизм высоких ступеней

**800°C**

Кварц

Полевой шпат



Сланец



Филлит



Гранат-слюдяной  
сланец



Гнейс

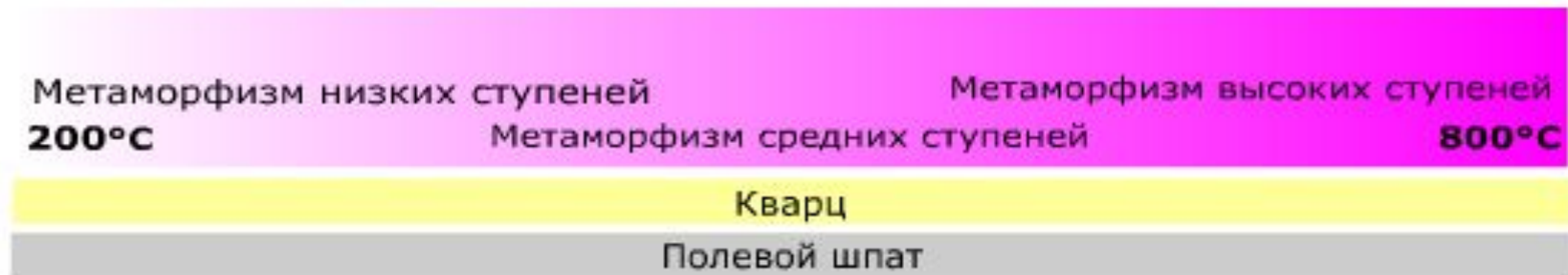


Мигматит

Полевой шпат, подобно кварцу, также стабилен в широком диапазоне температур. И присутствие в породе полевого шпата, также как присутствие кварца, не несет информацию о температурных условиях ее образования. Однако, некоторые минералы стабильны в ограниченном диапазоне температур. Эти минералы – хлорит, мусковит,

биотит, гранат, ставролит и силлиманит. Следующие слайды рассказывают, как с помощью этих минералов можно установить температуру метаморфических преобразований горной породы. Хлорит, мусковит, биотит, гранат, ставролит и силлиманит называются индекс минералами.

# ИНДЕКС МИНЕРАЛЫ



Chlorite



Slaneц



Филлит



Гранат-слюдяной  
сланец



Гнейс



Мигматит

В пелитовых осадках (то есть в осадках глинистого состава) хлорит стабилен только в условиях метаморфизма низких ступеней. Поэтому хлорит может использоваться в

качестве индекс минерала. Если хлорит присутствует в метаморфизованной пелитовой породе, можно сделать вывод, что эта порода испытала метаморфизм низких ступеней.

# ИНДЕКС МИНЕРАЛЫ

Метаморфизм низких ступеней

**200°C**

Метаморфизм средних ступеней

Метаморфизм высоких ступеней

**800°C**

Кварц

Полевой шпат

Хлорит

Мусковит



Сланец



Филлит



Гранат-слюдяной  
сланец



Гнейс

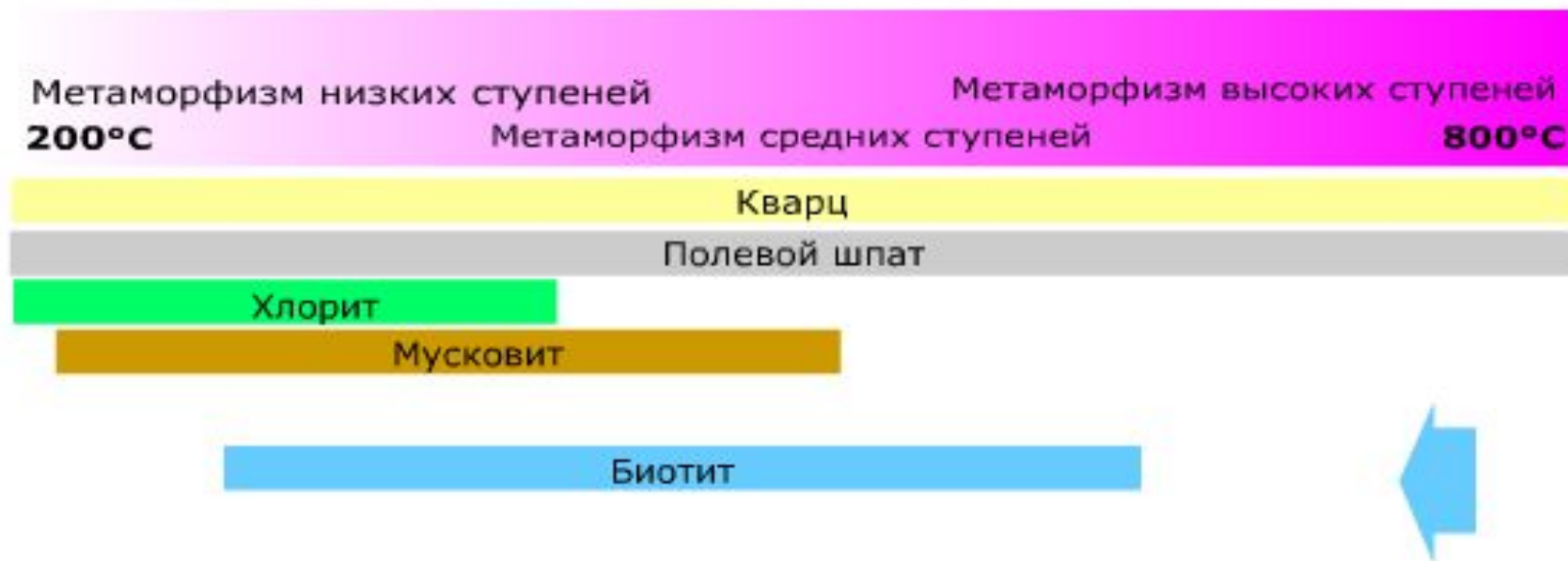


Мигматит



Следующий индекс минерал это мусковит. В пелитовых породах мусковит стабилен в условиях метаморфизма низких и средних ступеней.

# ИНДЕКС МИНЕРАЛЫ



Сланец



Филлит



Гранат-слюдяной  
сланец



Гнейс



Мигматит

Биотит не образуется в условиях метаморфизма низких ступеней. Однако в условиях метаморфизма средних ступеней в пелитовых породах биотит является характерным минералом.

# ИНДЕКС МИНЕРАЛЫ



Если в пелитовых породах присутствует гранат, можно сделать вывод, что эти породы испытали метаморфизм средних или высоких ступеней.

# ИНДЕКС МИНЕРАЛЫ



Сланец



Филлит



Гранат-сланец



Гнейс



Мигматит

Присутствие в пелитовых породах ставролита указывает на то, что они преобразованы в условиях метаморфизма средних или высоких ступеней.

# ИНДЕКС МИНЕРАЛЫ



Сланец



Филлит



Гранат-слюдяной сланец



Гнейс



Мигматит

Силлиманит также указывает на то, что пелитовая горная порода преобразована в условиях метаморфизма средних или высоких ступеней.

# ИНДЕКС МИНЕРАЛЫ



Красный прямоугольник подскажет вам ответ на этот вопрос. Если метаморфизованная пелитовая порода содержит кварц, полевои шпат, хлорит,

мусковит и гранат, значит она испытала метаморфизм низких-средних ступеней.



# ИНДЕКС МИНЕРАЛЫ



Сланец



Филлит



Гранат-слюдяной  
сланец



Гнейс



Мигматит

Следующий вопрос: Если метаморфизованная пелитовая порода содержит кварц, полевой

шпат, биотит, гранат, ставролит и силлиманит – каковы были условия ее метаморфизма?

# ИНДЕКС МИНЕРАЛЫ



Сланец



Филлит



Гранат-сланцевая  
сланец



Гнейс



Мигматит

Вероятно вы нашли правильный ответ: Если метаморфизованная пелитовая порода содержит кварц, полевой шпат, биотит, гранат, ставролит

и силлиманит, значит она испытала метаморфизм средних-высоких ступеней.

# РАЗМЕР ЗЕРЕН



Увеличение размера зерен



Сланец



Филлит



Гранат-слюдяной  
сланец



Гнейс



Мигматит

**Мелкозернистая структура**

**Крупнозернистая структура**

Горные породы низких ступеней метаморфизма, например филлит, обычно имеют мелкозернистую структуру. Однако, с увеличением степени метаморфизма, породы

обычно становятся более крупнозернистыми. Породы высоких ступеней метаморфизма обычно имеют крупнозернистую структуру.

# Минералы метаморфических пород

*минералы, устойчивые в условиях высоких температур и давлений:*

- Много минералов, которые характерны для магматических пород: кварц, полевые шпаты, слюды, роговая обманка, пироксен (авгит), магнетит*
- кальцит – минерал обычно осадочных пород*
- собственно-метаморфические - типоморфные минералы*

# типоморфные метаморфические минералы

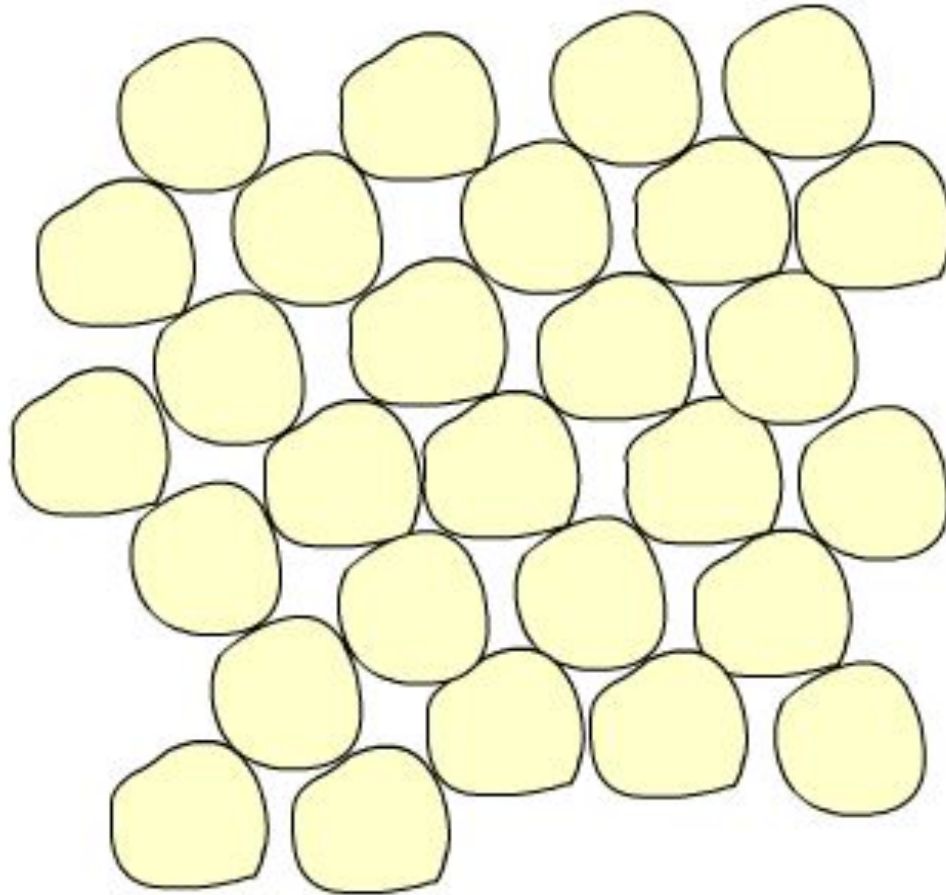
минералы, характерные только для метГП:

- серицит (тонкочешуйчатый мусковит);
- хлорит –  $(\text{Mg,Fe})_5\text{Al}(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH})_8$ ;
- тальк –  $\text{Mg}_3(\text{Si}_4\text{O}_{10})(\text{OH})_8$ ;
- серпентин (хризотил, антигорит) –  $(\text{Mg,Fe})_3(\text{Si}_2\text{O}_5)(\text{OH})_4$ ;
- гранат (например, альмандин –  $\text{Fe}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_4)_3$  и андрадит –  $\text{Ca}_3\text{Fe}_2(\text{SiO}_4)_3$ );
- эпидот –  $\text{Ca}_2(\text{Al,Fe}^{3+})_3(\text{SiO}_4)_3(\text{OH})$ ;
- андалузит, силлиманит, кианит –  $\text{Al}_2\text{SiO}_5$ ;
- кордиерит –  $\text{Mg}_2\text{Al}_4\text{Si}_5\text{O}_{18}$ , и др.

# Метаморфизм изохимический

в процессе метаморфизма породы изменяется количество  $\text{H}_2\text{O}$  и  $\text{CO}_2$ , при неизменном содержании других компонентов, часто с изменением минерального состава

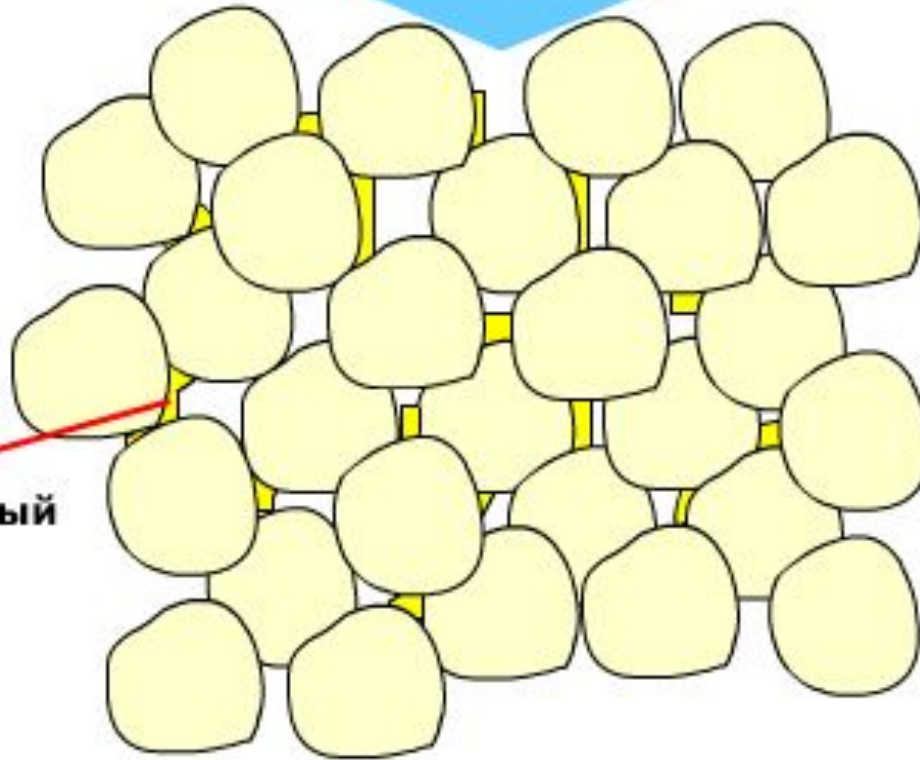
# ОТ КВАРЦЕВОГО ПЕСКА ДО КВАРЦИТА



Теперь давайте рассмотрим, как кварцевый песок превращается в метаморфическую породу, которая называется кварцит. На этом рисунке желтым показаны зерна кварца, составляющие кварцевый песок. Если вы посмотрите на

кварцевый песок через бинокляр, вы увидите, что между песчинками достаточно много незаполненного пространства. Это незаполненное пространство определяет пористость песка.

# ОТ КВАРЦЕВОГО ПЕСКА ДО КВАРЦИТА



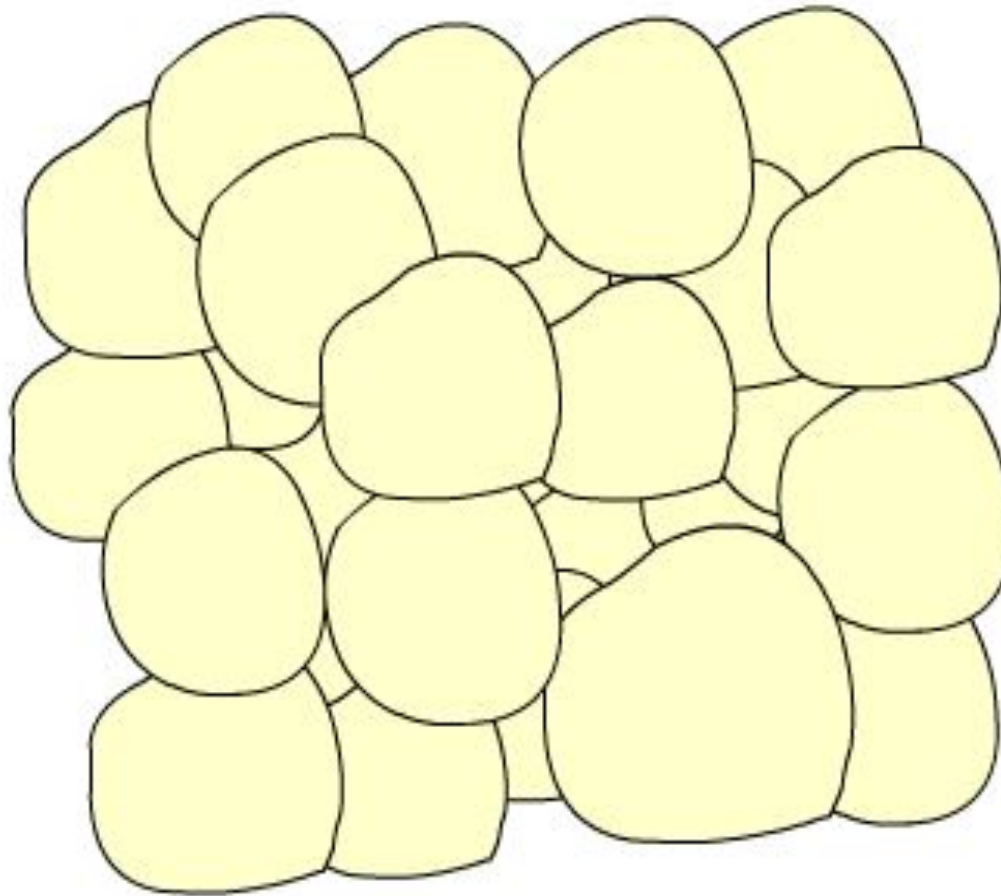
**Новообразованный  
кварц**

По мере накопления вышележащих осадков, давление, которому подвергается кварцевый песок, увеличивается. Это ведет к уплотнению и диагенезу песка. При уплотнении часть материала кварцевых зерен в местах их соприкосновения друг с другом растворяется и

переотлагается с образованием нового кварца, заполняющего пустое пространство между зернами. Переотложенный материал служит цементом, который связывает песчинки друг с другом. Таким образом, песок превращается в песчаник.



## ОТ КВАРЦЕВОГО ПЕСКА ДО КВАРЦИТА



При более высоких температурах и давлениях отдельные зерна продолжают расти за счет других. Размер зерен увеличивается, а их количество уменьшается. В результате этого процесса образуется крупнозернистая

метаморфическая порода – кварцит. Обратите внимание на то, что поскольку первоначальная порода состояла только из кварца, то есть чистого  $\text{SiO}_2$ , никаких других минералов при метаморфизме не образуется.

# Кварцит

**Кварциты** – массивные плотные явно-мелко-средне-кристаллические породы, состоящие, главным образом, из **кварца**.

**Цвет** – преимущественно серый, но встречаются розовые, красные, желтые и черные (с примесью углистого вещества) кварциты. Образование их связано с метаморфизмом кварцевых песчаников или других кремнистых пород

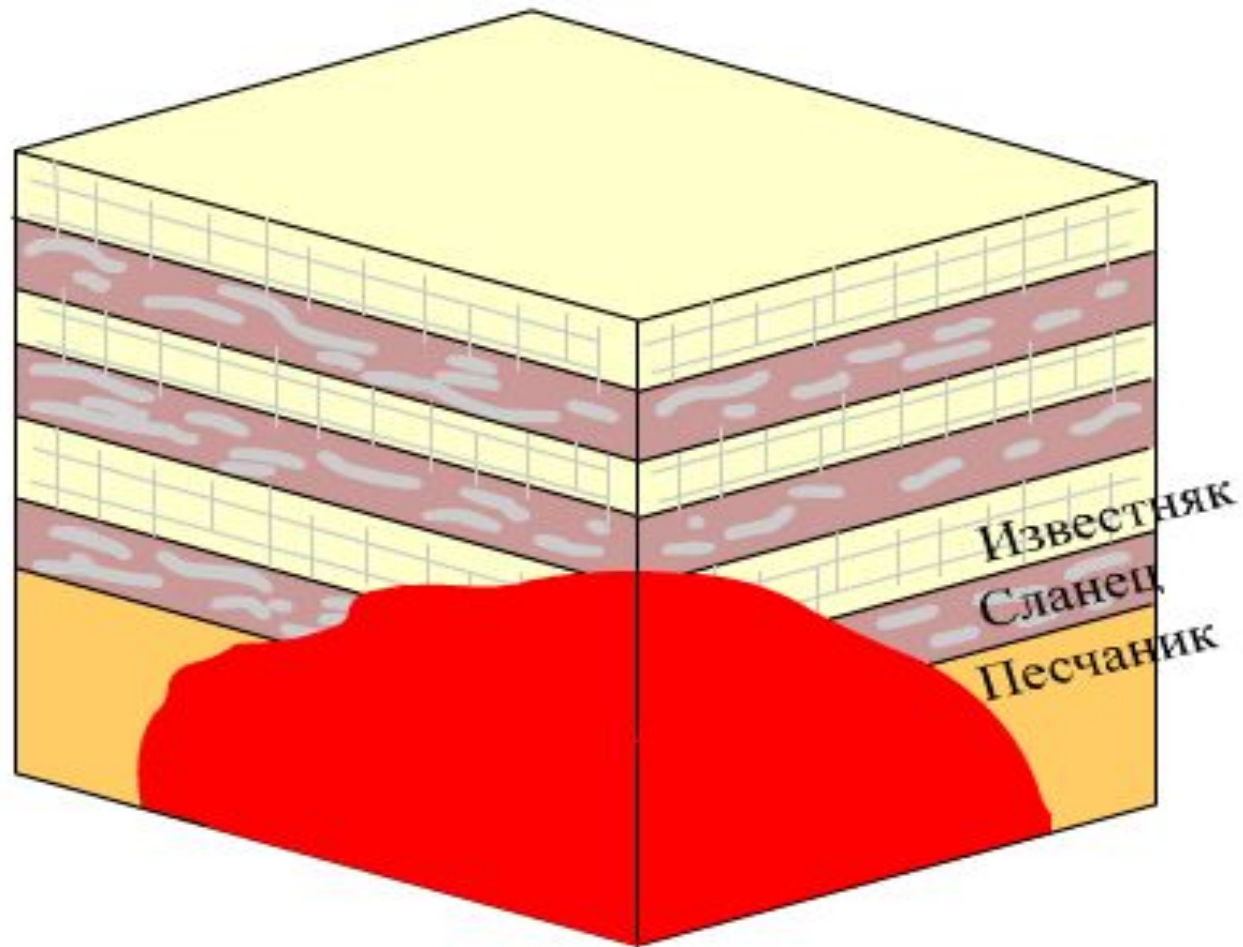
# Розовый кварцит



# Желтый кварцит



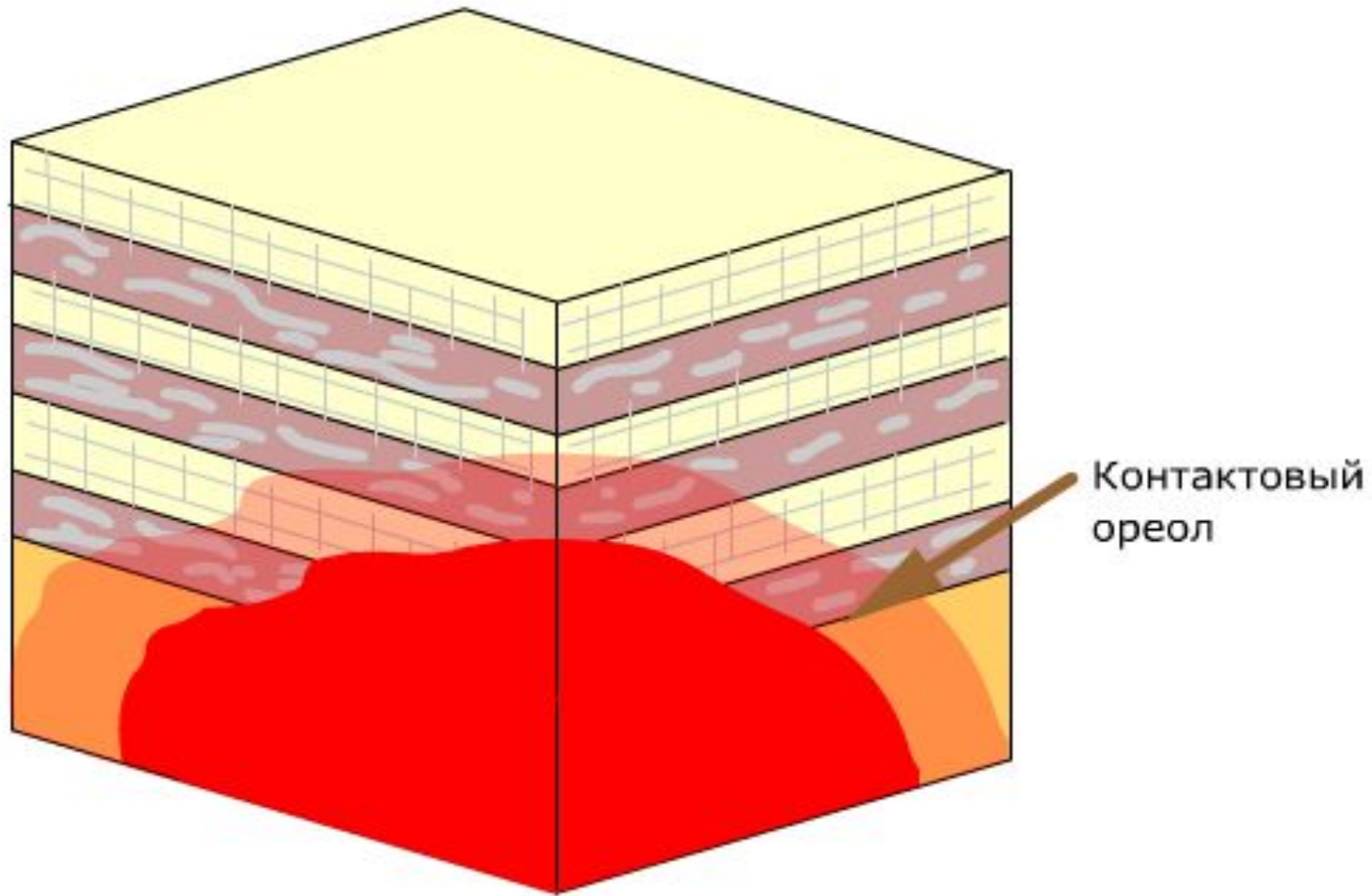
# КОНТАКТОВЫЙ МЕТАМОРФИЗМ



На этой анимации показано внедрение магмы в слоистые осадочные породы. До внедрения магмы температура осадочных пород была около 150 °С. Температура магмы 800 °С. Не удивительно, что осадочные породы нагреваются при внедрении магмы. При нагревании осадочные породы подвергаются

метаморфизму. Этот тип метаморфизма называется контактовым. При контактовом метаморфизме метаморфические преобразования вызываются увеличением температуры, тогда как давление остается постоянным.

# КОНТАКТОВЫЙ МЕТАМОРФИЗМ

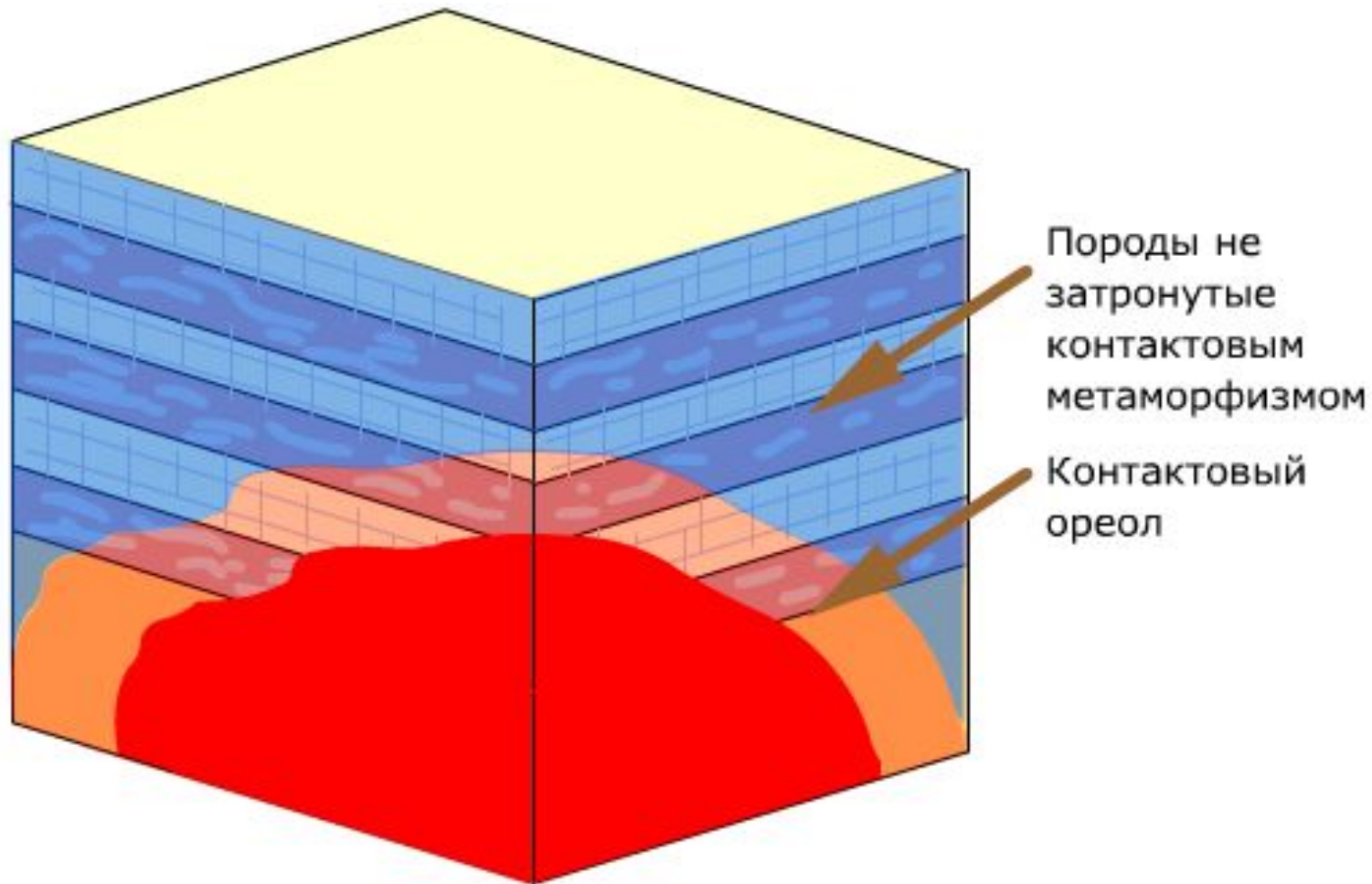


Контактный  
ореол

Горячая магма прогревает вмещающие породы. Зона, в которой вмещающие породы подверглись нагреву, называется контактовым

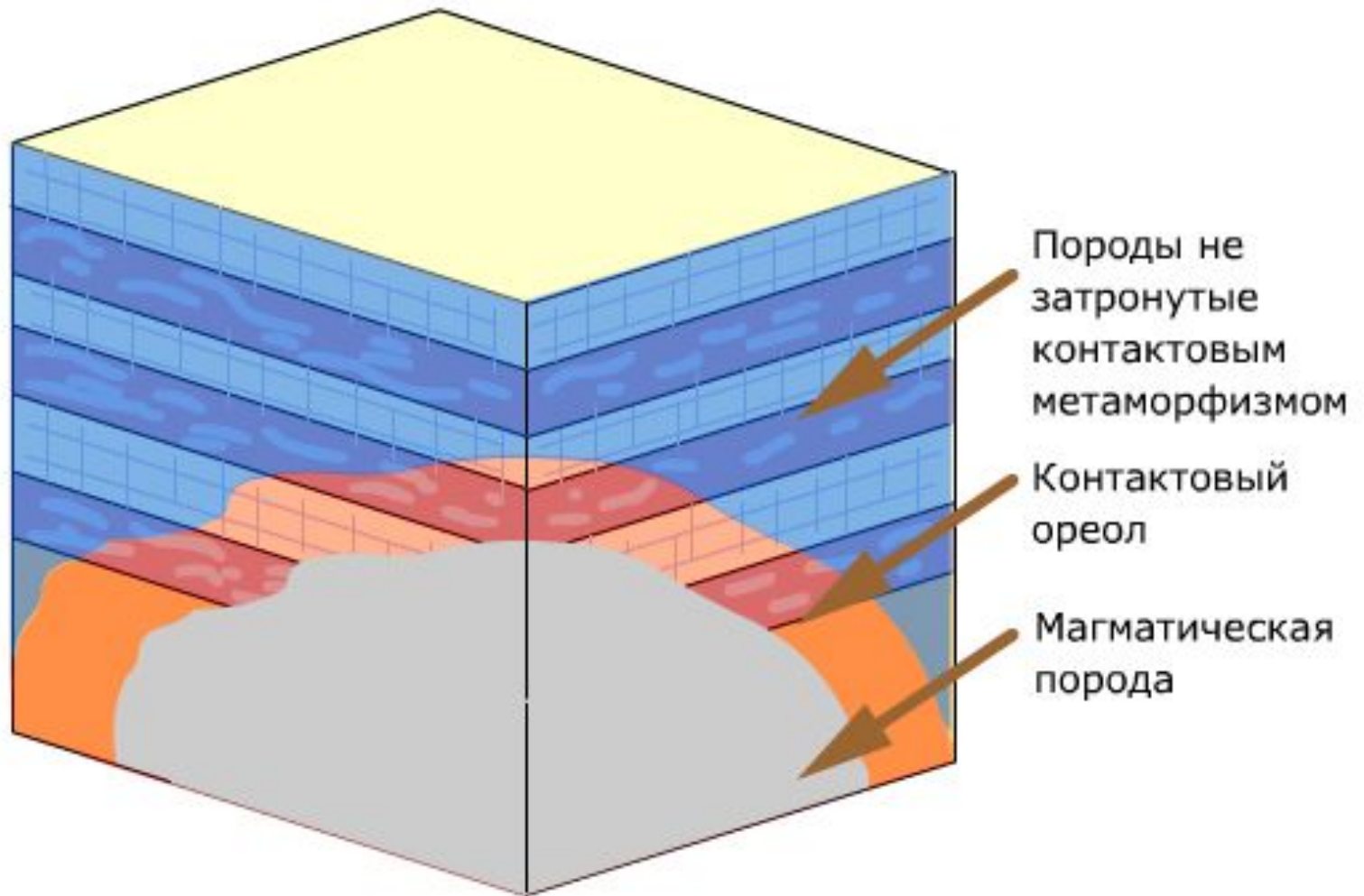
ореолом. Породы в пределах контактового ореола подвергаются контактовому метаморфизму.

# КОНТАКТОВЫЙ МЕТАМОРФИЗМ



Породы за пределами контактового ореола (показаны синим) не испытали нагрева за счет внедрения магмы. Поэтому они не затронуты контактовым метаморфизмом.

# КОНТАКТОВЫЙ МЕТАМОРФИЗМ



Породы не затронутые контактовым метаморфизмом

Контактный ореол

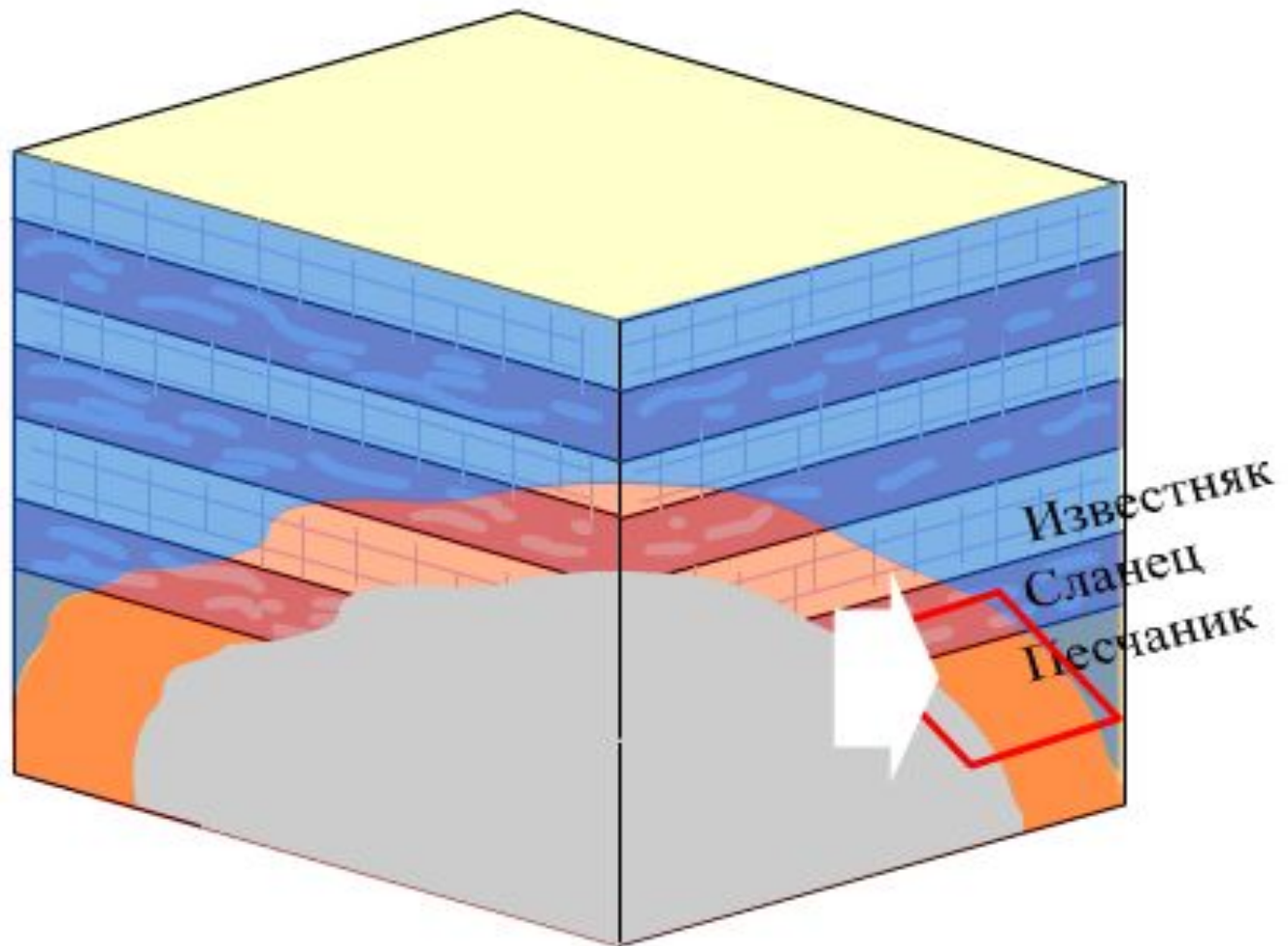
Магматическая порода

После внедрения магма охлаждается и кристаллизуется. Таким образом, мы можем наблюдать ядро, сложенное магматической породой и окруженное зоной

метаморфизованных вмещающих пород. На некотором расстоянии от магматического ядра вмещающие осадочные породы не затронуты контактовым метаморфизмом.



# КОНТАКТОВЫЙ МЕТАМОРФИЗМ

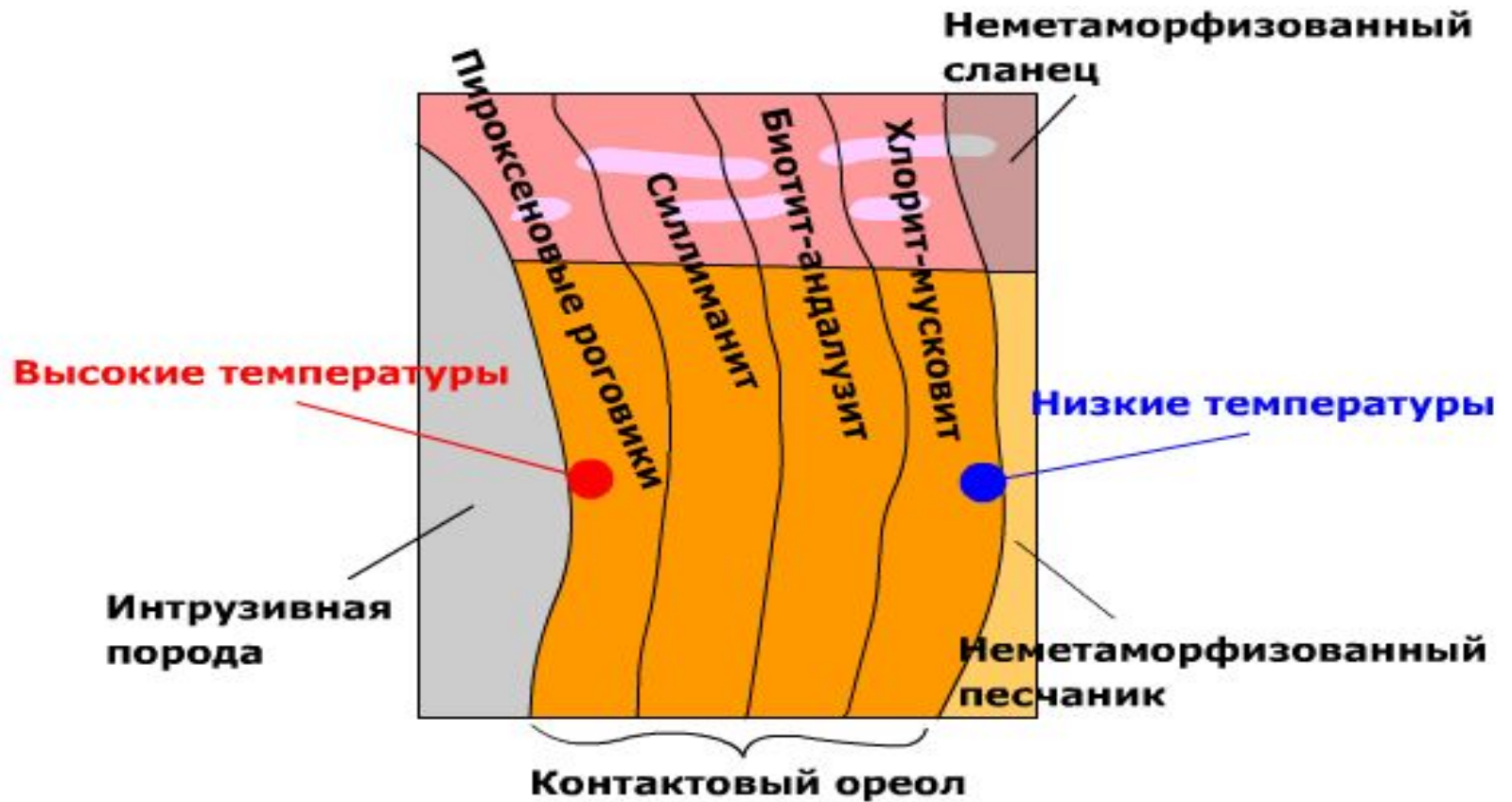


Давайте рассмотрим более подробно породы в пределах контактового ореола. Сначала давайте рассмотрим контактовый метаморфизм сланца и песчаника.

# **Метасоматизм**

**Разновидность метаморфизма, при котором содержание химических элементов в породе изменяется, то есть процесс метаморфизма протекает с привнесением одних и выносом других элементов**

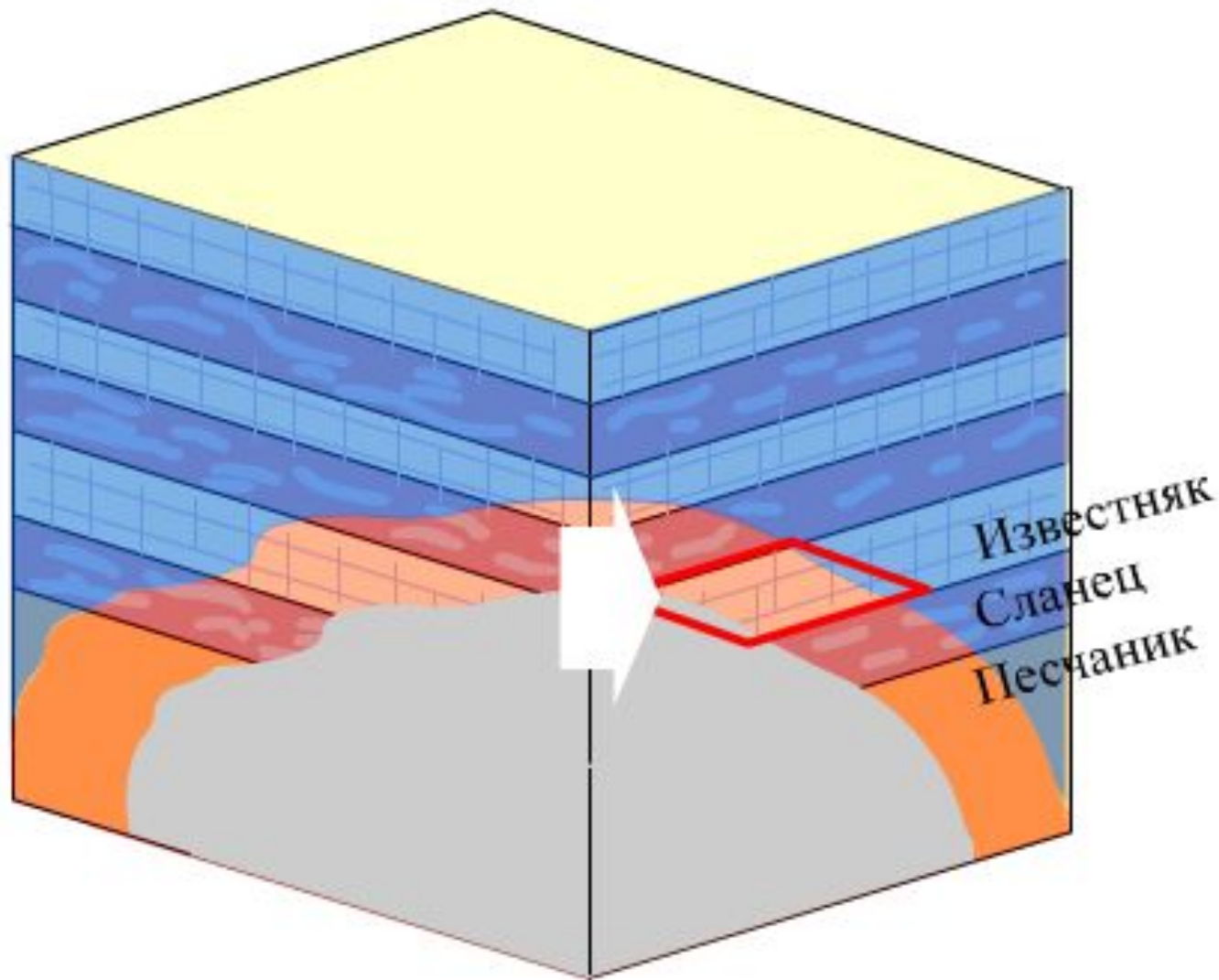
# КОНТАКТОВЫЙ МЕТАМОРФИЗМ



Во внутренней зоне контактового ореола, которая находится вблизи интрузивной породы (источника тепла), вмещающие породы испытали максимальный нагрев. Напротив, вмещающие породы во внешней зоне контактового ореола испытали минимальное повышение температуры. Таким образом, интенсивность температурного воздействия, которое испытали вмещающие породы, зависит

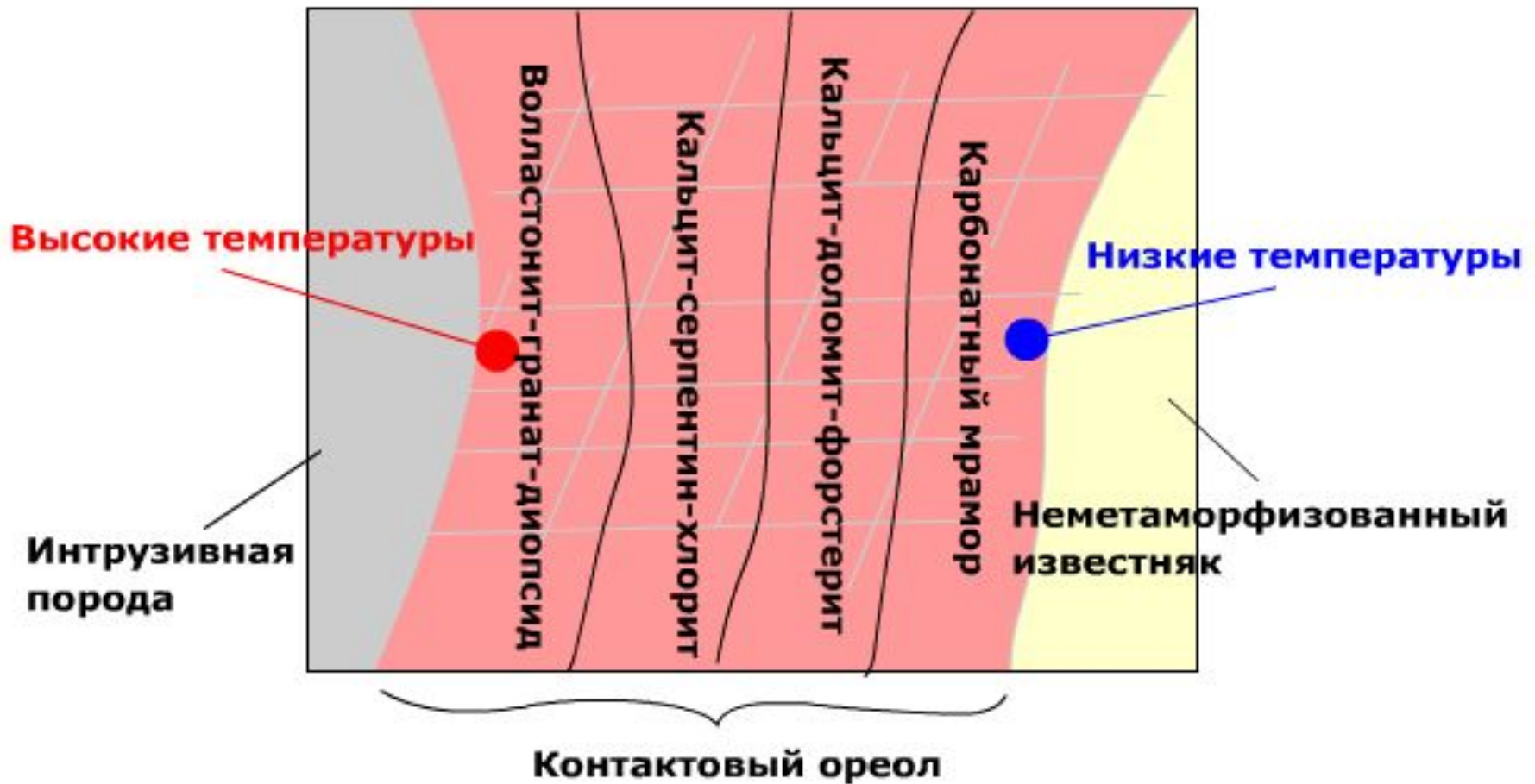
от расстояния между ними и интрузивной породой. Поэтому степень метаморфизма и минеральный состав пород меняется вкостр контактового ореола. Роговики это рогоподобные массивные мелкозернистые породы, которые образуются в результате действия высоких температур и умеренных давлений при контактовом метаморфизме.

# КОНТАКТОВЫЙ МЕТАМОРФИЗМ



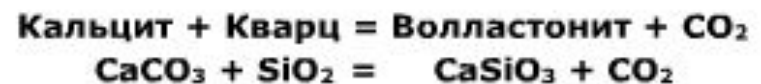
Теперь давайте рассмотрим контактовый метаморфизм известняка.

# КОНТАКТОВЫЙ МЕТАМОРФИЗМ



Метаморфизованный известняк также обнаруживает значительные вариации степени метаморфизма и минерального состава вкост контактового ореола. Если известняк до высокотемпературных метаморфических

преобразований содержал кальцит и кварц, то в высокотемпературной зоне происходит следующая реакция:



# ФЛЮИДЫ В ЗЕМНОЙ КОРЕ



Газы и жидкости, которые присутствуют в земной коре в условиях высоких температур и давлений, обычно называются флюидами. Вода ( $\text{H}_2\text{O}$ ), диоксид углерода ( $\text{CO}_2$ ) и азот ( $\text{N}_2$ ) являются наиболее распространенными флюидами в земной коре. Флюиды играют важную роль во многих геологических процессах, включая метаморфизм. Флюиды

реагируют с минералами или являются продуктами реакций между минералами, а также являются катализаторами реакций между минералами. Кроме того, флюиды также являются важными агентами транспортировки растворенных химических элементов. Этот процесс важен при образовании руд.

# ГИДРОТЕРМАЛЬНЫЙ МЕТАМОРФИЗМ



Гидротермальные процессы это процессы с участием нагретой воды. Вода может присутствовать в небольших трещинах на значительных глубинах в земной коре. Гидротермальные процессы характерны для

океанической коры вблизи срединно-океанических хребтов. На этой анимации показано, как морская вода проникает по трещинам в океаническую кору.

# ГИДРОТЕРМАЛЬНЫЙ МЕТАМОРФИЗМ



Температура воды в трещинах горных пород увеличивается с глубиной. Нагретая вода гораздо более реакционноспособна, чем холодная вода. Поэтому на глубине вода может реагировать с окружающими минералами. Минералы, первоначально содержащиеся в горных породах, могут растворяться и

заменяться новообразованными минералами. Метаморфизм, который происходит под действием гидротермальных процессов, называется гидротермальным метаморфизмом. Давление и температура горной породы, которая подвергается гидротермальному метаморфизму, не меняются.



# ГИДРОТЕРМАЛЬНЫЙ МЕТАМОРФИЗМ



Нагретая вода способна растворять ионы металлов, например железа и меди. Когда впоследствии нагретая вода поднимается к поверхности, ее температура и давление понижаются. Это может привести к отложению

металлов, которые находились в растворенном состоянии. Многие промышленные месторождения металлов сформировались в результате гидротермального метаморфизма в зонах срединно-океанических хребтов.

# ГИДРОТЕРМАЛЬНЫЙ МЕТАМОРФИЗМ

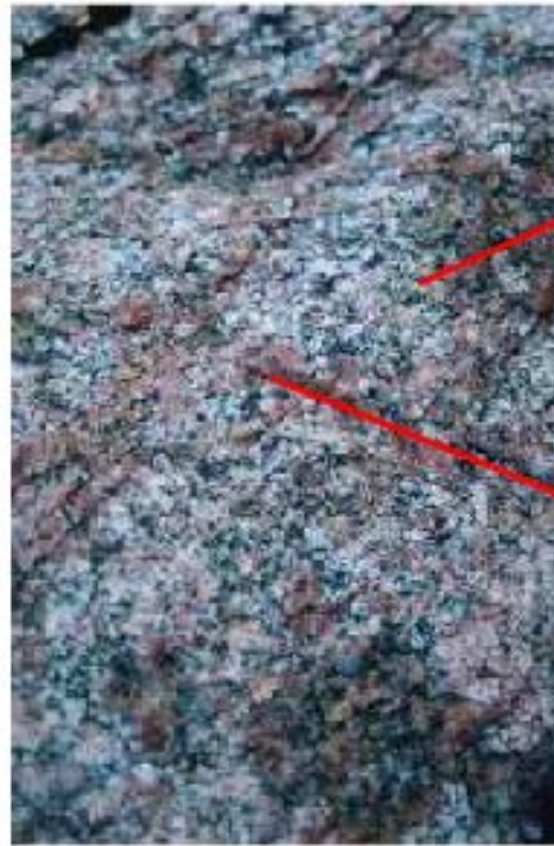
Не измененный  
эклогит

Гидротермально  
измененный  
эклогит



Не измененный  
гранит

Гидротермально  
измененный  
гранит

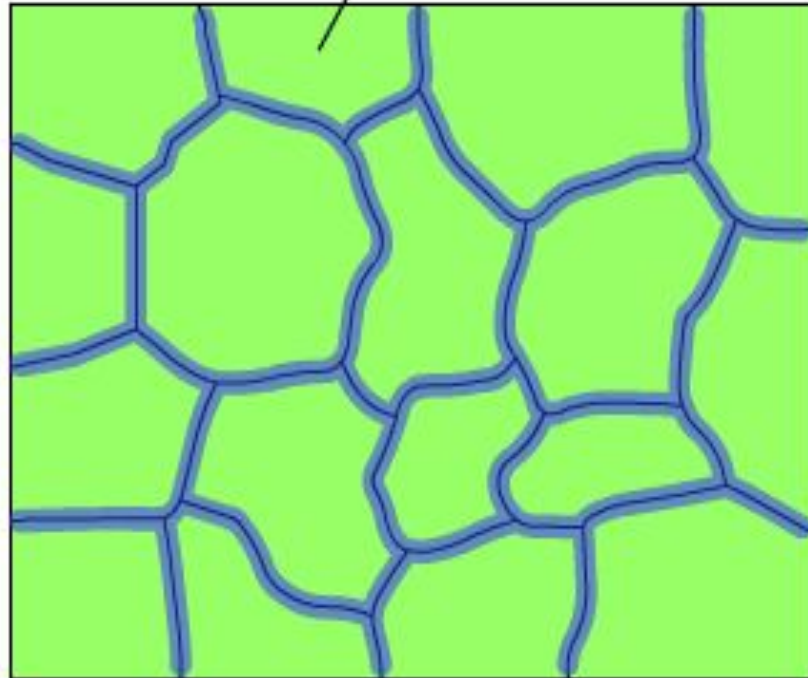


Эклогит и гранит, показанные на этом слайде, испытали воздействие флюидов, проникавших по небольшим трещинам, когда эти породы были погружены на несколько километров ниже поверхности Земли. Нагретая вода реагировала с минералами вдоль границ трещин. Вдоль трещин в эклогите зеленый пироксен,

характерный для этой породы, прореагировал с нагретой водой с образованием темного амфибола. В граните флюид способствовал отложению небольших зерен минерала гематита, что обусловило покраснение вдоль границ трещин, по которым циркулировал флюид.

# CO<sub>2</sub> И МЕТАМОРФИЗМ

Оливин



← CO<sub>2</sub>

← CO<sub>2</sub>



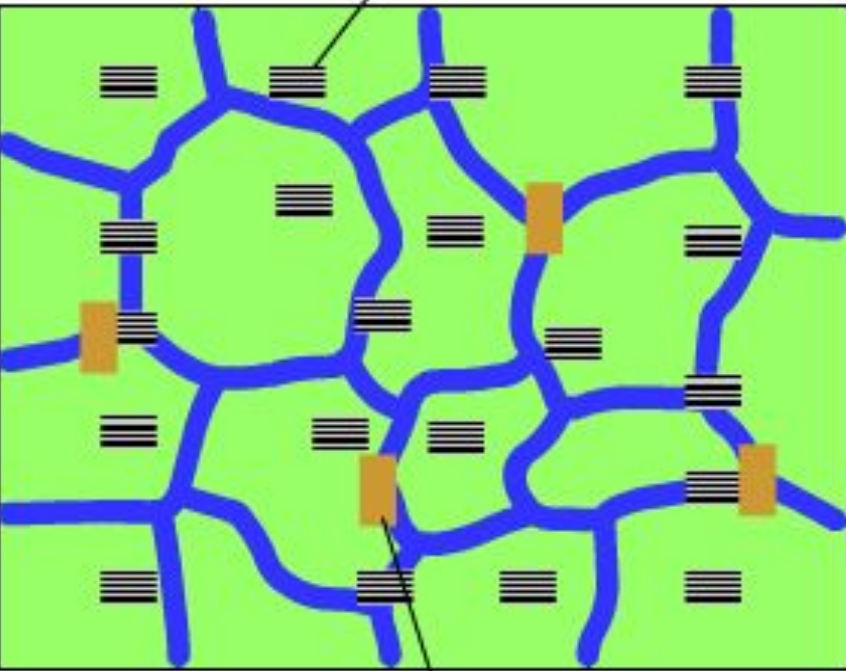
Дунит

Диоксид углерода (CO<sub>2</sub>) один из наиболее распространенных флюидов. При определенных условиях значительные количества CO<sub>2</sub> насыщают блоки мантийного или корового

вещества. На этой анимации показано, что происходит, когда дунит (первоначально состоящий из оливина) реагирует с CO<sub>2</sub>. Дунит это типичная мантийная порода.

# CO<sub>2</sub> И МЕТАМОРФИЗМ

Магнезит



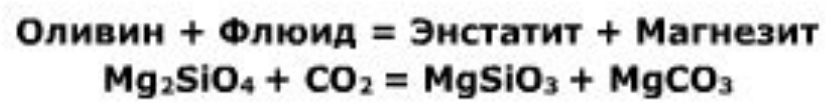
← CO<sub>2</sub>

← CO<sub>2</sub>

Энстатит

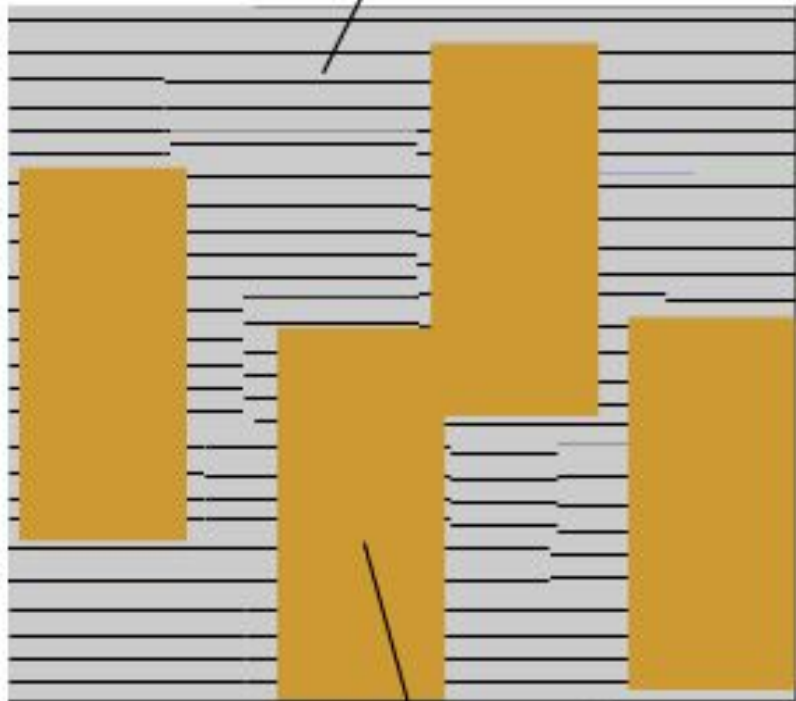
Между оливином и флюидом происходит следующая реакция:

Энстатит относится к группе пироксенов, а магнезит минерал из группы карбонатов



# CO<sub>2</sub> И МЕТАМОРФИЗМ

Магнезит



Сагвандит

Энстатит

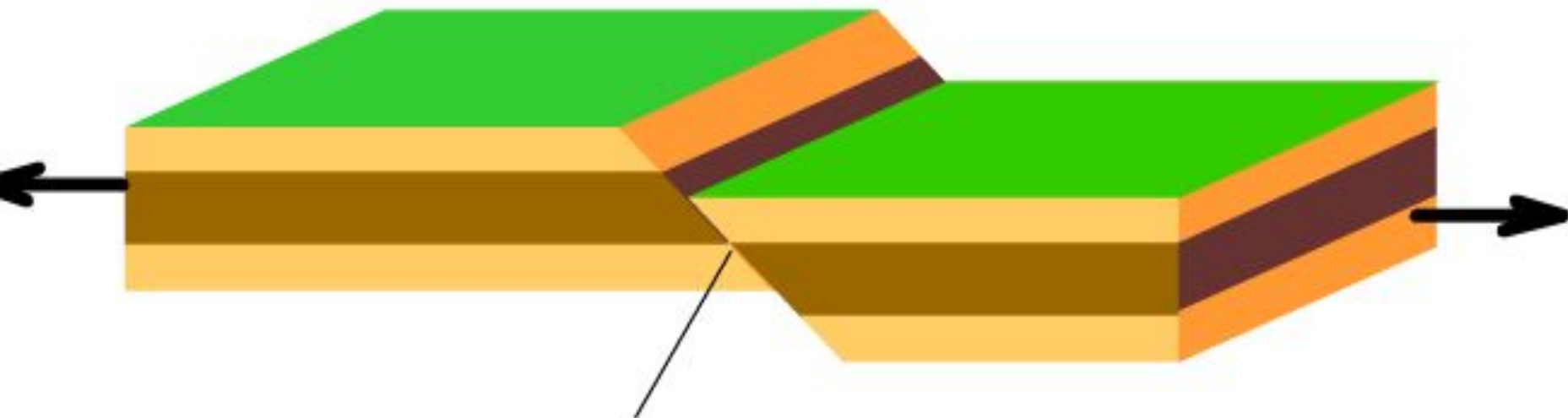


Сагвандит

Если весь оливин прореагирует, образуется порода, которая называется сагвандит. Сагвандит состоит из энстатита и магнезита. Сагвандит был описан около озера Сагелванн,

Тромсе, Северная Норвегия. Подобные породы также характерны для офиолитовых комплексов Урала и Тянь-Шаня.

# КАТАКЛАСТИЧЕСКИЙ МЕТАМОРФИЗМ



Катакластический метаморфизм

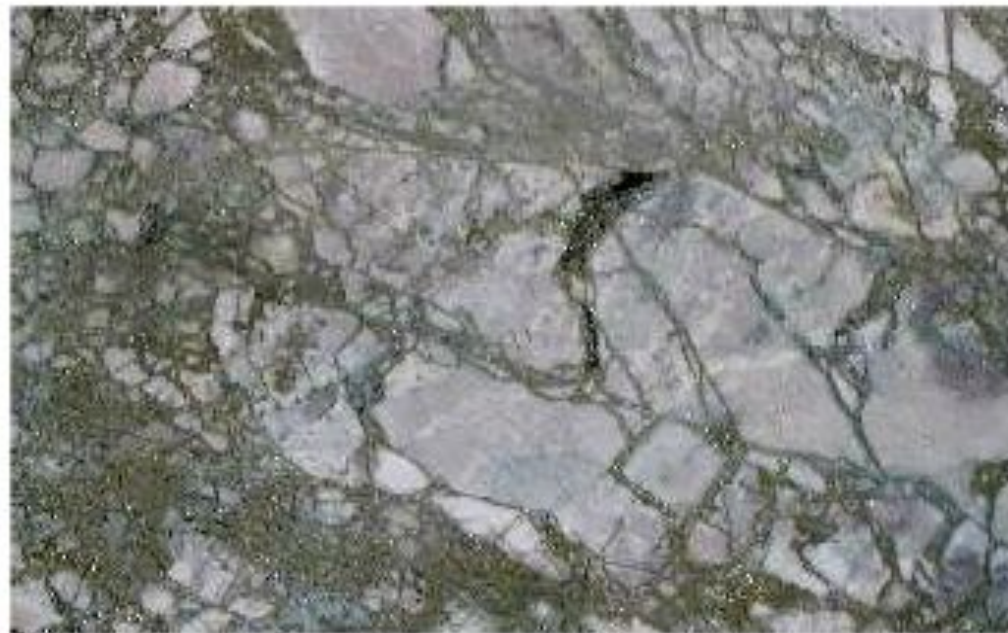
Катакластический метаморфизм происходит в зонах разрывных нарушений. Когда два блока земной коры перемещаются относительно друг друга, горные породы на контакте между этими блоками крошатся и перетираются. На этой

анимации показано образование разрывного нарушения – сброса, который формируется, когда два блока коры удаляются друг от друга в обстановке растяжения.

# КАТАКЛАСТИЧЕСКИЙ МЕТАМОРФИЗМ



Брекчия, Дален, Телемарк



Брекчия, Шпицберген

Тектонические брекчии сложены крупными остроугольными обломками различного состава в мелкозернистой основной массе.

Тектонические брекчии образуются при

раскалывании некогда монолитных горных пород, то есть тектонические брекчии образуются в результате катакластического метаморфизма.

# КАТАКЛАСТИЧЕСКИЙ МЕТАМОРФИЗМ



Зеркало скольжения, Квалойя, Тромсе



Зеркало скольжения, Тромсойа

Зеркала скольжения это выровненные и отполированные поверхности разрыва с бороздками и штрихами, остающимися в результате истирающего действия твердых

минералов. Бороздки на поверхности зеркала скольжения (красные линии на этом рисунке) показывают направление перемещения по разрыву.



# КАТАКЛАСТИЧЕСКИЙ МЕТАМОРФИЗМ



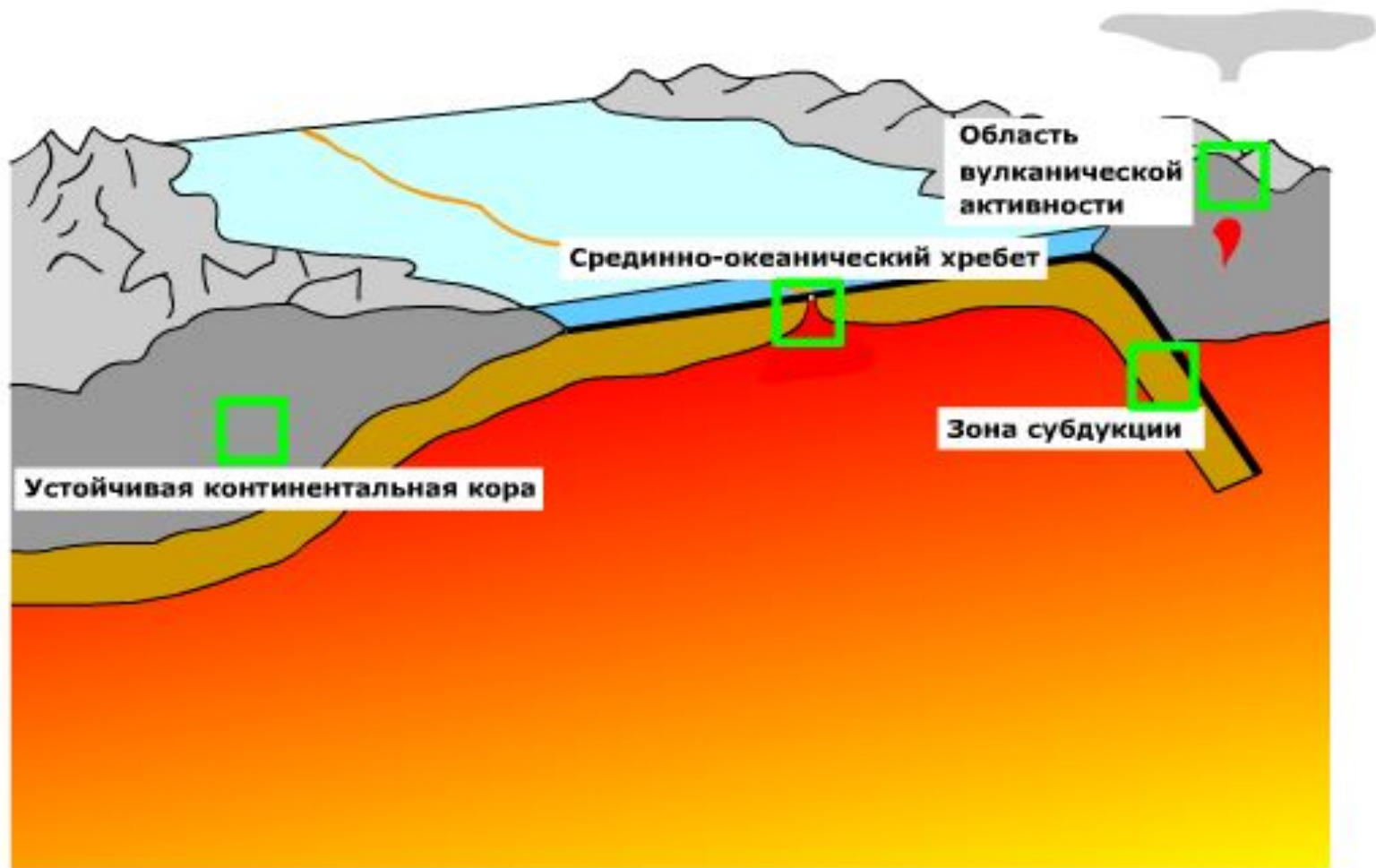
Тонко измельченные  
зерна минералов

Милонит, Лейрдален, Йотунхаймен

Милонит это мелкозернистая порода с директивной структурой, образующаяся в результате интенсивного тектонического перемалывания пород в зоне разрывного нарушения. Темноокрашенные блоки породы на этой фотографии состоят из такого

мелкозернистого материала. Розовые блоки состоят из минералов, которые избежали такой интенсивной деформации. Однако, зерна минералов были развернуты и вытянуты в направлении перемещения.

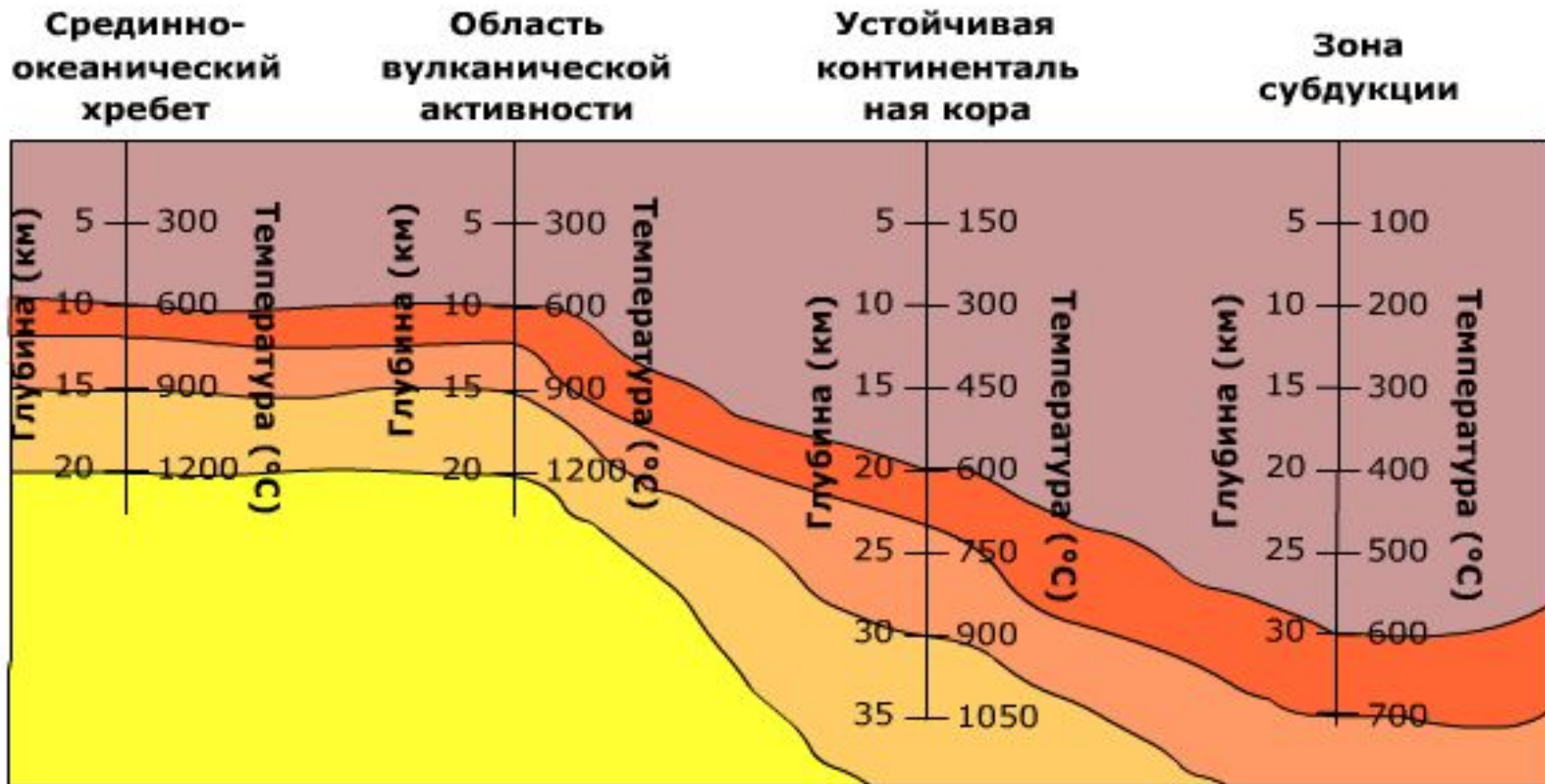
# ГЕОТЕРМАЛЬНЫЙ ГРАДИЕНТ



Геотермический градиент описывает изменение температуры с глубиной. Для различных геологических обстановок характерны разные геотермические градиенты. Нажимая курсором

на символы на этом рисунке, вы узнаете о геотермических градиентах в различных геологических обстановках

# ГЕОТЕРМАЛЬНЫЙ ГРАДИЕНТ



Под срединно-океаническими хребтами и в районах вулканической активности температура увеличивается с глубиной относительно быстро по сравнению с увеличением давления. Метаморфизм в этих геологических обстановках характеризуется высокими температурами и относительно низкими давлениями. Такой метаморфизм часто называется

высокотемпературным. В зонах субдукции температура увеличивается с глубиной относительно медленно по сравнению с ростом давления. Метаморфизм в этой геологической обстановке характеризуется высокими давлениями и относительно низкими температурами. Такой метаморфизм часто называется метаморфизмом высокого давления.

# МЕТАМОРФИЧЕСКИЕ ФАЦИИ



Гранат-слюдяной сланец

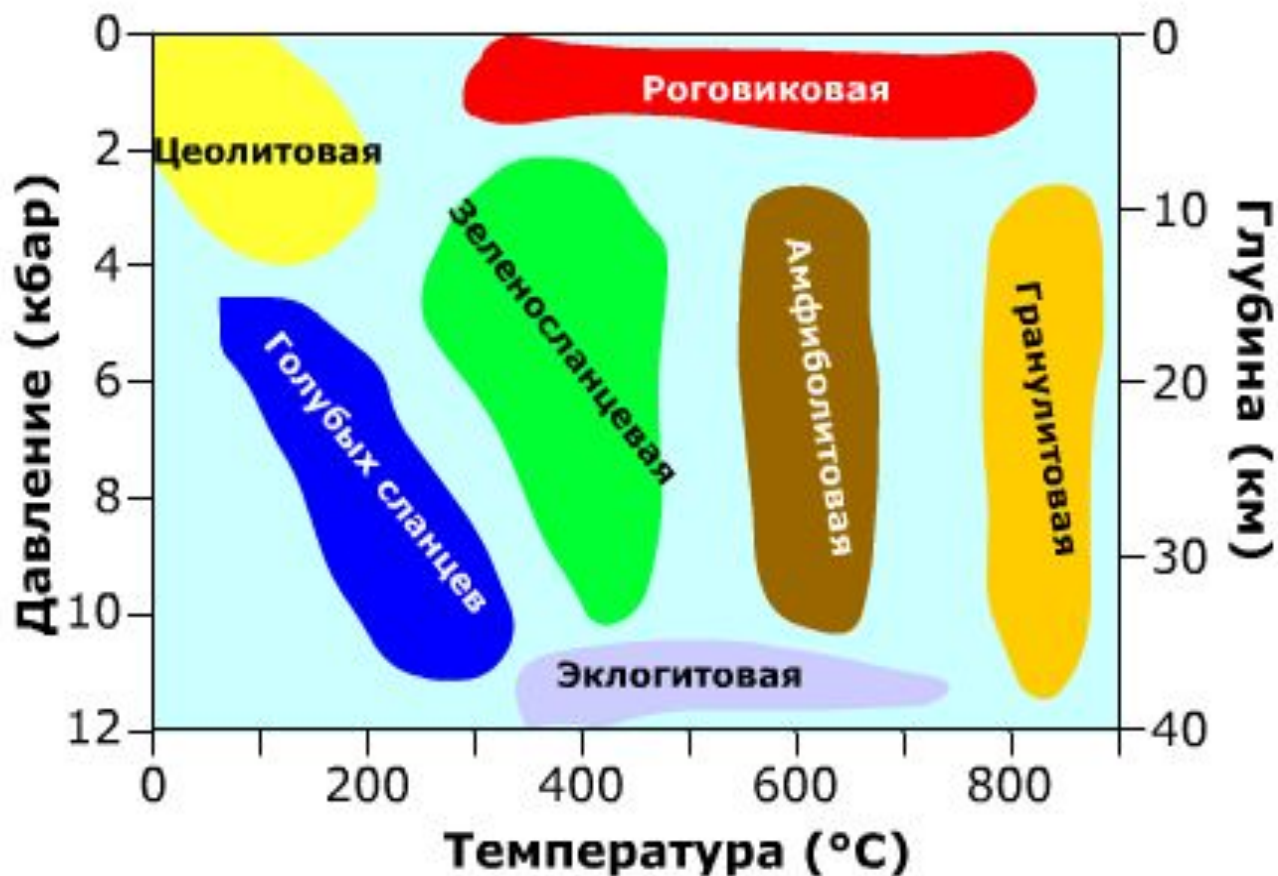


Гранатовый амфиболит

Породы, которые подвергаются метаморфизму в условиях близких температур и давлений относятся к одним и тем же метаморфическим фациям. Гранат-слюдяной сланец и гранатовый

амфиболит образовались в условиях близких температур и давлений. Эти условия называются амфиболитовой фацией метаморфизма.

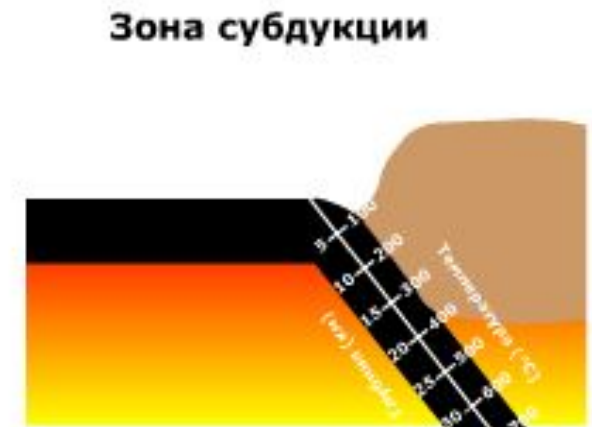
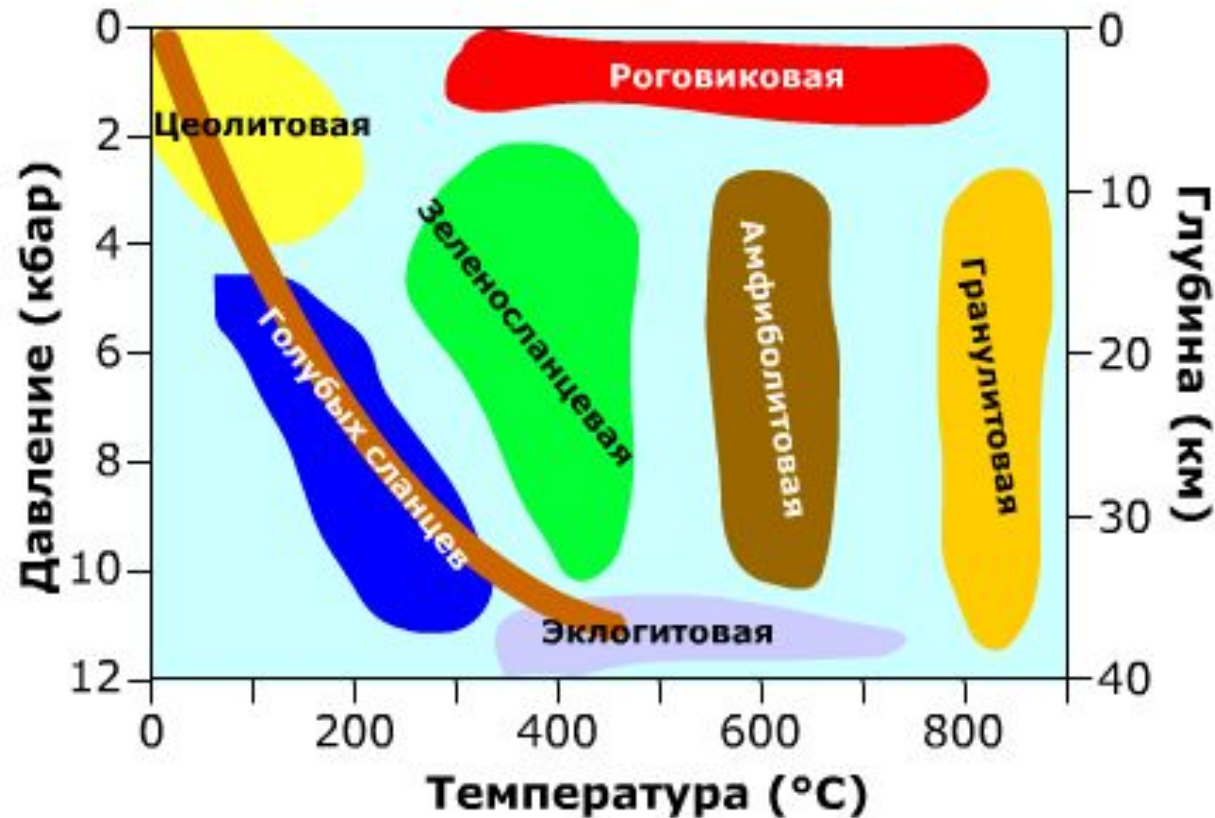
# МЕТАМОРФИЧЕСКИЕ ФАЦИИ



Метаморфические породы могут быть объединены в группы по условиям, в которых они испытали метаморфические

преобразования. Породы, относящиеся к цеолитовой фации, преобразованы в условиях низких температур и давлений.

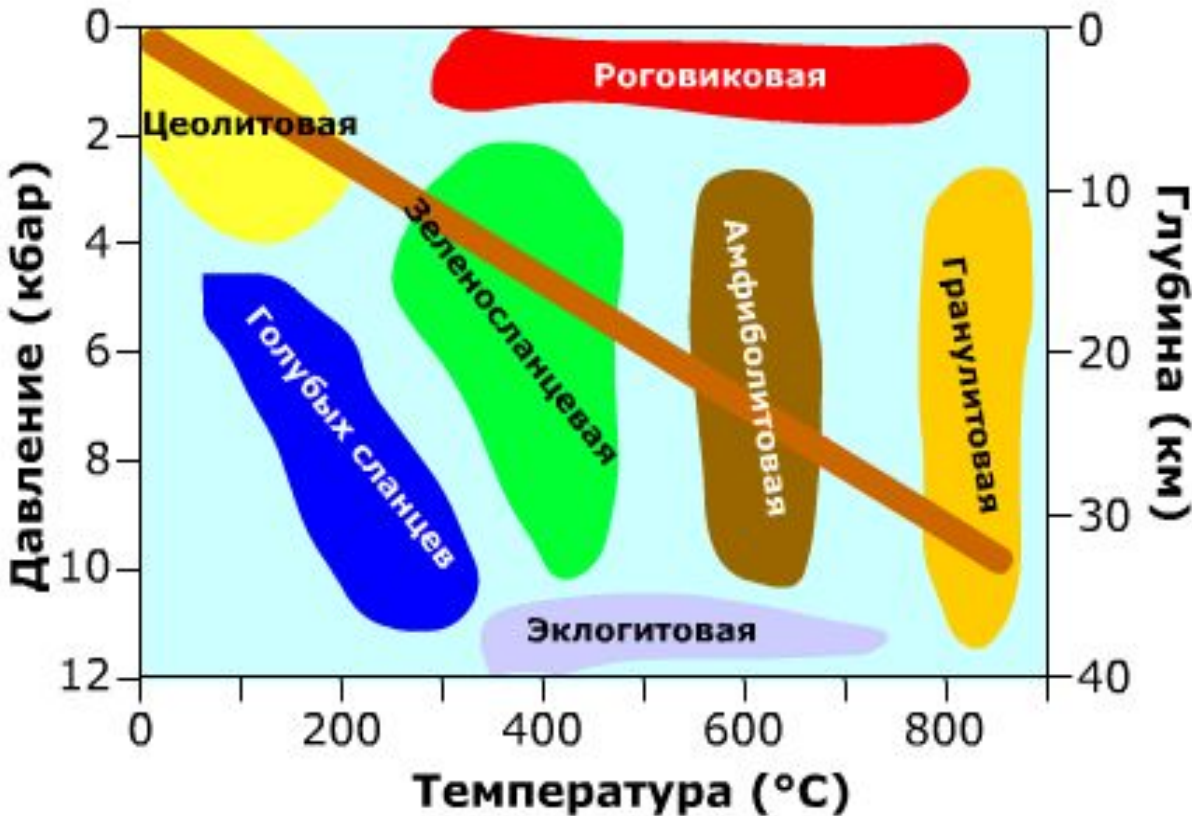
# МЕТАМОРФИЧЕСКИЕ ФАЦИИ И ТЕКТОНИЧЕСКАЯ ОБСТАНОВКА



В зонах субдукции температура увеличивается с глубиной относительно медленно по сравнению с ростом давления. Метаморфизм пород в зонах субдукции называется метаморфизмом высокого давления. В верхних частях субдуцирующей

плиты породы подвергаются метаморфизму цеолитовой фации. На более значительных глубинах в условиях метаморфизма высоких давлений породы преобразуются в условиях фации голубых сланцев и эклогитовой фации.

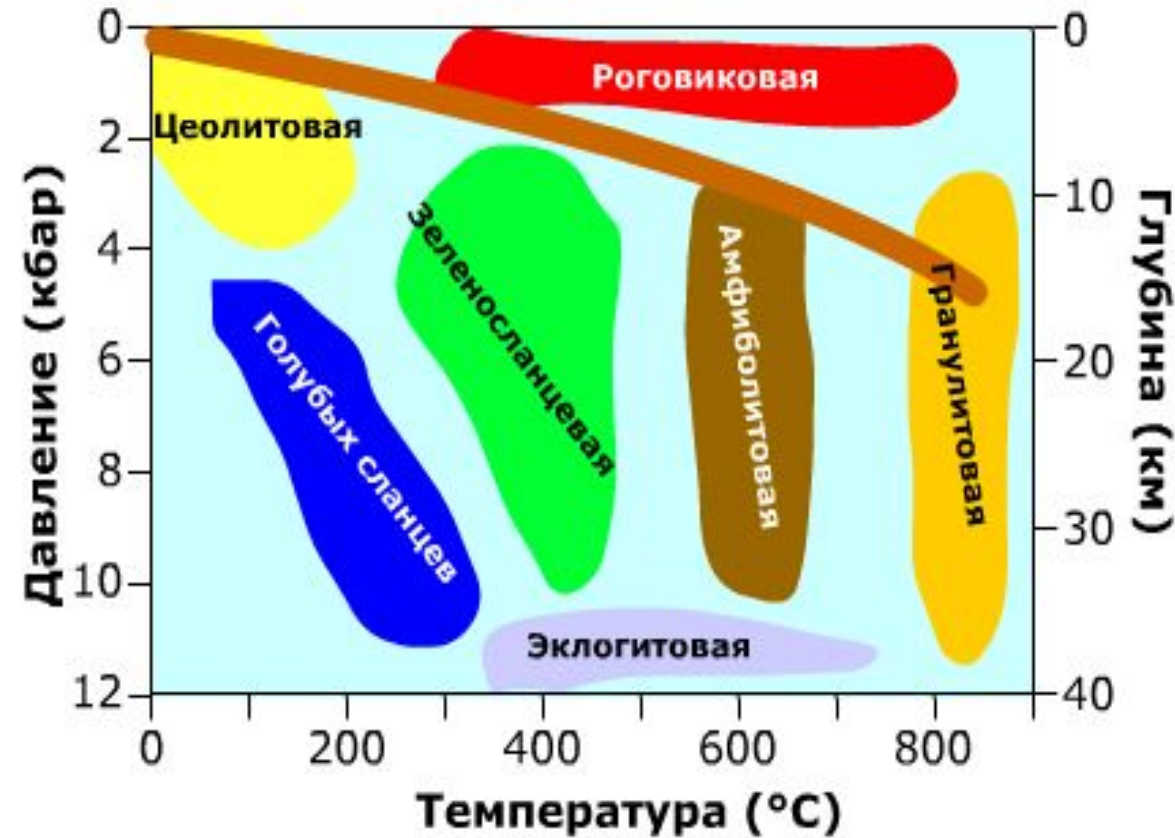
# МЕТАМОРФИЧЕСКИЕ ФАЦИИ И ТЕКТОНИЧЕСКАЯ ОБСТАНОВКА



В верхних частях нормальной континентальной коры породы подвергаются метаморфизму в условиях цеолитовой фации. С увеличением глубины породы континентальной коры

испытывают метаморфизм в условиях зеленосланцевой фации, амфиболитовой фации и гранулитовой фации.

# МЕТАМОРФИЧЕСКИЕ ФАЦИИ И ТЕКТОНИЧЕСКАЯ ОБСТАНОВКА

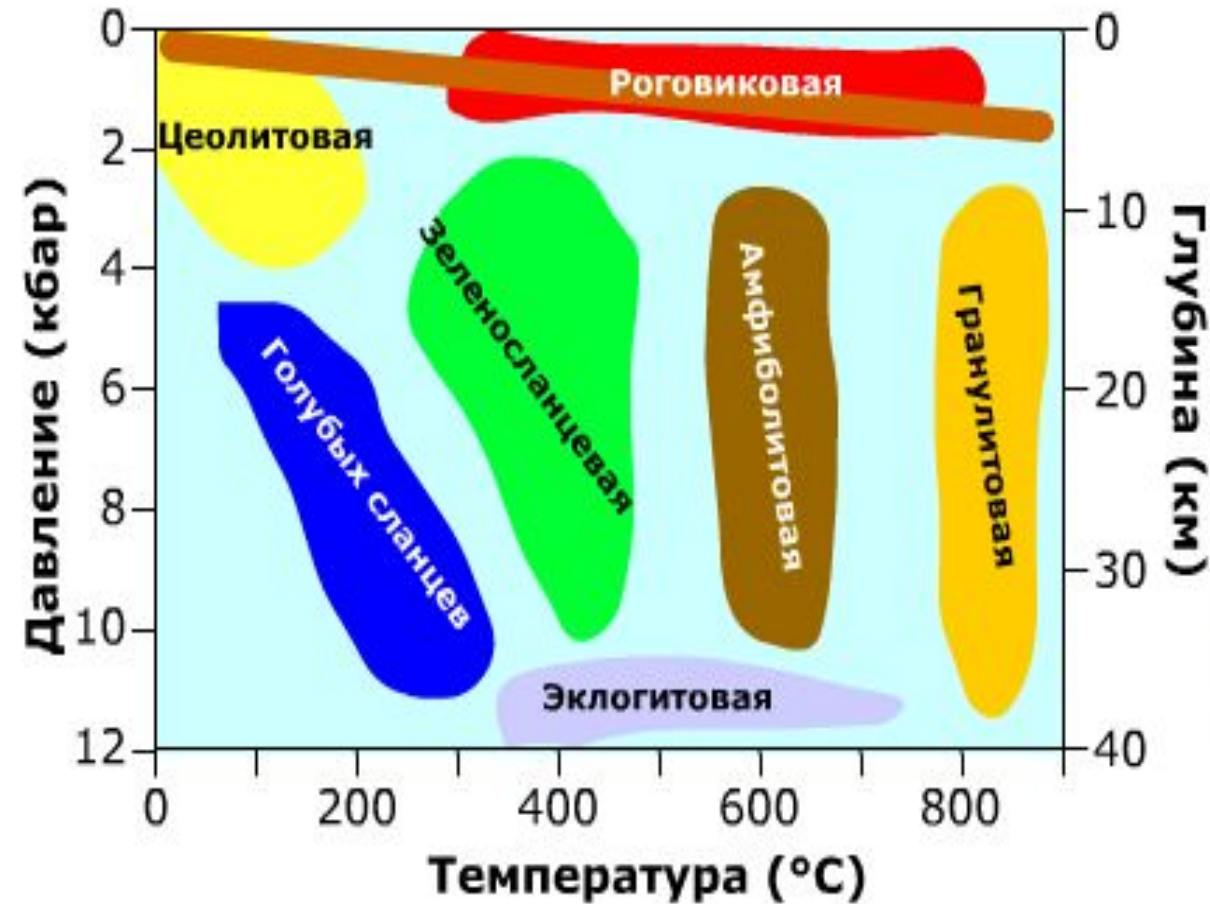


В районах с активной вулканической активностью температура быстро увеличивается с глубиной. В верхних частях коры породы подвергаются метаморфизму в условиях

цеолитовой фации. С увеличением глубины породы подвергаются метаморфизму в условиях роговиковой фации, амфиболитовой фации и гранулитовой фации.



# МЕТАМОРФИЧЕСКИЕ ФАЦИИ И ТЕКТОНИЧЕСКАЯ ОБСТАНОВКА



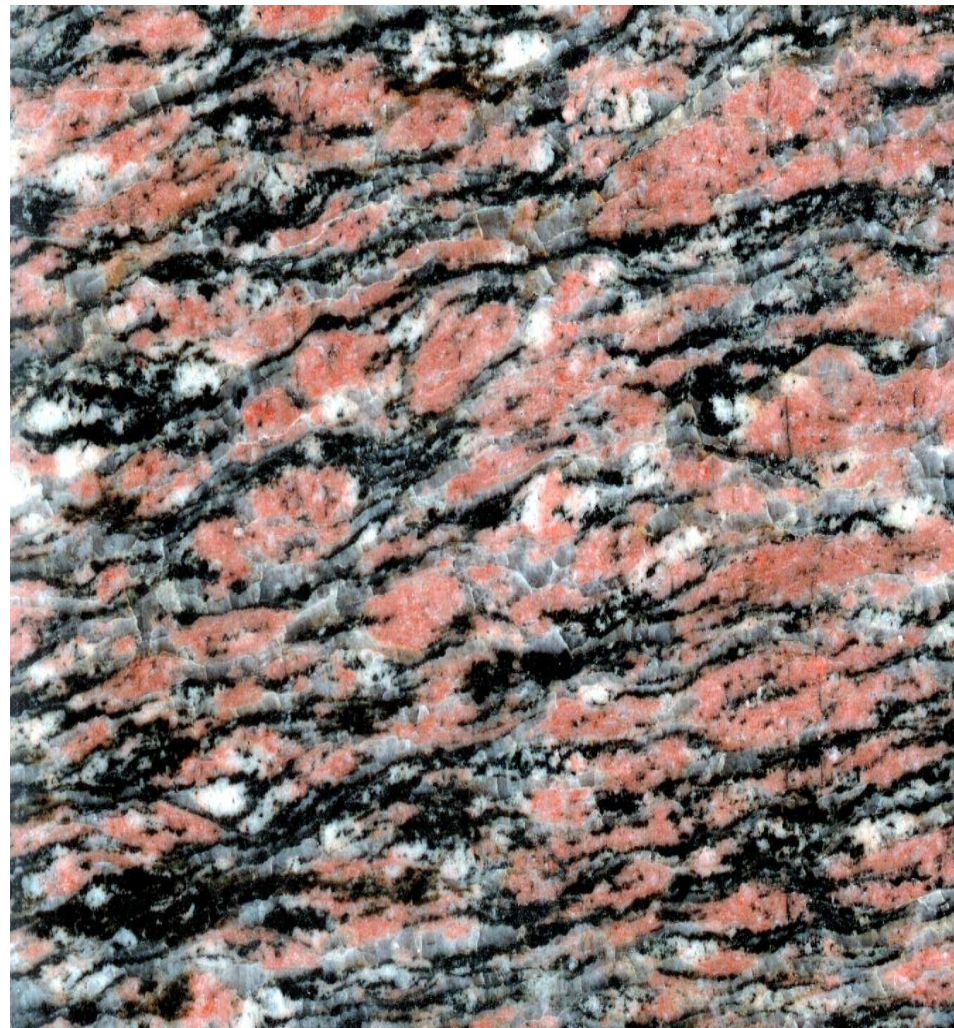
Роговиковая фашия характеризуется высокими температурами и низкими давлениями. Условия

роговиковой фашии обычны для контактового метаморфизма.

# Метаморфические горные породы

Типы метаморфизма	Региональный		
	Зона низких температур и давлений	Зона средних температур и давлений	Зона высоких температур и давлений
Исходные породы	200–300 °С	300–500 °С	500–800 °С и выше
Магматические:  Кислые, средние интрузивные - <i>гранит, диорит</i>	Не изменяются		Гнейсы (орто-)

# Гранито-гнейсы



# Метаморфические горные породы

Типы метаморфизма	Региональный		
	Зона низких температур и давлений	Зона средних температур и давлений	Зона высоких температур и давлений
Исходные породы	200–300 °С	300–500 °С	500–800 °С и выше
Магматические: Кислые, средние эффузивные - <i>липарит,</i> <i>кварцевый</i> <i>порфир,</i> <i>порфириты</i>	Кварц-полевошпатовые, кварц-сланцевые, сланцевые сланцы		Гнейсы (орто-)

# Метаморфические горные породы

Типы метаморфизма  Исходные породы	Региональный		
	Зона низких температур и давлений	Зона средних температур и давлений	Зона высоких температур и давлений
	200–300 °C	300–500 °C	500–800 °C и выше
Магматические: Основные и ультраосновные - <i>габбро, дунит, базальт, диабаз, перидотит</i>	Зеленые, хлоритовые, тальковые сланцы		Амфиболиты, ЭКЛОГИТЫ

# Метаморфические горные породы

<b>Типы метаморфизма</b>	<b>Региональный</b>		
	<b>Зона низких температур и давлений</b>	<b>Зона средних температур и давлений</b>	<b>Зона высоких температур и давлений</b>
<b>Исходные породы</b>	<b>200–300 °С</b>	<b>300–500 °С</b>	<b>500–800 °С и выше</b>
Магматические: Ультраосновные <i>дунит,</i> <i>перидотит,</i> <i>пироксенит</i>	<b>Серпентиниты</b> (регрессивный метаморфизм – «автометаморфизм»)		

# Метаморфические горные породы

Типы метаморфизма	Региональный		
	Зона низких температур и давлений	Зона средних температур и давлений	Зона высоких температур и давлений
Исходные породы	200–300 °С	300–500 °С	500–800 °С и выше
Осадочные: обломочные <i>песчаники,</i> <i>аргиллиты и др.</i>	<b>Филлиты</b>	<b>Кристаллические сланцы</b>	<b>Гнейсы (пара-)</b>

# Метаморфические горные породы

Типы метаморфизма	Региональный			Контактовый	
	Зона низких температур и давлений	Зона средних температур и давлений	Зона высоких температур и давлений	Перекристаллизация	Метасоматизм
	200–300 °С	300–500 °С	500–800 °С и выше		
Исходные породы					
Осадочные: Химические и биохимические Кремнистые Карбонатные	Кремнистые сланцы	Кварциты			
	Мраморизованные известняки	Мраморы			Скарны



# Метаморфические горные породы

- **Грейзены** – метасоматические породы - результат переработки постмагматическими газовыми и водными растворами пород, богатых кремнеземом и глиноземом.
- **Роговики** – контактово-метаморфические породы - измененные в контакте с интрузией глинистые сланцы, перешедшие в плотные мелкозернистые породы

# Структура метаморфических пород

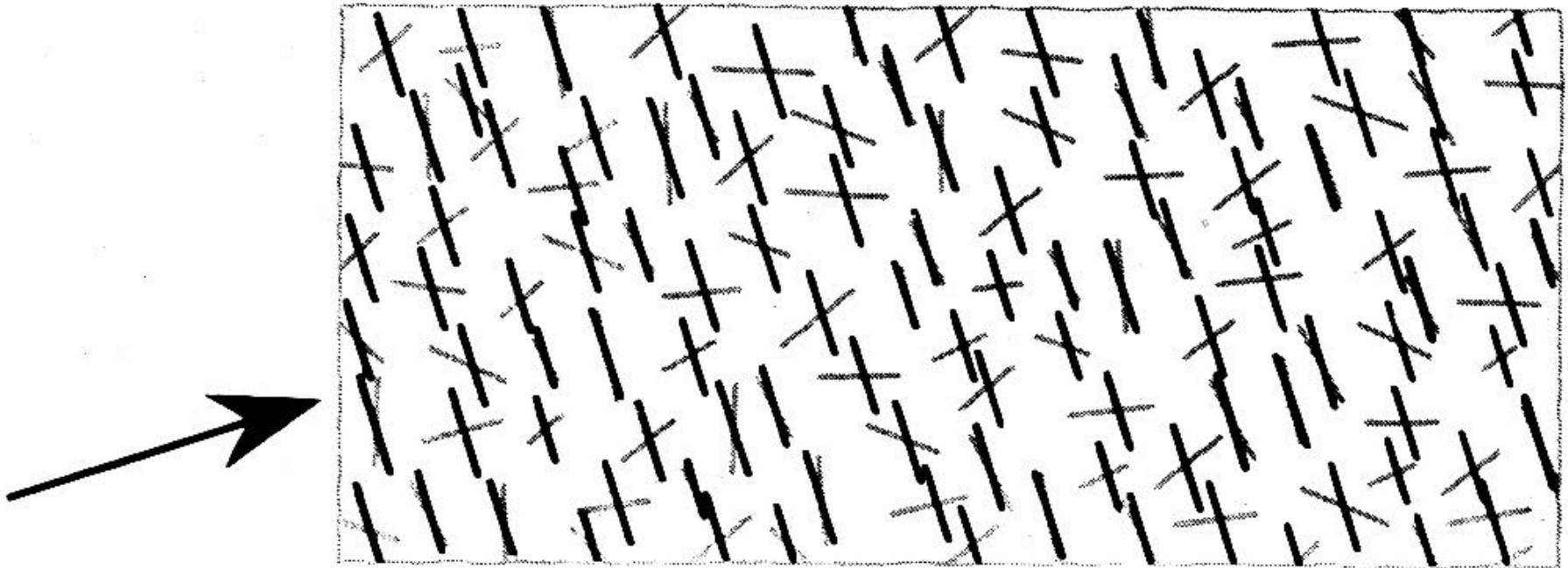
– кристаллическая

(кристаллобластовая - единицей структуры является бластомерно)

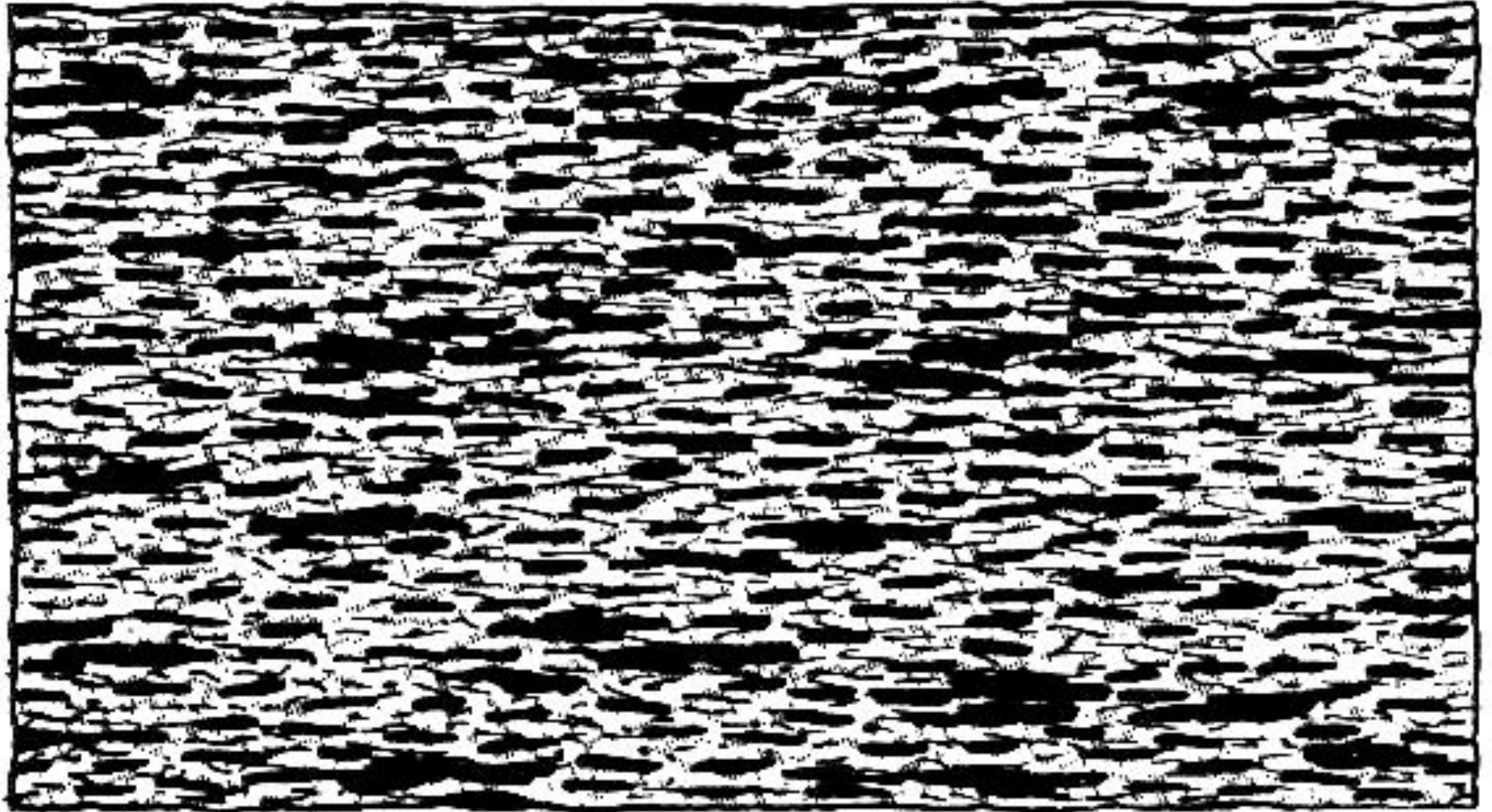
# Текстура метаморфических пород

- **сланцеватая** – порода распадается на тонкие плитки или пластинки
- **полосчатая** – чередование различных по составу полос
- **пятнистая** – при наличии в породе участков (пятен), отличающихся по составу, цвету, устойчивости к выветриванию
- **массивная** – при отсутствии ориентировки породообразующих минералов
- **плойчатая** – когда под влиянием стресса порода собрана в мелкие складки
- **очковая** – представленная более или менее округлыми или овальными агрегатами среди сланцеватой массы породы
- **катакластическая** – отличается раздроблением и деформацией минералов
- **милонитовая** – возникает благодаря интенсивному перетиранию минеральных зерен породы в результате чего образуется тончайшая пыль

# Образование сланцеватости



# Сланцеватость - схема



# Слюдяной сланец



# ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- Большинство минералов, встречающихся в природе, стабильны в пределах ограниченного диапазона давлений и температур. Поэтому когда горные породы испытывают изменения температуры и давления, между минералами, из которых они состоят, могут происходить химические реакции. В результате этих реакций образуются новые минералы – порода подвергается метаморфизму. Деформации и участие флюидов также приводят к метаморфизму горных пород.

- Когда метаморфизму подвергаются крупные блоки коры, как, например, в зонах субдукции, такой метаморфизм называется региональным.

- Когда в породы земной коры внедряется горячая магма, вмещающие породы в непосредственной близости от интрузии

испытывают нагрев. Нагретые породы подвергаются контактовому метаморфизму.

- Когда порода содержит флюиды, в ней могут происходить реакции между минералами и флюидами. Вода и диоксид углерода это наиболее распространенные флюиды в земной коре.

- Геотермический градиент описывает изменение температуры с глубиной. Различные геологические обстановки характеризуются разными значениями геотермического градиента.

- Породы, которые подвергаются метаморфизму в условиях близких температур и давлений относятся к одним и тем же метаморфическим фациям.



В целом, МетГП похожи на МГП, т.к. последние слагают более 60 % объема земной и залегают на глубине, где происходит метаморфизм. Особенно похожи полиминеральные сланцевато-полосчатые ГП. Мономинеральные массивные ГП: кварцит и мрамор , образуются при метаморфизме ОГП

- МетГП изучаются на практ р.5.
- Важно отметить, что на территории Челябинской области широко распространены ГП разного генезиса, часто вблизи земной поверхности залегают ГП, которые образовались на больших глубинах, например, дуниты или эклогиты возникали на глубинах более 50 – 70 км. Какие процессы способствовали тому, что сейчас они лежат близи земной поверхности.