

# МЕТАМОРФИЧЕСКИЕ ПОРОДЫ

[Что такое метаморфизм](#)

[Давление](#)

[Региональный метаморфизм](#)

[Индекс минералы](#)

[Метаморфизм и размер зерен](#)

[Контактный 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

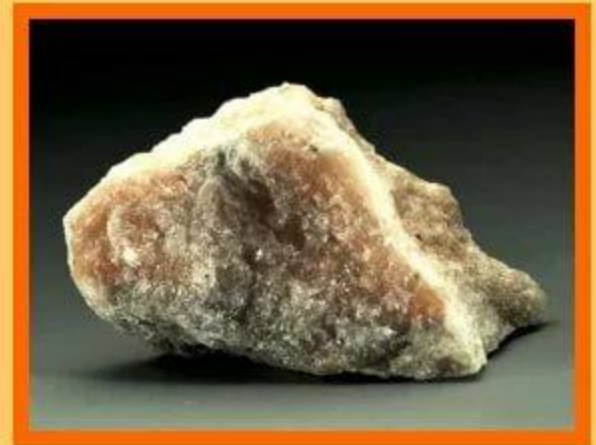
возникают в глубоких зонах земной коры путем преобразования магматических и осадочных, а также других метаморфических горных пород под влиянием высоких температур и давлений.

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

# *Метаморфические горные породы*

*Но вот, под давлением, магма опять  
Стремится земную кору разорвать,  
И в месте такого вторжения  
Наметятся вдруг превращения:  
Сыпучий песок превратился в кварцит,  
Был мел очень мягкий, вдруг мрамор  
лежит.*

*Такие породы, весьма специфические,  
Зовутся геологами метаморфические.*



*2015 Мой  
лучший урок*



# 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

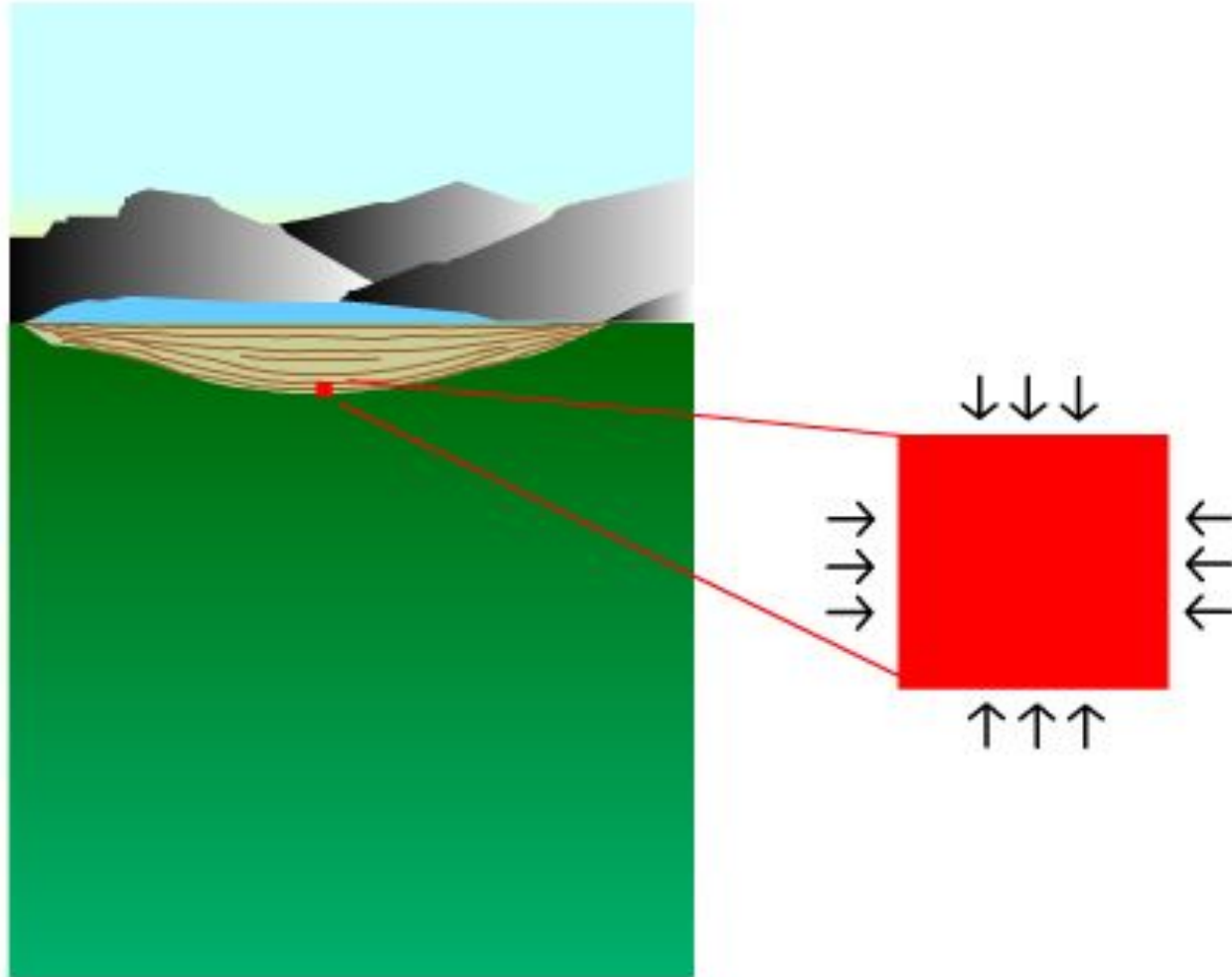


Гнейс

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).

# Региональный метаморфизм – главный фактор ЛИТОСТАТИЧЕСКОЕ ДАВЛЕНИЕ

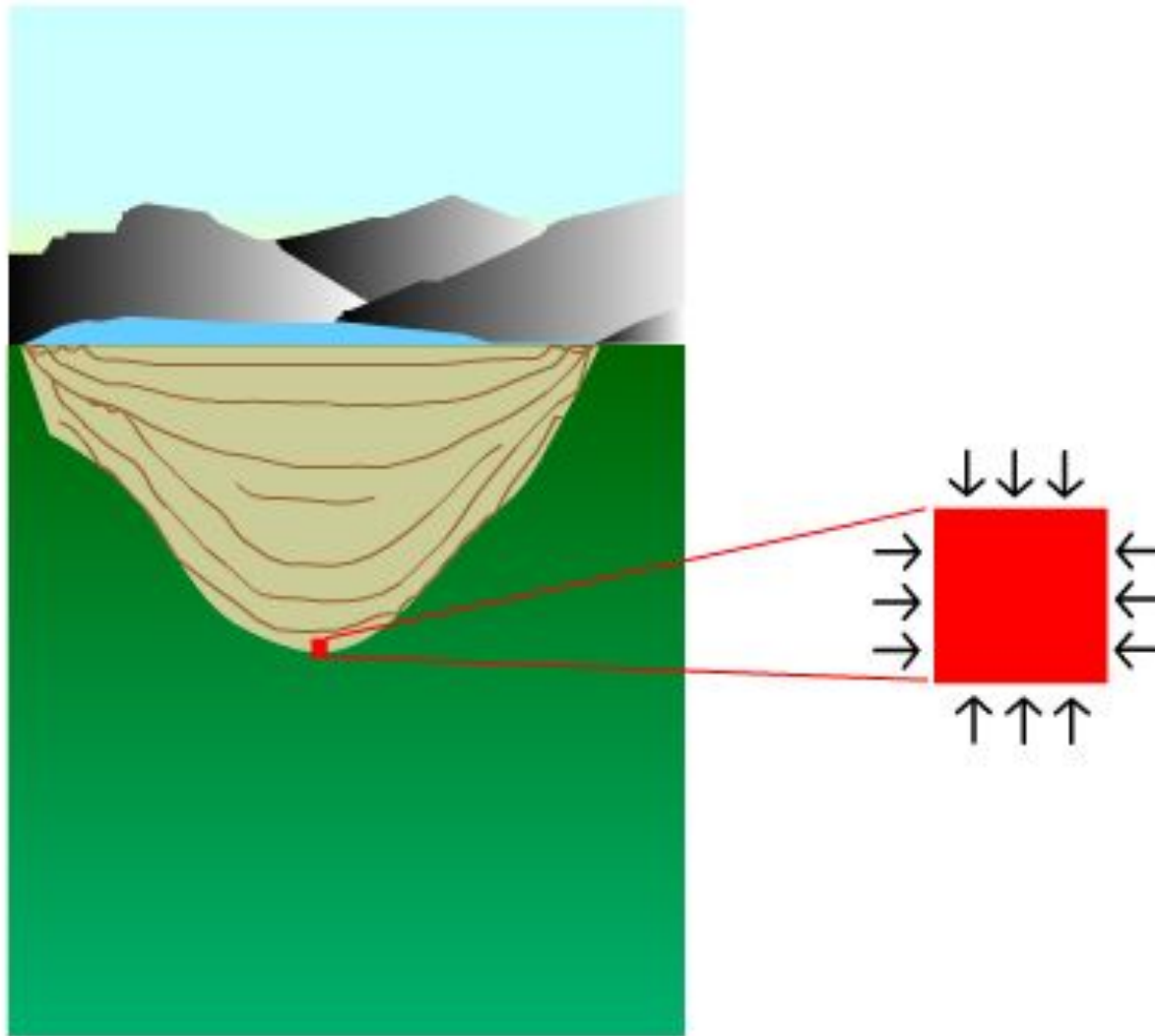


Ныряльщик, находящийся на глубине 50 м под поверхностью воды, испытывает давление соответствующее весу 50-метровой колонны воды. Силы, которые действуют на тело ныряльщика, одинаковы во всех направлениях. Такое давление называется литостатическим.

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**

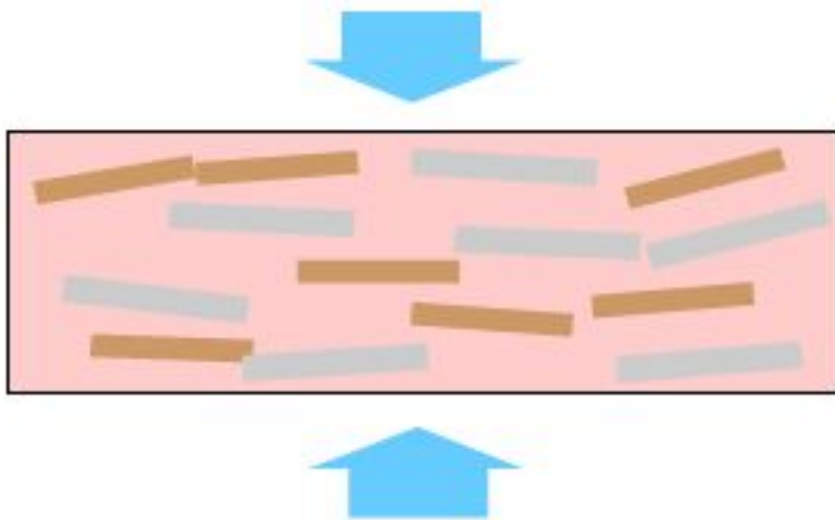


Гранит

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.

# Метаморфические горные породы

глина



глинистый  
сланец

известняк



мрамор

песчаник

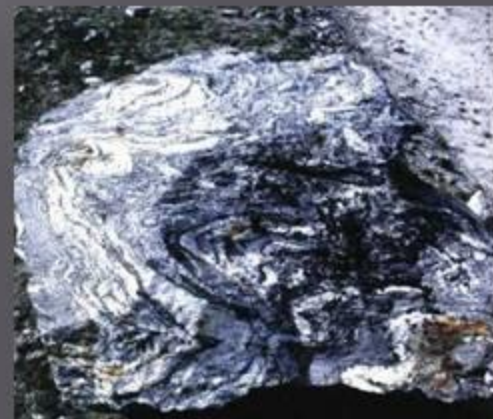


кварцит

гранит



гнейс



# Ортопороды и парапороды

Из первично магматических	Из первично осадочных
Ортопороды	Парапороды
Гнейсы (по составу близки к гранитам)	Кварциты (осадочные песчаники)
Амфиболиты (преобразованные базальты)	Мраморы (из известняков и доломитов)
Гранулиты (в составе кварц, полевой шпат) с полосчатой и ленточной текстурой	Глинистые сланцы (динамометаморфизм глин)
	Филлиты (кровельные сланцы в результате динамометамор- физма, состоят из кварца и серицита)

## 2. Виды метаморфизма

Метаморфизм (от гр., метаморфозос – преобразование, изменение) – процесс изменения минерального состава, структуры, текстуры горных пород под воздействием давления, температуры и химически активных веществ:

✓ **изохимический** - без существенного изменения исходных пород;

✓ **аллохимический** или метасоматоз - химический состав исходной породы существенно изменяется в результате привноса или выноса каких-либо компонентов

Процессы метаморфизма как бы заключают цикл изменений, происходящих с горными породами

Метаморфизм

Региональный

Локальный

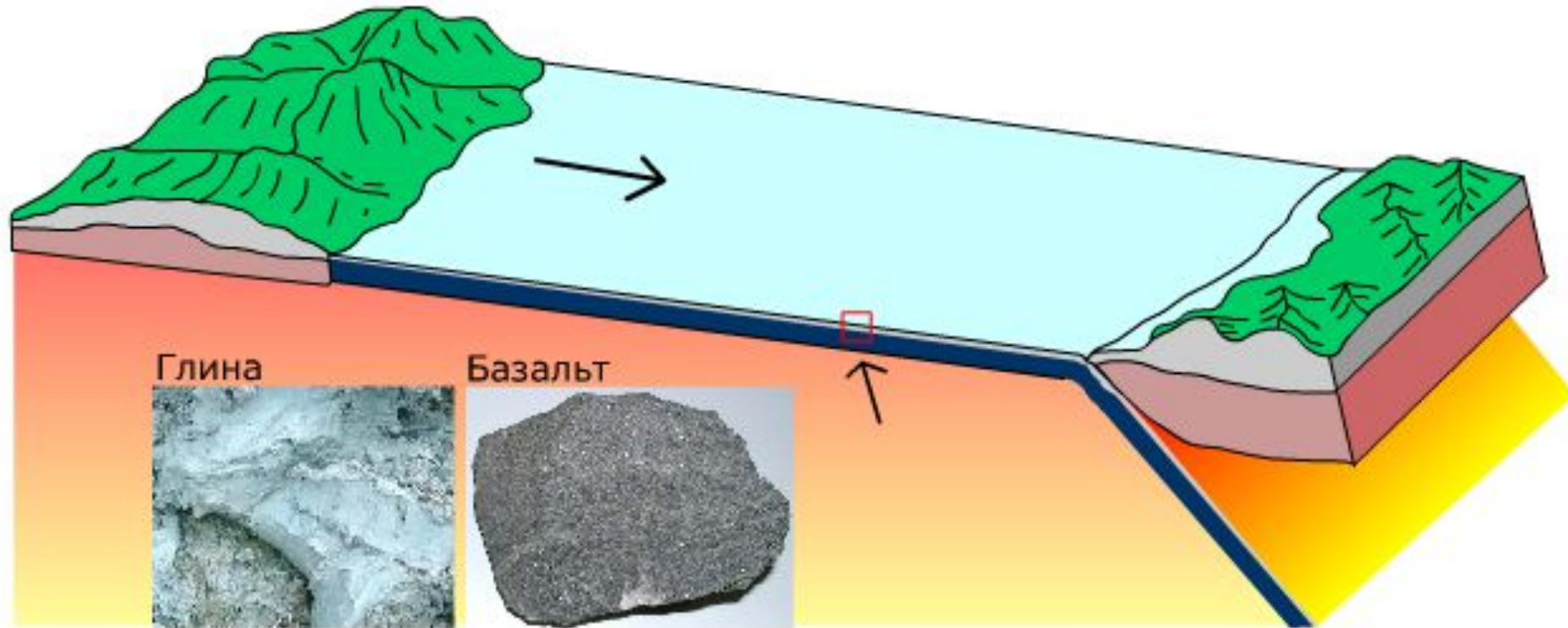
Региональный  
(динамотермальный)

Контактовый  
(термальный)

Катакластический  
(динамический)

Импактный  
(ударный)

# РЕГИОНАЛЬНЫЙ МЕТАМОРФИЗМ



Глина



Базальт

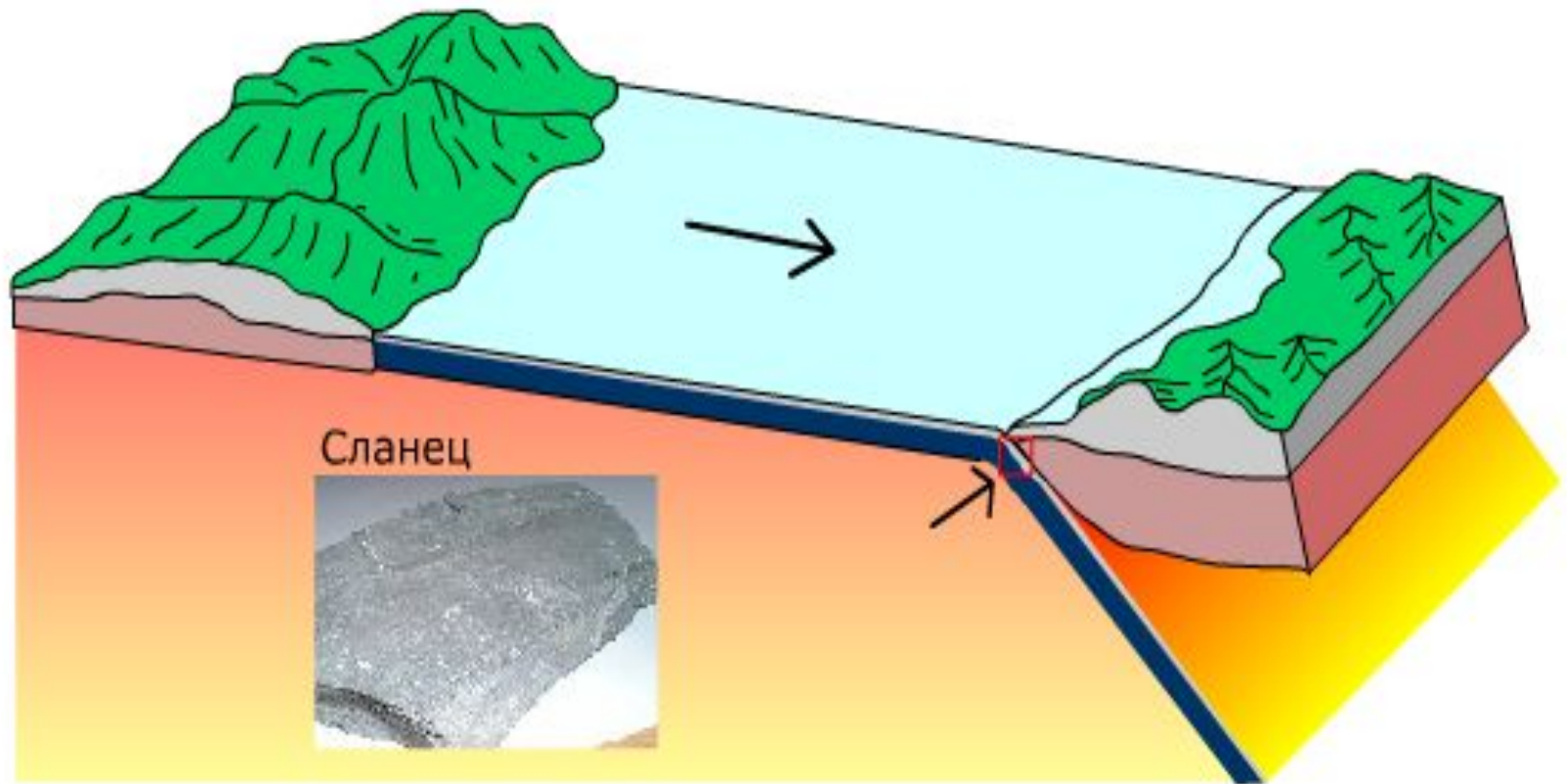


Метаморфизм, который затрагивает крупные блоки земной коры, называется региональным. В зонах субдукции крупные блоки океанической коры погружаются на большие глубины. В результате увеличения температуры и давления субдуцирующая кора подвергается метаморфизму. Верхняя часть океанической

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.



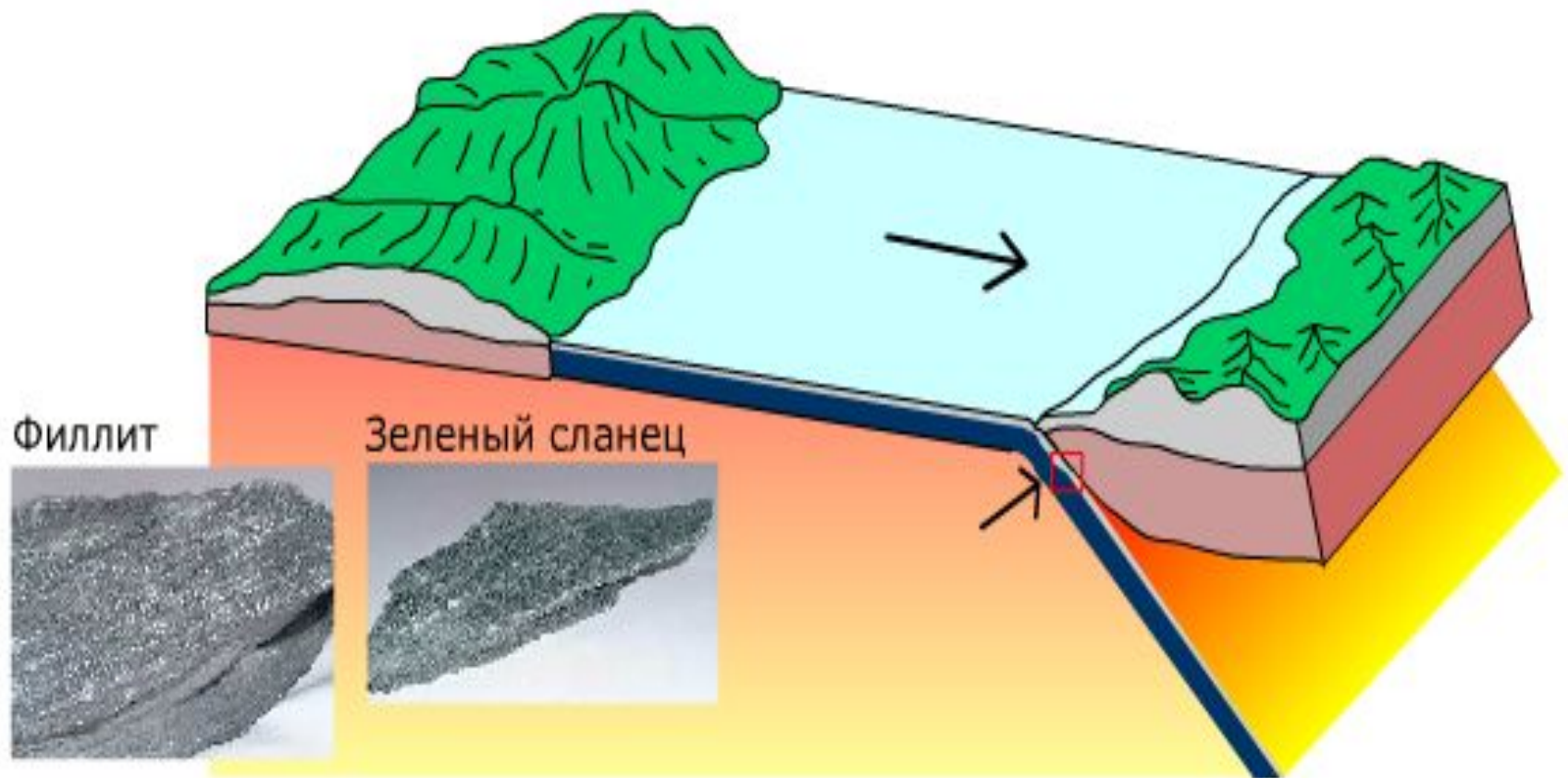
# РЕГИОНАЛЬНЫЙ МЕТАМОРФИЗМ



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

В результате диагенеза глина превращается в сланец.

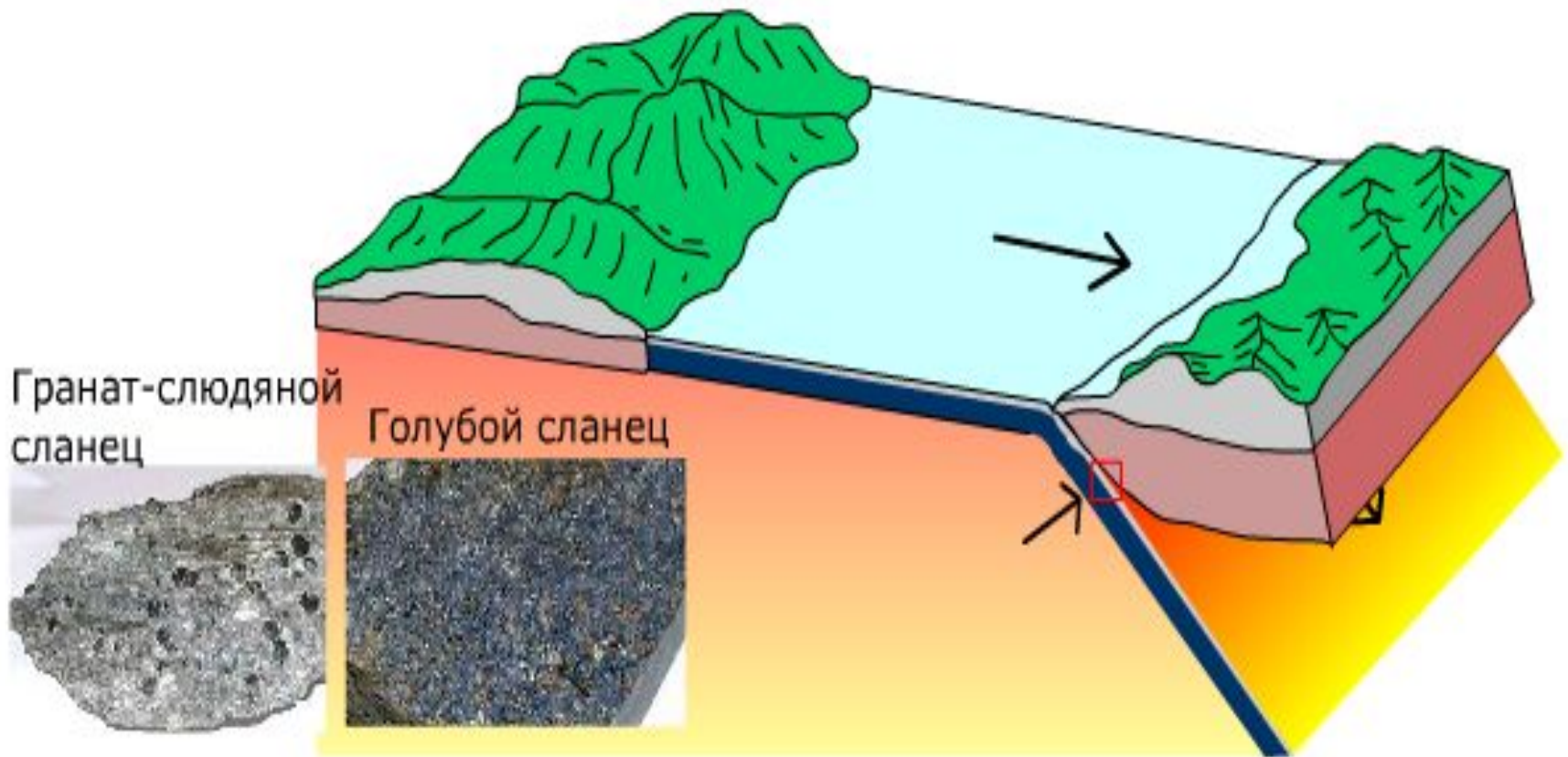
# РЕГИОНАЛЬНЫЙ МЕТАМОРФИЗМ



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.

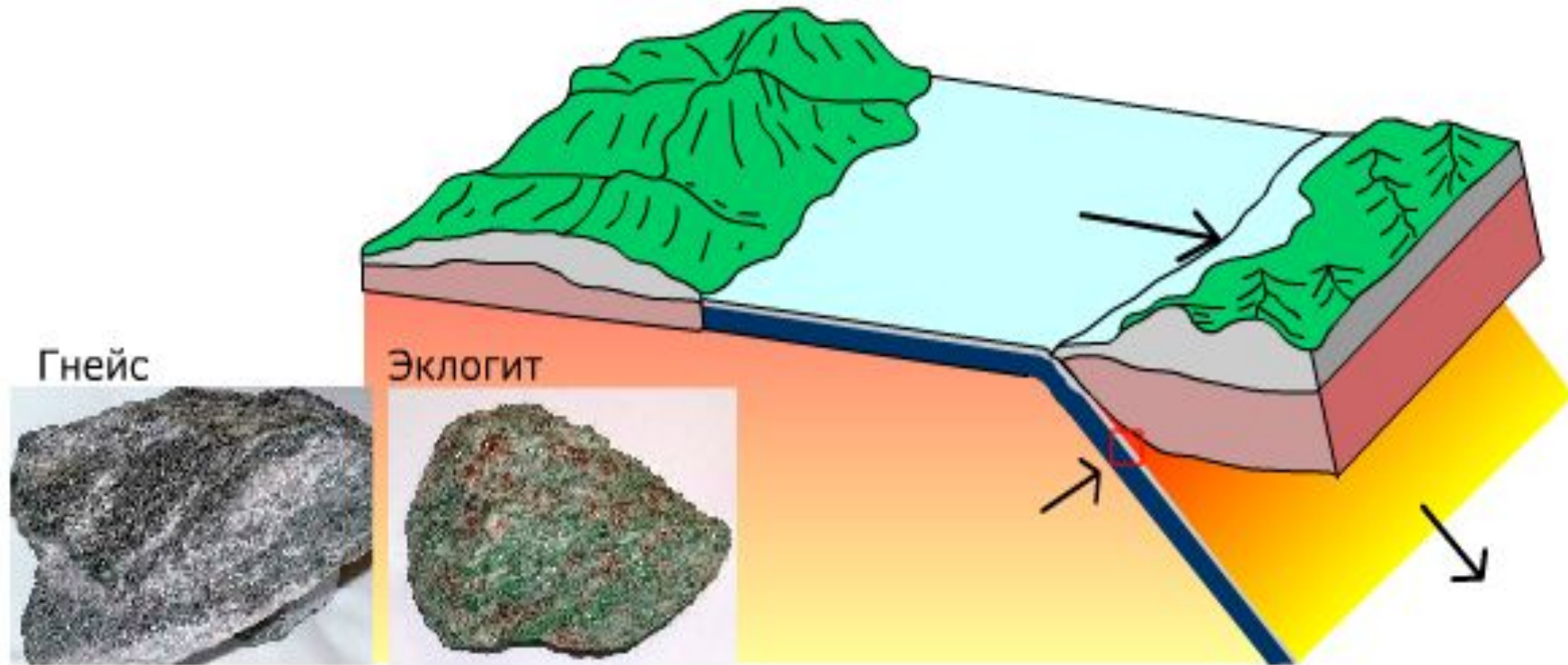
# РЕГИОНАЛЬНЫЙ МЕТАМОРФИЗМ



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

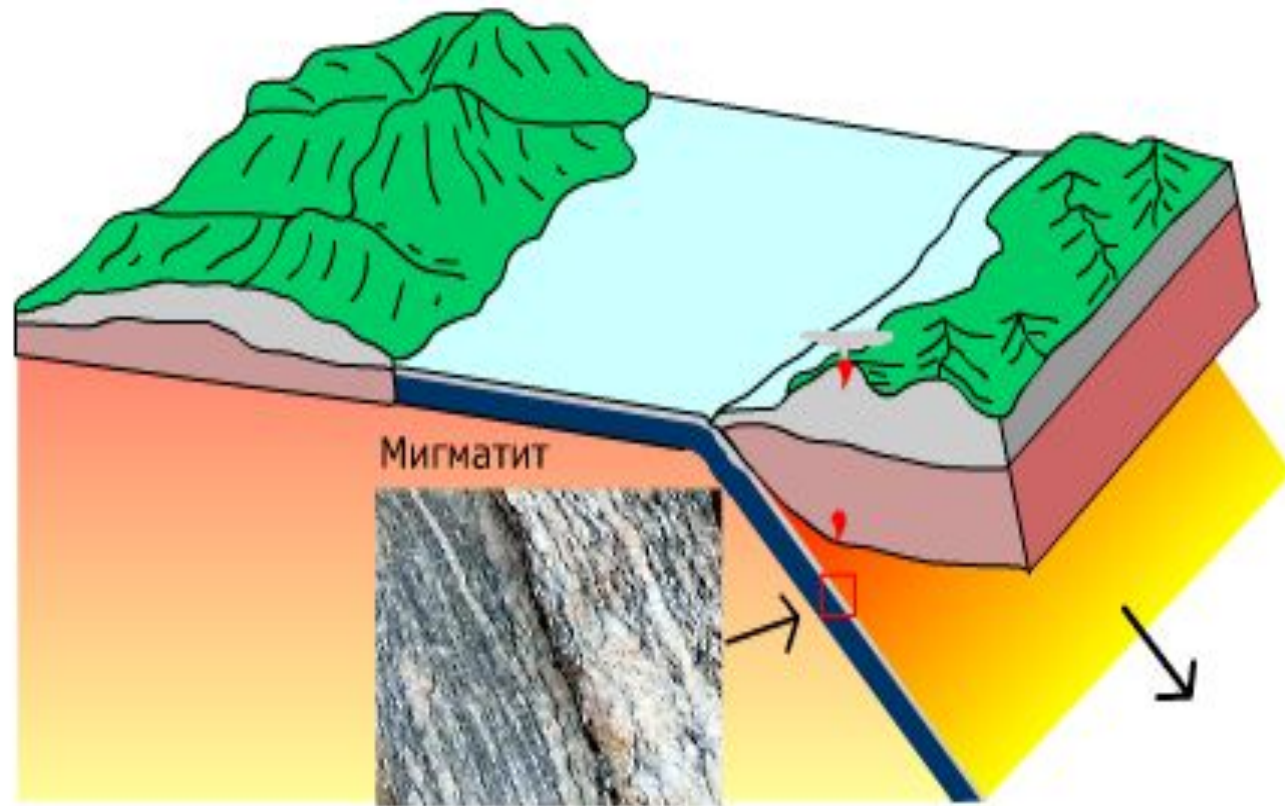
превращается в голубой сланец, а филлит – в гранат-сланцевой сланец. Такой метаморфизм называется метаморфизмом средних ступеней.

# РЕГИОНАЛЬНЫЙ МЕТАМОРФИЗМ



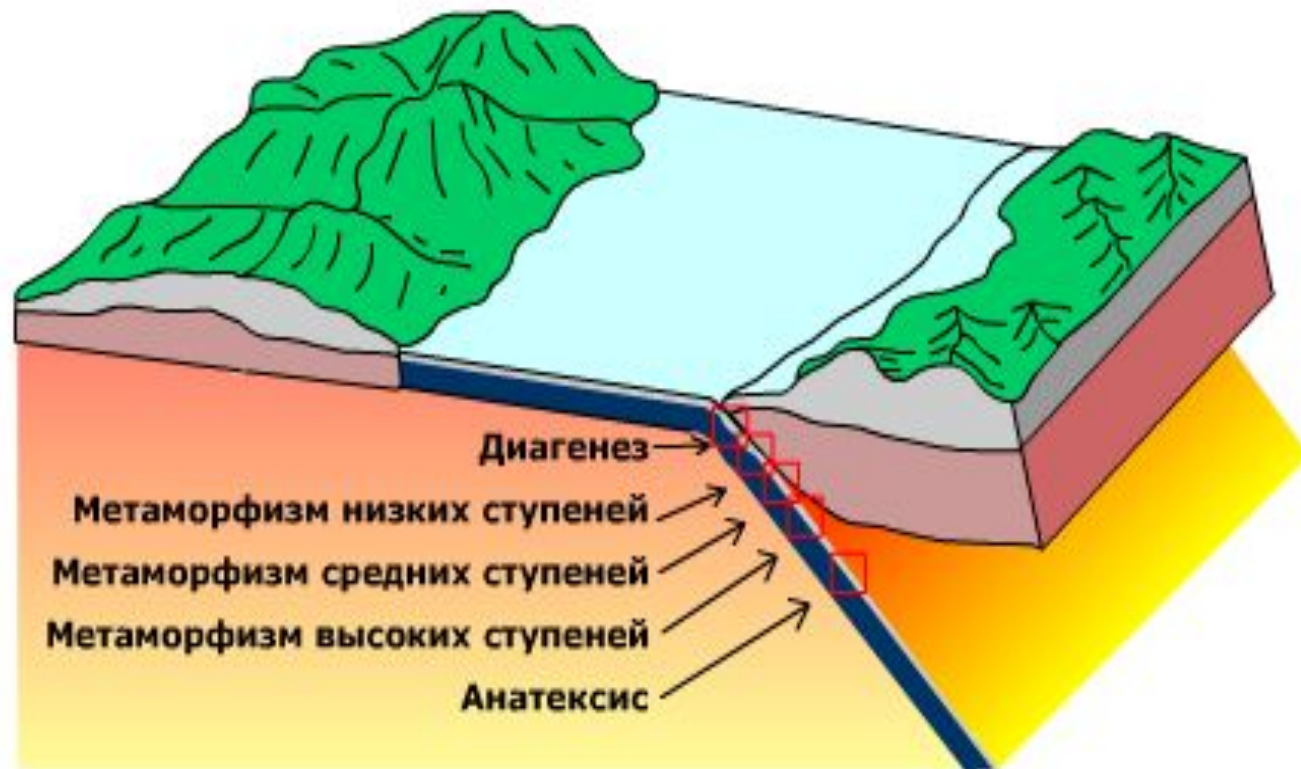
На глубине около 20 км гранат-сланцев превращается в гнейс. На глубине около 40 км голубой сланец превращается в эклогит.

# РЕГИОНАЛЬНЫЙ МЕТАМОРФИЗМ



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

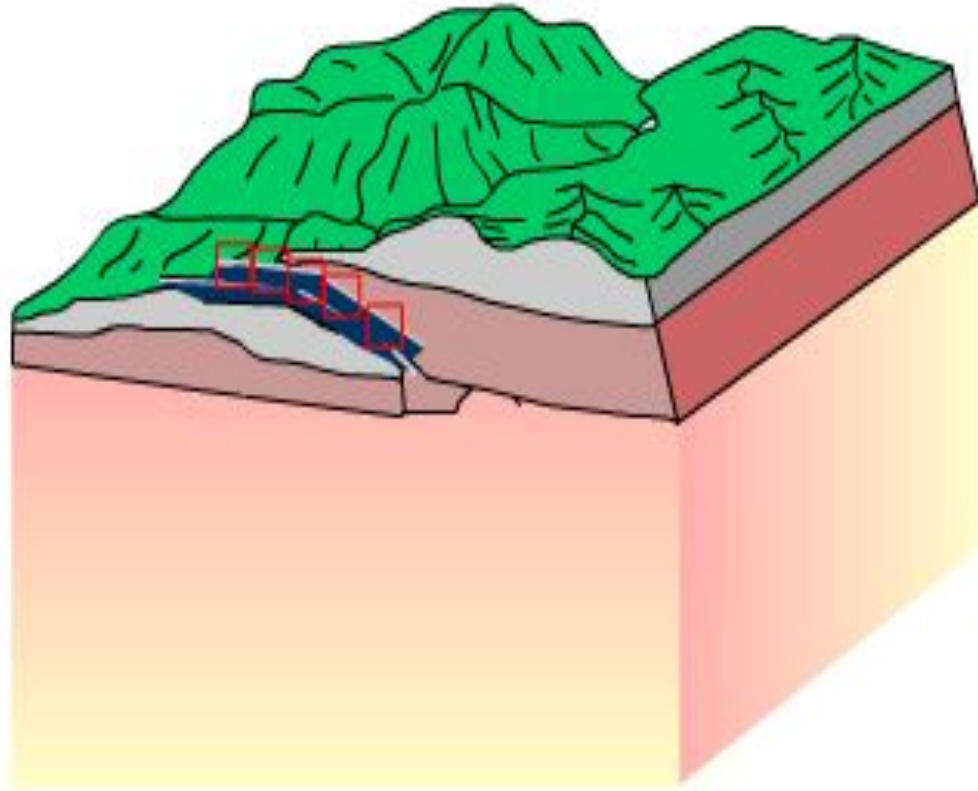
# РЕГИОНАЛЬНЫЙ МЕТАМОРФИЗМ



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).

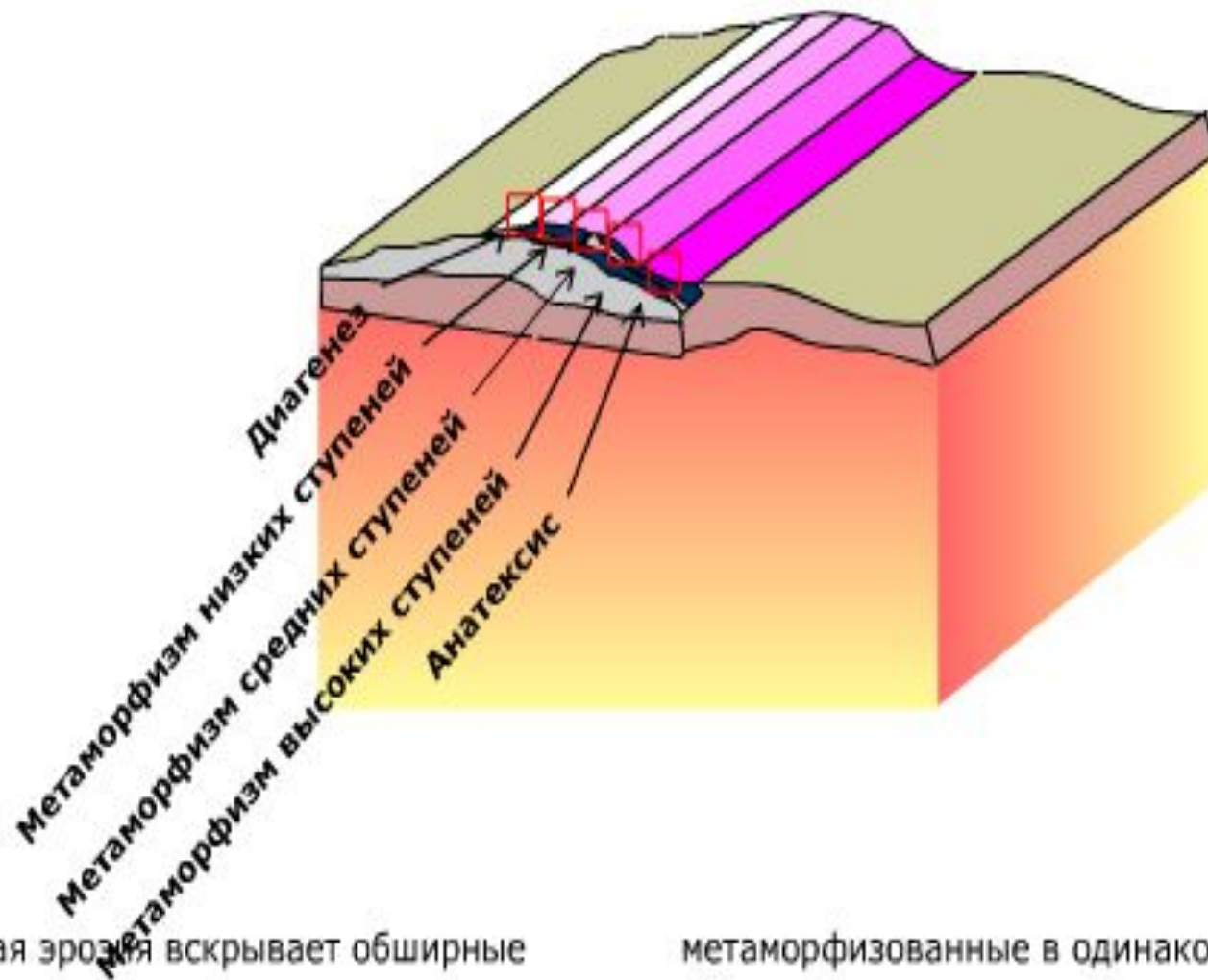
# РЕГИОНАЛЬНЫЙ МЕТАМОРФИЗМ



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.



*Гнейсы*



*Кварциты*



*Мраморы*



При региональном метаморфизме:

- ✓ образовавшиеся в экзогенных условиях богатые водой минералы переходят в безводные или бедные водой минералы;
  - ✓ образуется ряд рудных минералов, иногда в промышленных количествах, например, железные руды в железистых кварцитах (Кривой Рог, Курская магнитная аномалия).
- 1) Низкая ступень – образуются филлиты, серициты, зеленокаменные породы, кремнистые сланцы.
  - 2) Средняя ступень – мрамор, слюдистые сланцы, кварциты, кварцито-сланцы.
  - 3) Высокая ступень – мраморы, амфиболиты, гнейсы, кварциты, эклогиты.
  - 4) Ультраметаморфизм – происходит частичное или полное переплавление горной породы. Возникающий при этом расплав послойно внедряется во вмещающие породы с образованием инъекционных гнейсов и мигматитов.

# 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

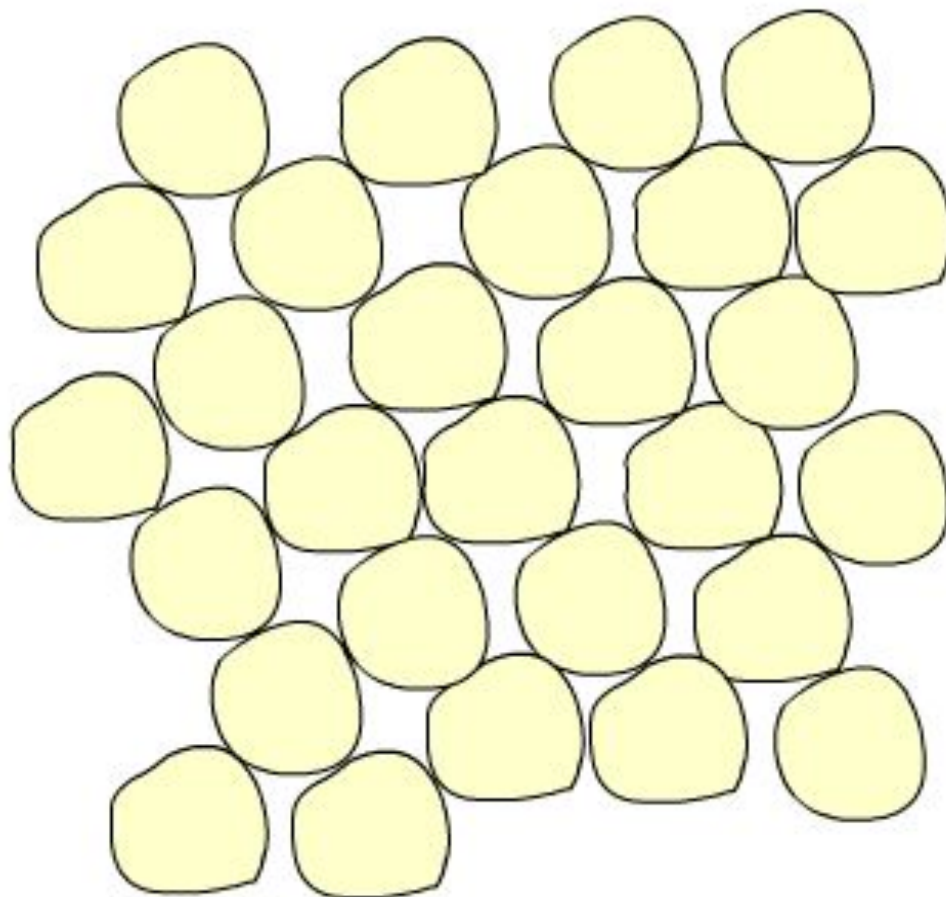
минералы, характерные только для метГП:

- 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

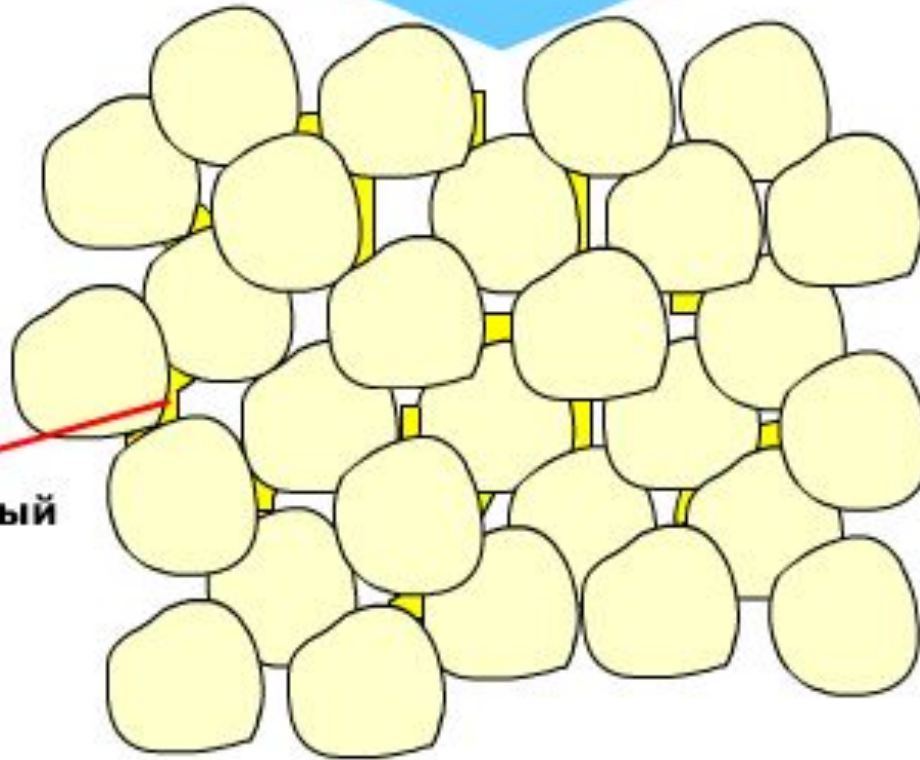
## ОТ КВАРЦЕВОГО ПЕСКА ДО КВАРЦИТА



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



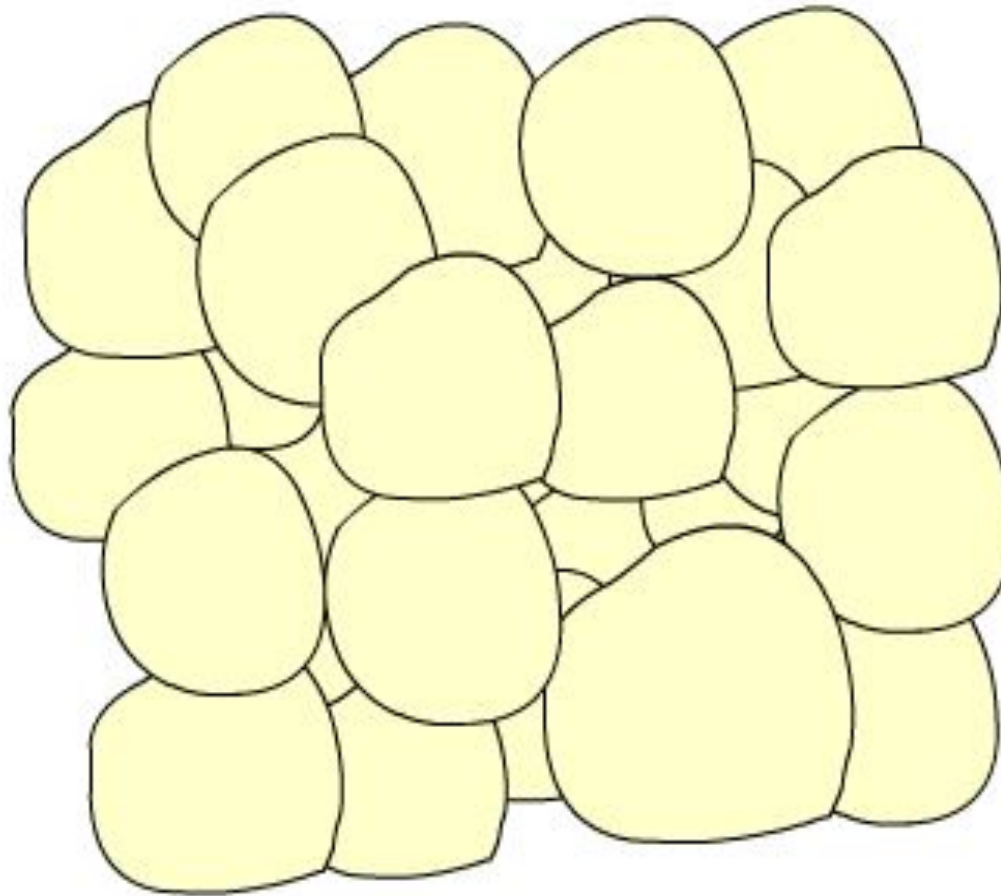
**Новообразованный  
кварц**

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



# ЛОКАЛЬНЫЙ МЕТАМОРФИЗМ – на ограниченных площадях

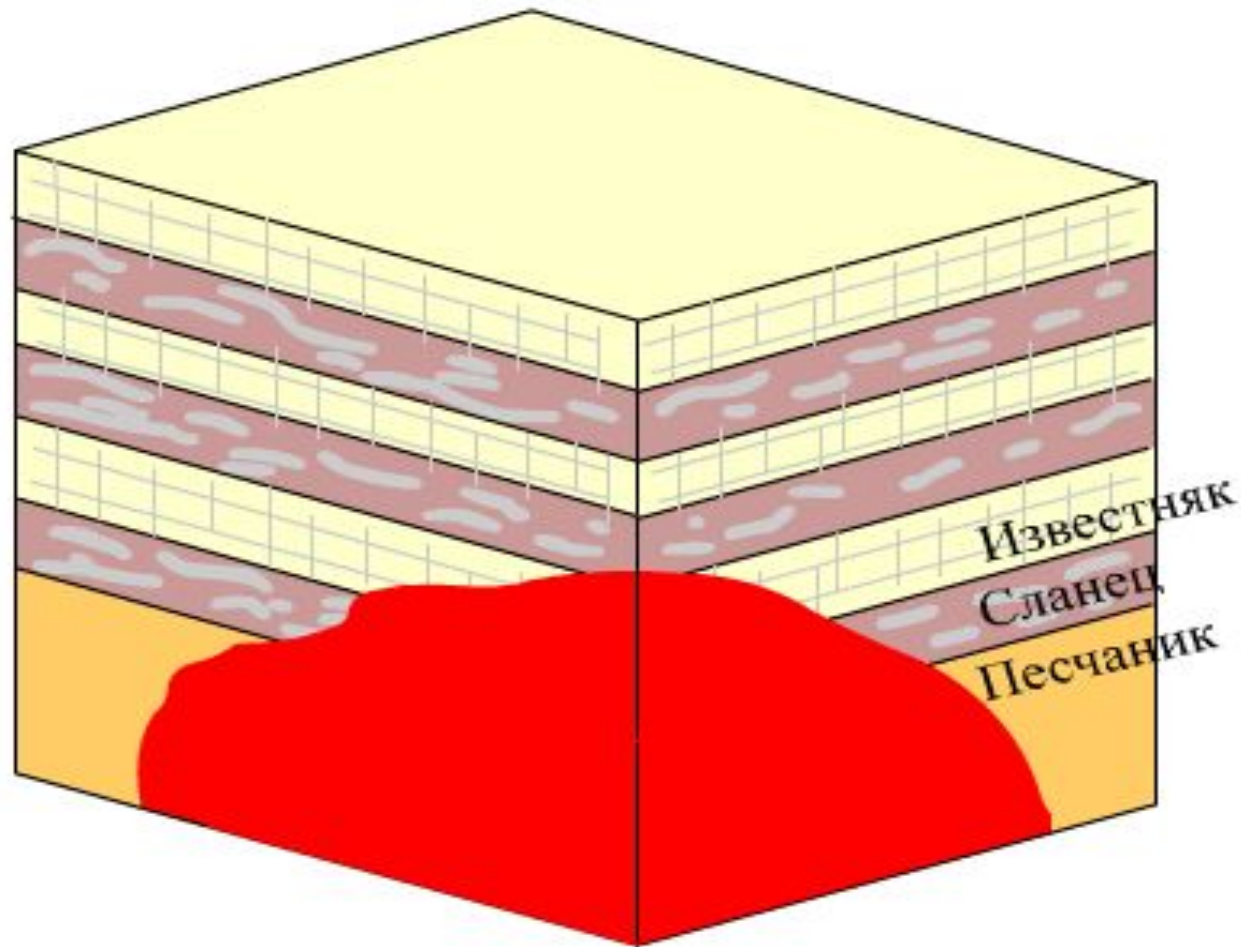
Контактовый (контактный, термальный) метаморфизм производит несланцеватые породы (без каких-либо направлений расщепления), такие как мраморы, кварциты, скарны, роговики.

Наиболее распространены роговики, содержащие андалузит, хлорит, мусковит. Это породы серого, тёмно-серого и чёрного цветов. Их минеральный состав разнообразен и зависит от состава первичных пород (кварц, полевые шпаты, амфиболы и пироксены). Структура контактовых роговиков обычно микрокристаллическая, а текстура – массивная

# Роговики



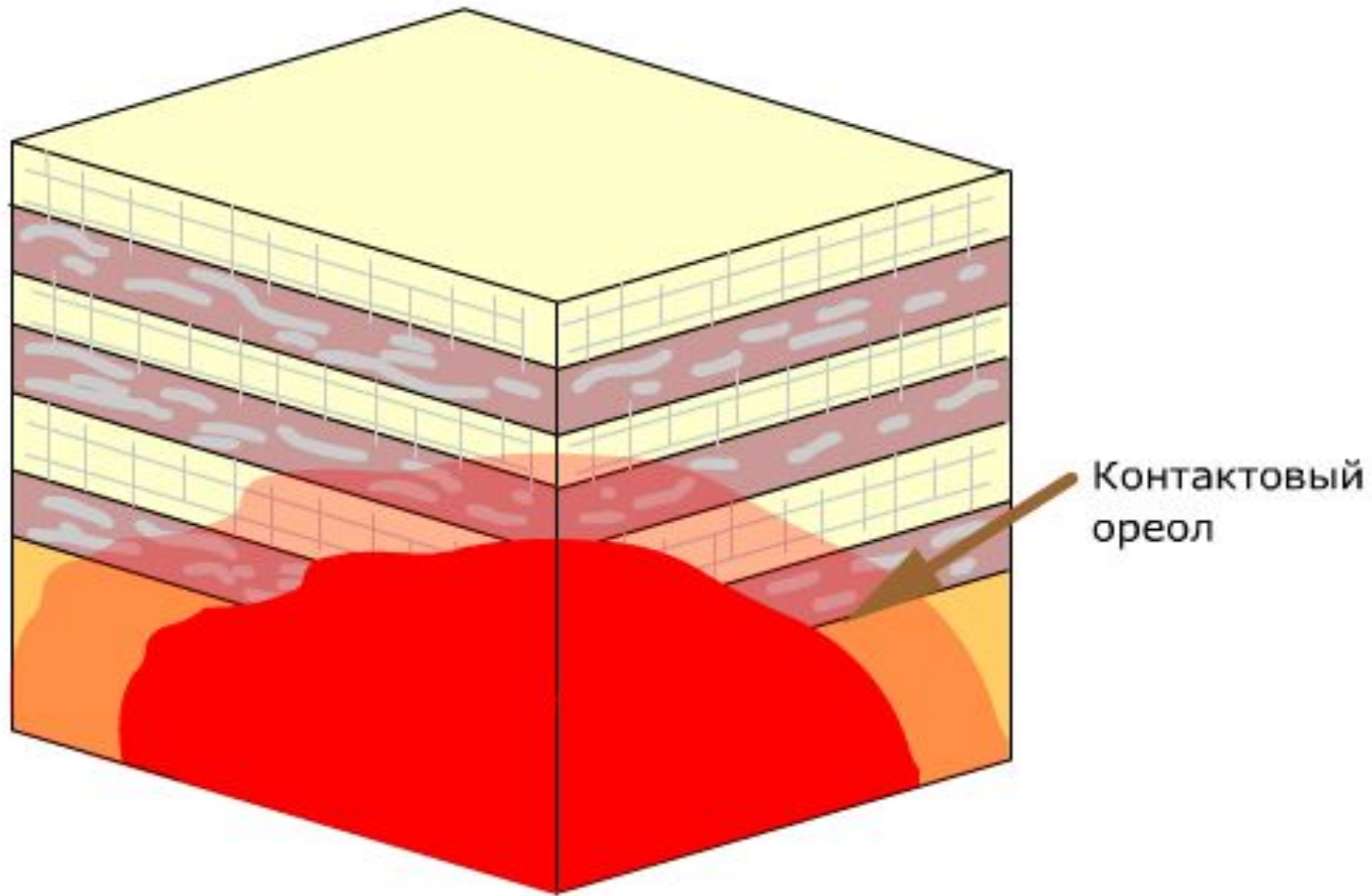
# КОНТАКТОВЫЙ МЕТАМОРФИЗМ



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



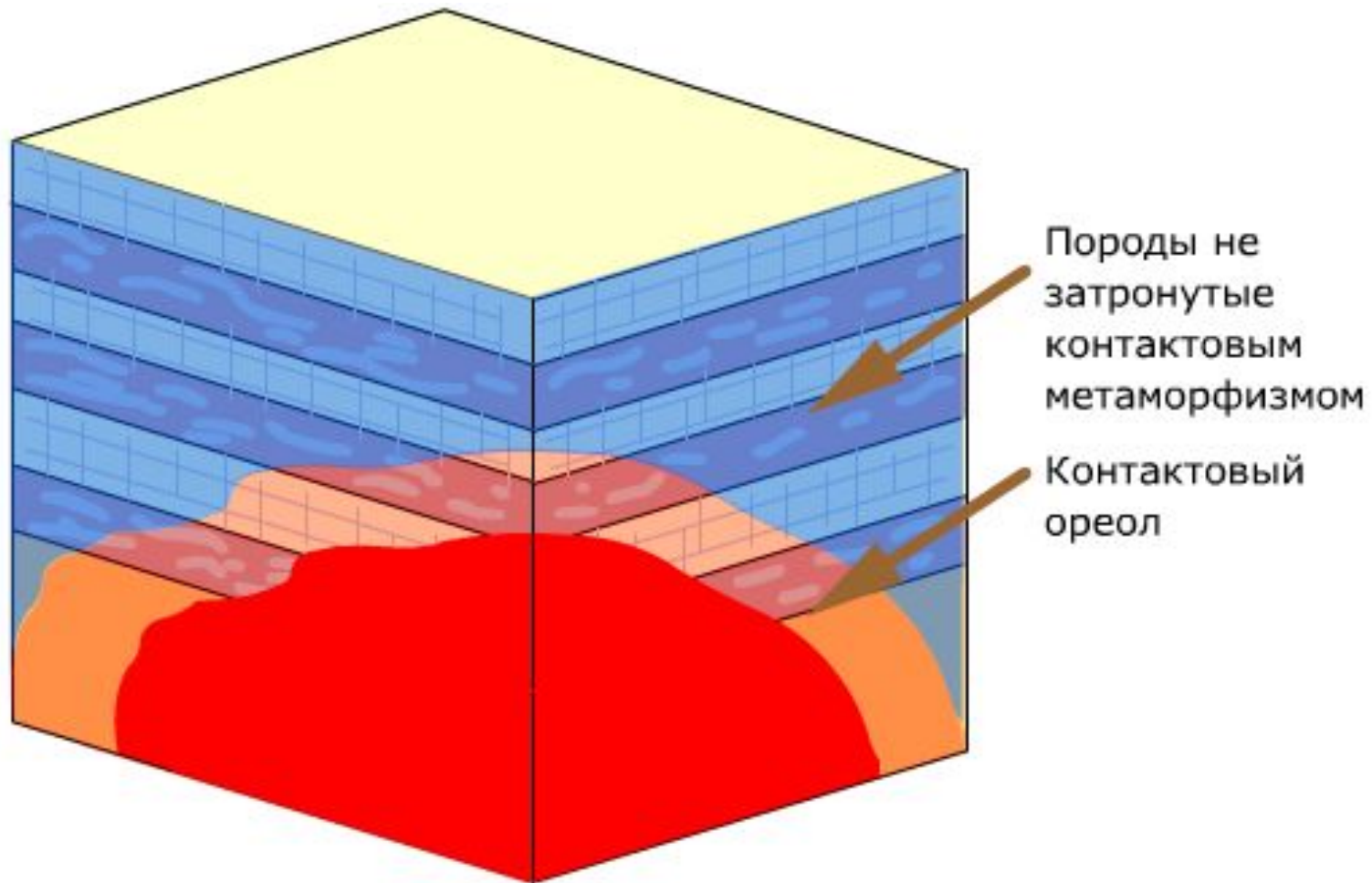
Контактный  
ореол

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

ореолом. Породы в пределах контактового ореола подвергаются контактовому метаморфизму.

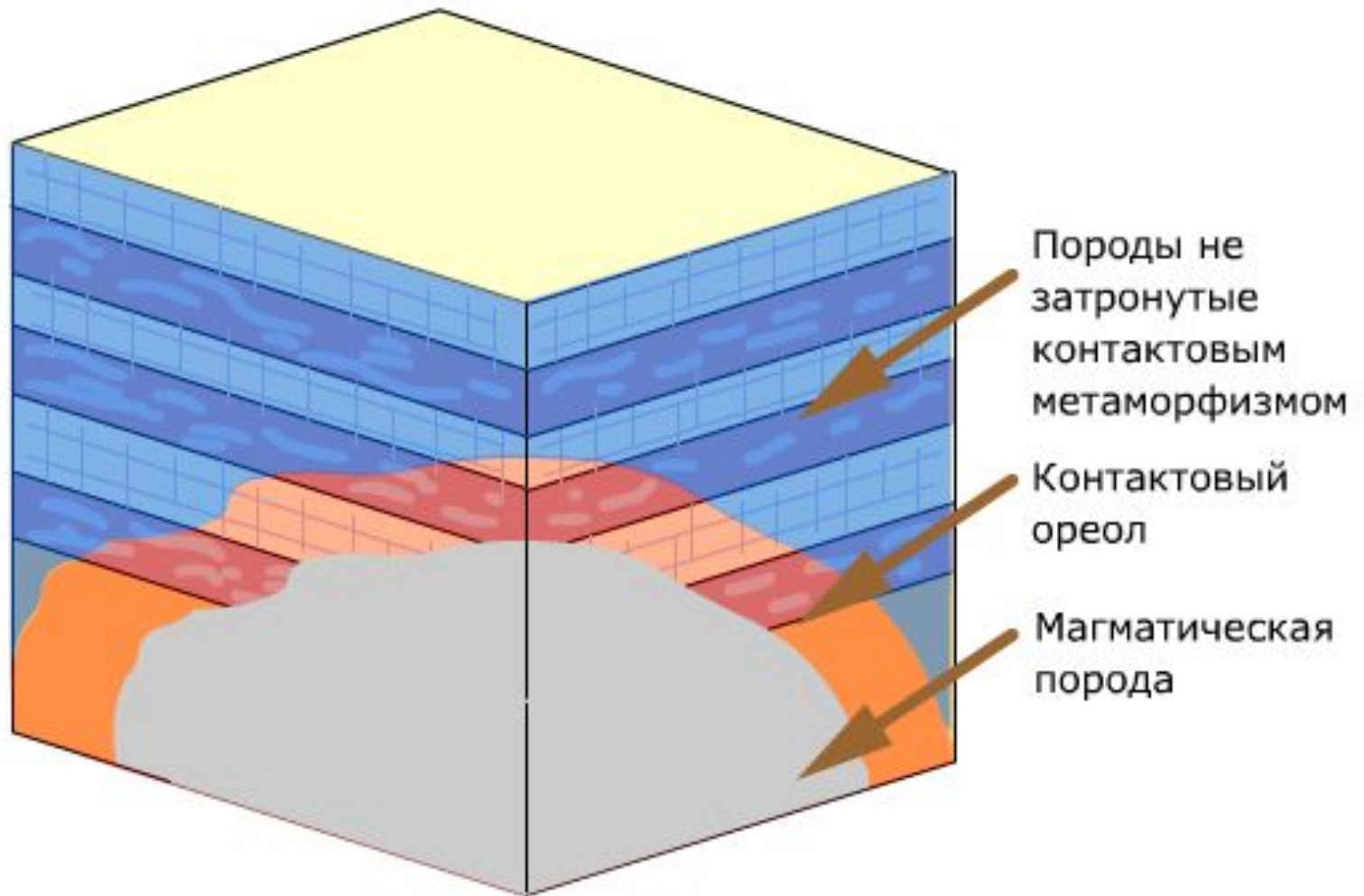


# КОНТАКТОВЫЙ МЕТАМОРФИЗМ



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

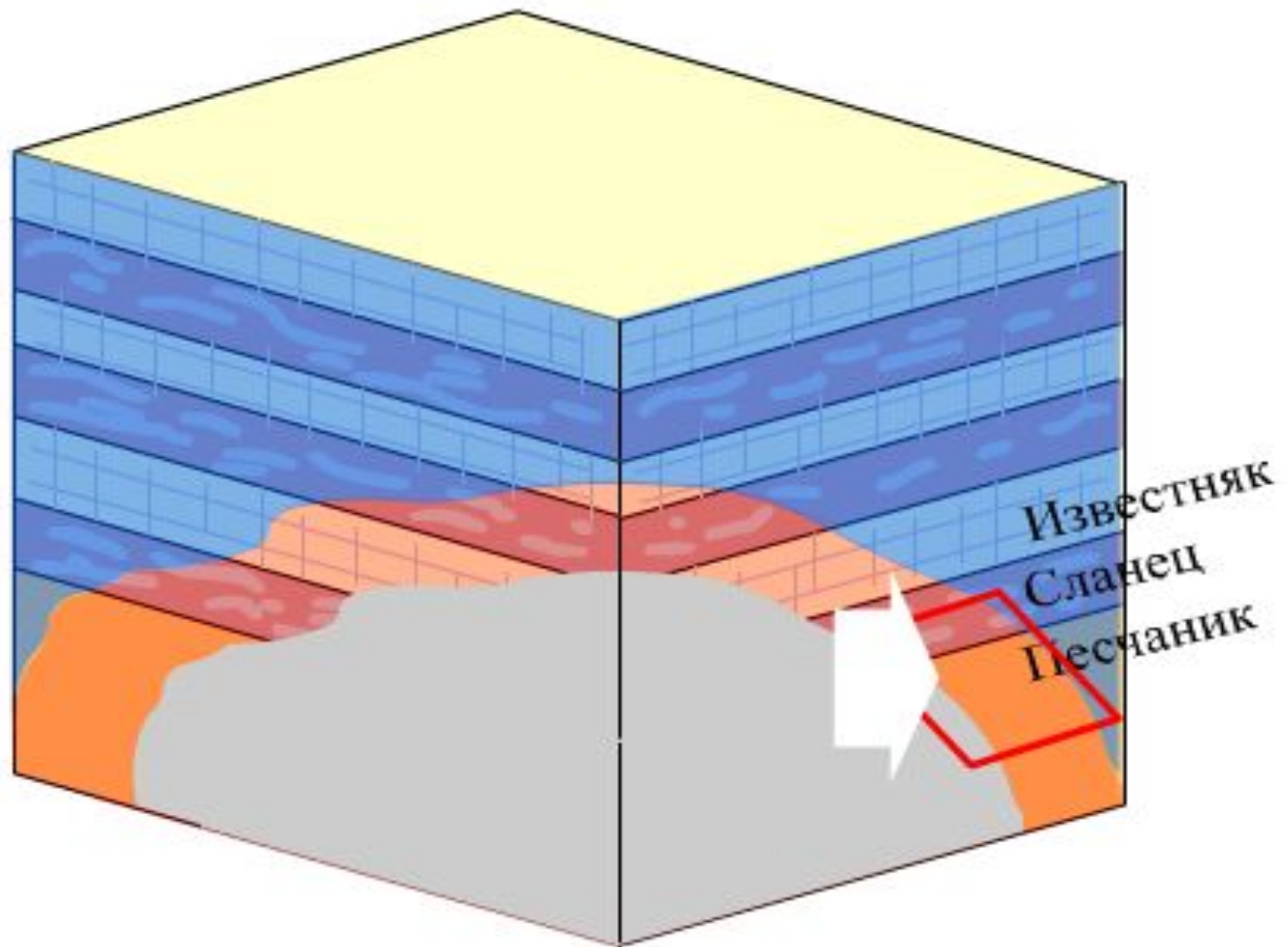
Контактный ореол

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

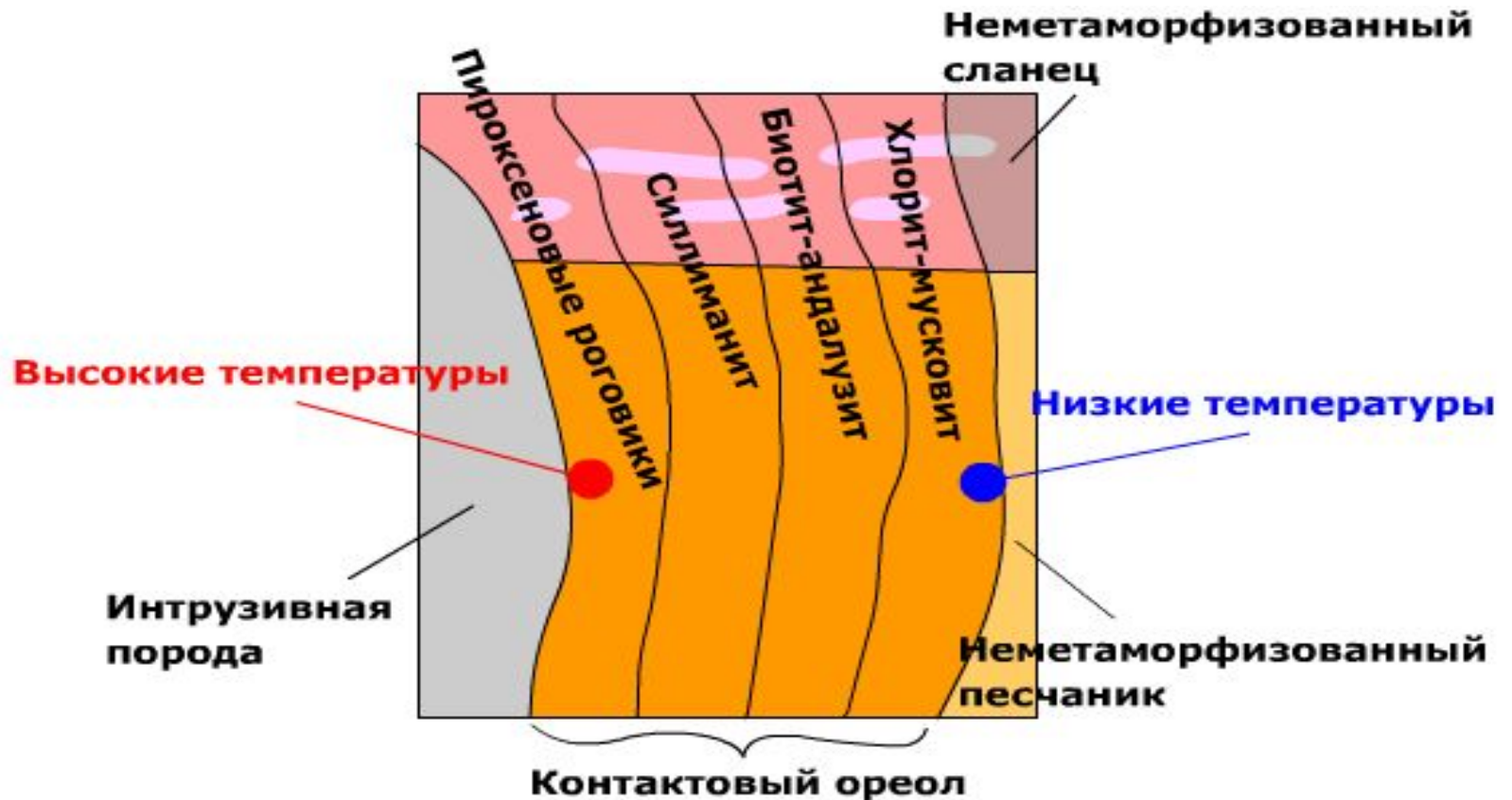


Давайте рассмотрим более подробно породы в пределах контактового ореола. Сначала давайте рассмотрим контактовый метаморфизм сланца и песчаника.

# **Метасоматизм**

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

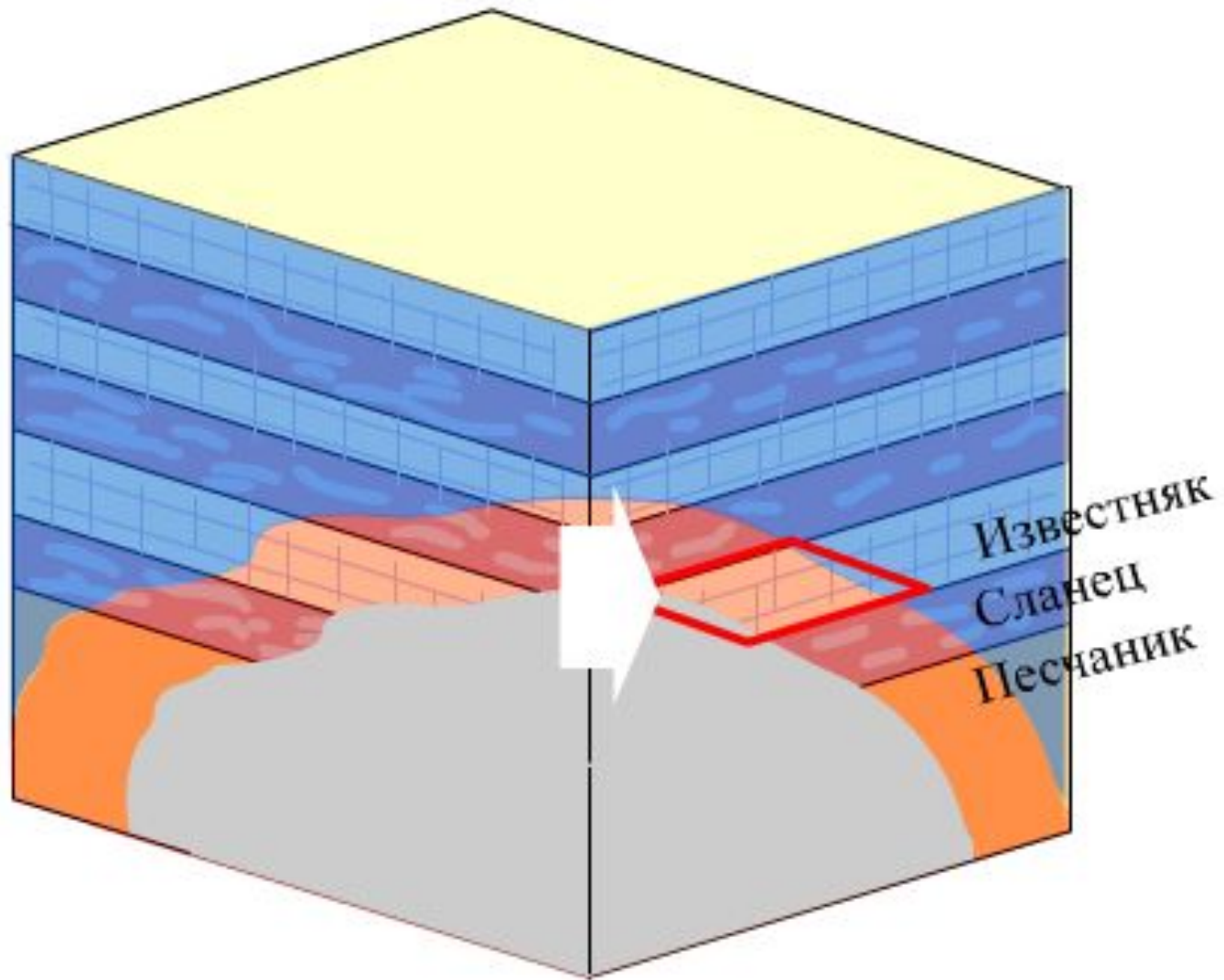
# КОНТАКТОВЫЙ МЕТАМОРФИЗМ



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

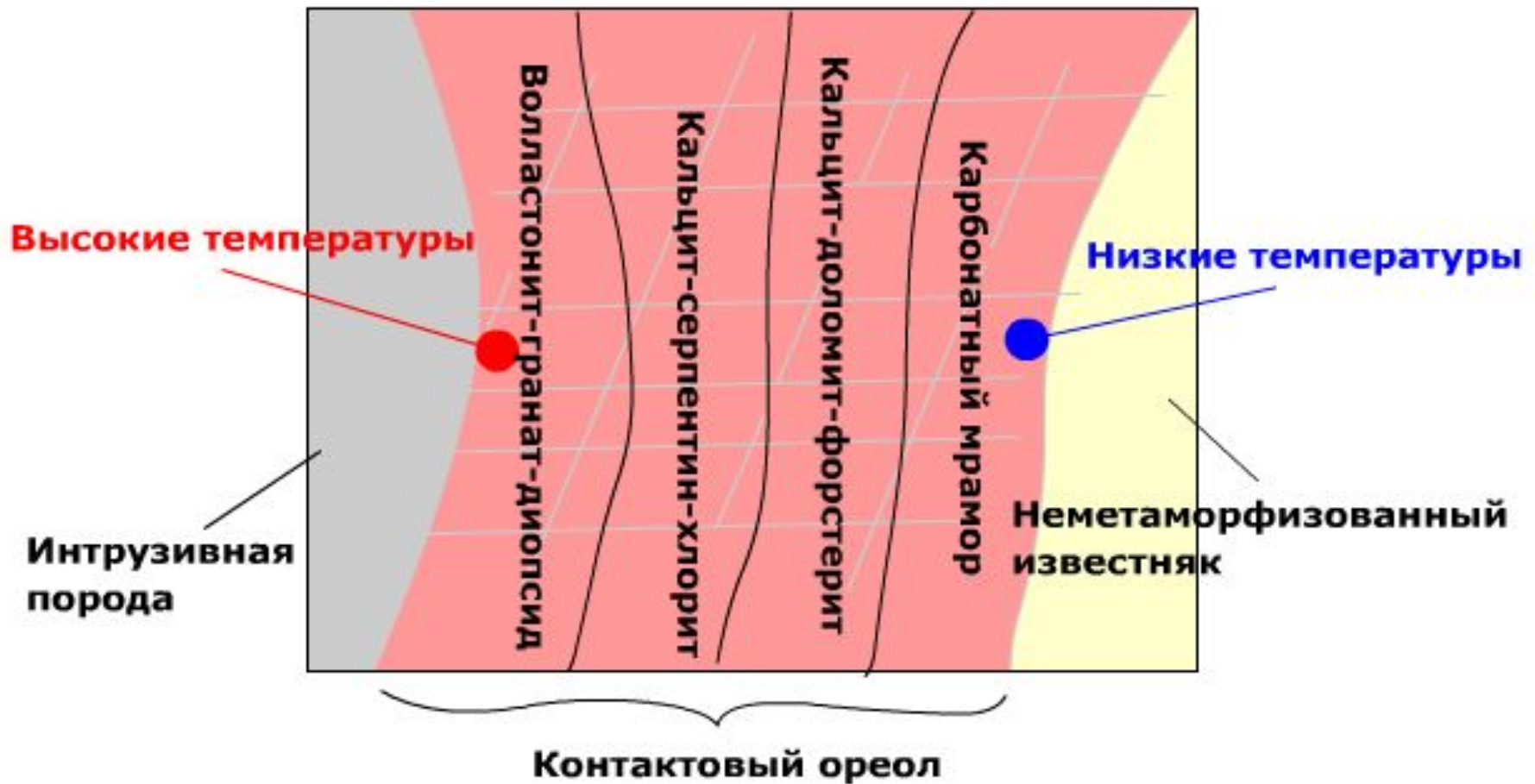
от расстояния между ними и интрузивной породой. Поэтому степень метаморфизма и минеральный состав пород меняется вкост контактового ореола. Роговики это рогоподобные массивные мелкозернистые породы, которые образуются в результате действия высоких температур и умеренных давлений при контактовом метаморфизме.

# КОНТАКТОВЫЙ МЕТАМОРФИЗМ



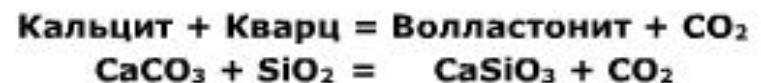
Теперь давайте рассмотрим контактовый метаморфизм известняка.

# 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:



# МЕТАСОМАТОЗ

При локальном метаморфизме характерны процессы метасоматоза – замещение одних минералов другими, но без изменения объема.

При метасоматическом изменении, главным образом, магматических пород в контакте гранитных интрузий, возникают светлые крупнозернистые породы – **грейзены**. Для них характерны кварц, мусковит, турмалин, топаз, флюорит, берилл и др.





# Метасоматоз

Процесс преобразования горной породы в твёрдом состоянии, сопровождающийся частичным или полным изменением её химического и минерального состава.

В отличие от метаморфизма происходит активный привнос и вынос химических элементов.

Выделяют три разновидности метасоматоза:

-контактовый – воздействие тепла и флюидов магматических тел на окружающие их породы. Приводит к образованию контактово-метасоматических пород, которые обрамляют интрузивы (особенно гранитного состава)

-региональный – связан с региональными эндогенными потоками флюидов. Регионально-метасоматические породы формируются в тектонически активных зонах под влиянием мощных потоков флюидов

-гипергенный – приурочен к зоне гипергенеза. Образуются гипергенно-метасоматические породы.

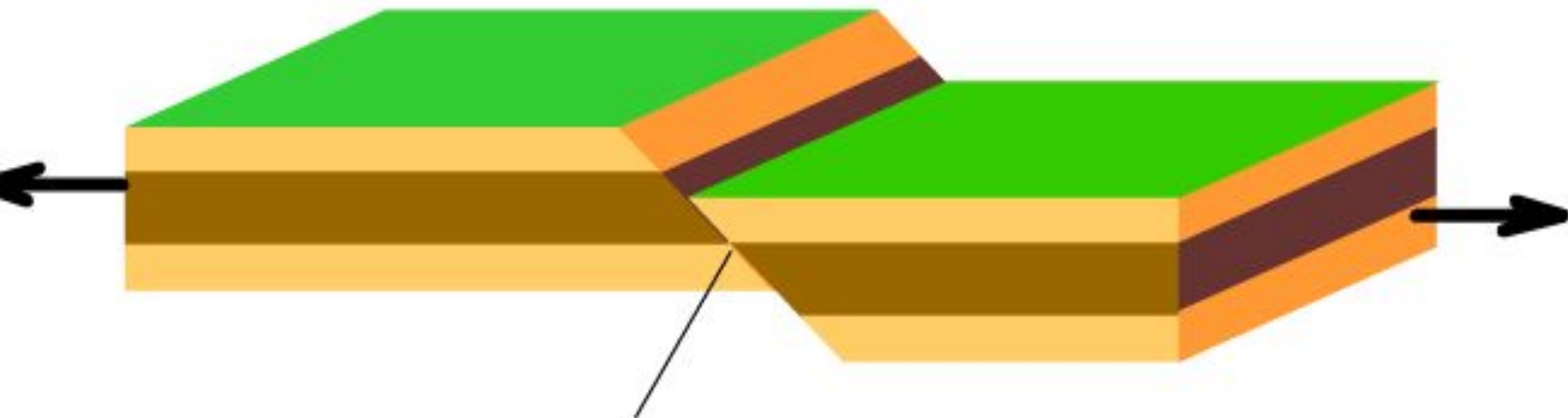
Частный случай контактово-метасоматического метаморфизма - образование скарнов (на контактах магматических пород (гранодиоритов) с известняками и доломитами).

Скарны - обобщенное название горных пород контактово-метасоматического происхождения, в составе которых преобладают силикаты железа, кальция, магния и марганца.

К скарнам иногда бывают приурочены крупные месторождения полезных ископаемых – железа, вольфрама, свинца и цинка, меди и т.д. (гора Магнитная на Урале – образование магнитного железняка на границе изверженных и осадочных горных пород).



# 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

(динамический, дислокационный, динамометаморфизм)

Приурочен к участкам развития дизъюнктивных нарушений (дислокаций) – типа сбросов, развит в границах и совершается при сравнительно небольших давлениях и довольно низкой температуре.

Происходит дробление крепких минералов или их деформации в первоначальной структуре и текстуре пород без образования трещин.

Формируются разнообразные породы: тектонические брекчии, катаклазиты, милониты (от мельница).

# Катакластический метаморфизм



*Тектоническая брекчия* - агрегат относительно крупных обломков, сцементированных мелкозернистой массой, обладает массивной текстурой.



*Катаклазит* - неполное разрушение материала, видны реликты исходных пород, в той или иной степени деформированных.

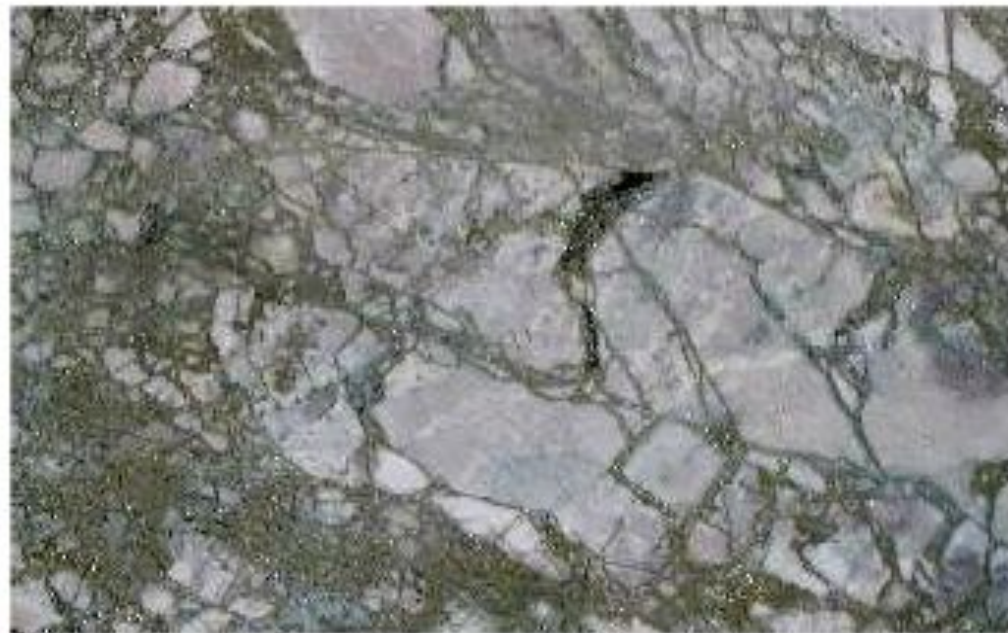


*Милонит* - тонкоизмельченная масса, образующая породу, часто обладающую сланцеватой или линзовидно-полосчатой текстурой.

# 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, Тромсойя

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

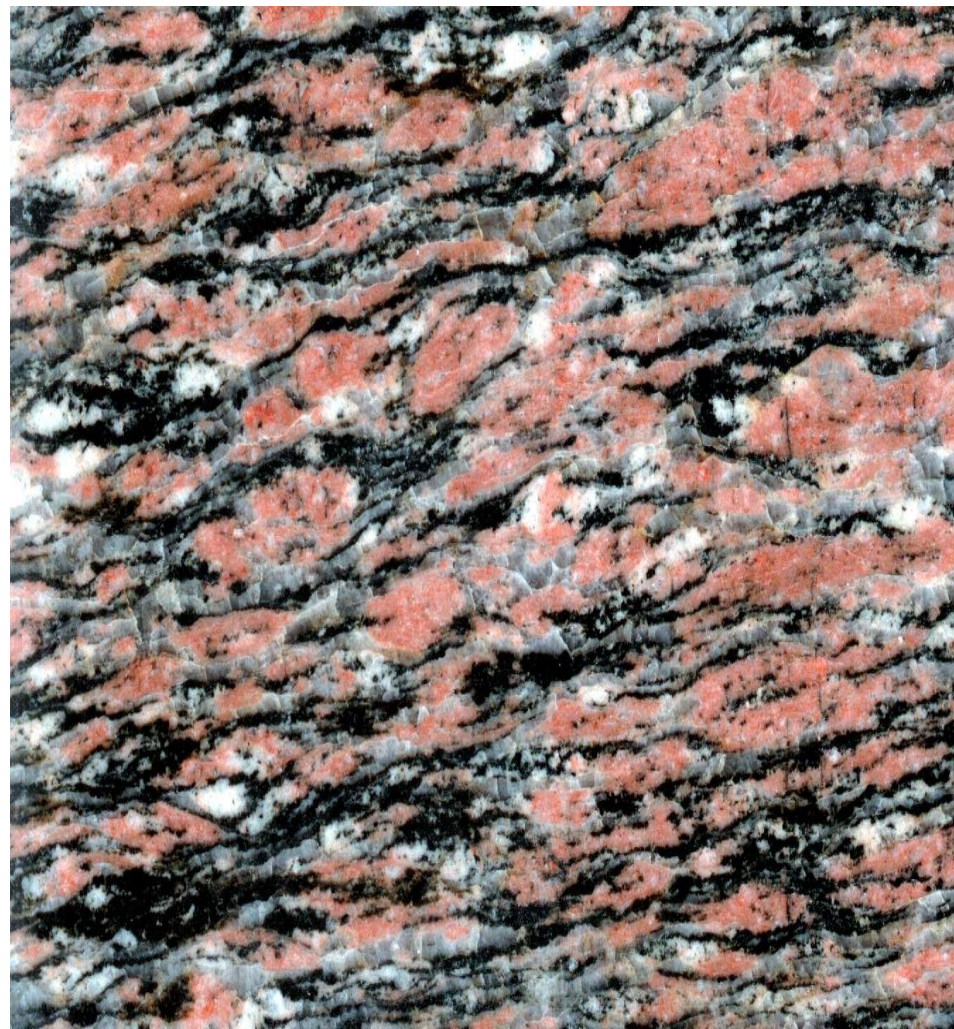
Милонит, Лейрдален, Йотунхаймен

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.



# Гранито-гнейсы



# УДАРНЫЙ (ИМПАКТНЫЙ) метаморфизм

(от англ. *impact* — «столкновение», «удар»)

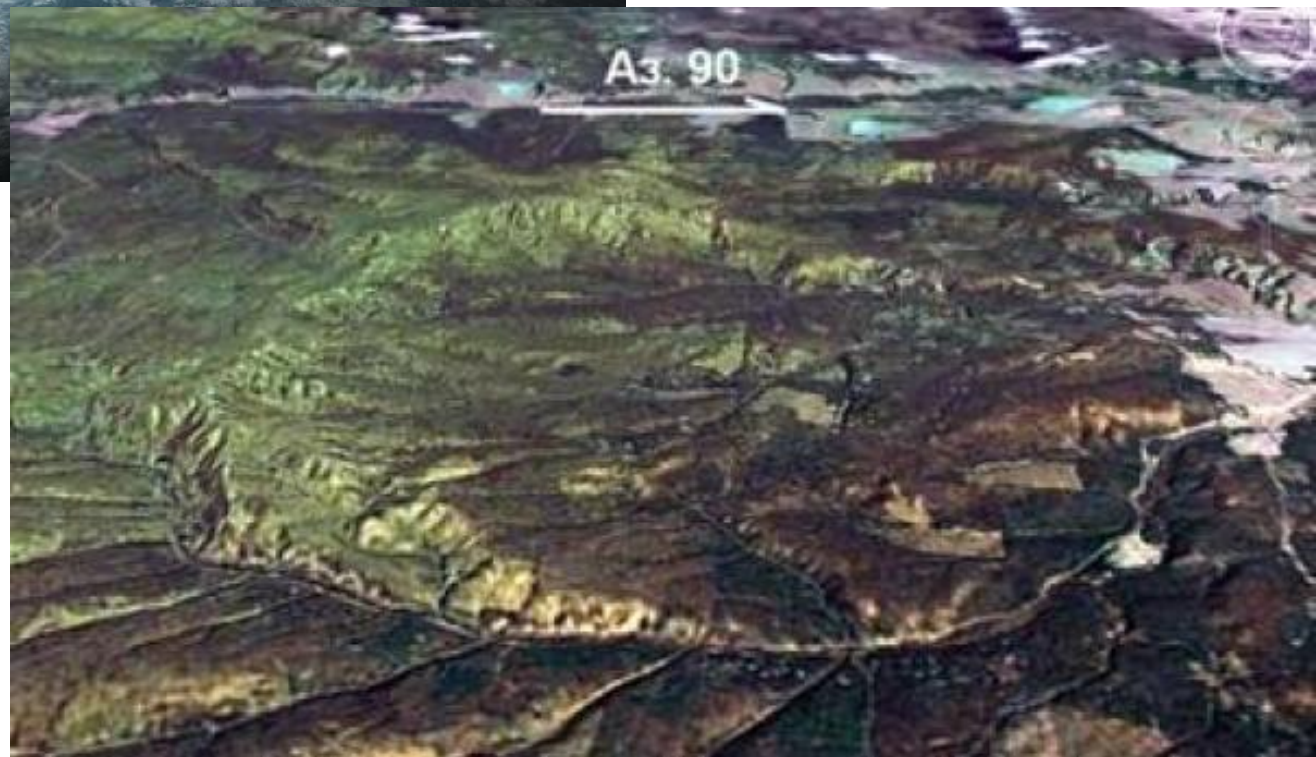
Особый тип контактового метаморфизма вызван высокоскоростным ударом метеорита.

Ударный кратер на поверхности земли называется астроблемой

На земле обнаружено около 150 астроблем

При ударе горные породы нагреваются и частично плавятся, а в самом центре даже испаряются.

После остывания на днище кратера образуется слой импакта — горной породы с весьма необычными геохимическими свойствами, сильно обогащена редкими на земле элементами — иридием, осмием, платиной, палладием.



Огромные ударные нагрузки (кратковременное, но резкое повышение давления). Отмечается разрушение кристаллической структуры некоторых плагиоклазов и они превращаются в аморфное стекловатое вещество. Образуются минералы, для которых необходимо сверхвысокое давление. Например, из кремнезёма очень высокой плотности – коэссит, а также алмазы.

Классификация импактов (импактитов):

- обломочные – породы, сформированные без участия импактного расплава или с очень небольшим его количеством (импактированные породы мишени, брекчии)
- расплавные породы – продукты застывания импактного расплава (тагамиты, импактные стёкла, шлаки, пемзы)