

# Лекция № 34

На предыдущих лекциях было показано, что продукты метаморфизма глинистых (пелитовых), а также основных вулканических пород и их осадочных аналогов наиболее широко распространены в метаморфических комплексах. В ассоциации с породами этих двух главных петрохимических групп входят метаультрамафиты, метакарбонатные породы, метаморфизованные кислые магматические породы, метасилицитолиты и метаморфизованные кварцевые песчаники, а также высокоглиноземистые породы.

Рассмотрим эти типы пород подробнее.

# Метаультрамафиты

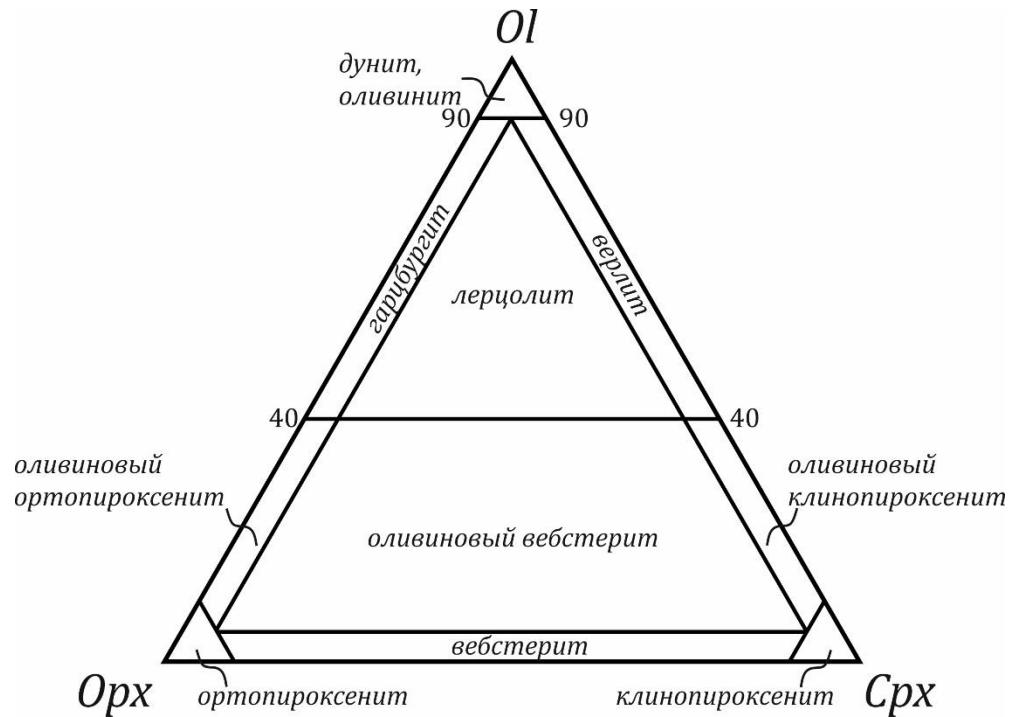
К этой группе пород относятся метаморфизованные ультрамафиты ультраосновного и основного состава, главной особенностью которых является резкое преобладание мафических (темноцветных) минералов.



Серпентинизированный дунит – пример самой начальной стадии метаморфизма ультрамафитов.

# Протолит метаультрамафитов

Вспомним классификационную диаграмму ультрамафитов, главными минералами которых являются оливин, моноклинный и ромбический пироксены, подчиненное значение играют амфиболы, а акцессорными минералами являются хромшпинель и титаномагнетит.



Ключевые особенности химизма пород:

- много  $MgO$ ,  $SiO_2$ ;
- мало  $FeO$ ,  $CaO$ ,  $Al_2O_3$ .

# Условия метаморфизма ультрамафитов

По степени метаморфических преобразований в группе метаультрамафитов намечается соответствие определенным  $P-T$  условиям на международной схеме минеральных фаций:

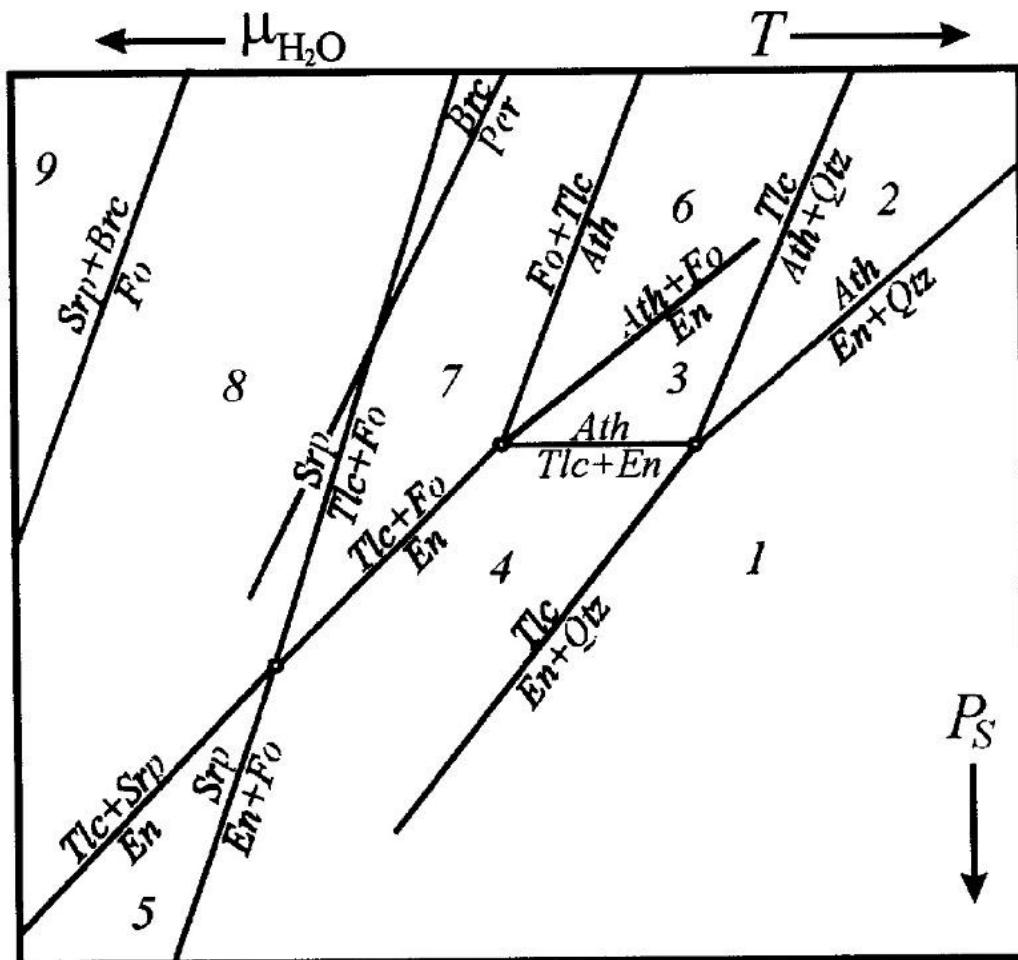
- цеолитовая фация – самые низкотемпературные преобразования ультрамафитов, связанные с гидратацией и превращением в **серпентиниты**;
- зеленосланцевая фация – образуются антигоритовые серпентиниты и серпентиновые сланцы. Возможно появление талька, хлорита, амфибала tremolite-актинолитового ряда, а также ромбических амфиболов (антофиллита и куммингтонита). Возникают тальк-антигоритовые, актинолит-тальк-хлоритовые и другие сланцы. При более высокой температуре антигорит полностью сменяется антофиллитом. В условиях повышенной активности  $\text{CO}_2$  возникает кальцит.

# Условия метаморфизма ультрамафитов

- амфиболитовая фация – среднетемпературные парагенезисы образуются в амфиболовых сланцах и массивных амфиболовых породах, состоящих из роговой обманки, бедной алюминием, tremолита, хлорита, талька и оливина;
- гранулитовая фация – самая высокотемпературная. Образуются оливин-пироксеновые и пироксеновые породы, близкие по составу ультрамафическому протолиту. Этими преобразованиями охвачена значительная часть глубинных пород мантии Земли. Аналогичные процессы происходят после затвердевания ультрамафитовых магм на большой глубине в ходе регressiveного субсолидусного преобразования первичных интрузивных тел или масс кумулатов.

Для метаультрамафитов также существуют *схемы минеральных фаций*, один из примеров которых показан на следующем слайде.

# Минеральные фации метаультрамафитов



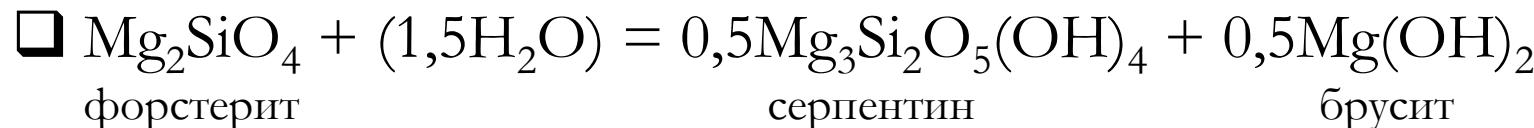
1 – Энстатит-кварцевая; 2 – энстатит-антофиллитовая (антофиллит-кварцевая); 3 – тальк-антофиллитовая (энстатит-антофиллитовая); 4 – тальк-энстатитовая; 5 – энстатит-серпентиновая; 6 – антофиллит-форстеритовая (тальк-антофиллитовая); 7 – тальк-форстеритовая; 8 – форстерит-серпентиновая (серпентин-тальковая); 9 – брусит-серпентиновая.

$\text{Srp}$  – серпентин,  $\text{Brc}$  – брусит;  $\text{Frc}$  – форстерит;  $\text{Tlc}$  – тальк;  $\text{En}$  – энстатит;  $\text{Per}$  – периклас;  $\text{Ath}$  – антофиллит;  $\text{Qtz}$  – кварц.

# Серпентиниты

**Серпентиниты** – самые низкотемпературные породы в ряду метаультрамафитов. Среди них с повышением температуры можно наметить следующий ряд: лизардит + хризотил  $\pm$  брусит  $\rightarrow$  антигорит  $\pm$  брусит.

## *Ключевые реакции серпентинизации:*



$\Delta V_s$  (объемный эффект реакции) = 15,2 см<sup>3</sup> на 1 моль H<sub>2</sub>O.

При серпентинизации по этой реакции объем породы увеличивается на 35-40% (изохимический процесс).

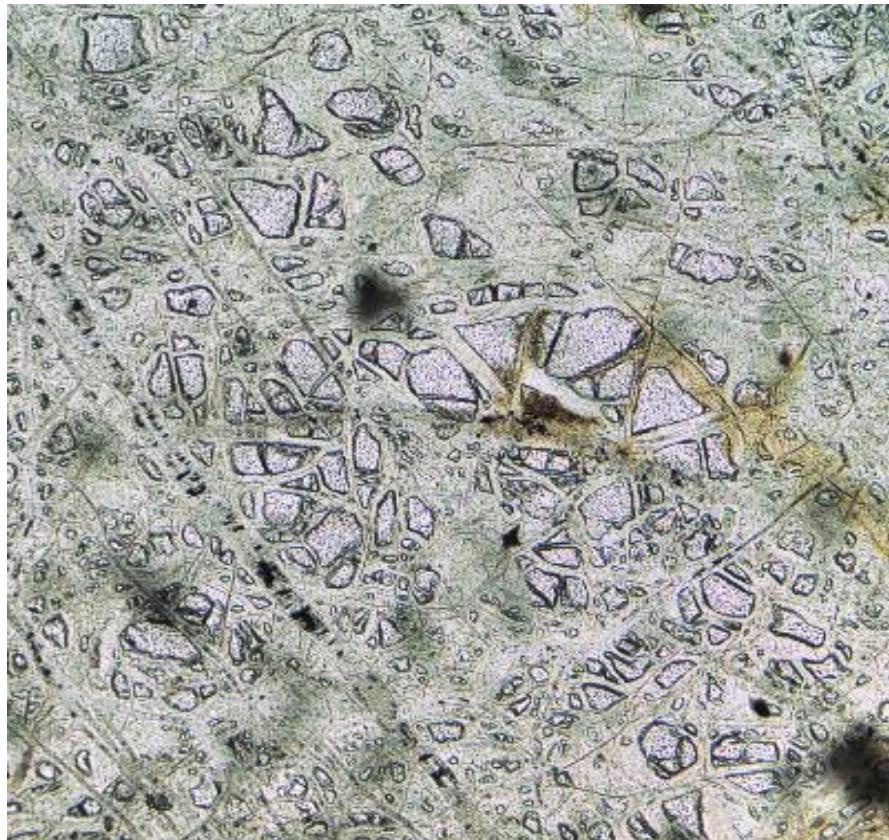


$\Delta V_s = 0$ . Происходит вынос Mg и Si (аллохимический процесс).

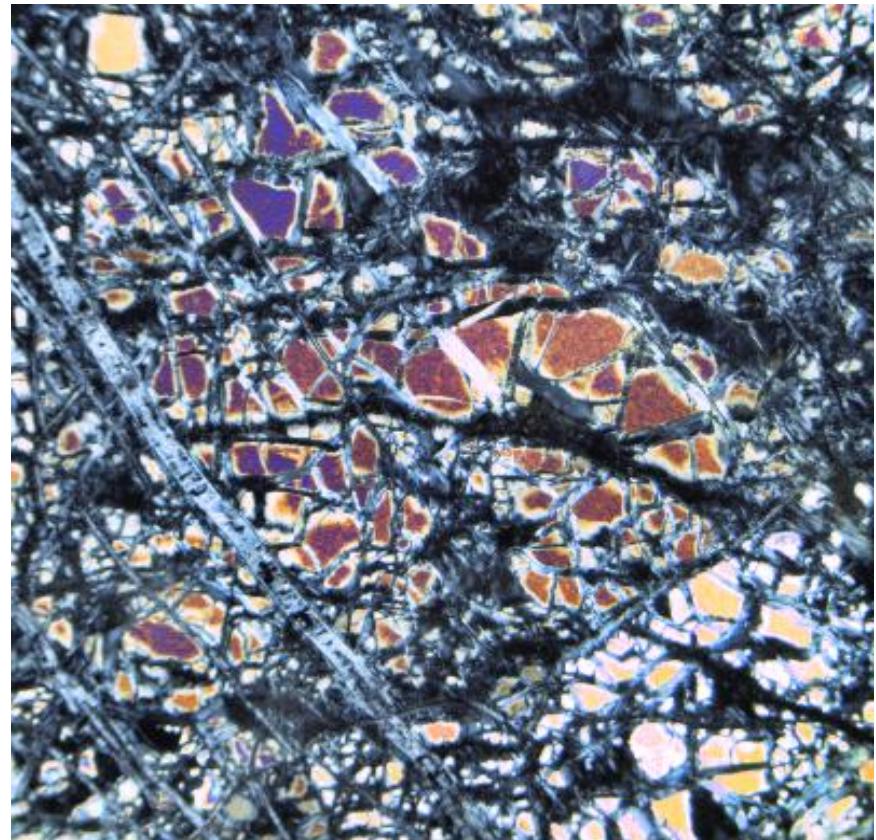
Фаялитовый компонент ( $\text{Fe}_2\text{SiO}_4$ ) оливина не участвует в этих реакциях, однако он разлагается с образованием

тонкодисперсного магнетита, придающего породам черный цвет.

**Серпентинизация** обычно начинается с трещин в зернах оливина, при этом может наблюдаться характерная **петельчатая структура**, в ядрах которой сохраняются реликты оливина с высокими цветами интерференции, окруженные серым волокнистым серпентином. При дальнейшем развитии процесса образуются полные псевдоморфозы серпентина по оливину.

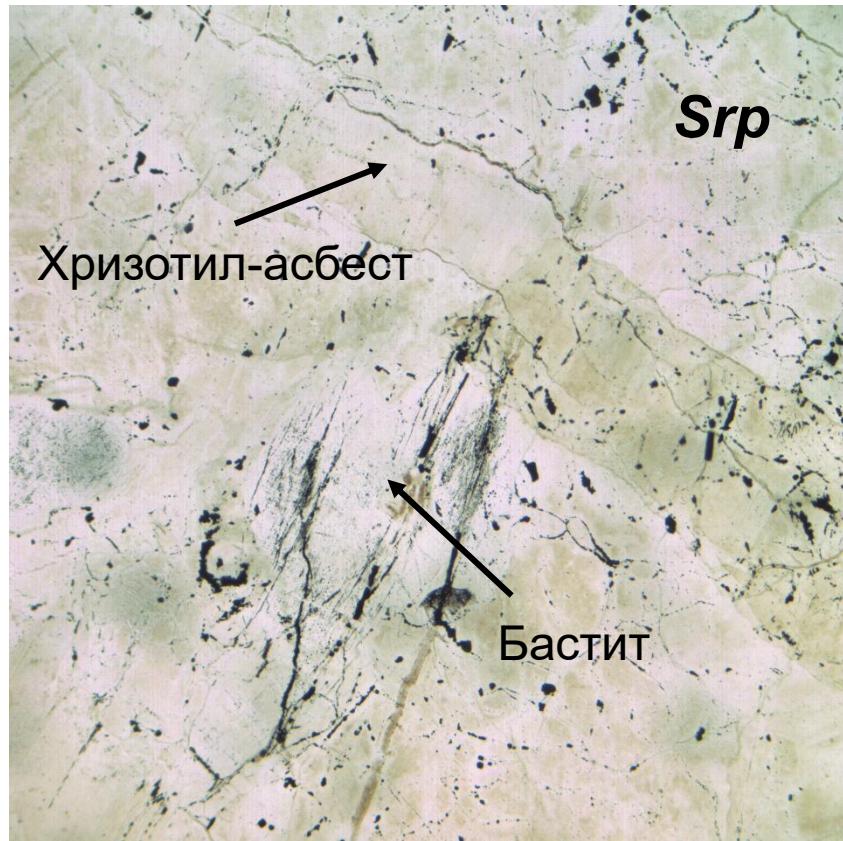


Оlivин с серпентином при одном николе.  
Объектив 10×. D=1,1 мм.



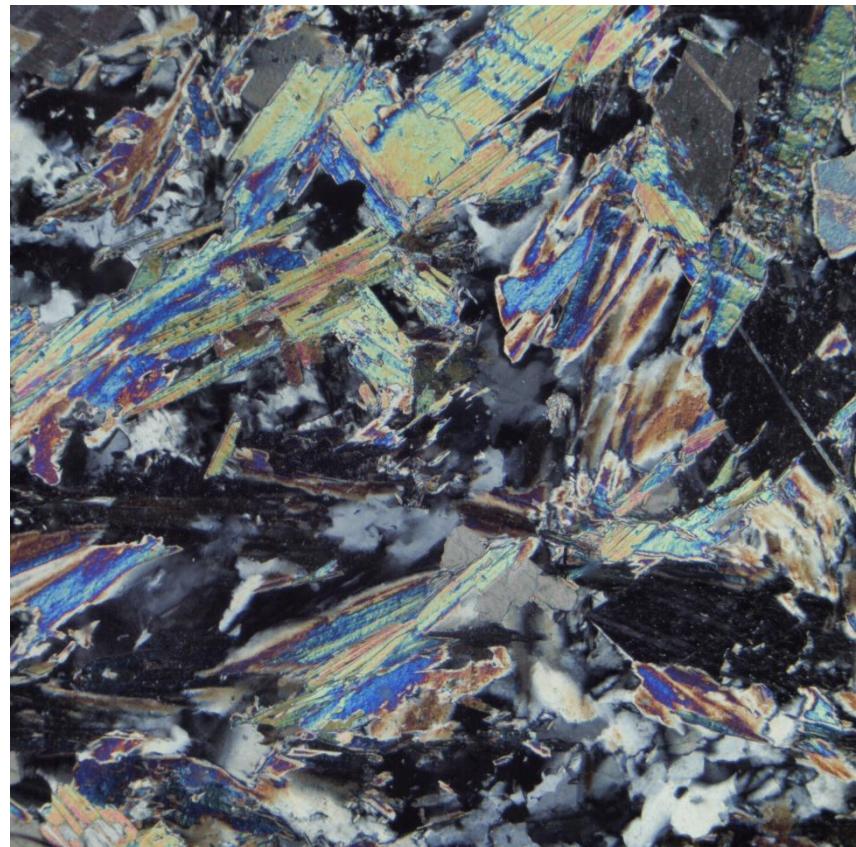
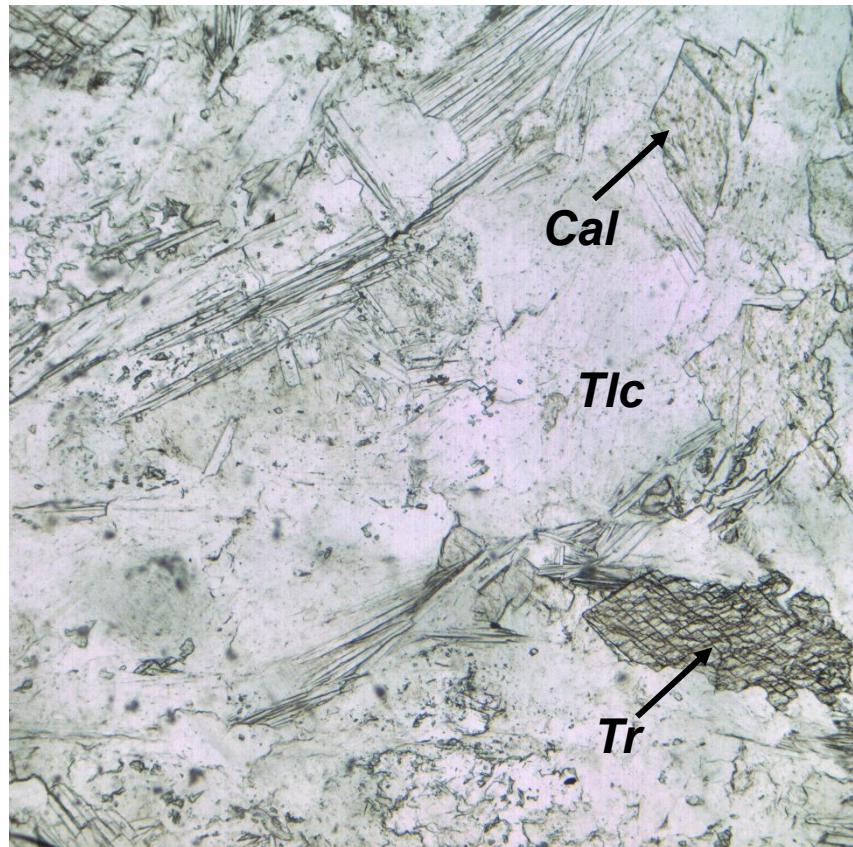
Оlivин с серпентином в скрещенных николях. Объектив 10×. D=1,1 мм.

При интенсивной серпентинизации петельчатая структура становится менее выраженной, оливин полностью замещается плотным агрегатом серпентина (*Srp*) с образованием участков массивной текстуры, ромбический пироксен замещается *bastitom* (серпентин, наследующий ориентировку пироксена), а моноклинный пироксен сохраняется или замещается *уралитом* (тремолит-актинолитовый волокнистый агрегат).



Апограцбургитовый серпентинит с прожилком поперечно-волокнистого (хризотил-асбеста). Объектив 4×. D=4 мм. Слева – при одном николе, справа – николи скрещены

# Кальцит-тремолит-тальковый сланец



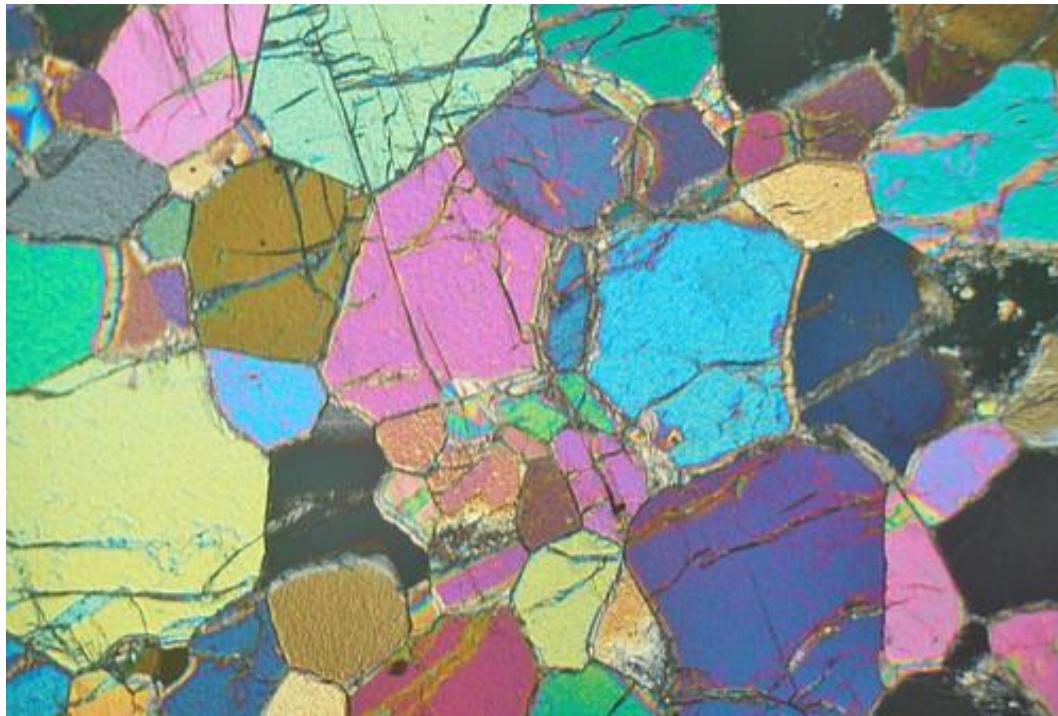
Эта порода соответствует зеленосланцевой фации метаморфизма в условиях высокой активности  $\text{CO}_2$  (присутствует кальцит). Присутствие большого количества кальций-содержащего минерала – тремолита свидетельствует о присутствии моноклинного пироксена в составе протолита (вебстерит или лерцолит). Объектив 4×. D=4 мм. Слева – при одном николе, справа – николи скрещены

# Нефрит

В интенсивно деформированных tremolитовых сланцах зеленосланцевой фации можно встретить линзы *нефрита* – волокнистого tremolита. Нефрит обладает широкой палитрой цветов: от почти белого через все оттенки зелёного (желтоватый, травянистый, изумрудный, болотный) до коричневого и почти чёрного. В России добывается на Алтае, Южном Урале, Камчатке, в Туве, Башкортостане и Бурятии.



# Метаультрамафиты гранулитовой фации

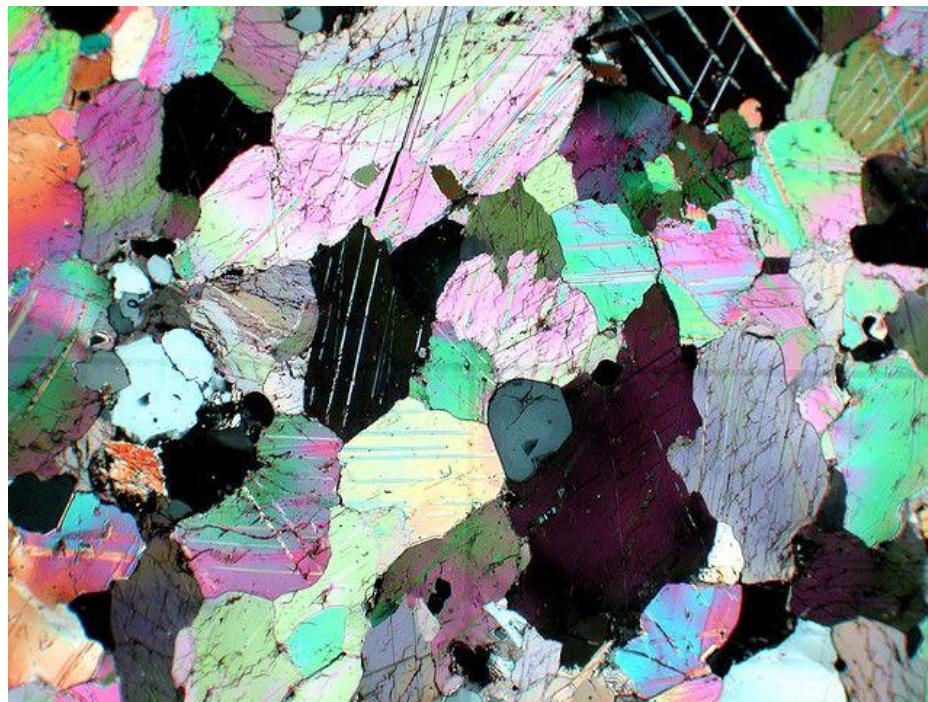


Пример существенно оливиновой породы, испытавшей полную перекристаллизацию в условиях гранулитовой фации ( $T > 700^{\circ}\text{C}$ )

Для ультрамафитов, метаморфизованных в условиях *гранулитовой фации*, характерны структуры высокотемпературной перекристаллизации оливина и пироксена (гранобластовый агрегат с преобладающими углами в сечениях зерен  $120^{\circ}$ ). Нередко образуются грубозернистые пегматоидные оливиновые и пироксеновые породы.

# Метакарбонатные породы

К этой группе пород относятся продукты метаморфизма известняков и доломитов, хотя среди них могут быть метаморфизованные карбонатные образования типа травертинов и известковых туфов.



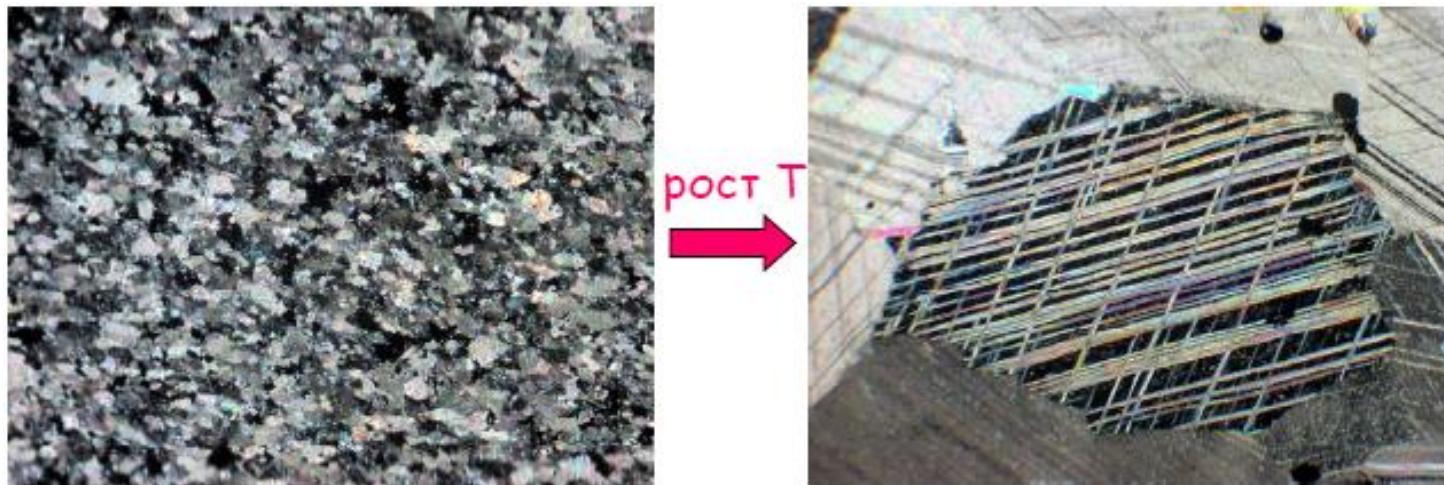
Кальцитовый мрамор –  
продукт метаморфизма  
карбонатных пород.

# Протолит метакарбонатных пород

- В качестве исходных пород возможны как органогенные, так и хемогенные осадочные образования, признаки которых могут сохраняться в метаморфических породах низшей ступени.
- В карбонатном материале возможны примеси других осадочных пород (песчаных, глинистых, песчано-глинистых).
- Наблюдается широкий диапазон составов: от чистых карбонатов до силикатных (алюмосиликатных алюмосиликатных) пород.
- Химизм: CaO, MgO, CO<sub>2</sub> и переменные содержания SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, FeO, MnO и других компонентов.

# Структурные особенности пород

В зависимости от температуры образования пород и интенсивности процесса метаморфизма гранобластовая структура мраморов может меняться от гетеробластовой (низшая ступень) до гомеобластовой (средне- и высокотемпературные породы). С ростом температуры обычно наблюдается как увеличение, так и общее выравнивание размера зерен карбоната, особенно кальцита. В определенной степени структура пород является показателем интенсивности процесса метаморфизма:



(из лекции А.Л. Перчука)

# Условия метаморфизма карбонатных пород

## Важно:

- только на основе структурных особенностей пород нельзя получить достоверную информацию об условиях метаморфизма;
- необходимо рассматривать минеральные ассоциации мраморов, связанные с метаморфическими реакциями силикатных минералов;
- для чисто кальцитовых или доломитовых мраморов, в силу их простого химического состава, применение физико-химического анализа парагенезисов минералов и, соответственно, достоверное определение условий метаморфизма **невозможно**.

Для характеристики условий метаморфизма мраморов по минеральным ассоциациям используют те же приемы, что и для других групп пород. Подробнее – на следующих двух слайдах.

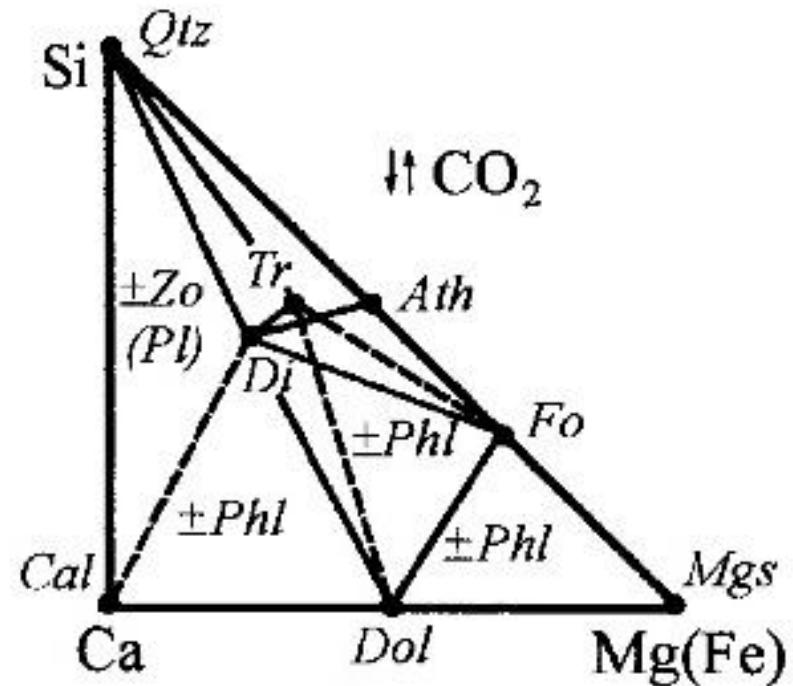
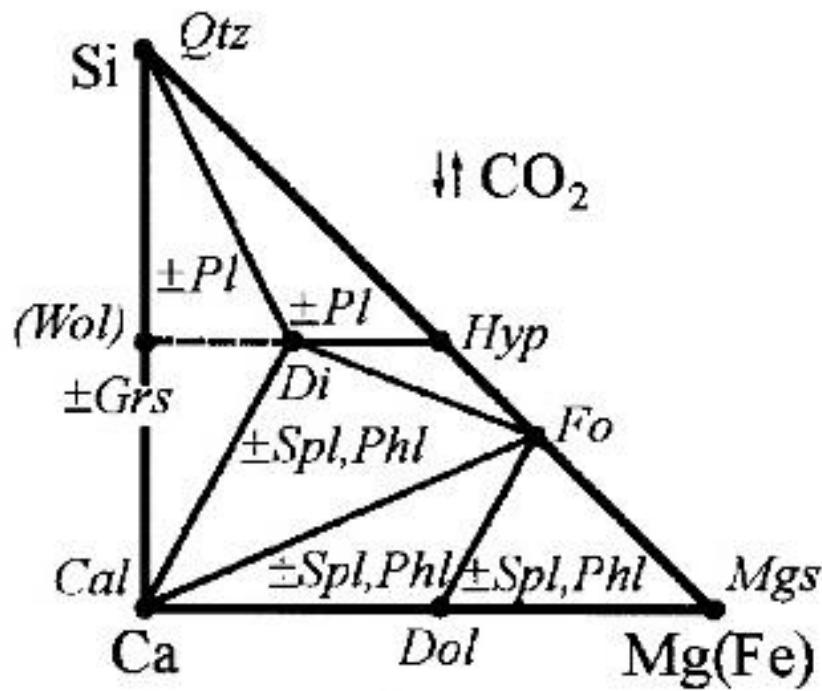
# Условия метаморфизма карбонатных пород

Индикаторные минералы, отражающие степень метаморфизма мраморов, протолит которых содержал примесь кремния и алюминия (кремнистых и глинистых компонентов осадка):

- низшая ступень – хлорит, серицит;
- средняя ступень – амфибол тремолит-актинолитового ряда, антофиллит, роговая обманка, минералы группы эпидота, реже гроссуляр;
- высшая ступень – диопсид, доломит, волластонит.

Проведение более детальной характеристики минеральных ассоциаций и установление их связи с температурой образования пород можно провести с использованием классических диаграмм ***состав–парагенезис***.

# Диаграммы состав-парагенезис



На представленных схемах видно четкое разделение мраморов на *кальцит-форстеритовую* (левый треугольник) и *диопсид-доломитовую* фации. Граница между ними определяется реакцией:  $0,5\text{диопсид} + 1,5\text{доломит} \rightarrow 2\text{кальцит} + \text{форстерит} + \text{CO}_2$  (стрелка характеризует направление повышения температуры).

## На заметку!

Кальцит и доломит очень похожи в шлифе, и очень часто невозможно отличить их друг от друга.

В случае широкого развития двойников дело обстоит проще.

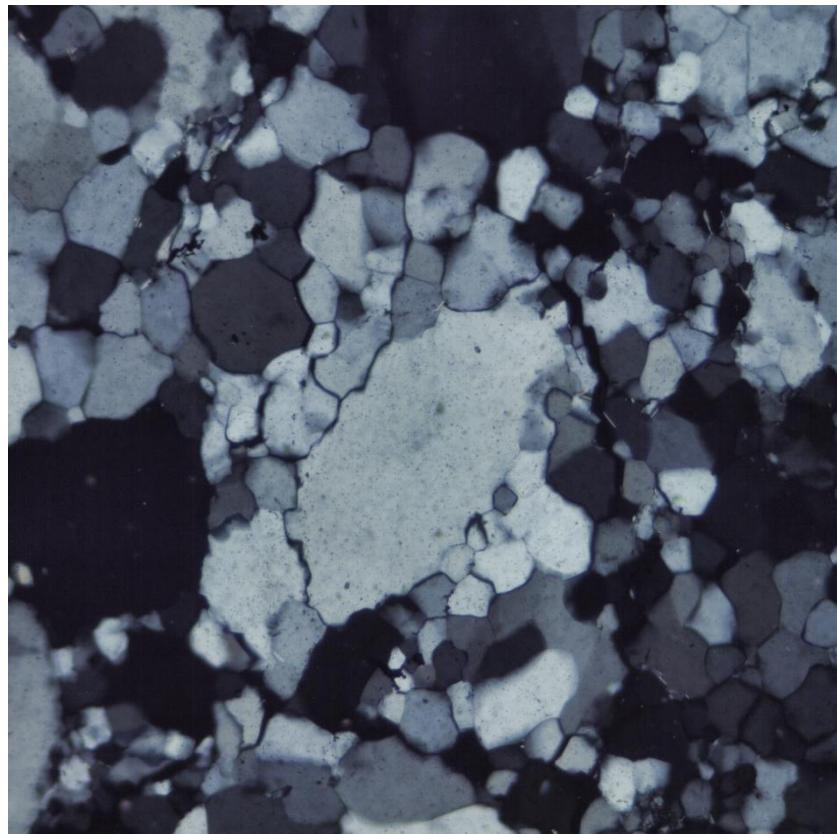
*Кальцит* изобилует несколькими системами полисинтетических двойников. В *доломите* их меньше, и расположены они по-другому. Помогает мнемоническое правило Д.С. Коржинского (правило «Д–К»). Для его использования нужно найти сечения, в которых наблюдаются два направления спайности (не путать с двойниковыми швами!) карбоната, образующие ромбические блоки. В *доломите* (Д) доломитовые полоски имеют одно или два направления, близкие к короткой (К) диагонали ромбического блока. В *кальците* (К) одно или несколько направлений полисинтетических двойников располагаются ближе к длинной (Д) диагонали ромба.

*Магнезит* вообще не подвержен двойникованию.

---

# Метасилицитолиты и метаморфизованные кварцевые песчаники

---



К этой группе пород относятся **кварциты** – продукты метаморфизма кварцевых песков и песчаников, хемогенных кремнистых отложений и биогенных образований (диатомиты, радиоляриты, опоки и др.).

Шокшинский кварцит – слабометаморфизованная порода. Объектив 4×, D=4 мм.

# Структурные особенности пород

Структуры мономинеральных кварцитов гранобластовые, они остаются такими же при наличии примесей полевых шпатов, граната, карбоната, пироксенов; в слюдяных разностях кварцитов – лепидогранобластовые; в присутствии минералов призматического и игольчатого габитусов (амфиболов, хлоритоида, кианита, силлиманита и др.) – нематогранобластовые, вплоть до фиброгранобластовых.

В породах высокотемпературных ступеней метаморфизма преобладают гомеобластовые структуры, а низкие ступени нередко характеризуются гетеробластовыми структурами (пример – Шокшинский кварцит). Это является одним из отличительных признаков, определяющих примерную степень метаморфизма породы.

# Состав кварцитов

Кварциты ( $\geq 75\%$  кварца) связаны постепенными переходами с другими группами метаморфических пород. С ростом содержания мусковита и/или биотита кварциты переходят в слюдяные сланцы через слюдяные кварциты; с ростом содержания полевых шпатов – через кварцитогнейсы в гнейсы; с одновременным увеличением количества плагиоклаза и роговой обманки – через амфиболовые гнейсы в кварцевые амфиболиты.

По этой причине для кварцитов не существует собственных фациальных схем. Их степень метаморфизма оценивается по минеральным ассоциациям, характерным для других типов пород, в первую очередь, для метапелитов и метабазитов.

**Важно!** Как и в случае мономинеральных мраморов, для чистого кварцита надежное определение степени метаморфизма невозможно.

# Состав кварцитов

Индикаторные минералы, отражающие степень метаморфизма кварцитов, протолит которых содержал примесь алюминия и кальция (глинистых и карбонатных компонентов осадка):

- низшая ступень – хлорит, серицит;
- средняя ступень – мусковит, биотит, хлоритоид, кианит, андалузит, ставролит, эпидот, роговая обманка, амфиболы tremolite-актинолитового ряда, куммингтонит, альмандин, гематит, магнетит;
- высшая ступень – моноклинные и ромбические пироксены, оливин (фаялит), кордиерит, силлиманит.

В целом, рост степени метаморфизма ведет к дегидратации пород: хлорит (11–14 % H<sub>2</sub>O) → биотит (3–5 % H<sub>2</sub>O) → безводные минералы.

Эволюция соединений углерода с температурой: аморфное углистое вещество → графит → 2Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + C = 4FeO + CO<sub>2</sub>.

# Железистые кварциты



**Железистые кварциты** (магнетитовые, гематитовые, мартитовые) встречаются в толщах разной степени метаморфизма. По составу протолита они представляют собой преимущественно химические (или биохимические) осадочные образования, состоящие из кремнистого материала (или яшмы), чередующихся со слоями водных окислов железа, карбонатов, силикатов и сульфидов.

Брекчированный железистый кварцит (Кривой Рог, Украина)

# Железистые кварциты



<https://www.sevstone.ru/collection/>

Тонкополосчатые железистые кварциты называют **джеспилитами**. Они представлены чередованием слойков магнетитовых и гематитовых пород с кварцевыми. Породы с более грубой полосчатостью – **итабириты**. В рудных прослойках в джеспилитах содержание магнетита и гематита достигает 90%. Среднее содержание железа в рудных джеспилитах 40%.

# Железистые кварциты

Богатые железные руды приурочены к толщам зеленых сланцев и филлитов, реже амфиболитов. Железистые породы, метаморфизованные в условиях высшей ступени, обычно не содержат богатых руд, так как в этих условиях магнетит взаимодействует с кварцем с образованием высокожелезистого ромбического пироксена (эвлита) и оливина (фаялита). С понижением содержания кварца в этих породах наблюдается переход железистых кварцитов в эвлизиты.

Железистые кварциты особенно широко распространены в докембрии. С археем и протерозоем связаны главные запасы руд этого типа, составляющие более 10 трлн тонн, тогда как запасы палеозойских и мезозойских железорудных бассейнов на земном шаре исчисляются в 135 млрд тонн.

# Высокоглиноземистые породы

К этой группе относятся породы, при содержании  $\text{Al}_2\text{O}_3$  не ниже 28% (нижний предел, принятый для бокситов). К породам зеленосланцевой фации относятся хлоритоидные, серицитовые, мусковитовые, парагонитовые и пирофиллитовые сланцы. К образованиям гранулитовой и верхов амфиболитовой фаций относят корундиты (наждаки), марундиты и силлиманитовые сланцы.



gme@hotbox.ru

<https://webmineral.ru/minerals/image.php?id=6410>, фото А. Королькова ©

Мелкозернистая корундовая порода (наждак) с прожилком Cr-кианита. Месторождение Чайныт, Южная Якутия