

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

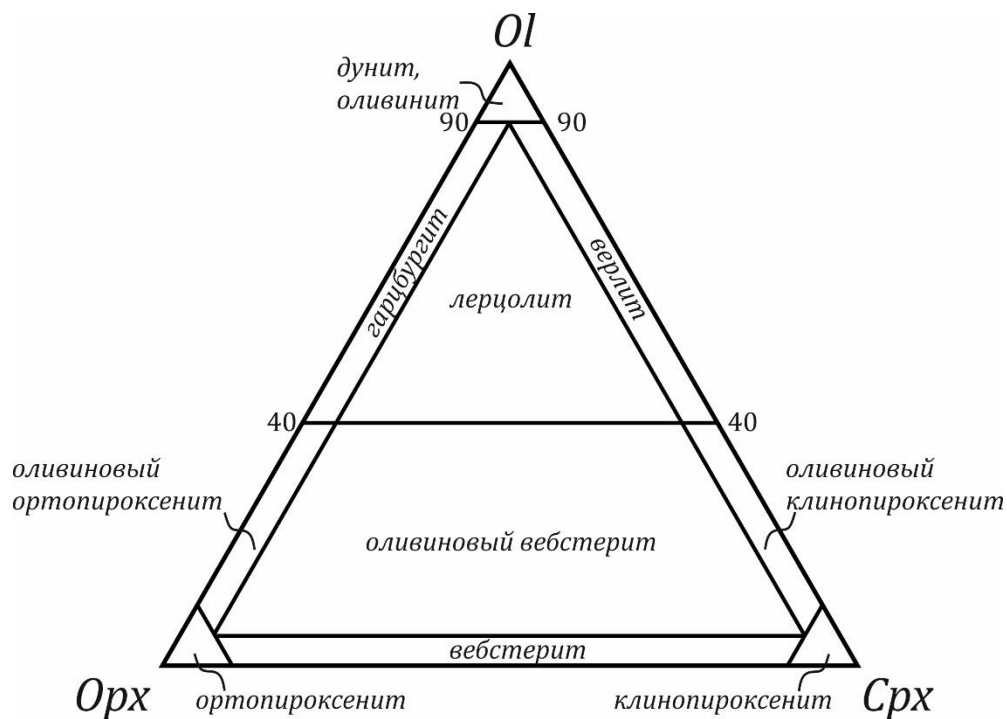
К этой группе пород относятся метаморфизованные ультрамафиты ультраосновного и основного состава, главной особенностью которых является резкое преобладание мафических (темноцветных) минералов.



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:

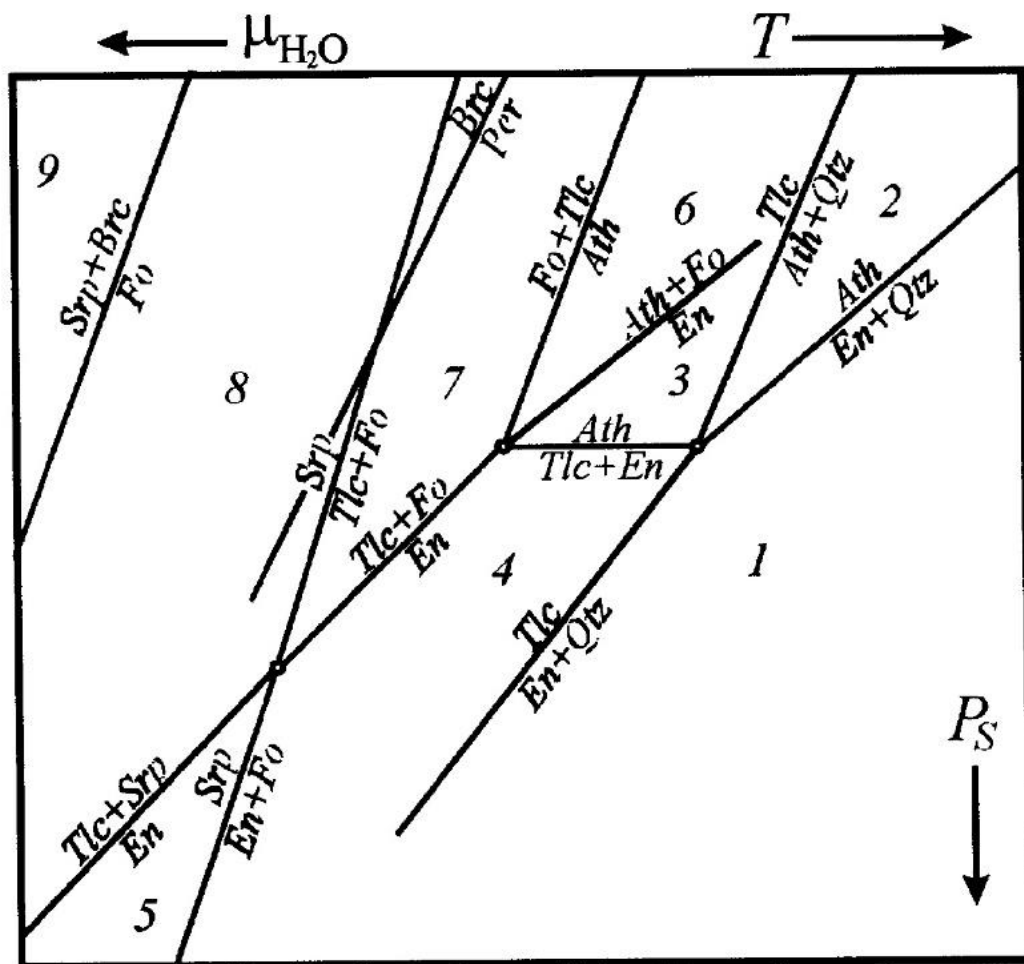
- ❑ цеолитовая фация – самые низкотемпературные преобразования ультрамафитов, связанные с гидратацией и превращением в **серпентиниты**;
- ❑ зеленосланцевая фация – образуются антигоритовые серпентиниты и серпентиновые сланцы. Возможно появление талька, хлорита, амфибола тремолит-актинолитового ряда, 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 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, тремолита, 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 регрессивного 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



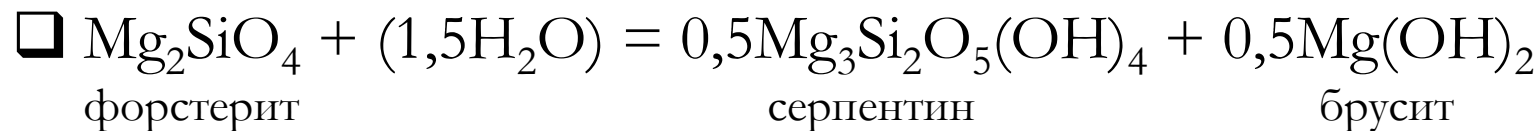
1 – Энстатит-кварцевая; 2 – энстатит-антофиллитовая (антофиллит-кварцевая); 3 – тальк-антофиллитовая (энстатит-антофиллитовая); 4 – тальк-энстатитовая; 5 – энстатит-серпентиновая; 6 – антофиллит-форстеритовая (тальк-антофиллитовая); 7 – тальк-форстеритовая; 8 – форстерит-серпентиновая (серпентин-тальковая);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

Srp – серпентин, *Brc* – брусит; *Fo* – форстерит; *Tlc* – тальк; *En* – энстатит; *Per* – периклаз; *Ath* – антофиллит; *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:



ΔV_s (объемный эффект реакции) = 15,2 см³ на 1 моль H₂O.

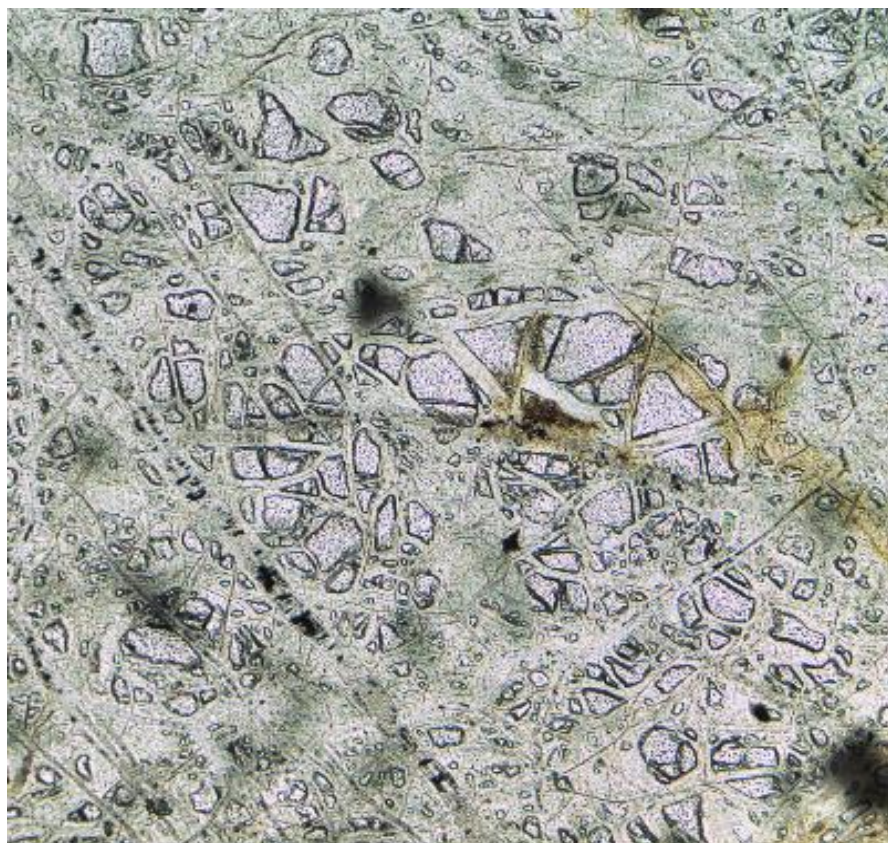
При серпентинизации по этой реакции объем породы увеличивается на 35-40% (изохимический процесс).



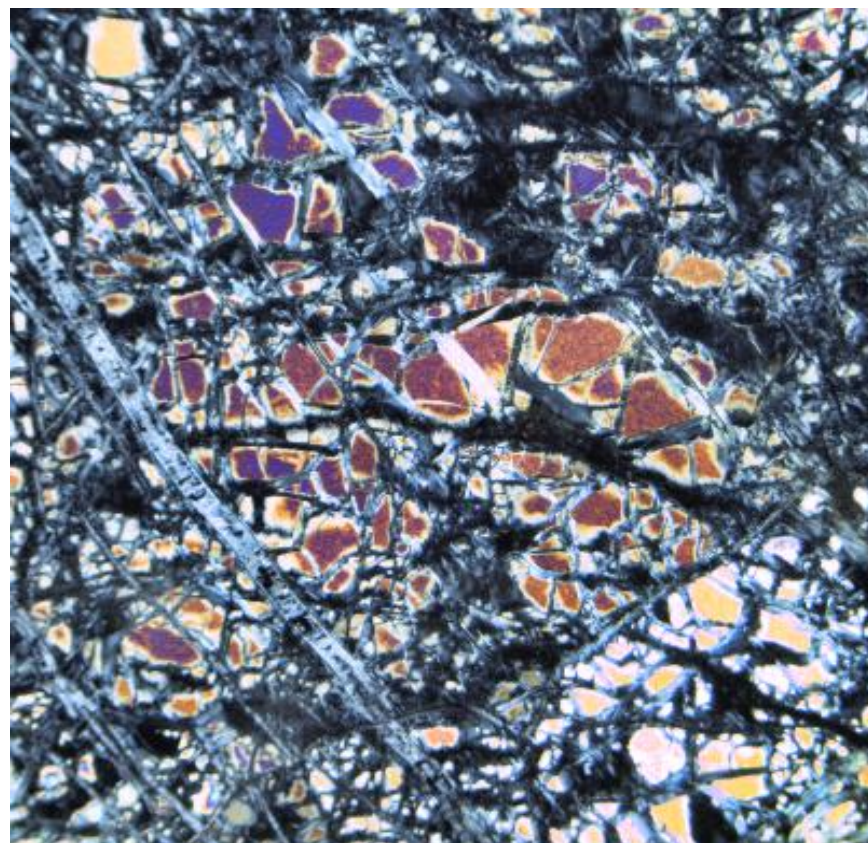
$\Delta V_s = 0$. Происходит вынос Mg и Si (аллохимический процесс).

Фаялитовый компонент (Fe₂SiO₄) 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.

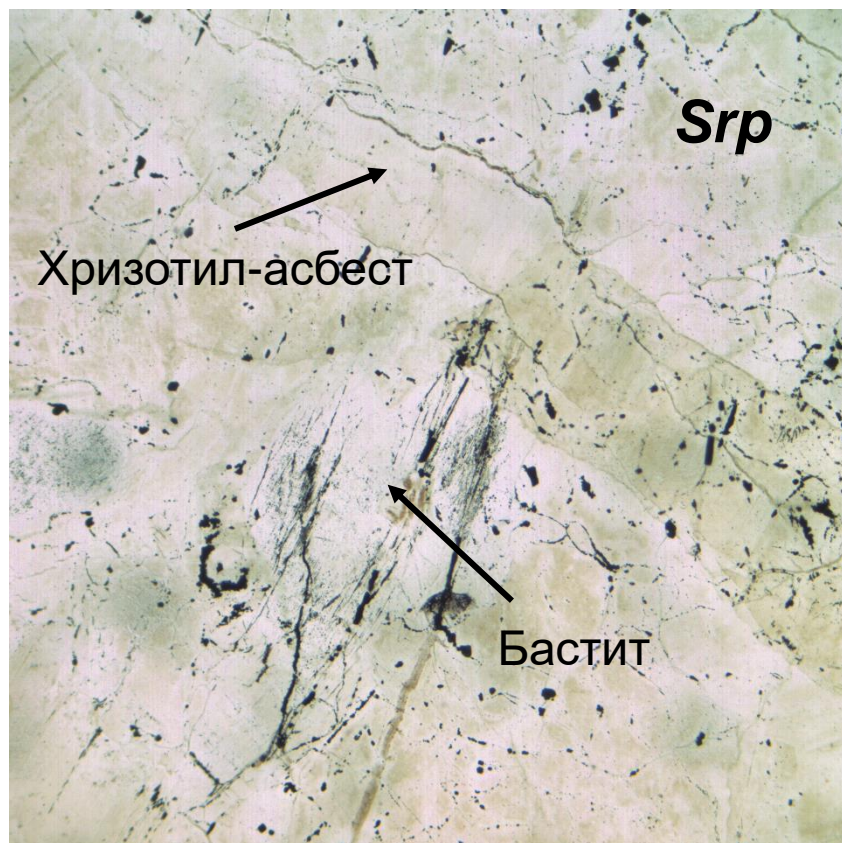


Оливин с серпентином при одном николе.
Объектив 10×. D=1,1 мм.



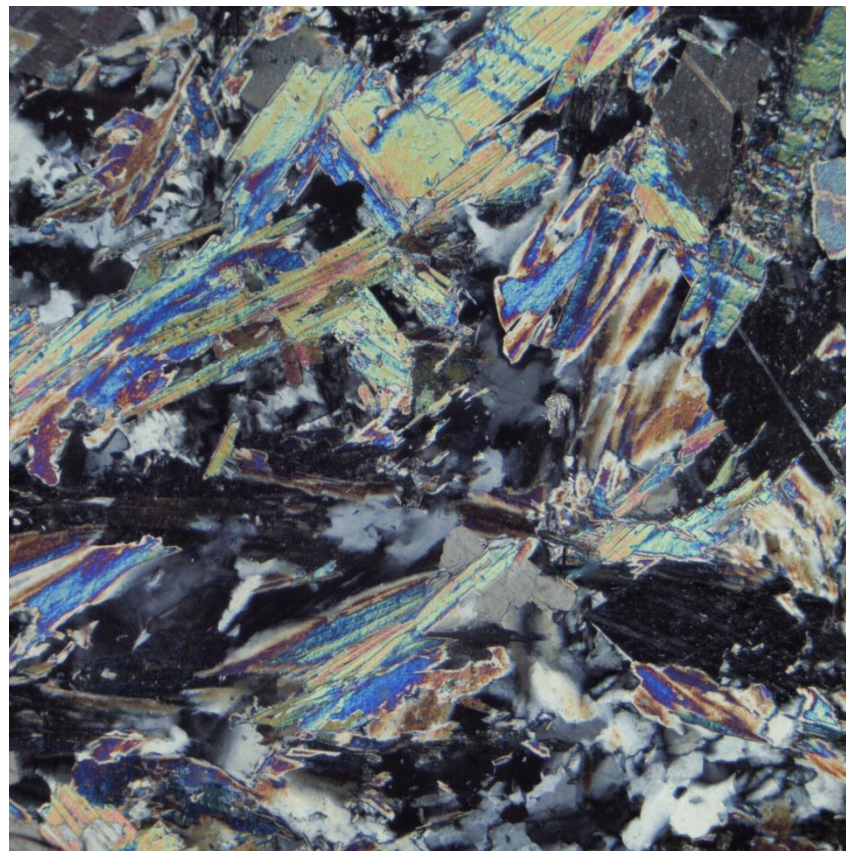
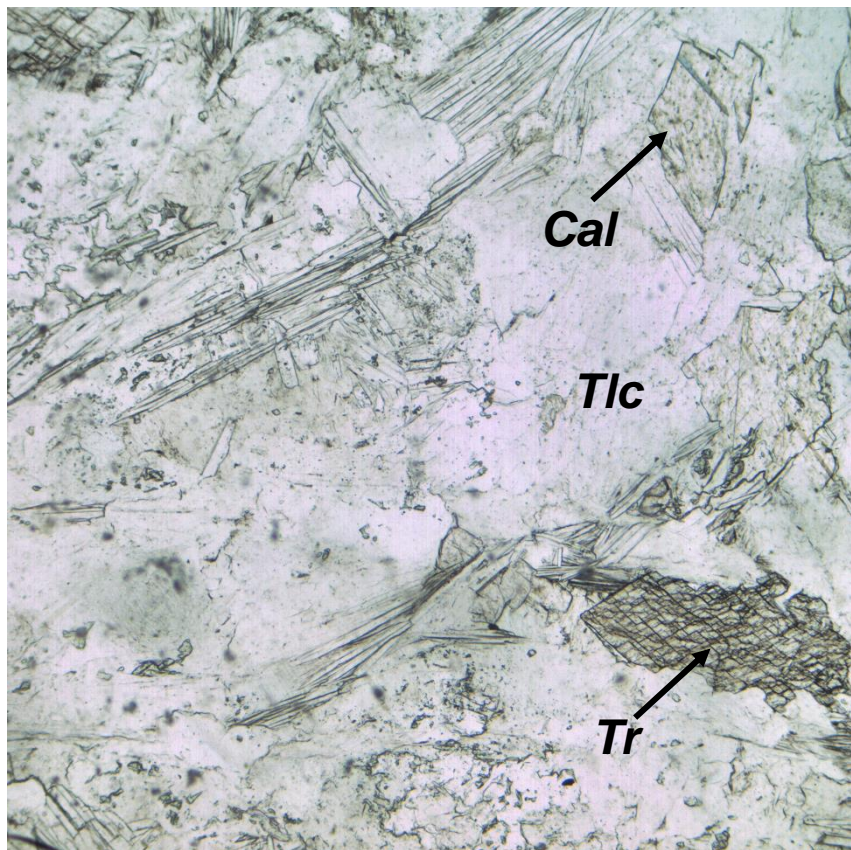
Оливин с серпентином в скрещенных
николях. Объектив 10×. D=1,1 мм.

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



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

Кальцит-тремолит-тальковый сланец



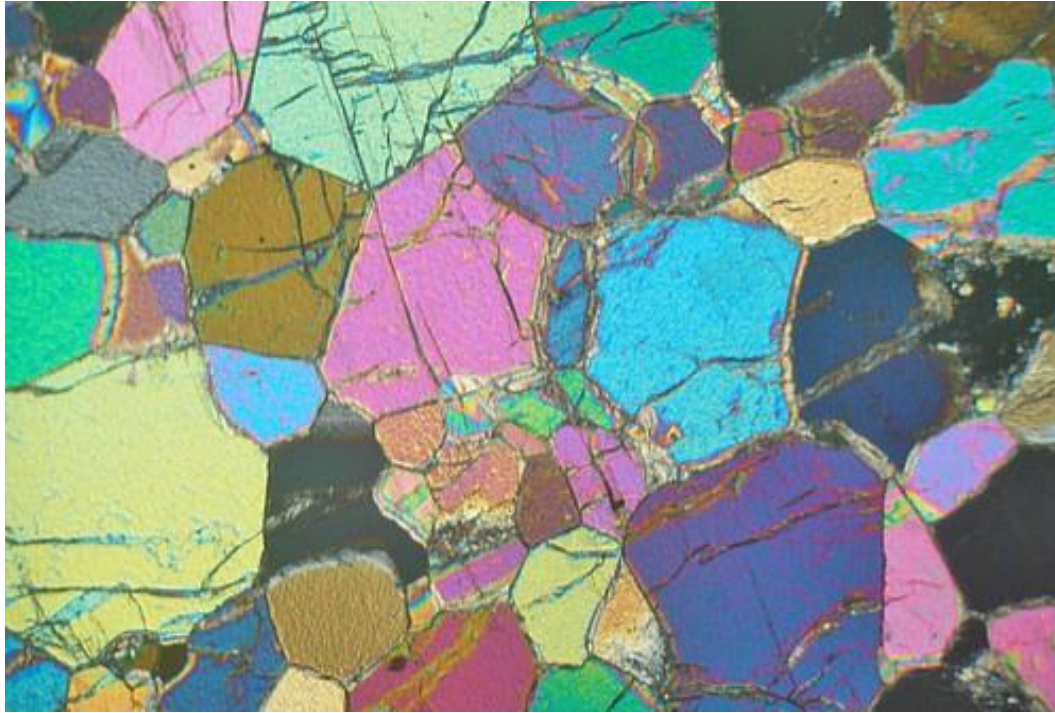
Эта порода соответствует зеленосланцевой фации метаморфизма в условиях высокой активности CO_2 (присутствует кальцит). Присутствие большого количества кальций-содержащего минерала – тремолита свидетельствует о присутствии моноклинного пироксена в составе протолита (вебстерит или лерцолит). Объектив 4x. D=4 мм. Слева – при одном николе, справа – николи скрещены)

Нефрит

В интенсивно деформированных тремолитовых сланцах зеленосланцевой фации можно встретить линзы *нефрита* – волокнистого тремолита. 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

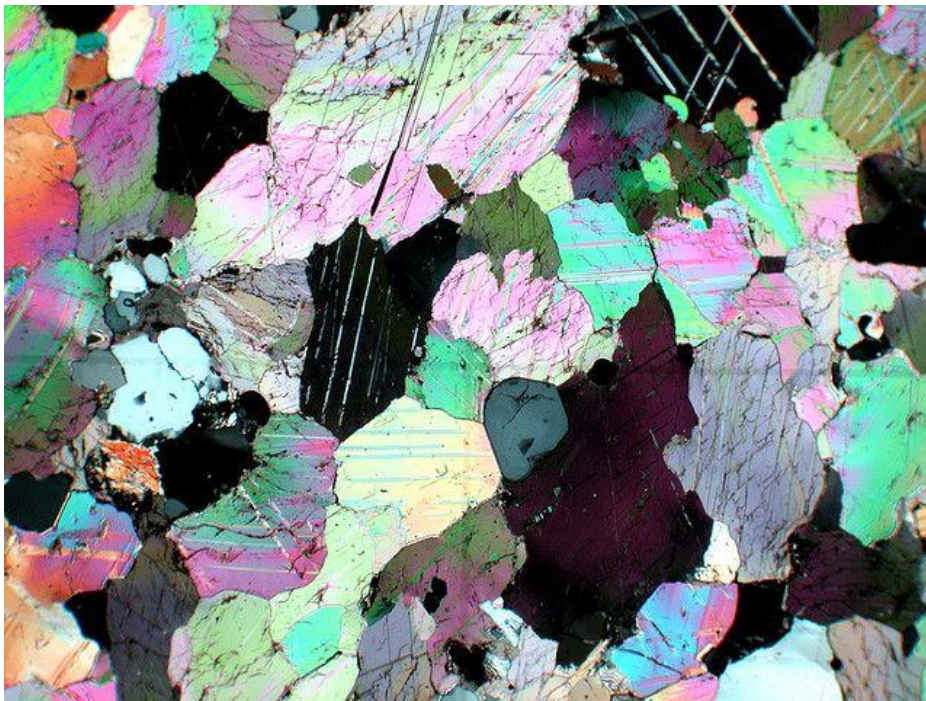


Пример существенно оливиновой породы, испытавшей полную перекристаллизацию в условиях гранулитовой фации ($T > 700^{\circ}\text{C}$)

Для ультрамафитов, метаморфизованных в условиях *гранулитовой фации*, характерны структуры высокотемпературной перекристаллизации оливина и пироксена (гранобластовый агрегат с преобладающими углами в сечениях зерен 120°). 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.



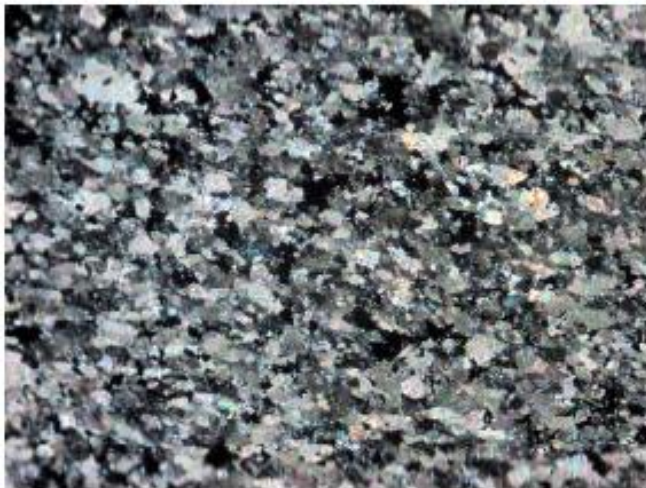
Кальцитовый мрамор – продукт метаморфизма карбонатных пород.

Протолит метакарбонатных пород

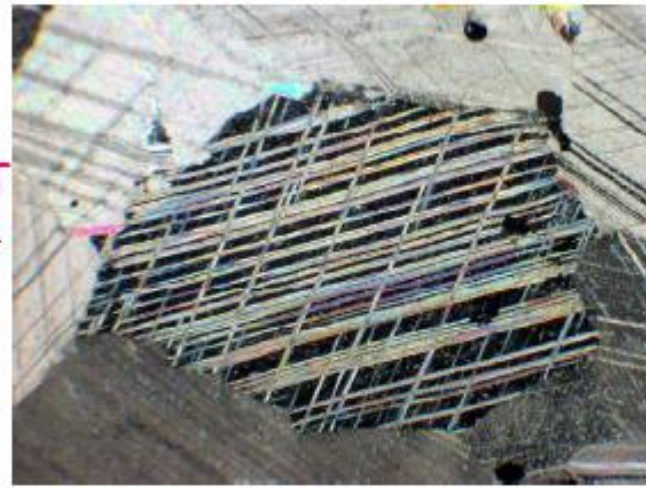
- ❑ В качестве исходных пород возможны как органогенные, так и хемогенные осадочные образования, признаки которых могут сохраняться в метаморфических породах низшей степени.
- ❑ В карбонатном материале возможны примеси других осадочных пород (песчаных, глинистых, песчано-глинистых).
- ❑ Наблюдается широкий диапазон составов: от чистых карбонатов до силикатных (алюмосиликатных) пород.
- ❑ Химизм: CaO, MgO, CO₂ и переменные содержания SiO₂, Al₂O₃, 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:*



рост T
→



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.

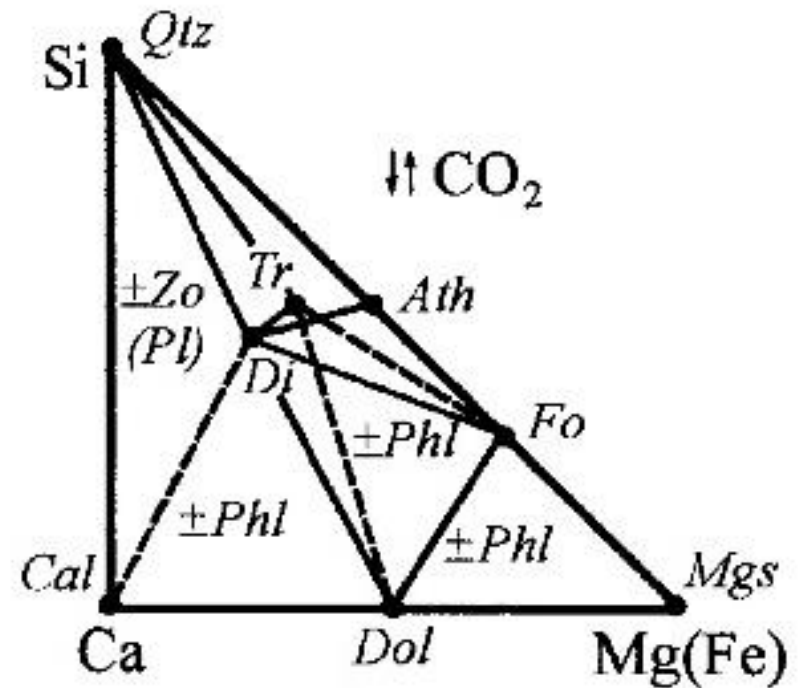
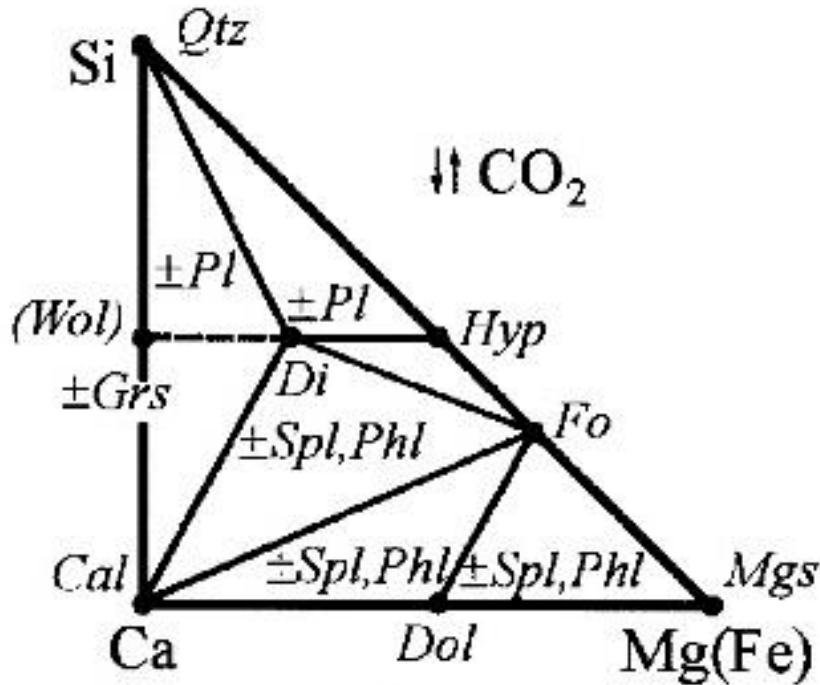
Условия метаморфизма карбонатных пород

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

- ❑ низшая степень – хлорит, серицит;
- ❑ средняя степень – амфибол тремолит-актинолитового ряда, антофиллит, роговая обманка, минералы группы эпидота, реже гроссуляр;
- ❑ высшая степень – 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).

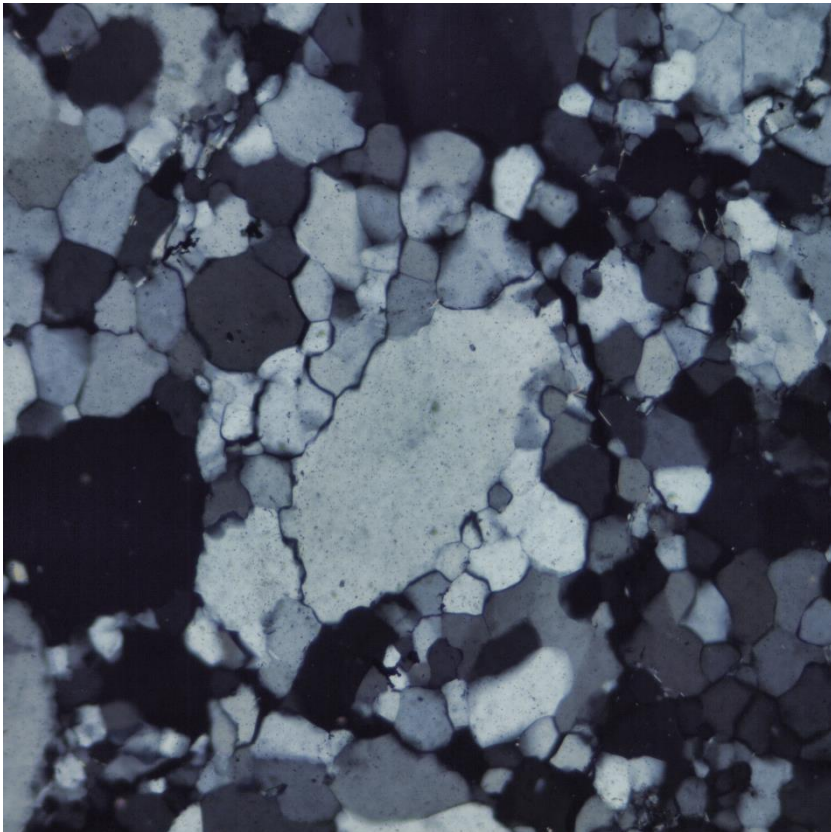
На заметку!

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 полосы 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 4х. 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 metabазитов.

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 тремолит-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 % H₂O) → биотит (3–5 % H₂O) → безводные минералы.

Эволюция соединений углерода с температурой: аморфное углистое вещество → графит → $2\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{C} = 4\text{FeO} + \text{CO}_2$.

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 слоев 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 Al_2O_3 не ниже 28% (нижний предел, принятый для бокситов). К породам *зеленосланцевой фации* относятся хлоритоидные, серицитовые, мусковитовые, парагонитовые и пиррофиллитовые сланцы. К образованиям *гранулитовой* и верхов *амфиболитовой фаций* относят корундиты (наждаки), марундиты и силлиманитовые сланцы.



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