

# МЕТАМОРФИЗМ

## МЕТАПЕЛИТЫ



Метапелиты – это продукты метаморфизма осадочных глинистых и песчано-глинистых пород (аргиллитов, алевролитов, глинистых сланцев и т.п).

В некоторых классификациях к метапелитам относят и химически сходные с ними продукты метаморфизма кислых магматических пород.

По другим классификациям метапелиты не имеют магматических аналогов (то есть являются исключительно пара-породами).

\*пелиты = глины



Исходные породы (протолит) метапелитов сложены тонкообломочными минералами:

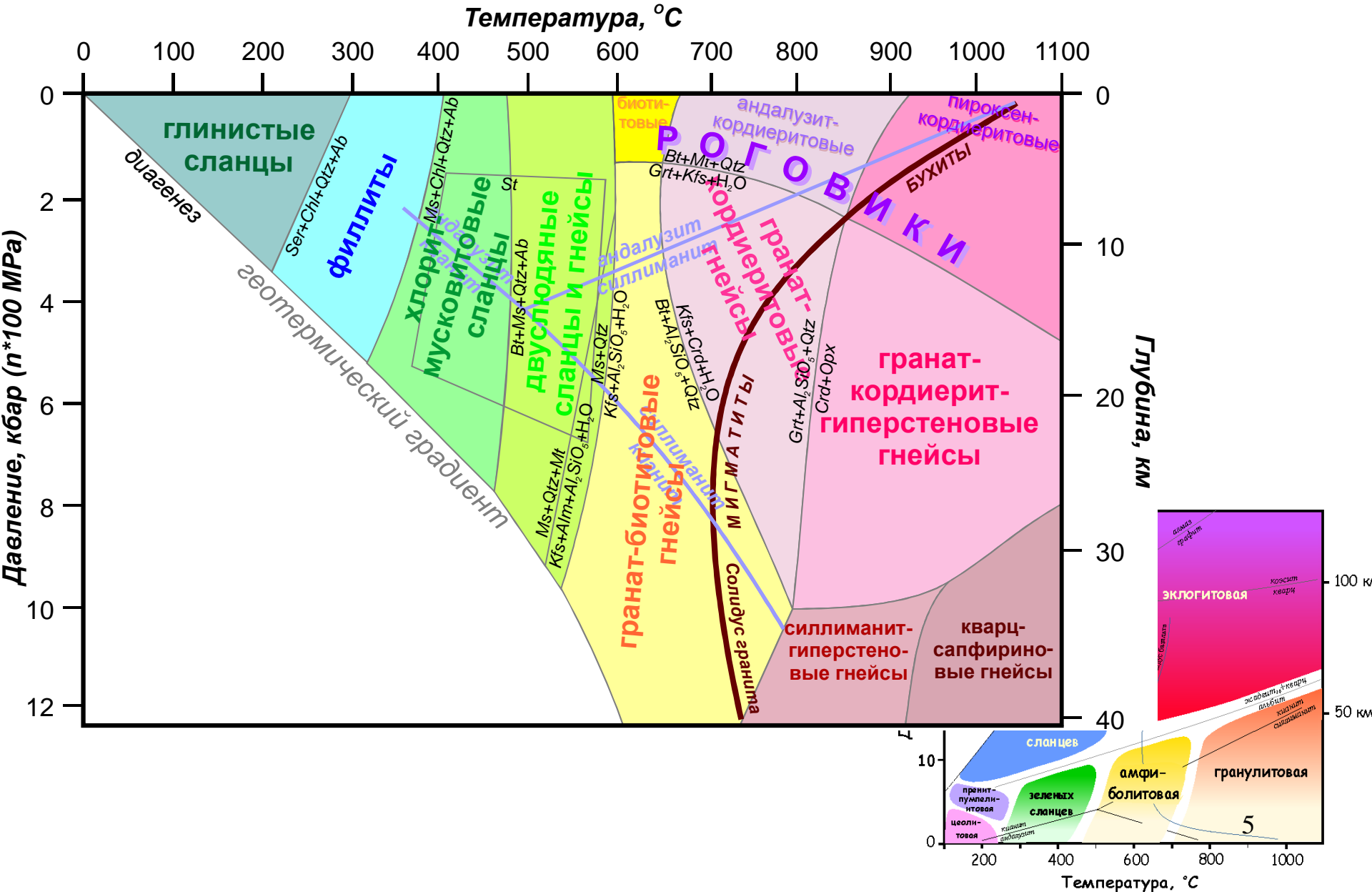
- более половины которых составляют слоистые силикаты, представленные глинистыми минералами (монтмориллонит, каолинит, смектит), белыми слюдами (серицит, парагонит, фенгит) и хлоритами;
- около трети может составлять кварц,
- присутствуют полевые шпаты, оксиды и гидроксиды железа, органическое вещество и т.п.

Таким образом, основными чертами химического состава метапелитов являются высокие содержания  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и  $\text{SiO}_2$ , преобладание  $\text{K}_2\text{O}$  над  $\text{Na}_2\text{O}$  и крайне низкое содержание  $\text{CaO}$  (<5%).

Парагенезисы метапелитов обладают очень высокой чувствительностью к валовому химическому составу породы, соотношению содержания Fe и Mg и составу флюида, что затрудняет выделение для них фаций метаморфизма. Поэтому на данный момент не существует общепринятой схемы метаморфических фаций для метапелитов, подобной схеме фаций метабазитов.



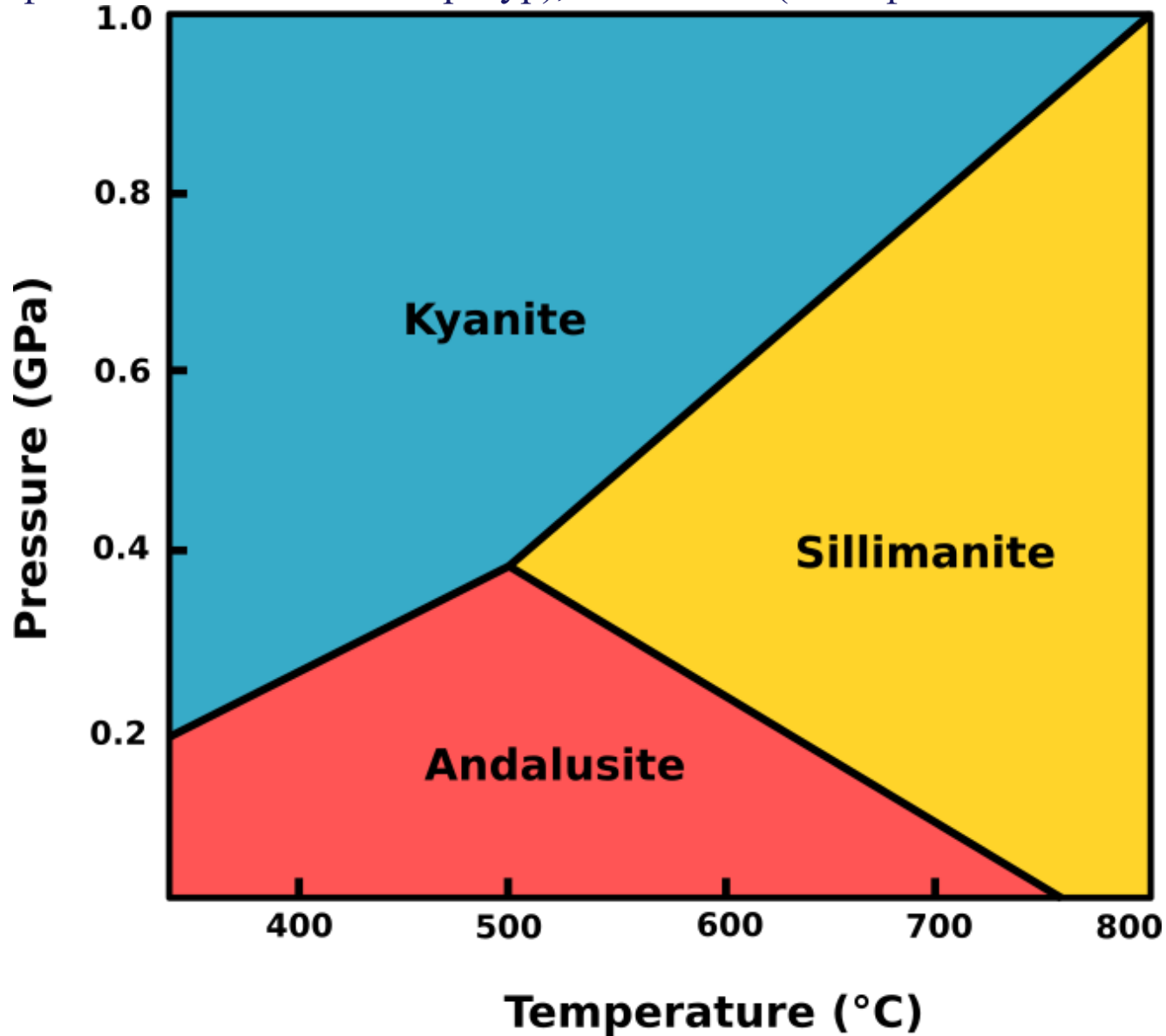
**Температура, °C**



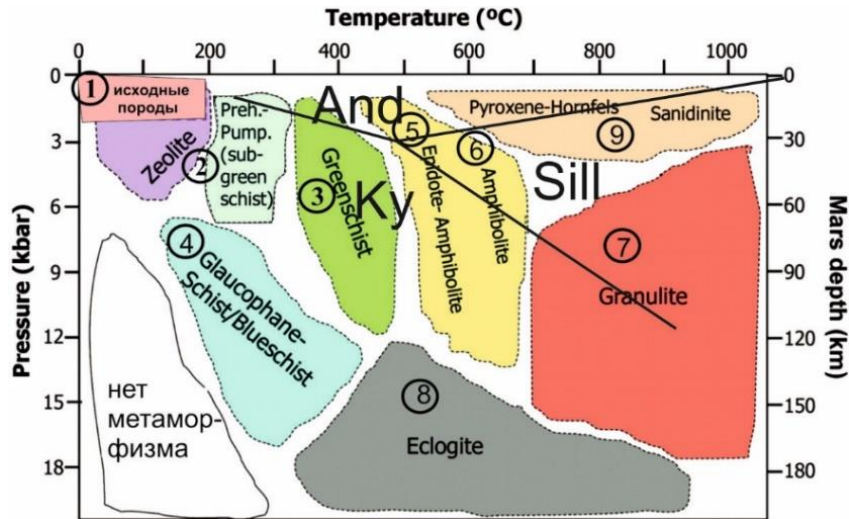
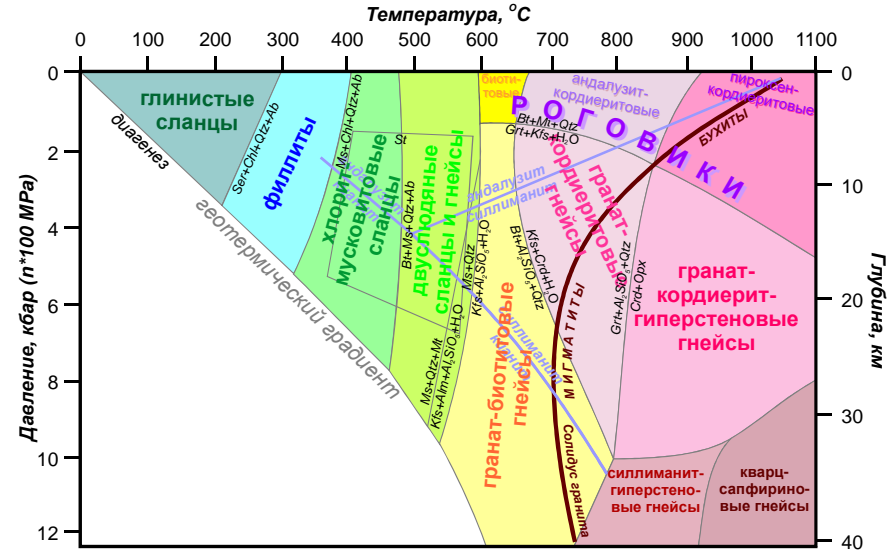
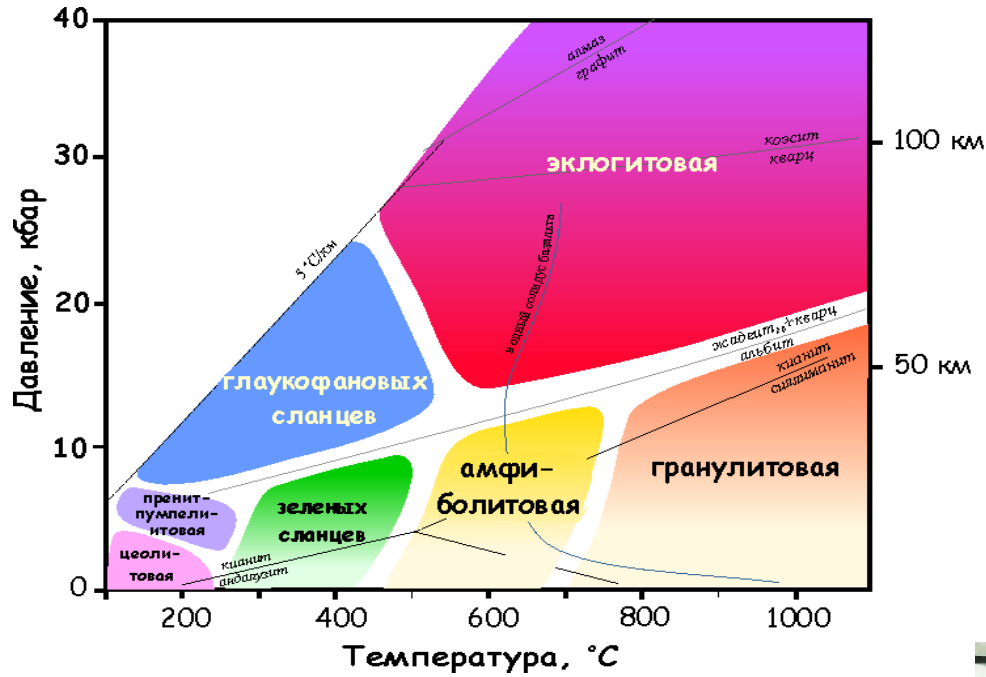
В метапелитах появляется много новых минералов, с которыми мы не встречались ни среди магматических пород, ни в метабазах, так как исходные породы метапелитов очень богаты глиноземом ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ).

В первую очередь это *полиморфные модификации* силикатов глинозема

**$\text{Al}_2\text{SiO}_5$ : андалузит** (модификация низких давлений), **силлиманит** (модификация высоких температур), **кианит** (модификация высоких давлений).



**Почти на всех схемах метаморфических фаций нанесены 3 поля стабильности этих минералов:**





# АНДАЛУЗИТ



Кристаллы андалузита в продольных сечениях имеют форму вытянутых прямоугольников, а в поперечных - почти квадратов.

Без анализатора они бесцветны или обладают очень слабой розовой окраской.

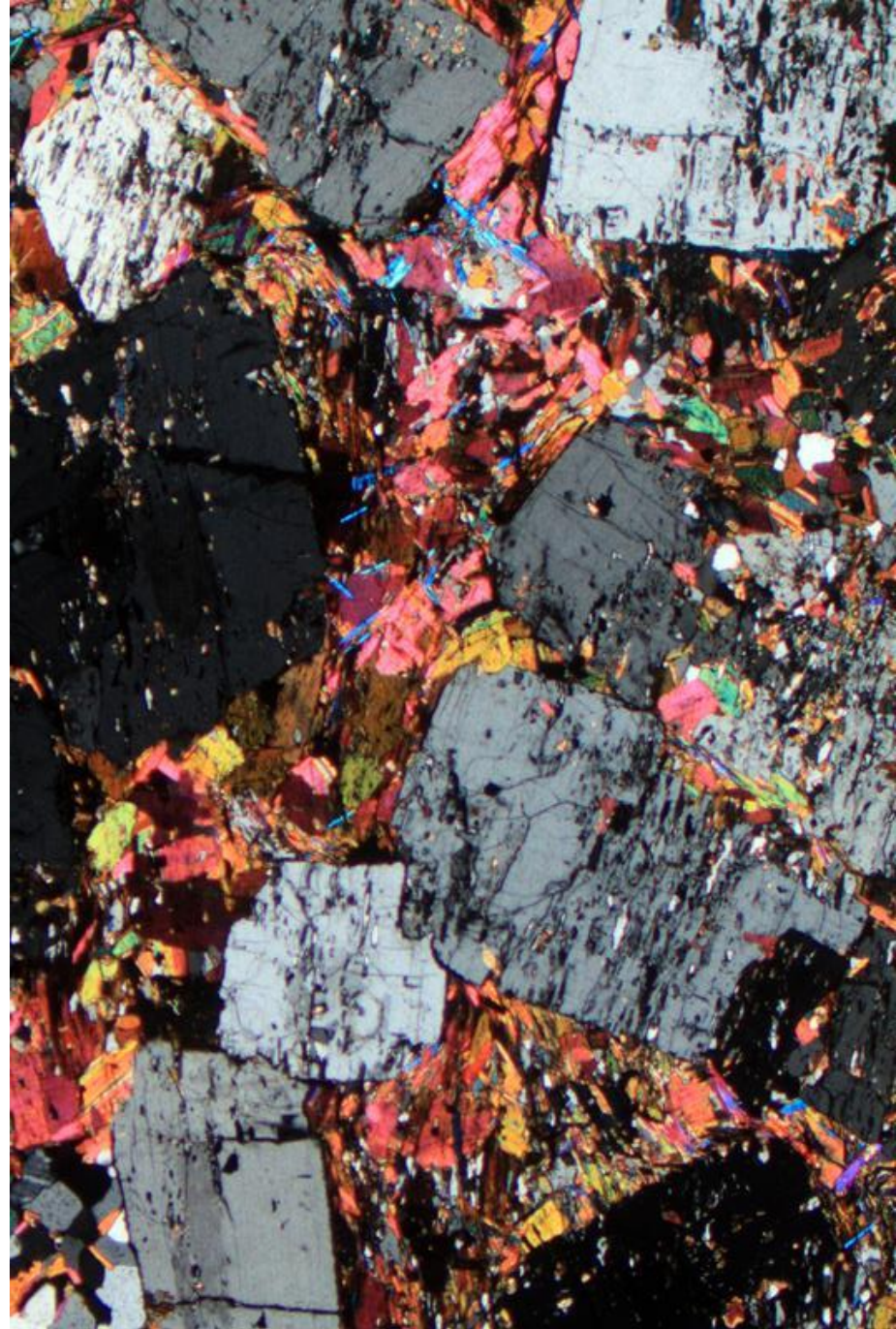
Рельеф андалузита средний, группа по показателям преломления 1,6-1,7.

Для андалузита характерны два направления спайности под углом 89 градусов

Андалузит имеет слабое двулучепреломление ( $n_g - n_r$  до 0,011), что определяет интерференционные окраски до светло-желтой первого порядка

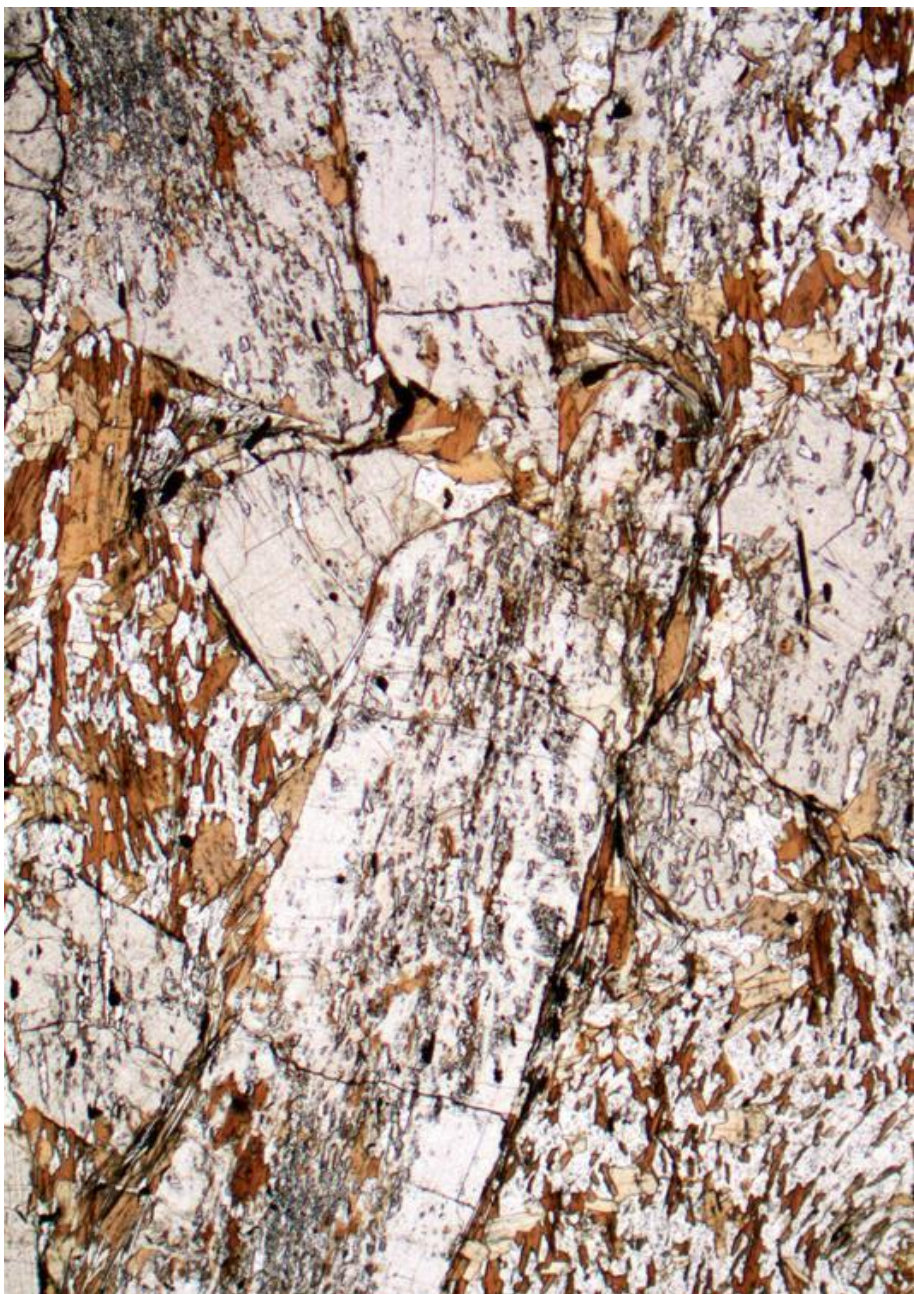
Погасание прямое, удлинение отрицательное.



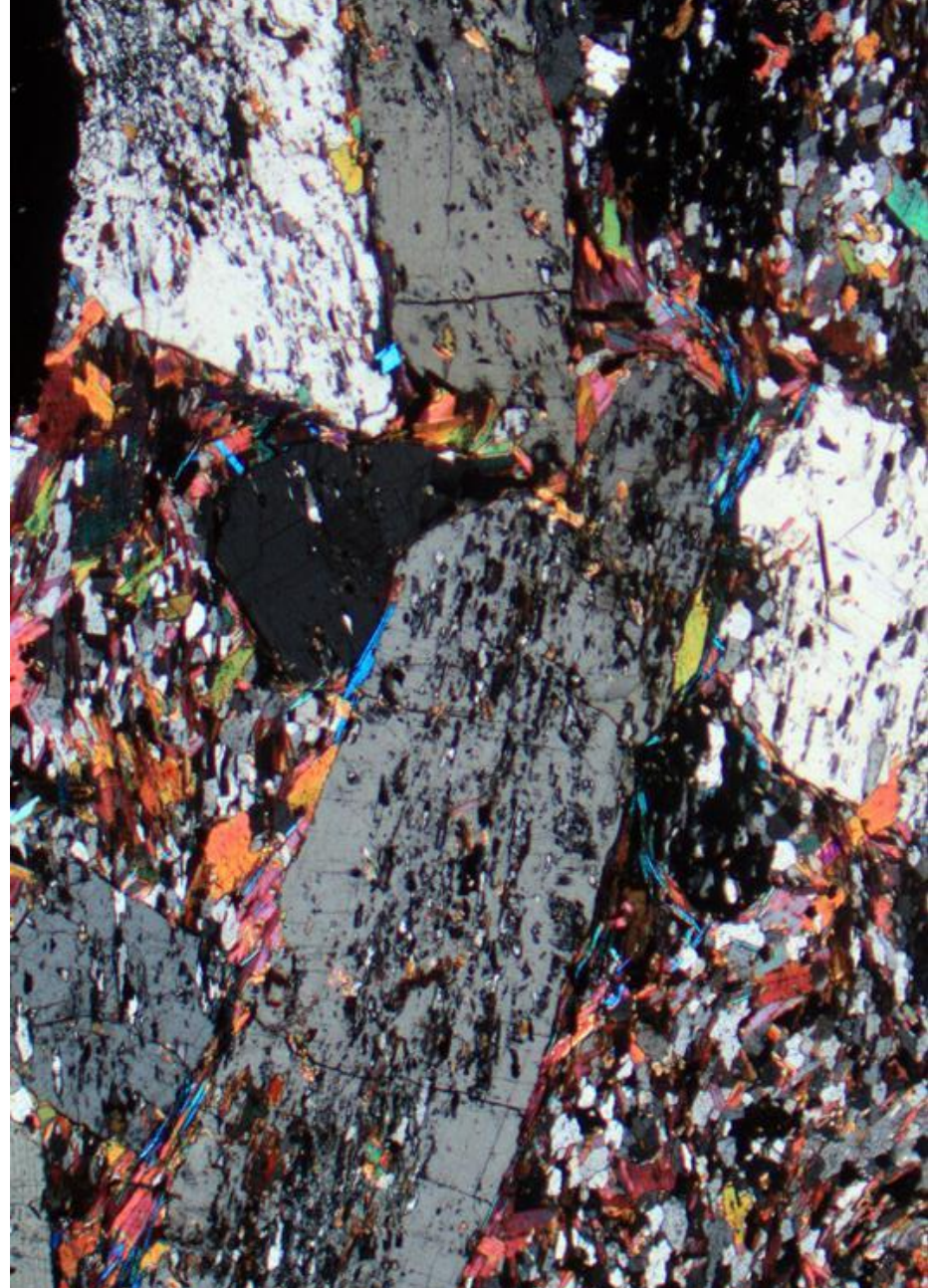


Поперечные разрезы андалузита. длина фото 4 мм.





Продольные сечения андалузита.  
Фото при одном Николе. Длина фото 4 мм



Продольные сечения андалузита.  
Фото в скрещенных Николях. Длина фото 4 мм





Андалузит с включениями углистого вещества по определенным крестообразным зонам называют **хиастолитом**

Приведены фото хиастолита без анализатора.

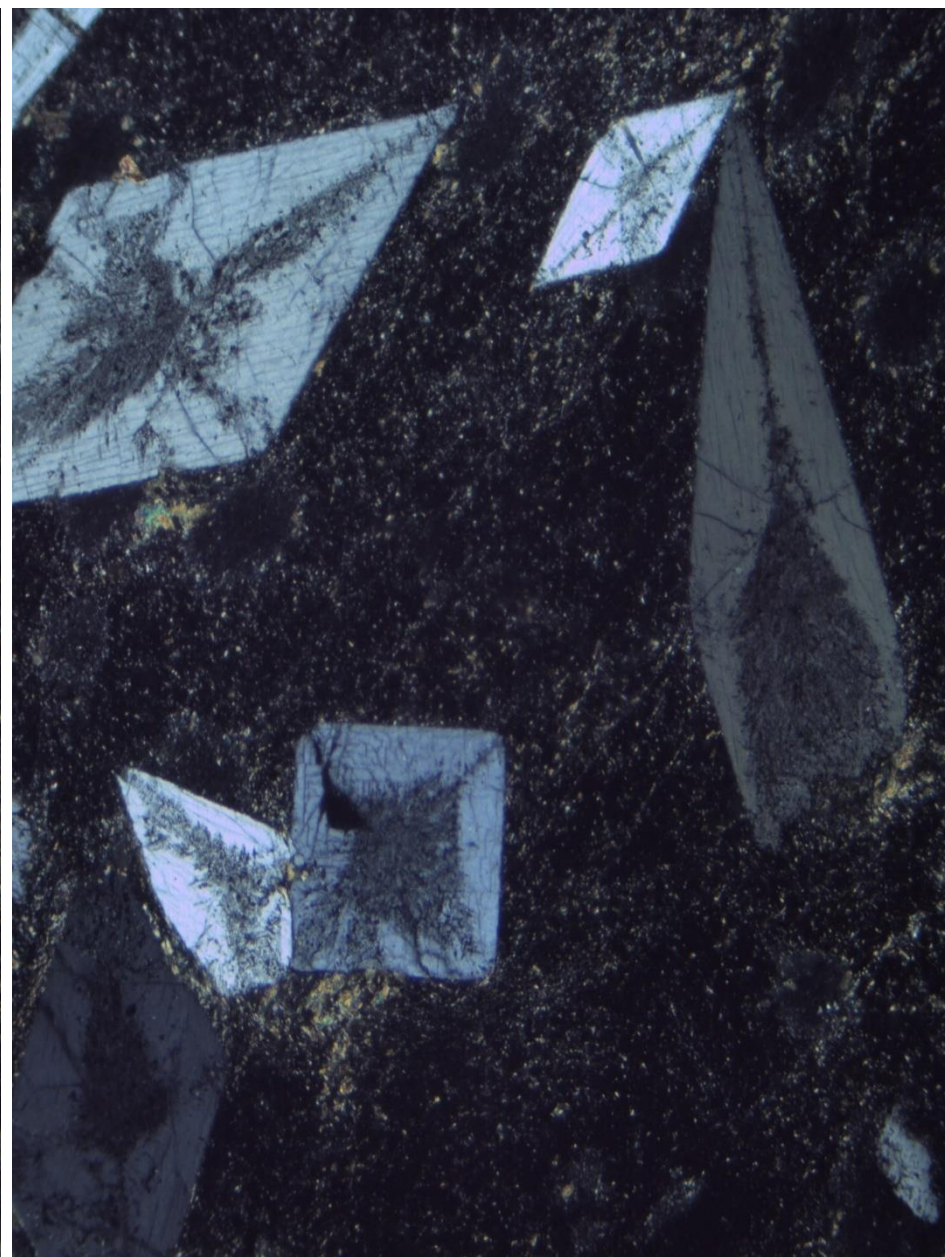
На верхнем фото у хиастолита проявлена характерная для андалузита спайность в двух направлениях под углом 89 градусов.

Размер кристаллов хиастолита на фото - первые мм.





# Андалузитовый (хиастолитовый) роговик





## СИЛЛИМАНИТ

Поперечные срезы силлиманита образуют четырехугольники, часто ромбы со спайностью поперек ромба



Фото при одном Николе, длина фото 3,5 мм.



Продольные разрезы силлиманита длиннопризматические, игольчатые и даже волокнистые. Силлиманит в шлифах бесцветен. Рельеф средний положительный, группа по показателям преломления 1,6-1,7.

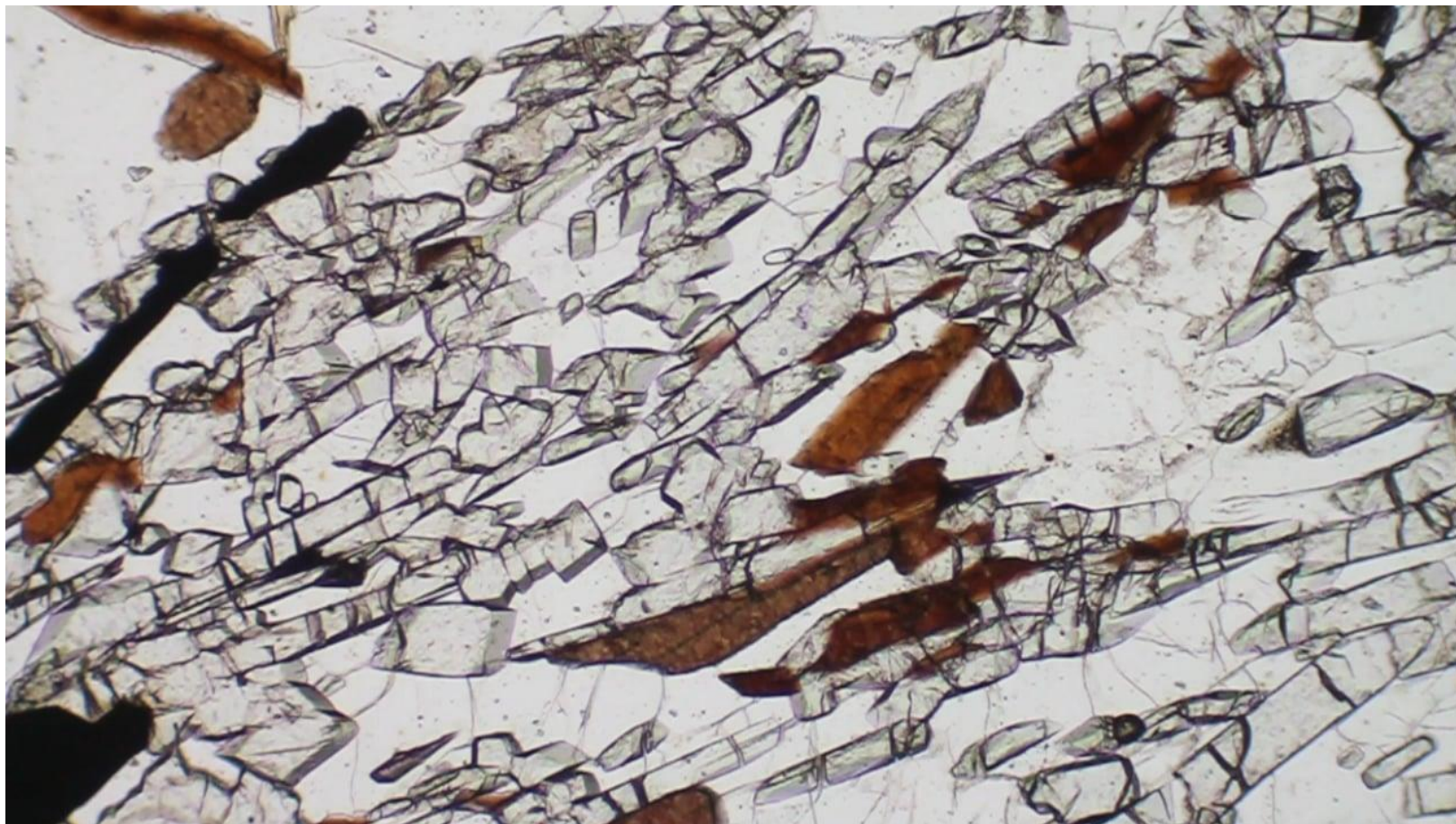


Фото при одном Николе, длина фото 3,5 мм.



Силлиманит имеет среднюю силу двулучепреломления ( $n_g - n_p = 0,02 - 0,022$ ), для него характерны интерференционные окраски конца первого - начала второго порядка (до синей второго).

Погасание силлиманита прямое. Удлинение положительное



Фото в скрещенных Николях,  
длина фото 3,5 мм.

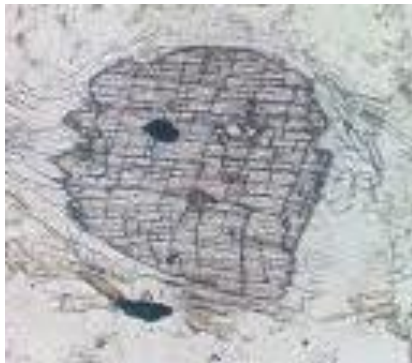
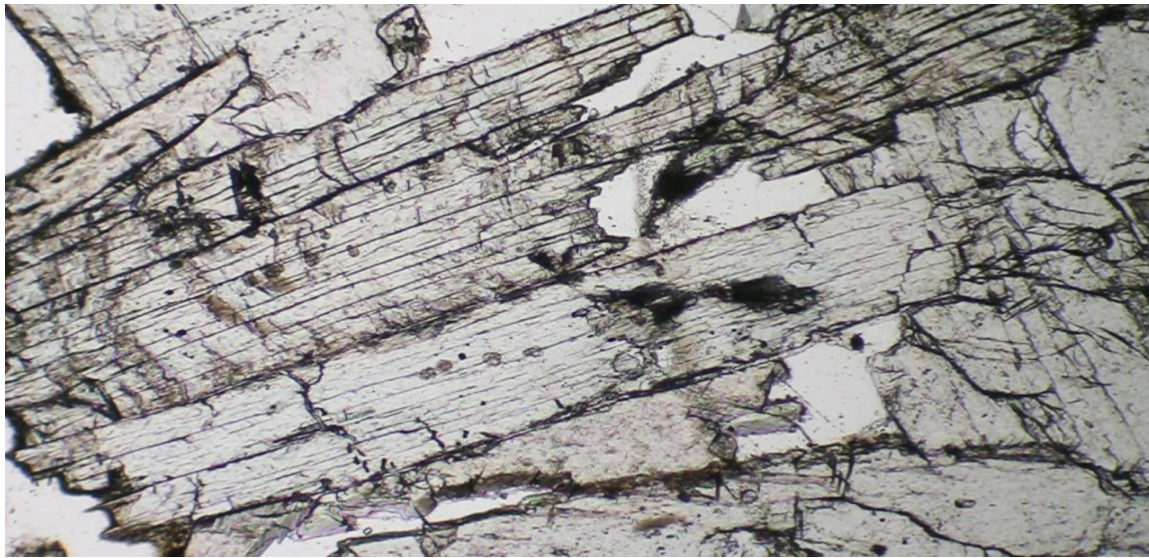


## КИАНИТ (ДИСТЕН)

Кианит образует удлиненные, призматические, прямоугольные зерна. Для него характерны полисинтетические двойники.

В шлифах кианит бесцветен. Он имеет два направления спайности, между которыми на разных разрезах угол меняется от 74 до 86 градусов.

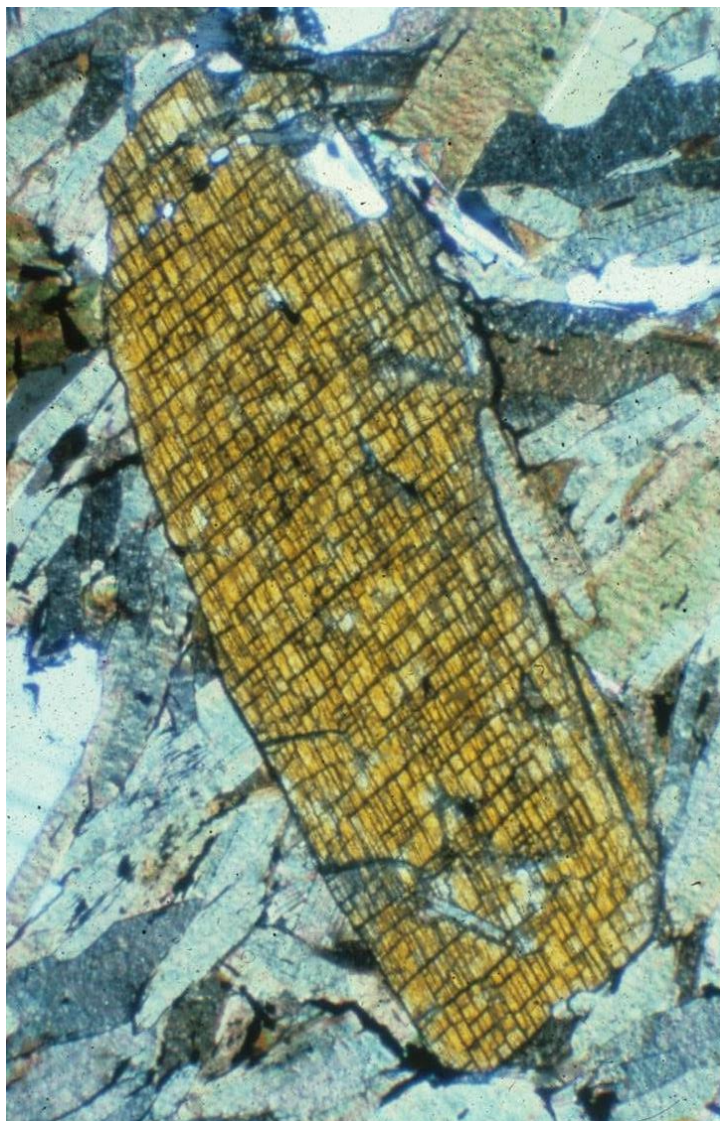
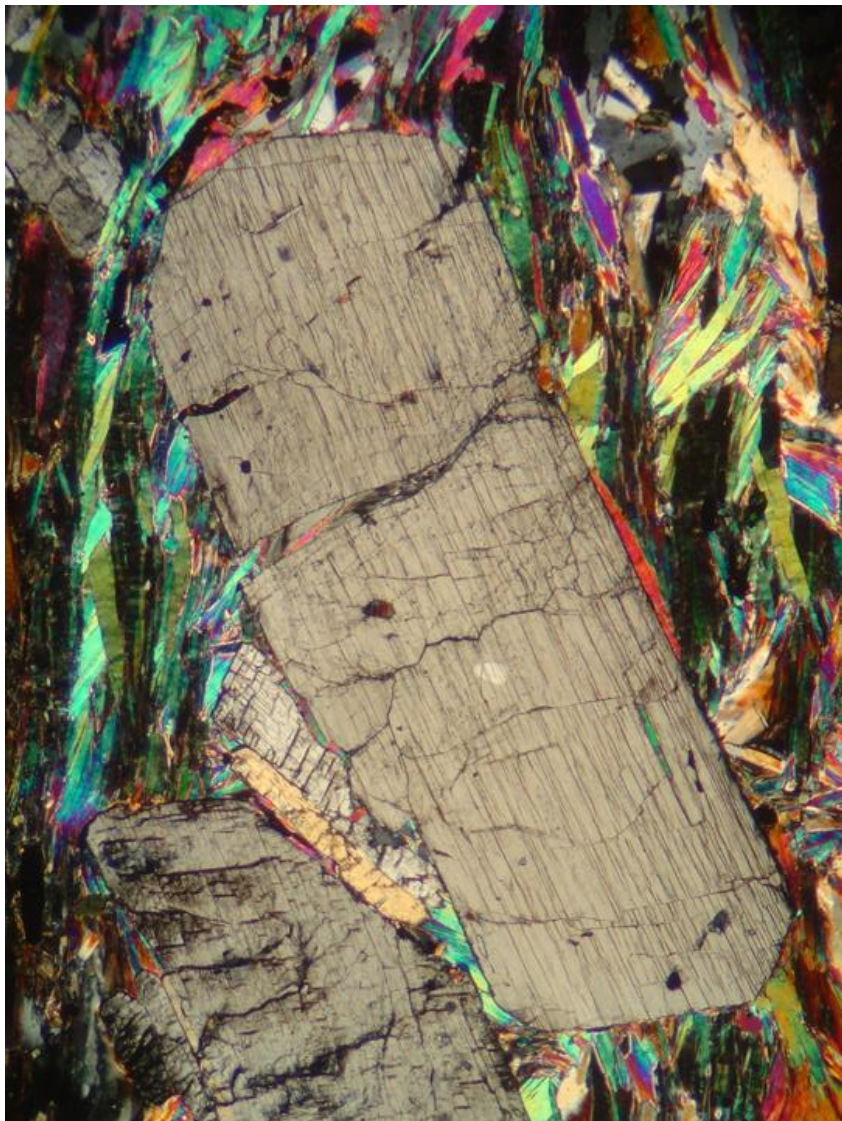
Рельеф высокий. Группа по показателям преломления 1,7-1,8.



Приведены различные фото при одном Николе.  
Длина кристаллов кианита на фото от 1 до 2 мм.



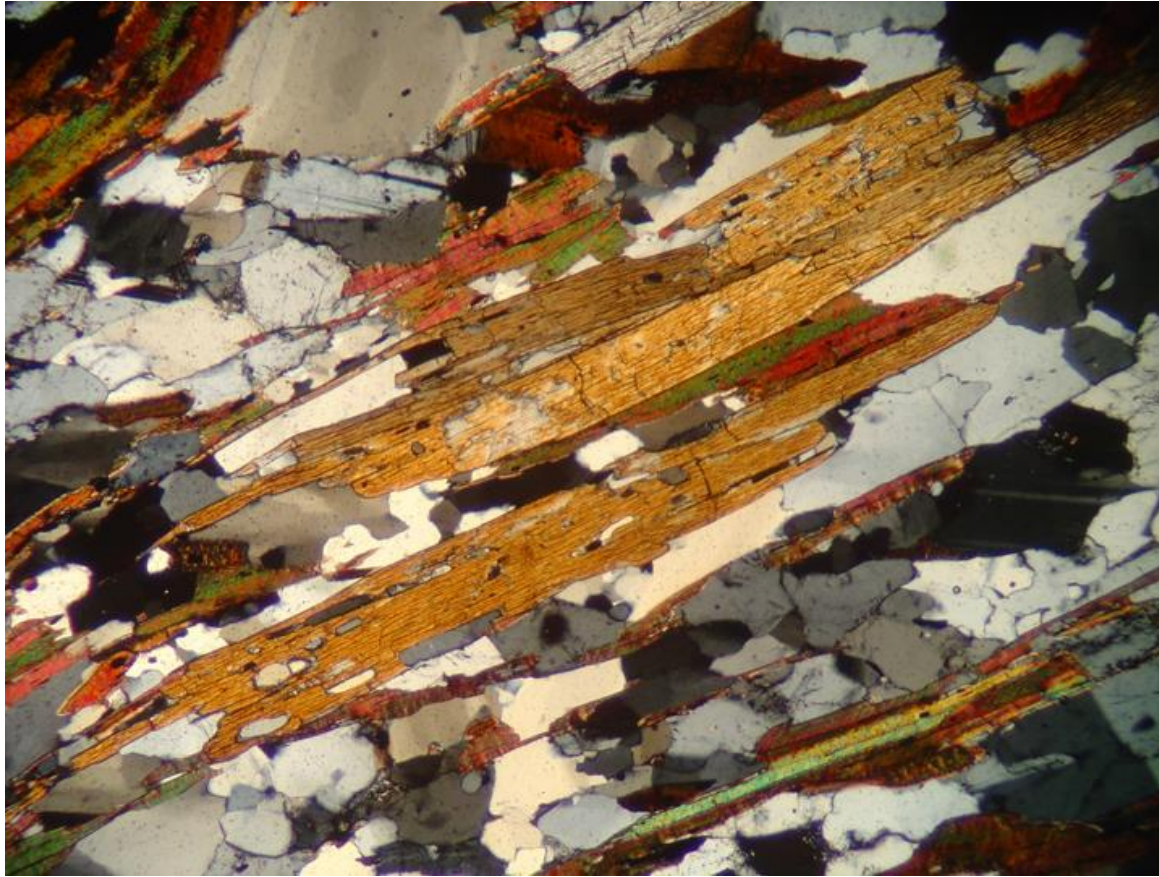
Кианит имеет слабое двулучепреломление ( $n_g - n_p = 0,012 - 0,016$ ) и низкие интерференционные окраски до желтой первого порядка.



Приведены фото в скрещенных Николях. Ширина фото 1,5 мм.  
Видна характерная форма кристаллов и спайность.



В зависимости от разреза кианит имеет либо прямое, либо косое (до 30 градусов) погасание.



Таким образом, кианит в шлифах схож с ортопироксеном. Но! Орх – минерал высшей степени метаморфизма, а кианит, указывая на высокое давление, часто встречается с низкотемпературными минералами. Чтобы их не перепутать нужно следить за ассоциацией!



## Хлоритоид $(\text{Fe, Mg, Mn})_2\text{Al}_4[\text{SiO}_4]_2\text{O}_2\text{OH}$

— это типичный минерал фации зеленых сланцев (и фации хлорит-мусковитовых сланцев на диаграмме метапелитов).

Из характерных особенностей хлоритоида отметим простое или полисинтетическое двойникование, аномальные серо-сизые интерференционные окраски и иногда проявляющуюся зональность типа песочных часов





# Ставролит $(\text{Fe,Mg})_2(\text{Al,Fe})_9\text{O}_6[(\text{Si,Al})\text{O}_4]_4(\text{O,OH})_2$

Образуется при условиях низшей и средней ступеней метаморфизма, то есть в при Р-Т параметрах фаций зеленых сланцев и амфиболитовой на схеме фаций метабазитов.

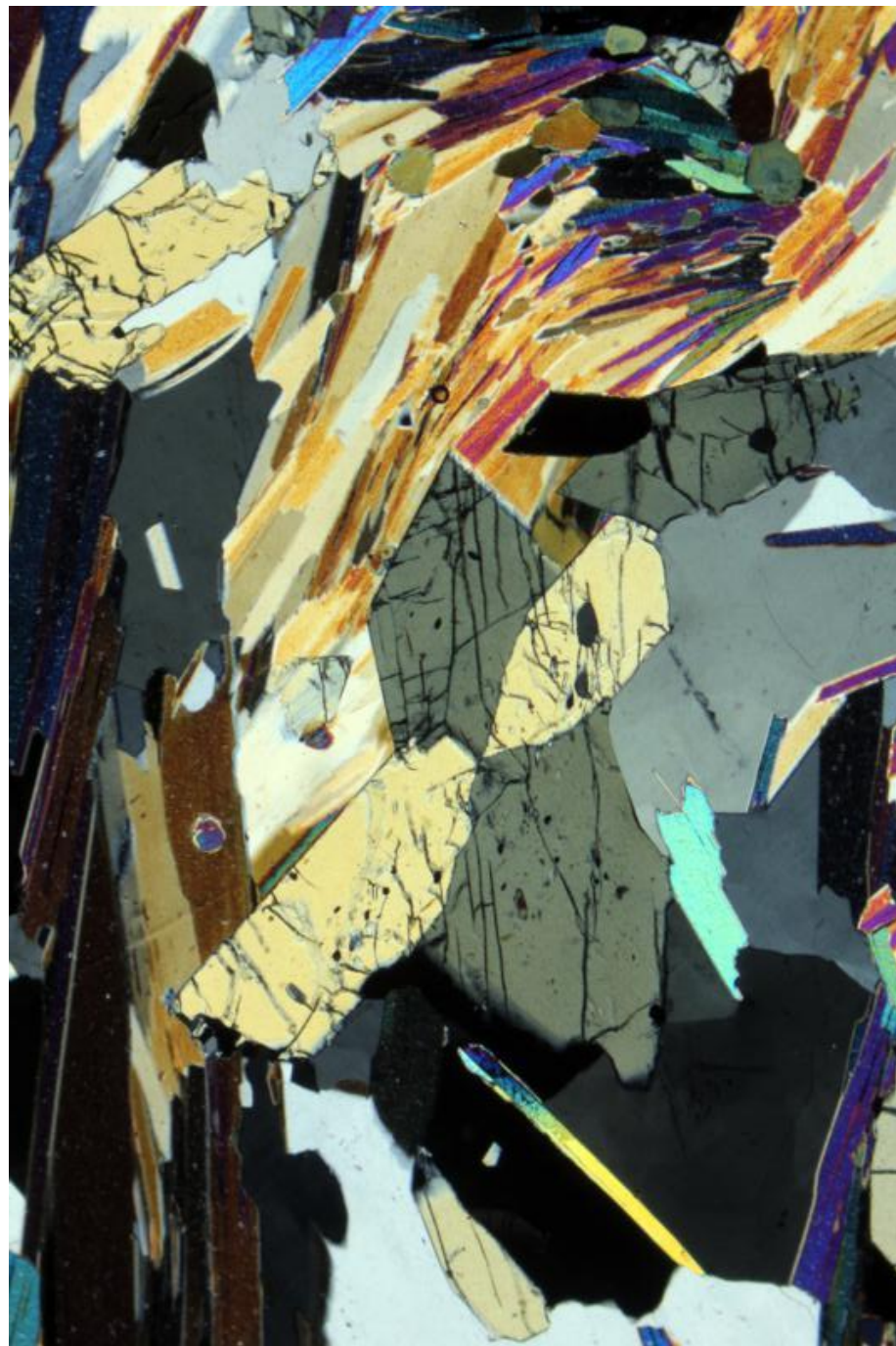


На данной схеме фаций метапелитов поле стабильности ставролита обведено линией бежевого цвета.

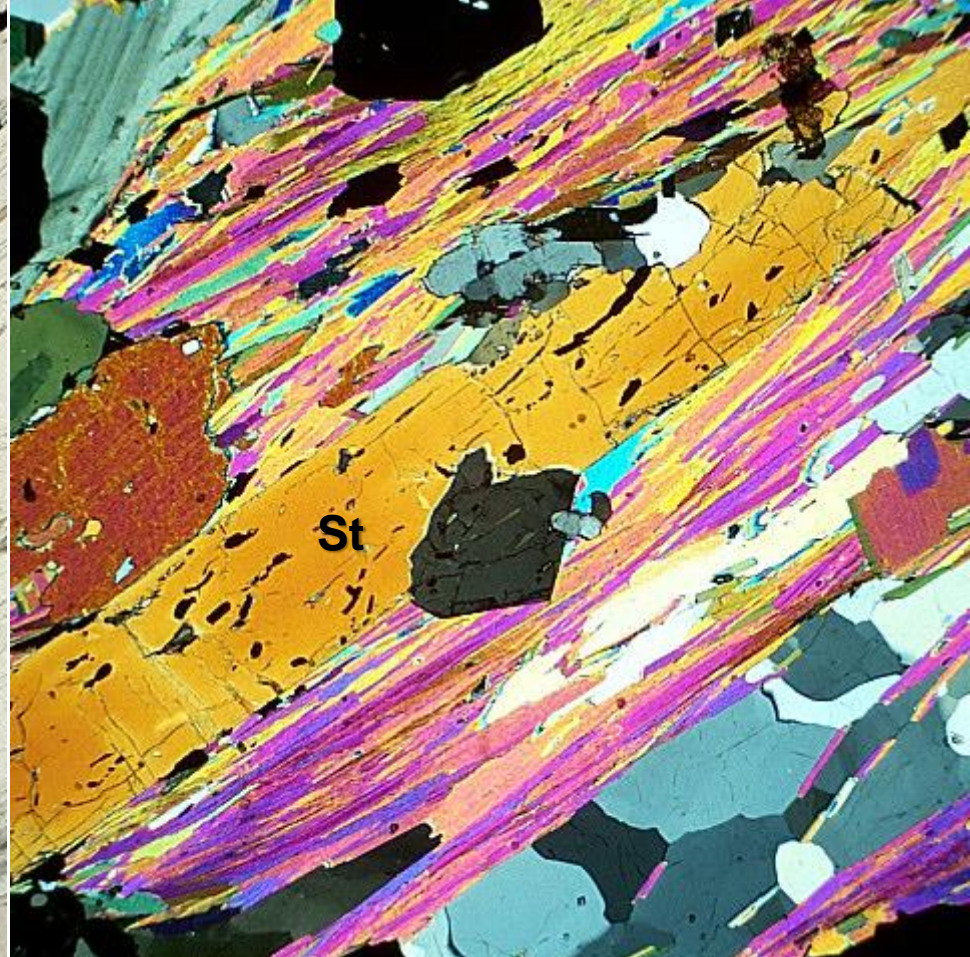






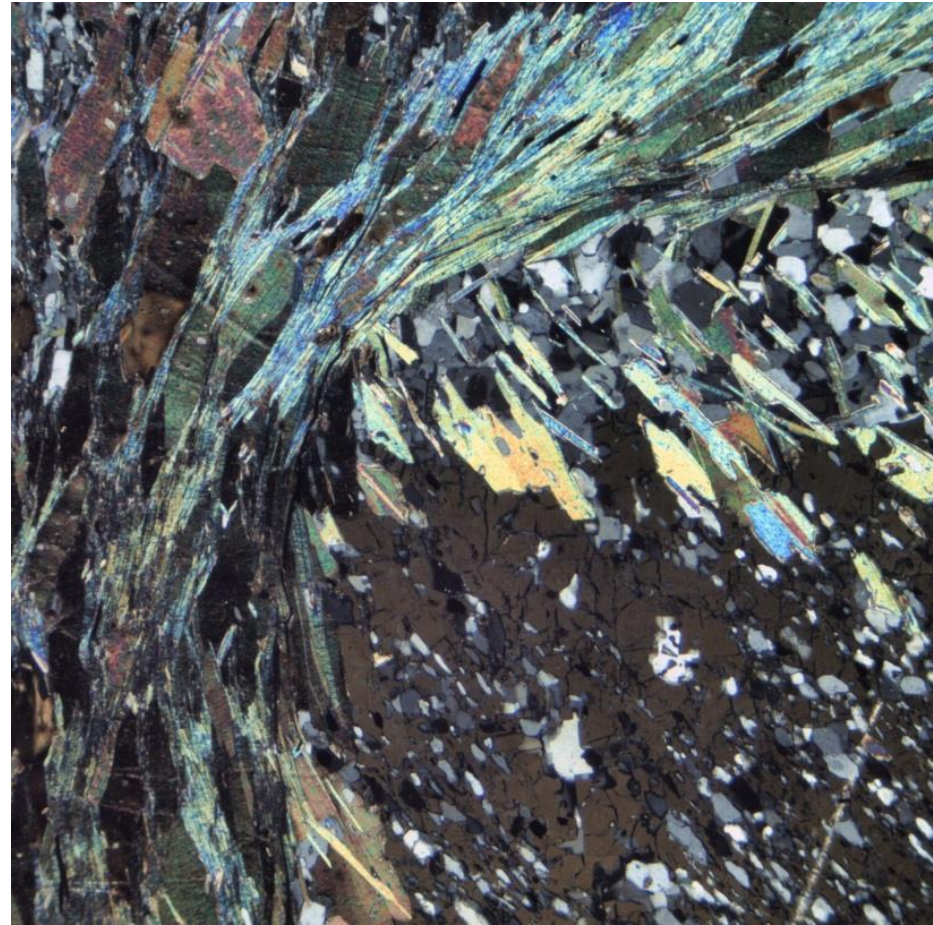
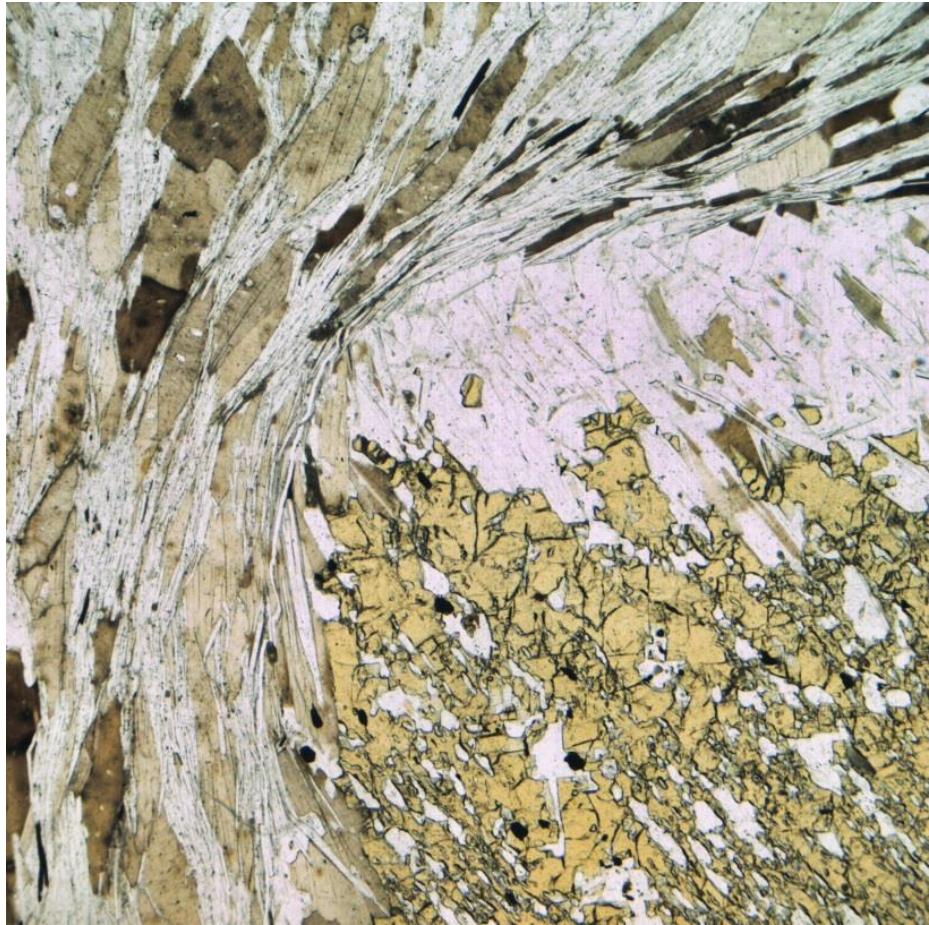






Ставролит обычно легко определяется в шлифах по характерному медово-желтому плеохроизму, интенсивность которого зависит от содержания железа в минерале, высокому рельефу и низким интерференционным окраскам (до желтой первого порядка). Ставролит часто образует порфиرو- и пойкило-бласты.

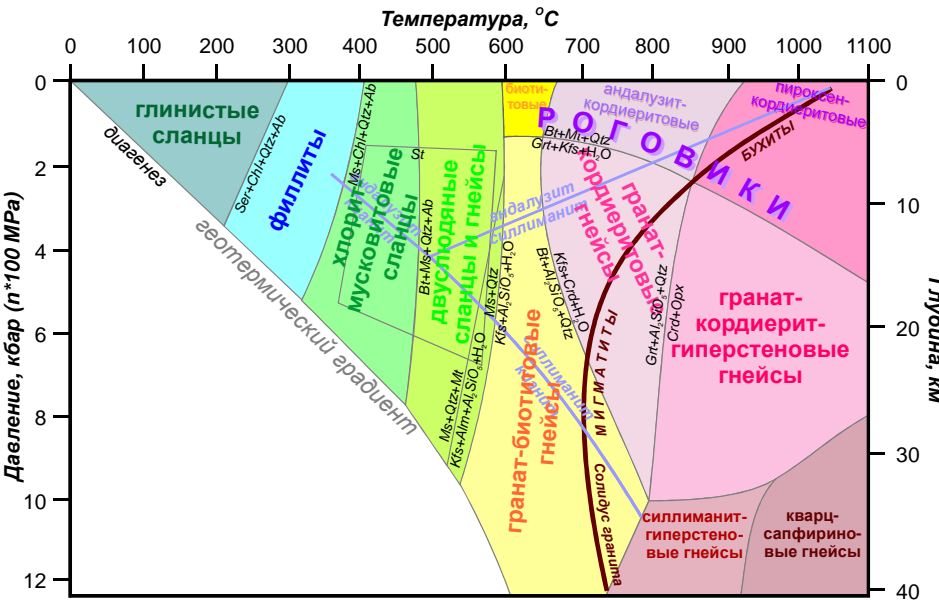




Ставролит очень часто образует пойкилобласты.



Последовательно рассмотрим преобразования метapelитов, начиная с самых низких ступеней метаморфизма

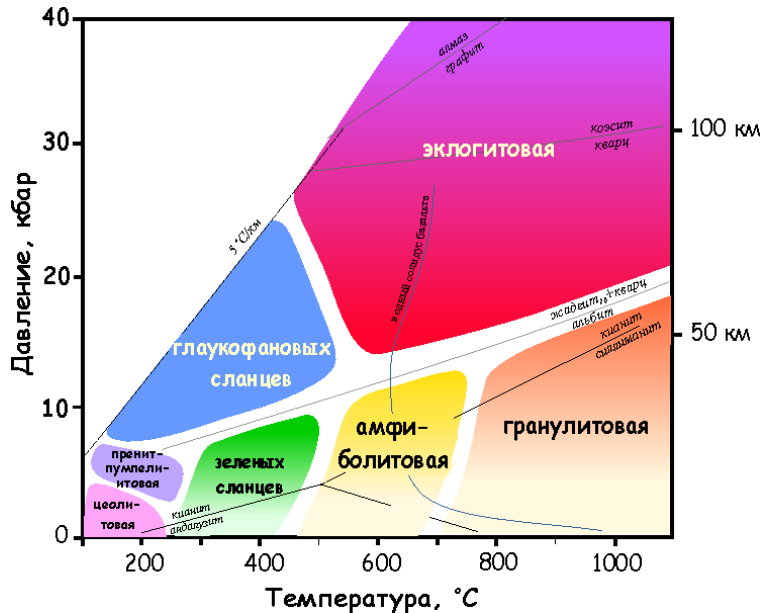


## Глинистые сланцы:

(соответствуют условиям цеолитовой и части пренит-пумпелиитовой фаций метабазитов)

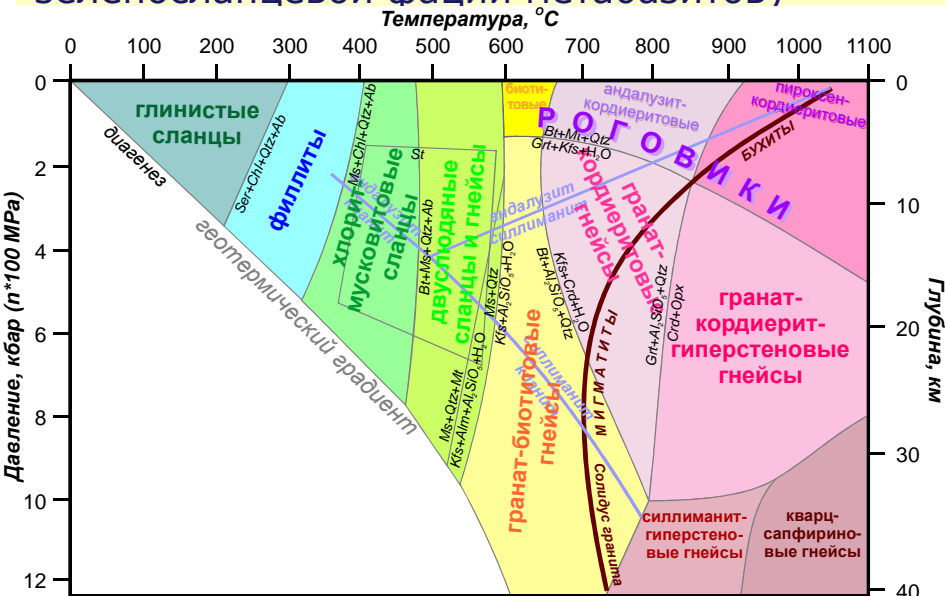
Преобразования достаточно слабые, сохраняется парагенезис исходных пород с преобладанием глинистых минералов и других слоистых силикатов.

При наличии стресса породы приобретают сланцеватую текстуру.



## Филлиты:

(соответствуют условиям верхней части пренит-пумпелиитовой и нижней части зеленосланцевой фаций метабазитов)

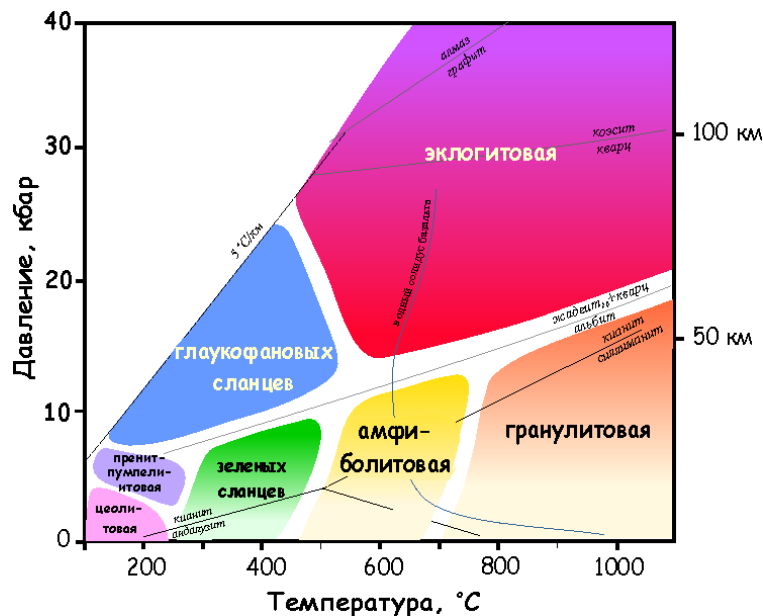


При условиях фации филлитов разлагаются гидрослюда и глинистые минералы. Возможный набор минералов филлитов: серицит+хлорит+кварц+альбит+турмалин+графит+фенгит(Mg-Fe-слюда) + парагонит (Na-слюда).

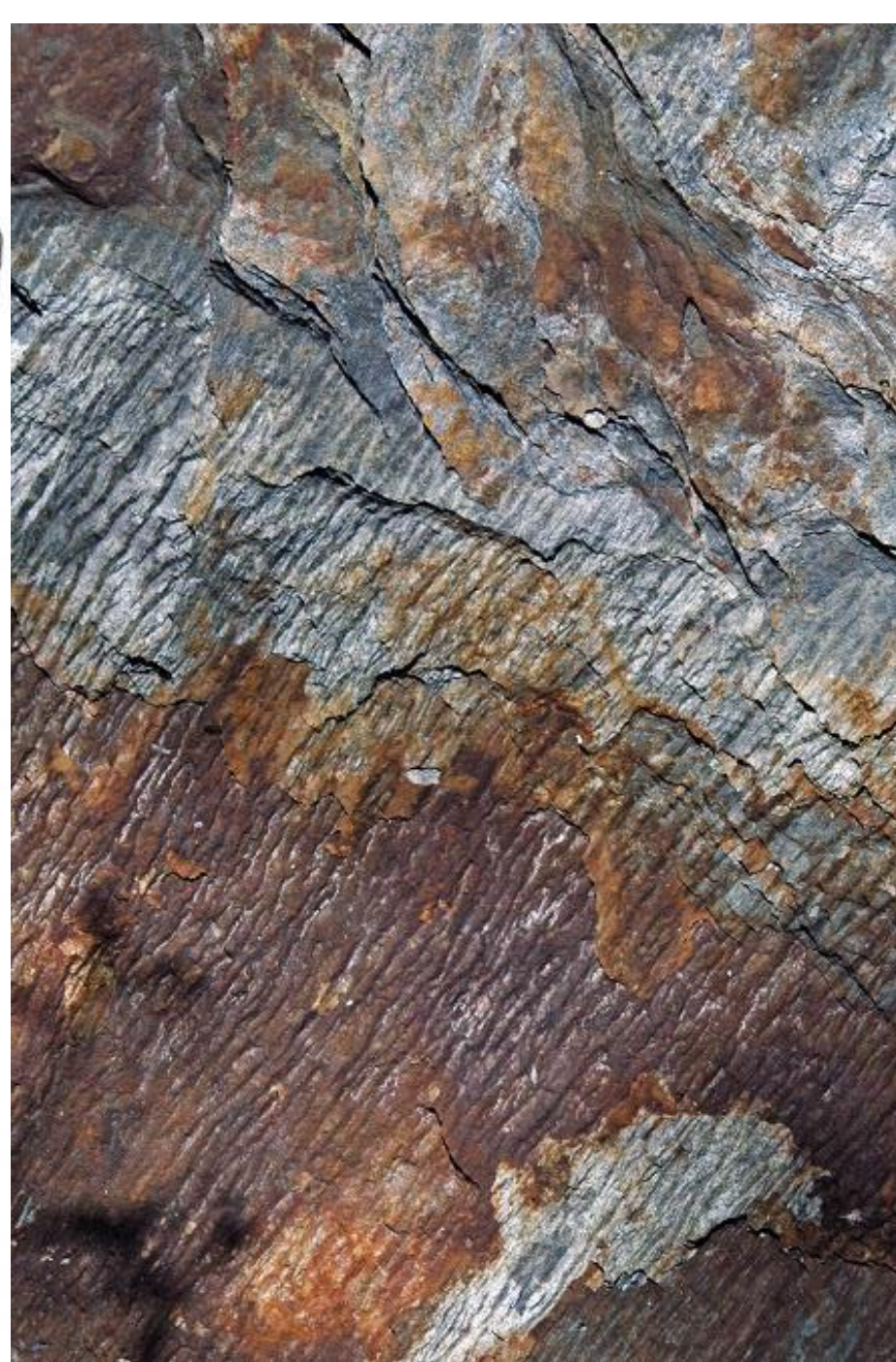
При условиях фации филлитов начинается реакция серицит+хлорит=биотит

Это не линия, а целая область переходов, где хлорит постепенно вытесняется биотитом

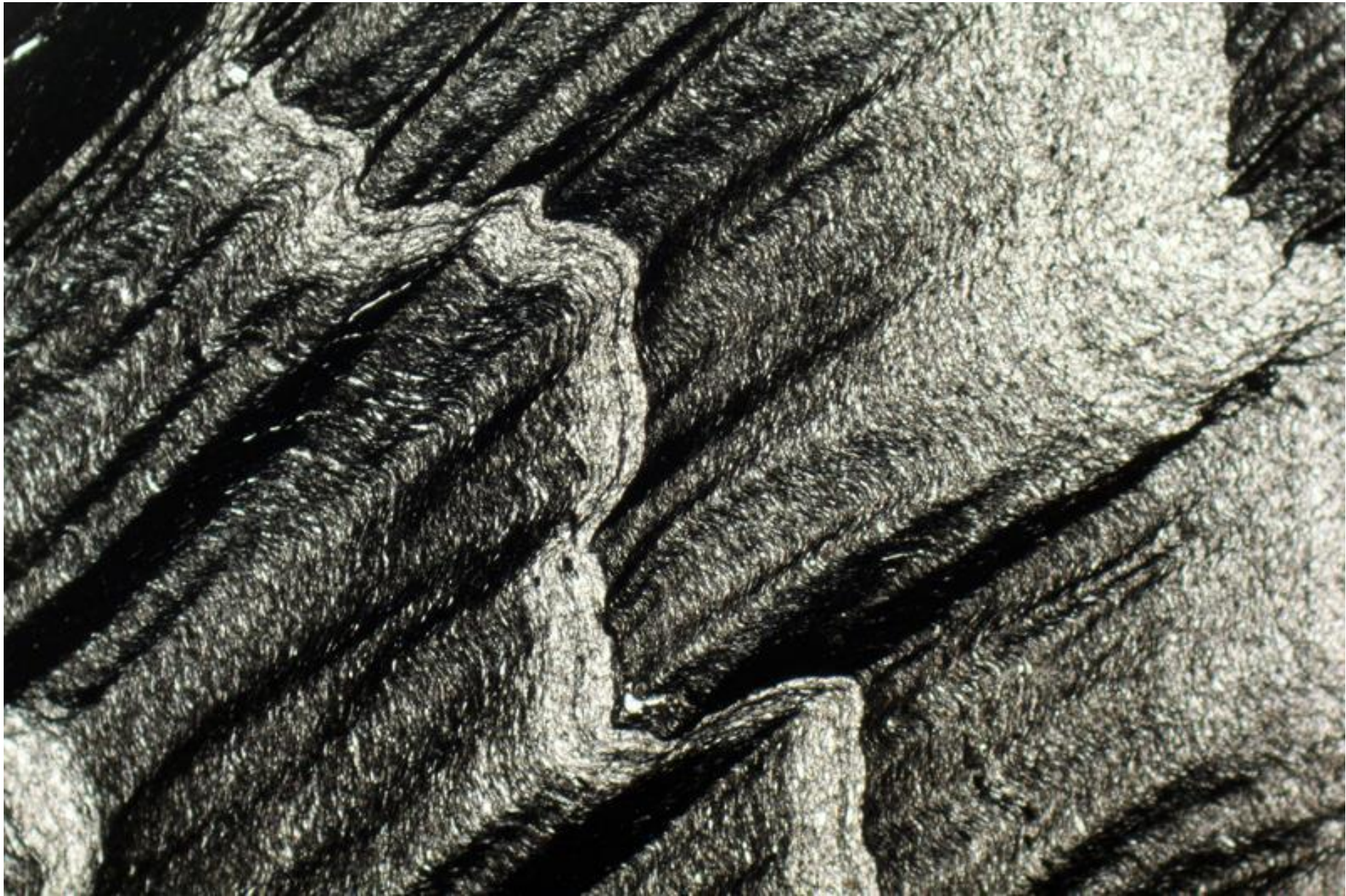
\*филлит (от греческого филлитес – листоватый) – мелко или скрытозернистая сланцеватая порода, обычно имеющая шелковистый блеск, создаваемым серицитом и другими мелкочешуйчатыми слюдами







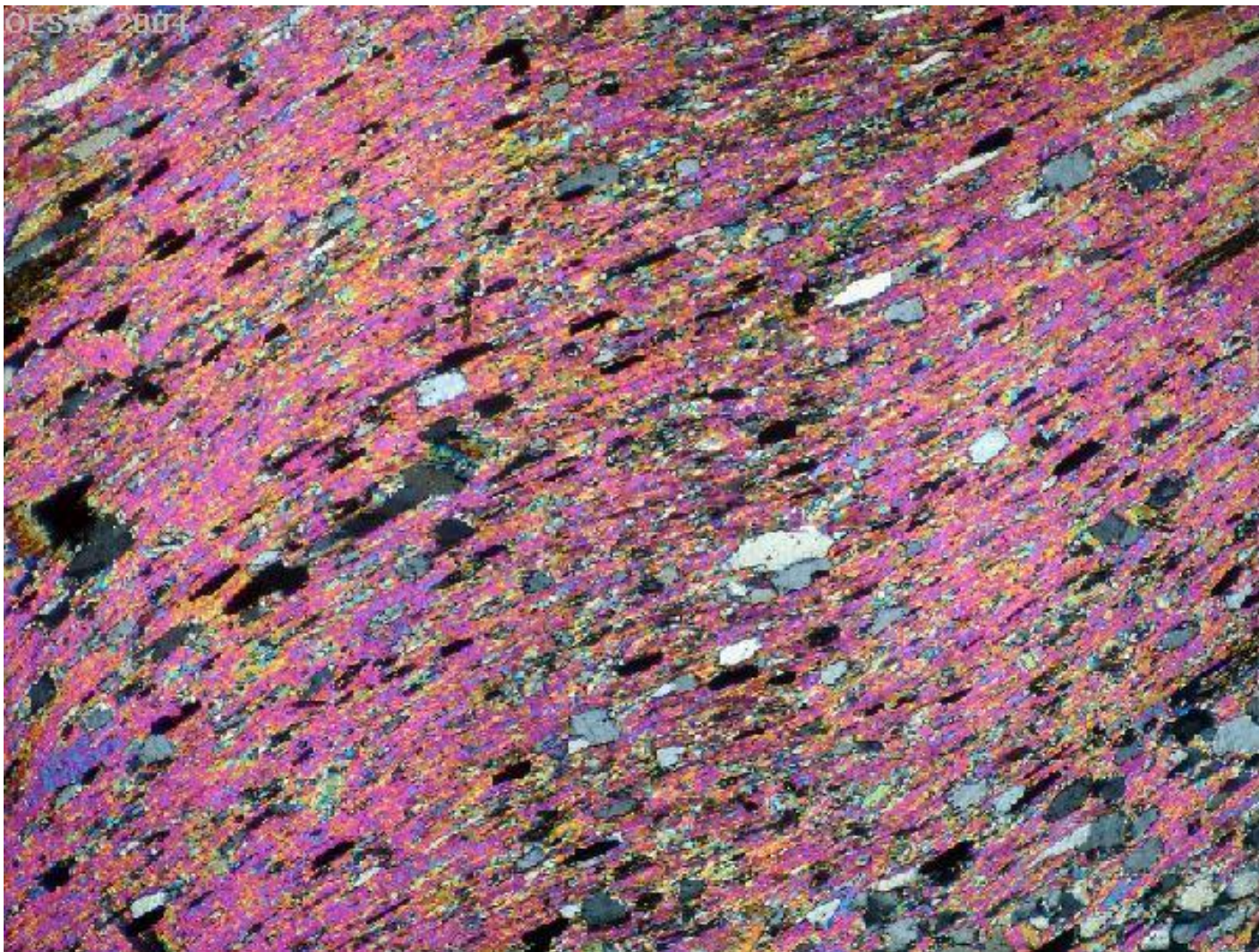












Порода, состоящая преимущественно из мелкозернистого мусковита и кварца, Образованная при условиях переходных от фации филлитов к фации хлорит-мусковитовых сланцев. Фото шлифа с анализатором.

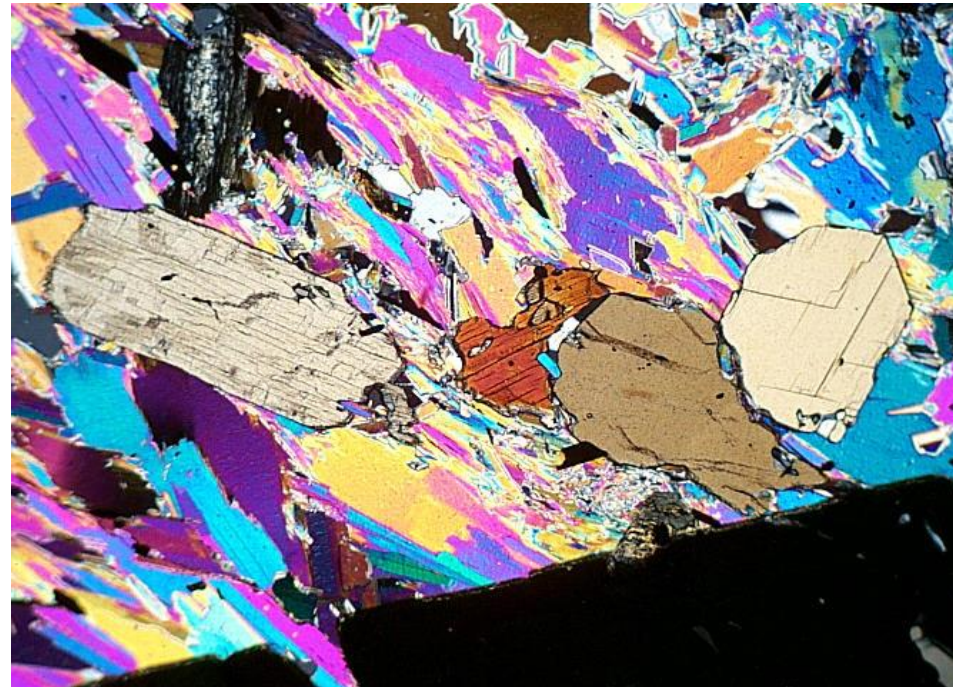
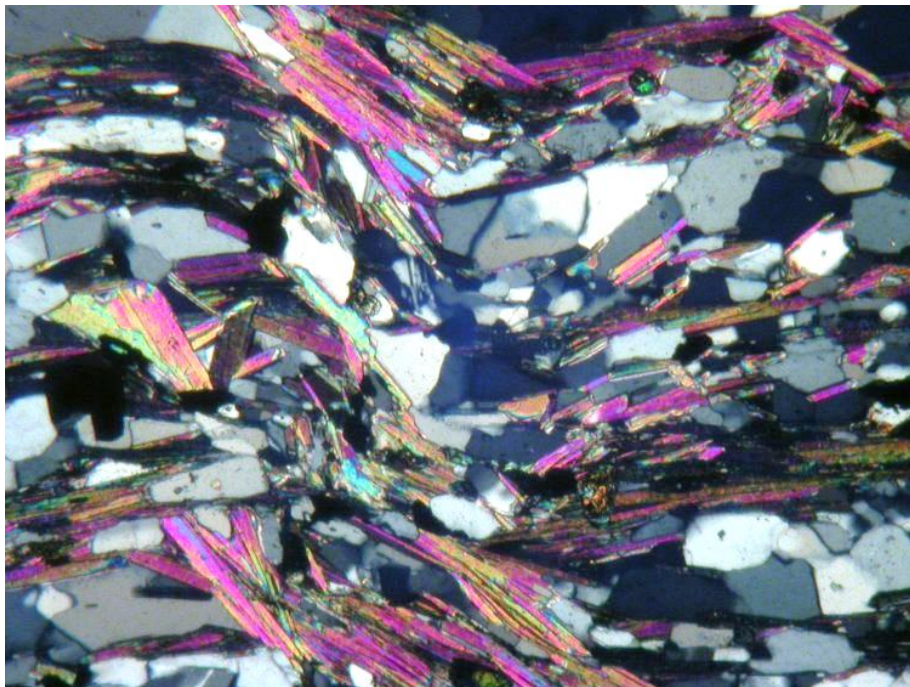


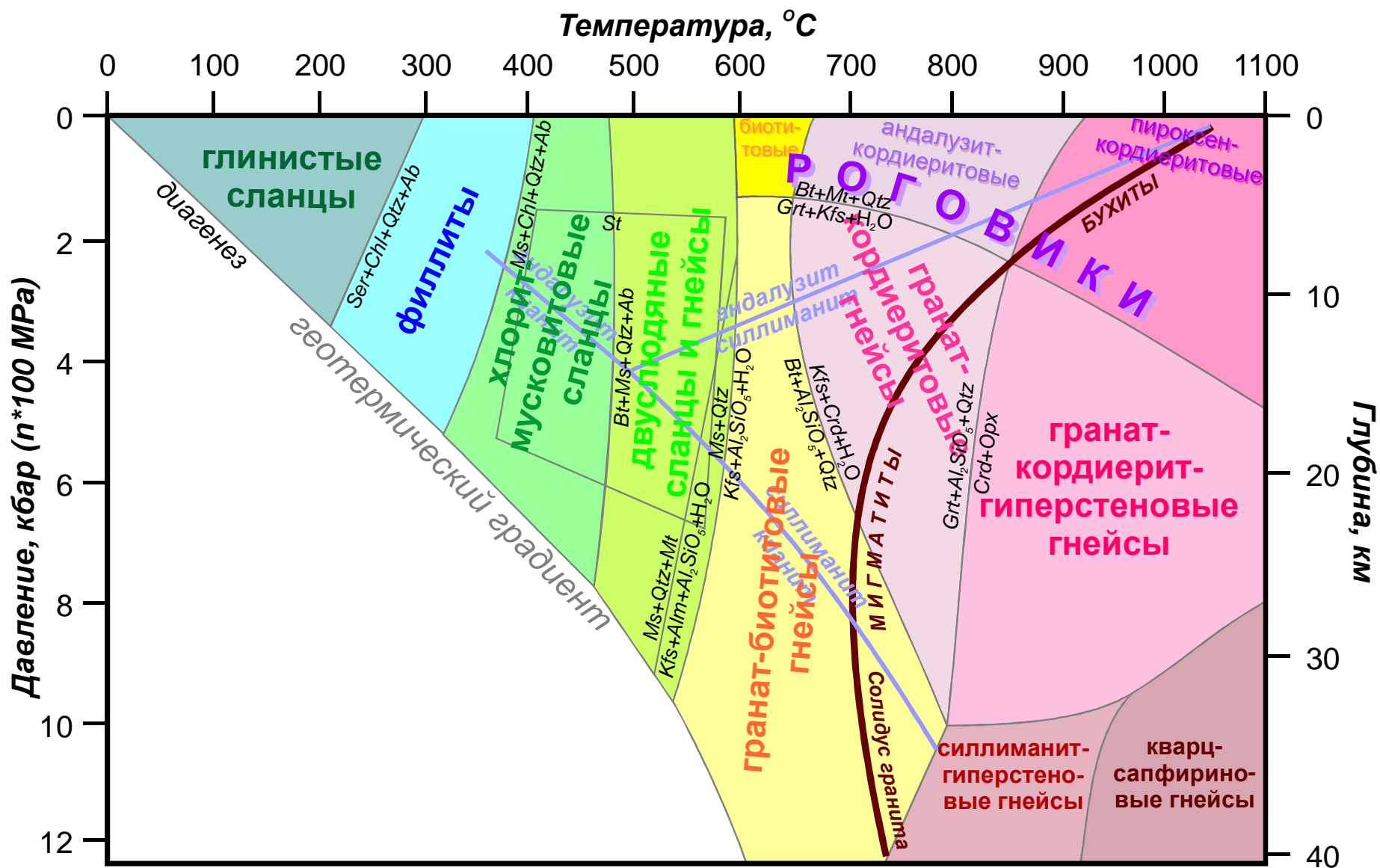
# Хлорит-мусковитовые сланцы

(с андалузитовой и кианитовой субфациями)  
(соответствует условиям зеленосланцевой фаций метабазитов)

Размер зерен укрупняется, Серицит переходит в Мусковит.

Возможный набор минералов: **Кварц+Полевой шпат+Мусковит+Хлорит+Хлоритоид+Ставролит+Гранат+графит** и т.д.







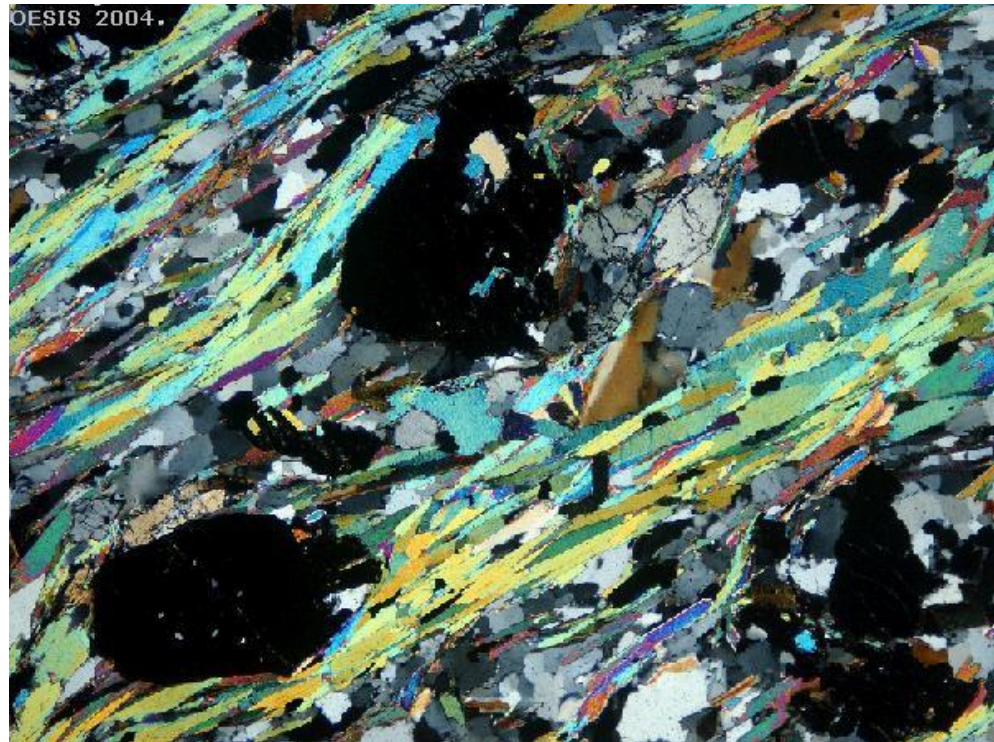
С повышением температуры Хлорит полностью вытесняется Биотитом и происходит переход в **фацию Двуслюдяных гнейсов и сланцев** (соответствует условиям амфиболитовой фаций метабазитов)  
Андалузит, Силлиманит и Кианит – определяют субфацию глубинности.



В различных соотношениях могут присутствовать:

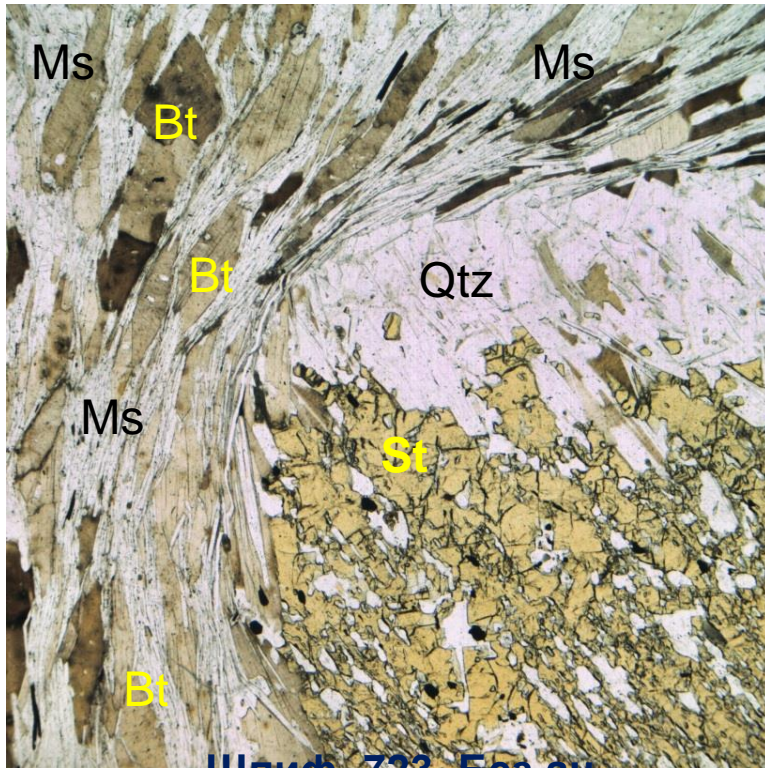
Кварц+Биотит+Мусковит+Полевой шпат+ Андалузит (Силлиманит, Кианит) + Гранат+Ставролит и т.д.

Гранат, Андалузит и Ставролит часто образуют порфиро- и пойкилобласты.

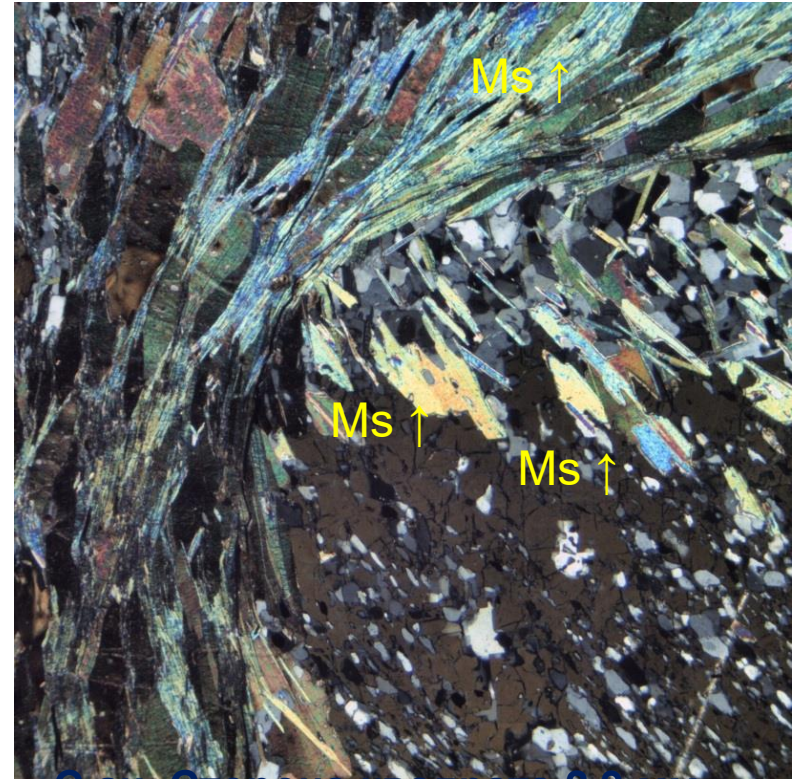




# Пойкилобласты как консерваторы структур и парагенезисов



Шлиф. 723. Без ан.



С ан. Сторона квадрата 2.9 мм

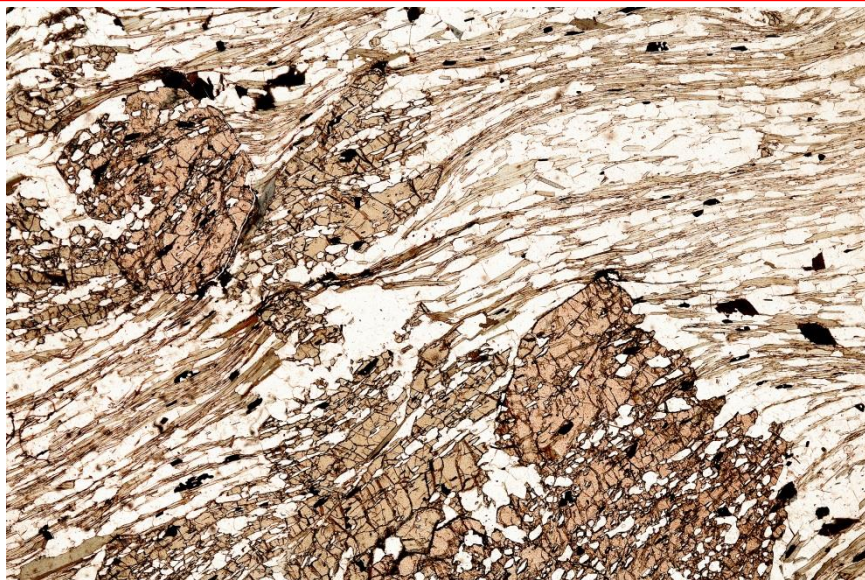
## Кварц-ставролит-двуслюдяной сланец

Прогрессивный метаморфизм нередко сопровождается пластическими деформациями породы под действием дифференциального стресса. С этим связано формирование директивных текстур, по-новому ориентированных относительно прежних. В данном случае в Ms-Q -St пойкилобласте «законсервировано» старое направление сланцеватости, т.к. этот пойкилобласт сформировался до начала последней деформации, обусловившей наблюдаемую сланцеватость основной ткани породы. Такие пойкилобласты называются докинематическими.

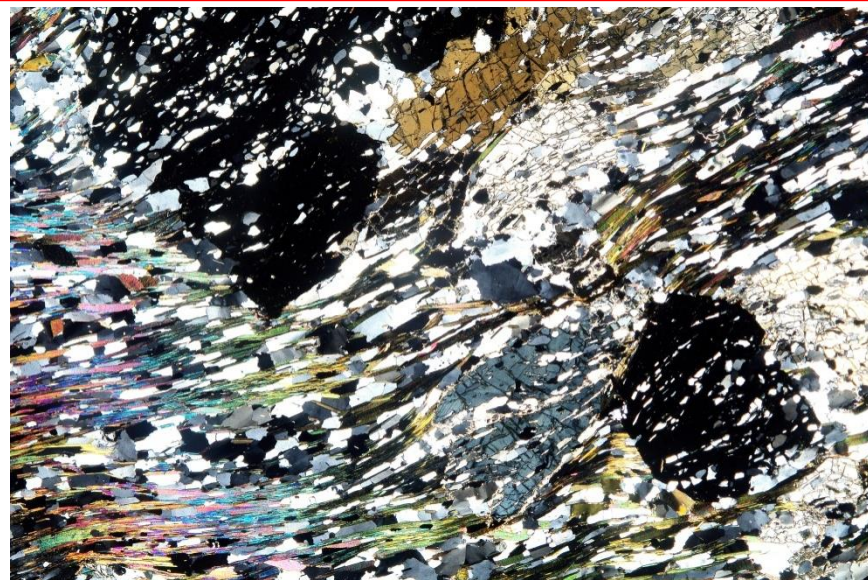


## Гранаты в метапелитах средней степени

Узнать гранат в метапелитах очень нетрудно, благодаря его высокому до очень высокого рельефу и изотропности. Здесь его ни с чем не спутаешь.



Шлиф 364. Без ан. Длина 2.5 мм



С ан.

Ставролит-кварц-гранат-кварц-двуслюдяной сланец. Текстура сланцеватая с элементами плейчатой. В Grt цепочками зерен Qtz зафиксирована полосчатость, совпадающая со сланцеватостью основной ткани породы: пойкилобласты Grt - посткинематические

В ряду идиоморфизма Бекке гранат стоит на первом месте – часто его порфириобласты являются идиобластами с 6- и 4-угольными сечениями →

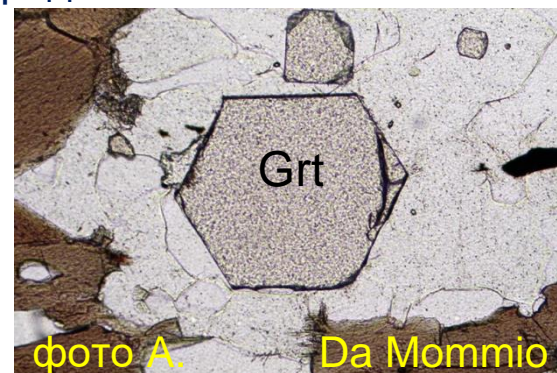


фото А.

Da Mommio



# Биотит-Гранатовые сланцы и гнейсы

(соответствуют верхней части амфиболитовой и нижней части гранулитовой фации).

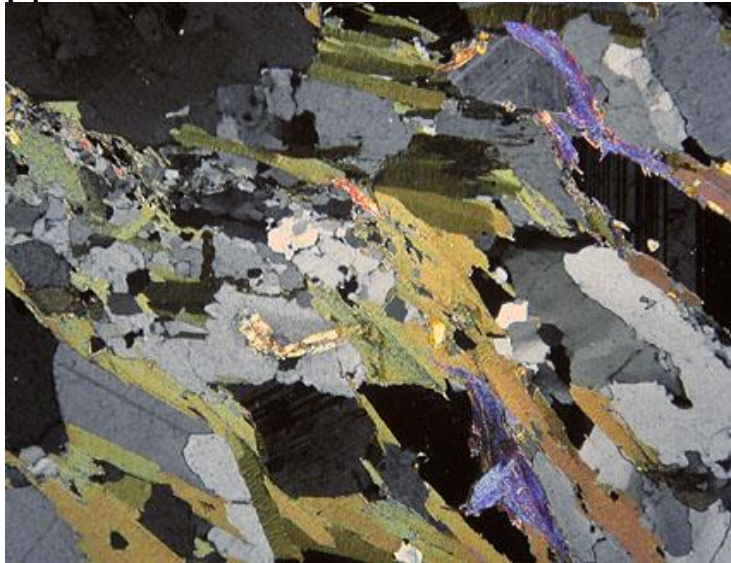
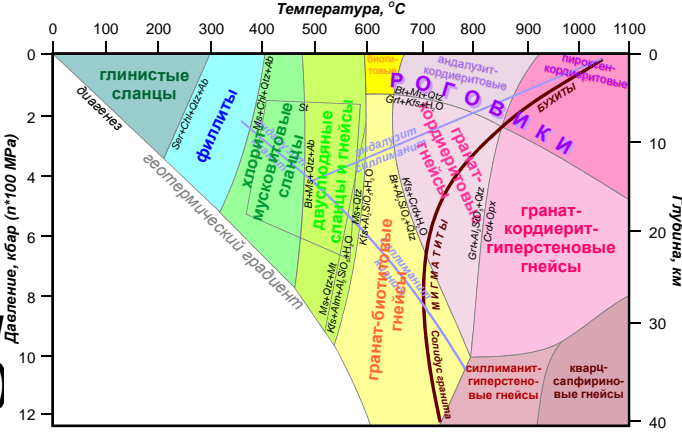
Андалузит, Силлиманит и Кианит определяют субфацию глубинности.

Здесь исчезает Мусковит, в соответствии с реакцией

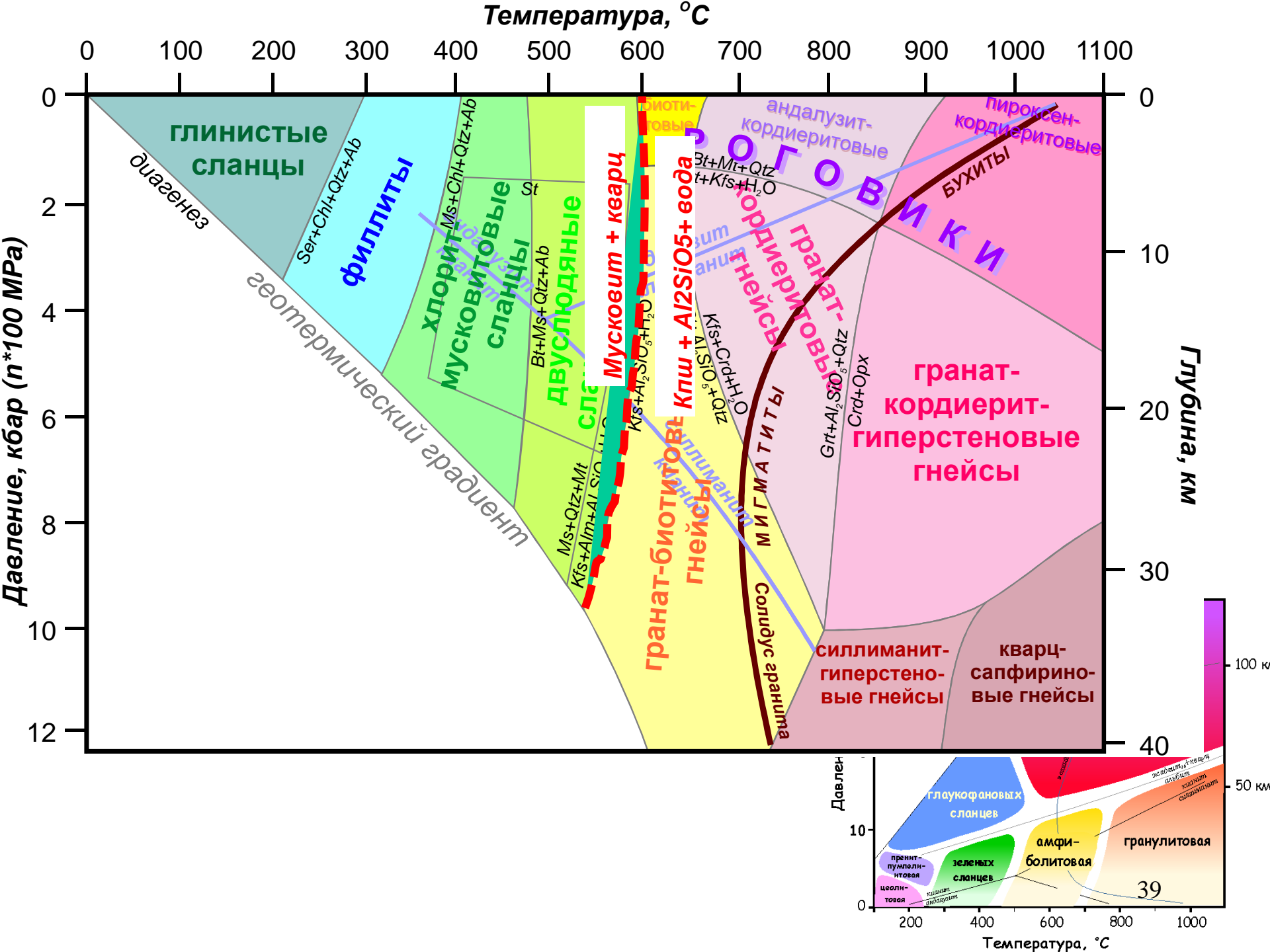


Возможные минералы: Биотит+Кварц+Полевой шпат+

Гранат и т.д.





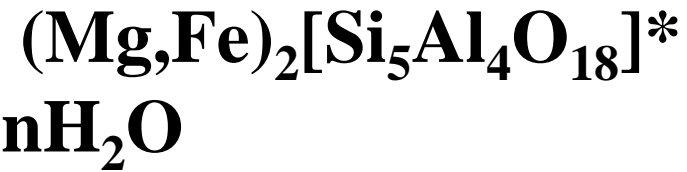




**Гранат-кордиеритовые гнейсы** (соответствуют нижней и средней части гранулитовой фации).  
Из силикатов глинозема характерен только Силлиманит.

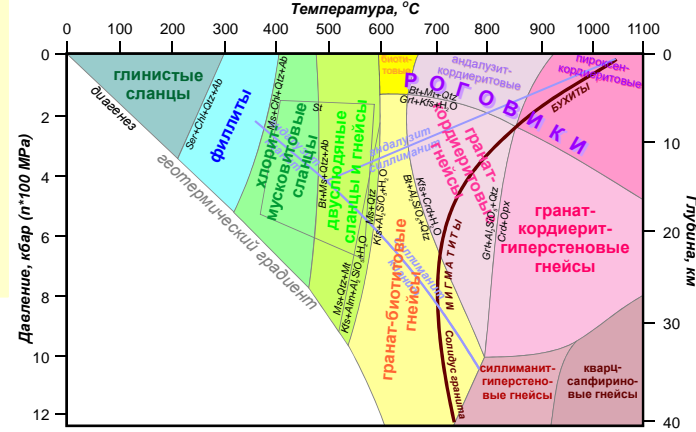
*Здесь появляется Кордиерит:*

# Кордиерит

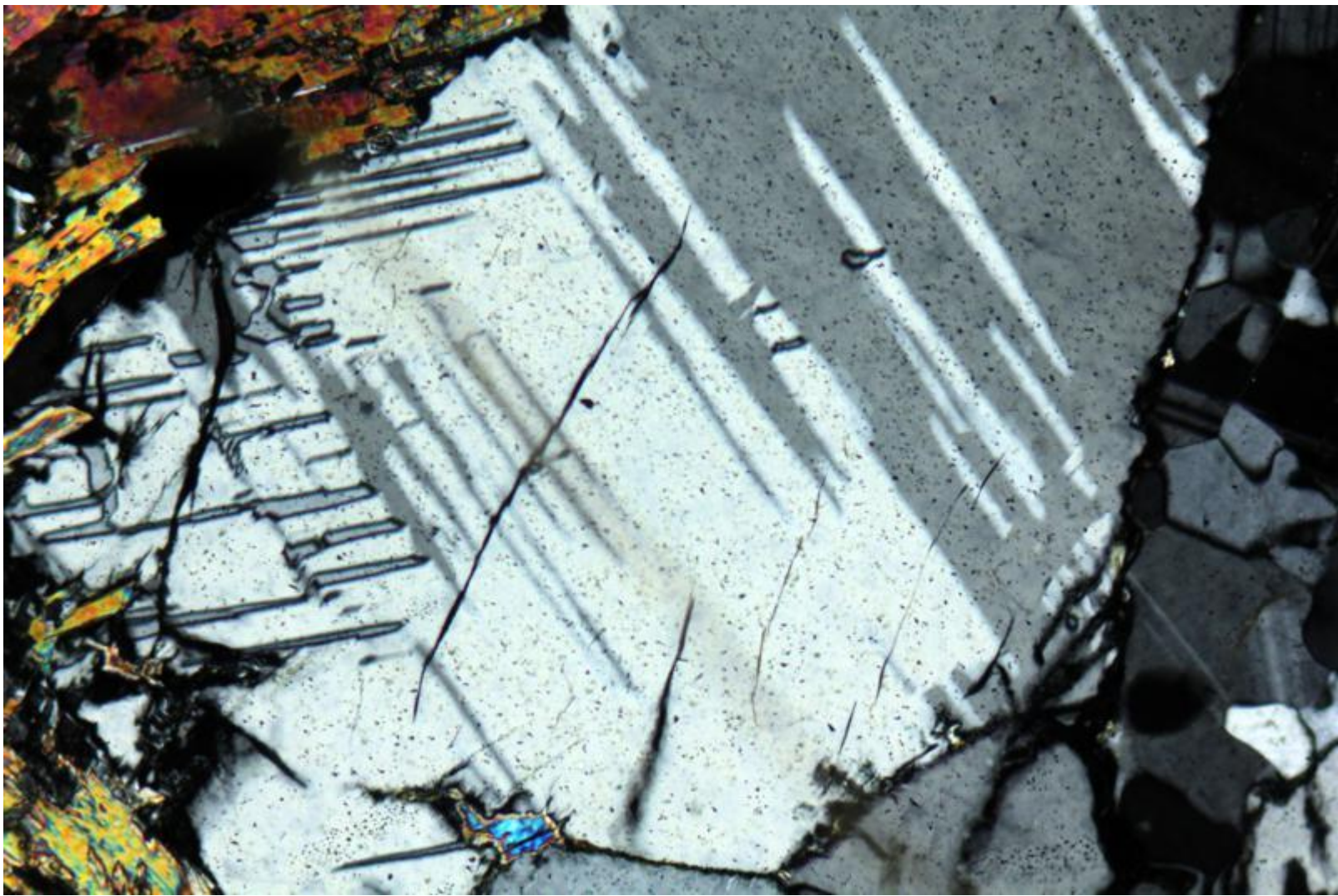


в шлифах зачастую не отличим от плагиоклаза.

Возможный состав пород:  
Кварц+Полевой шпат +  
Кордиерит + Гранат + Биотит +  
Силлиманит

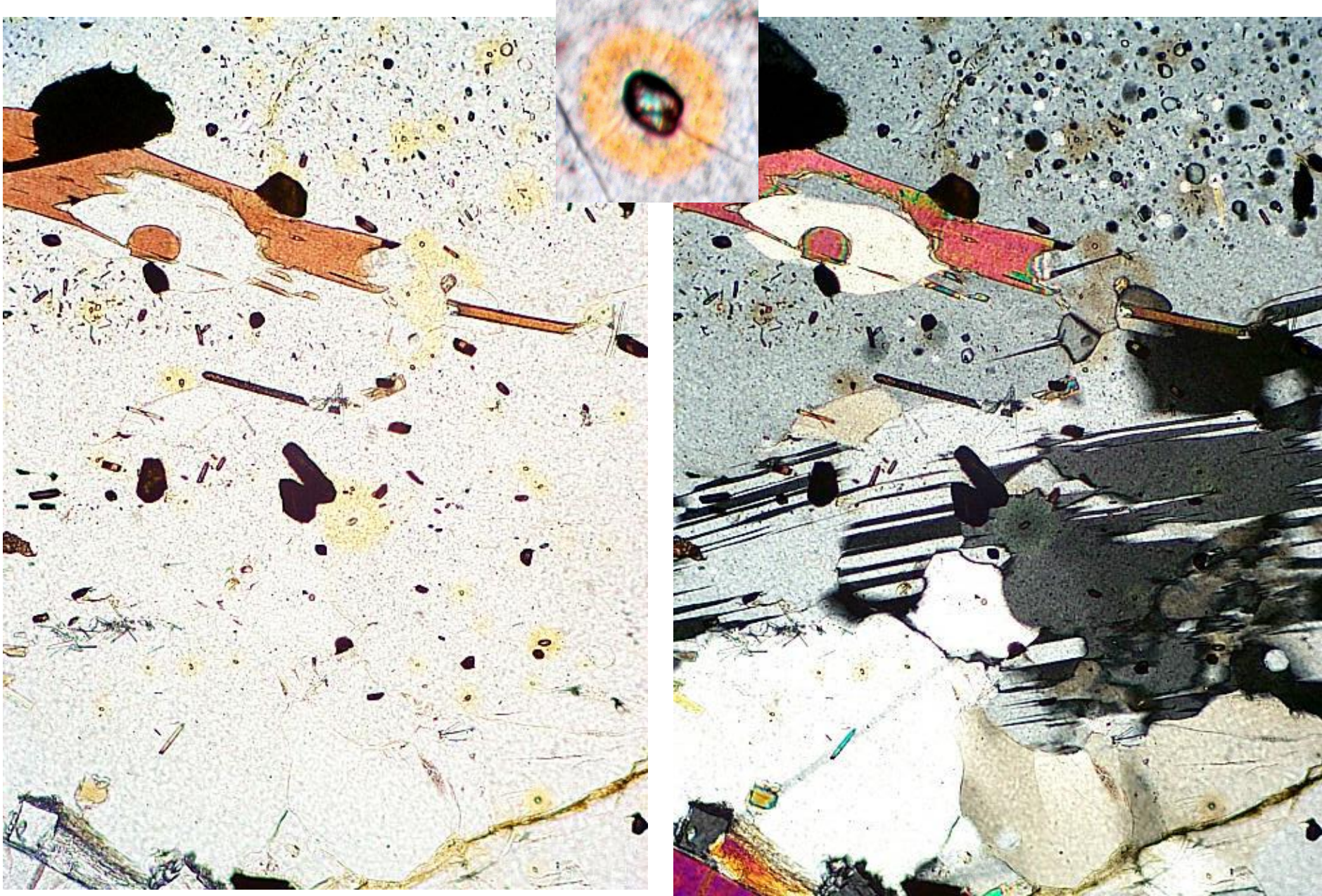






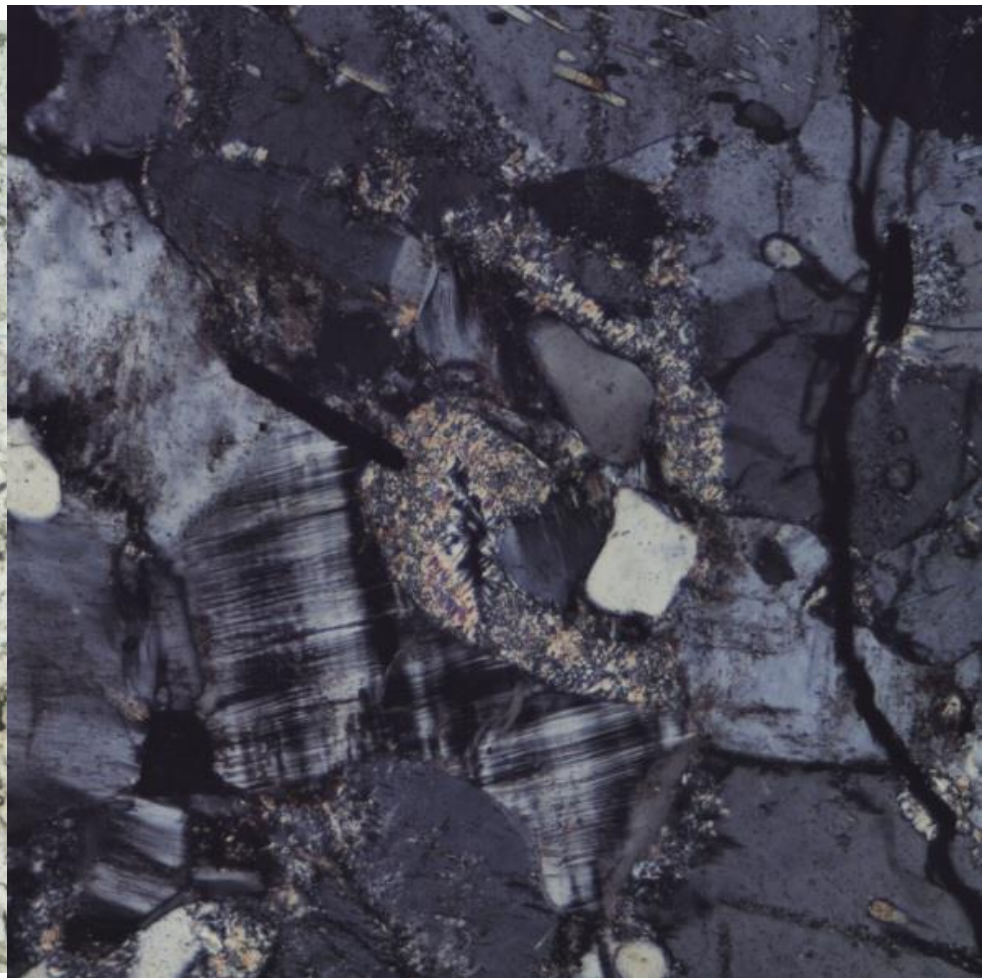
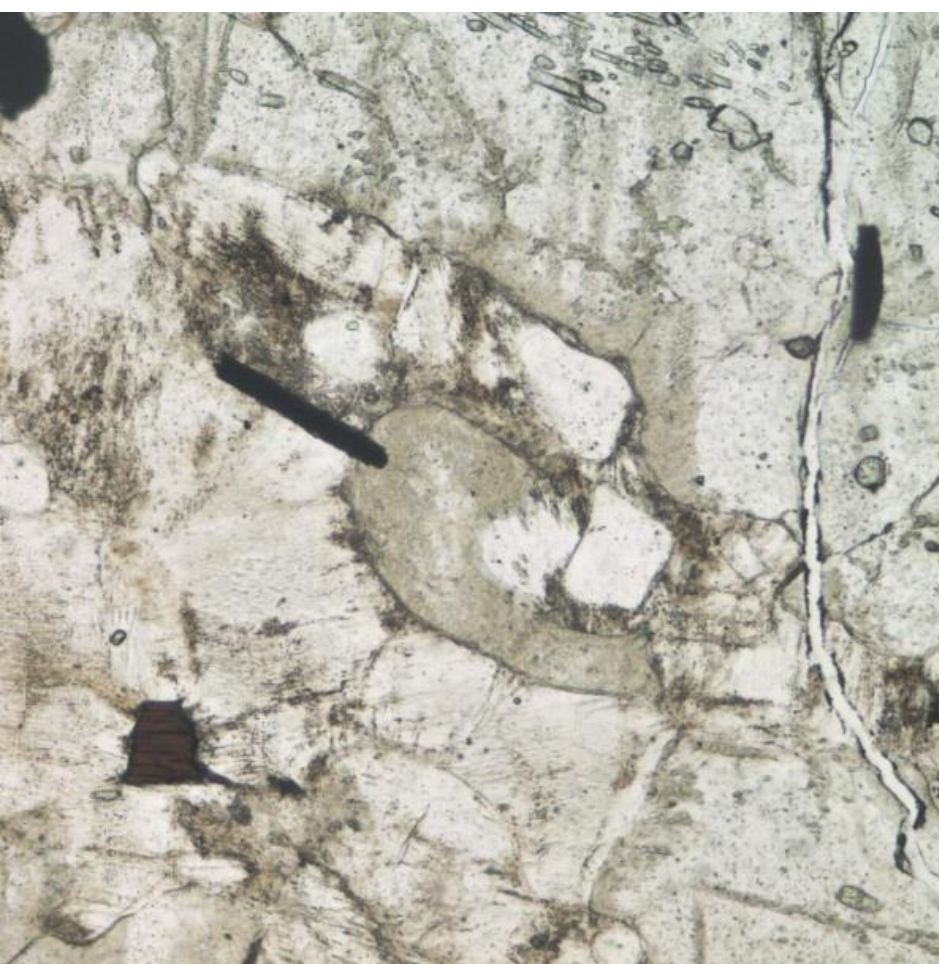
Особый характер двойников Crd с пересекающимися под  $60^\circ$  и нередко скругленными, выклинивающимися двойниковыми полосками, не всегда проявлен, и не позволяет уверенно различать Crd и Pl, хотя у последнего двойниковые полоски более четкие, ограничены прямыми линиями, и обычно протягиваются через всё зерно.





Плеохроичные дворики желтого цвета вокруг радиоактивных минералов - отличительная особенность кордиерита

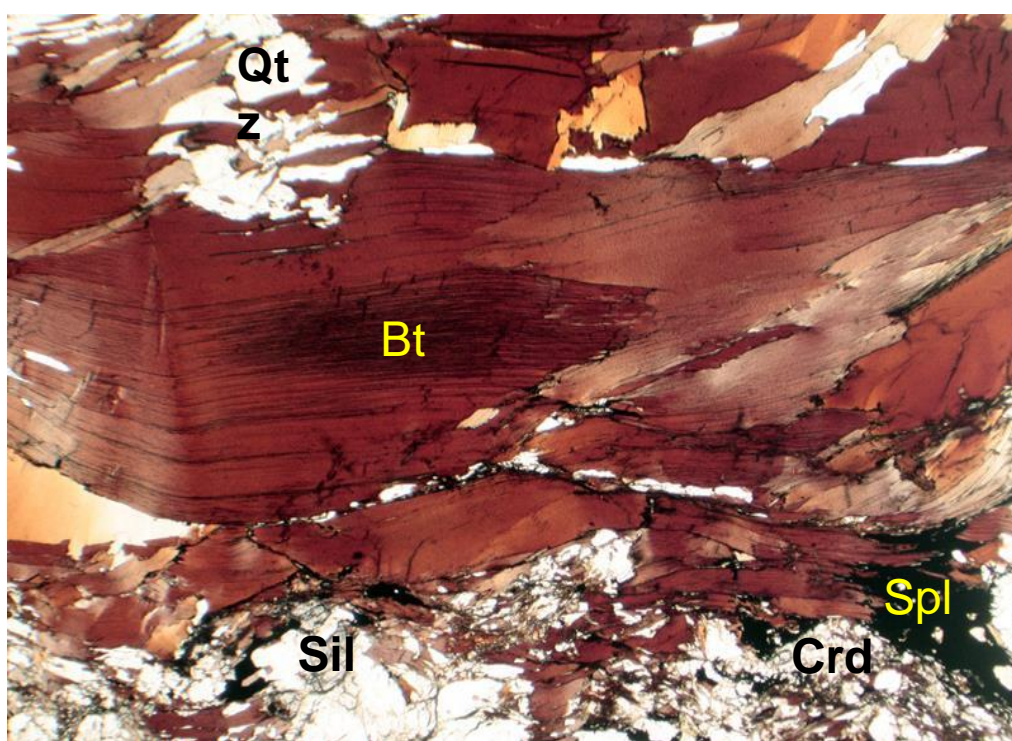




Один из признаков Crd - «пинитизация» - образование грязно-зеленоватых или желтовато-коричневых вторичных агрегатов, сложенных неразличимыми выделениями Chl и Prl (пирофиллита).



# Биотит в метапелитах высшей ступени



**Ti-биотит** в **силлиманит-кордиерит-кварц-биотитовом** сланце. **Итальянские Альпы**. Длина 7 мм. (Фото A. Da Mommio)

Слюды ряда биотита – минералы переменного состава, и в проградных реакциях, в отличие от мусковита, не исчезают сразу.

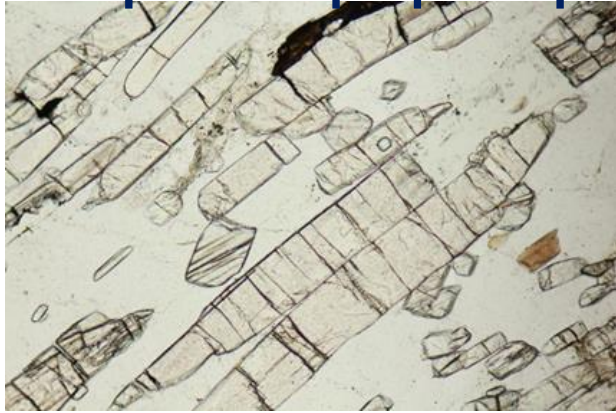
В первой реакции расходования Bt, наиболее низкотемпературной (при  $P > 5$  kBar) –  $2Bt + 6Qtz = 2Kfs + 3Orx + 4H_2O$ , по мере роста  $T$  Bt расходуется постепенно: её продукты – остаток Bt с большей магнезиальностью ( $Mg\#$ ), чем исходный Bt, и Orx с меньшей  $Mg\#$ , чем остаток Bt.

Во второй, (при  $P \simeq 7$  kBar до  $T \simeq 870^\circ$ , в богатых Mg метапелитах) протекает реакция  $Bt + Sil \rightarrow Kfs + Grt + Crd$ , в равновесии с кордиеритом ещё «долго» сохраняются богатые Mg и Cl маловодные титанистые биотиты (**скорее уже – флогопиты, Phl**), с *красновато-бежевым до рыжего или оранжевого плеохроизмом по Ng*.

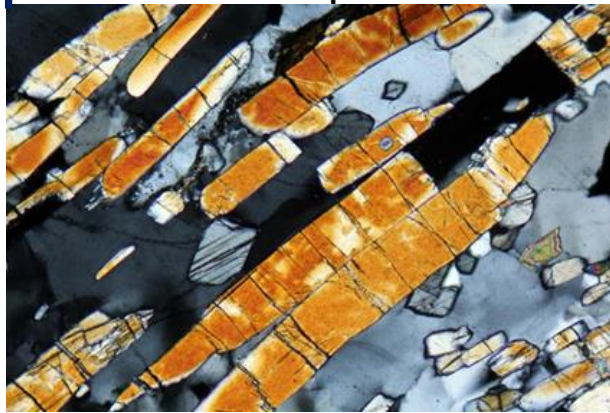


# Силлиманит– ведущий силикат Al в высшей степени

Галерея микрофотографий Sil от <https://www.alexstrekeisen.it/english/index.php>



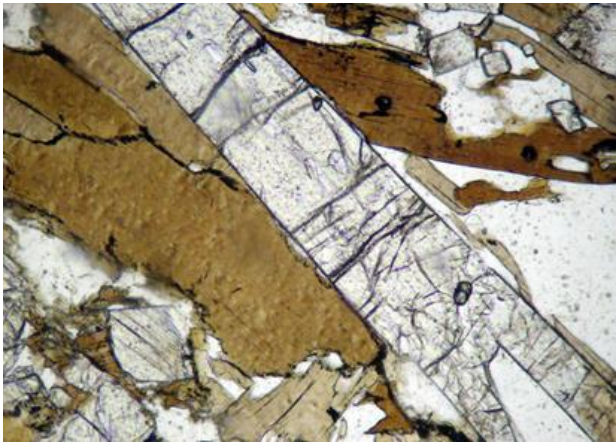
1. Без анализатора



1. С анализатором

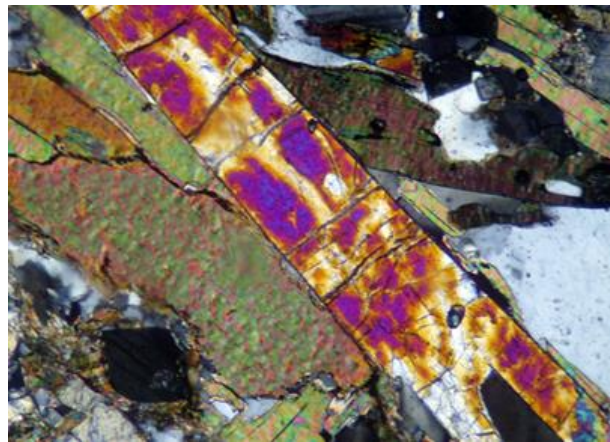


2. Без анализатора



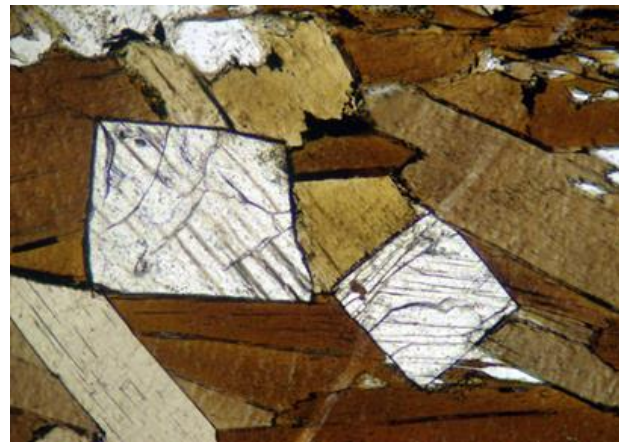
3. Без анализатора

*Длинная сторона всех фото 2 мм*



3. С анализатором

Автор всех фото на этом слайде *Alessandro Da Mommio*

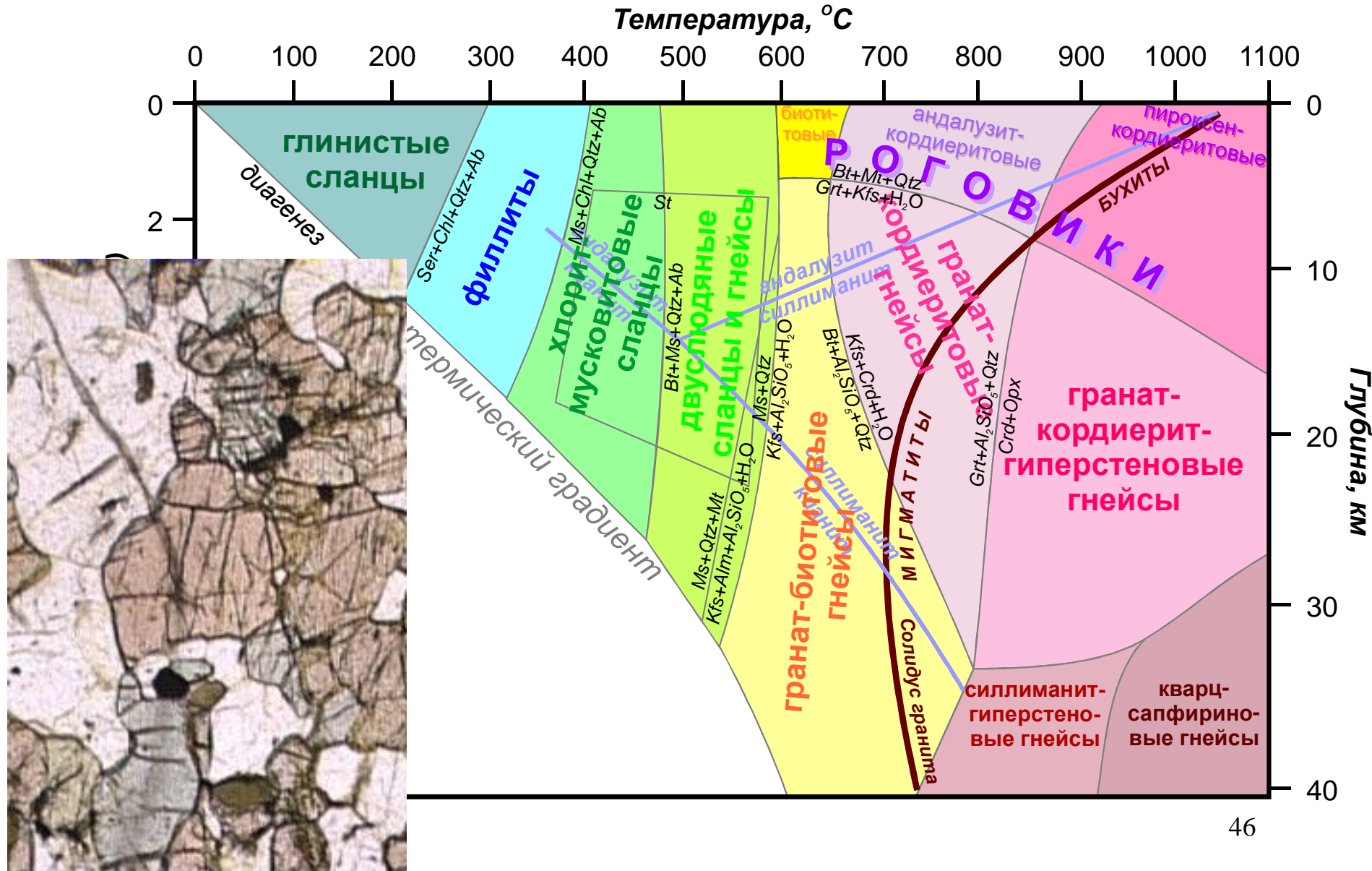


4. Без анализатора

**Sil** - индекс-минерал гранулитовой фации. Форма - призмы от длинностолбчатого до игольчатого и волокнистого облика. Рельеф средний, переходный к высокому, интерференционные окраски - до голубой II порядка, погасание прямое. Ромбовидные поперечные разрезы Sil со следами сов. спайности по диагонали – верный его признак.



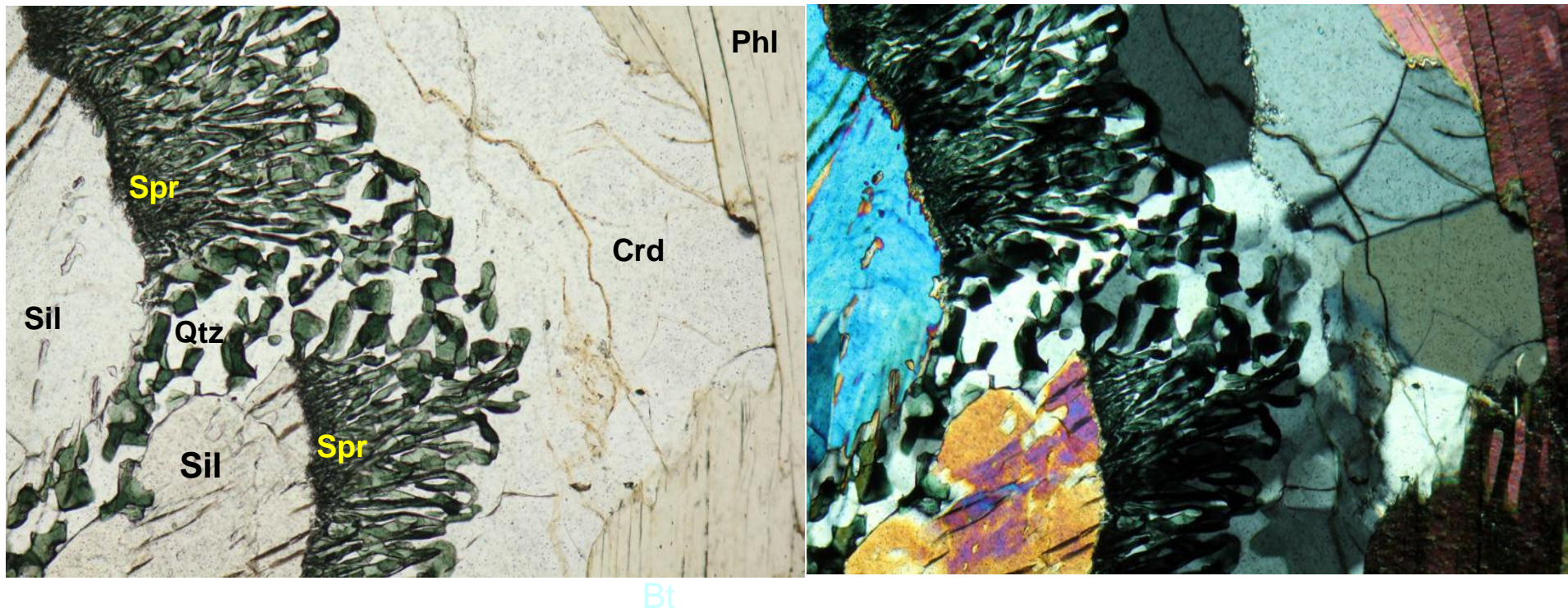
**Гранат-кордиерит-гиперстеновые гнейсы** (соответствуют верхней части гранулитовой фации) из силикатов глинозема присутствует только **силлиманит**





**Текстуры** регионально метаморфизованных пород высшей ступени метаморфизма обычно *массивные* или гнейсовидные, редко - сланцеватые.

Для пород гранулитовой фации метаморфизма характерны **коронарные реакционные структуры**, в которых записывается история метаморфических преобразований пород.

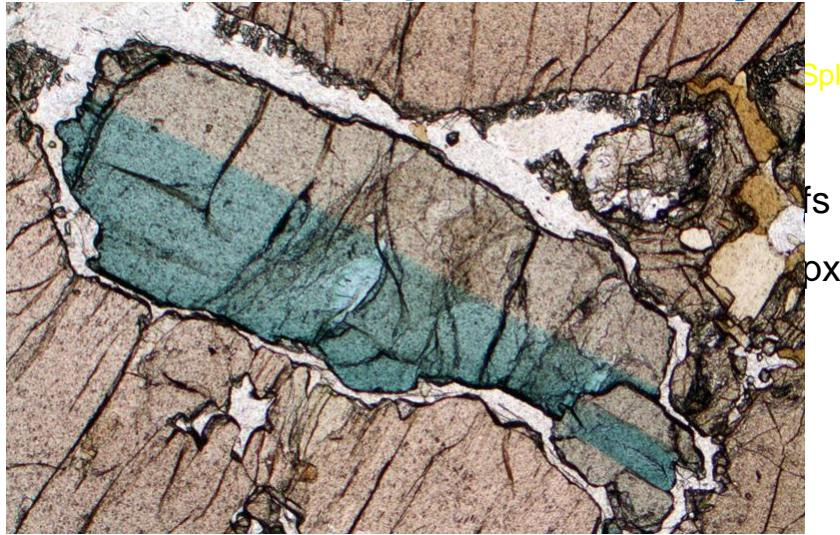


Коронарная реакционная структура: Сапфириновые-кварцевые симплектиты вокруг Силлиманита – продукты реакции  $Crd + Sil = Spr + Qtz$ . Итальянские Альпы. Длина 2 мм. (Фото А. Да Моттио)

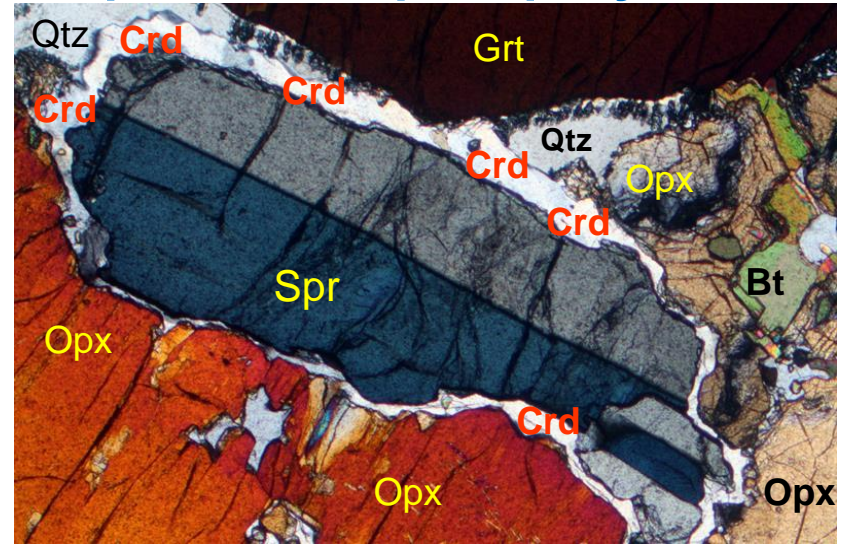


# Фация кварц-сапфириновых гнейсов (очень высоких Т и Р)

## Сапфирин+Qtz – глубинная альтернатива кордиериту

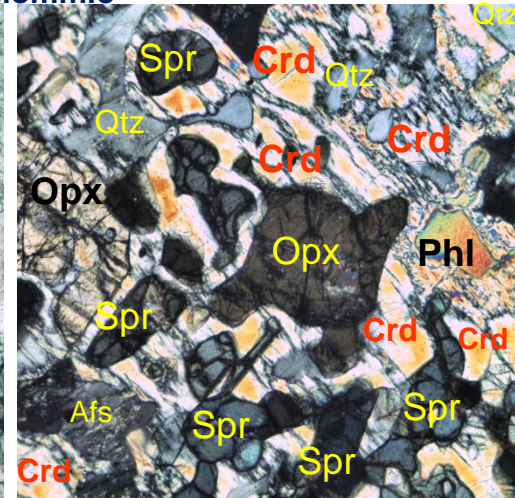
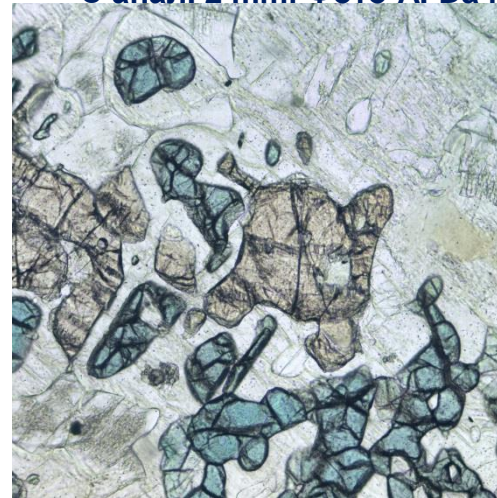


Диафторированный Grt-Opx-Qtz-Spr—гранофельс с реакционной каймой Crd на Spr. Vale-Codera, Италия. Без анал. 2 mm. Фото A. Da Mommio



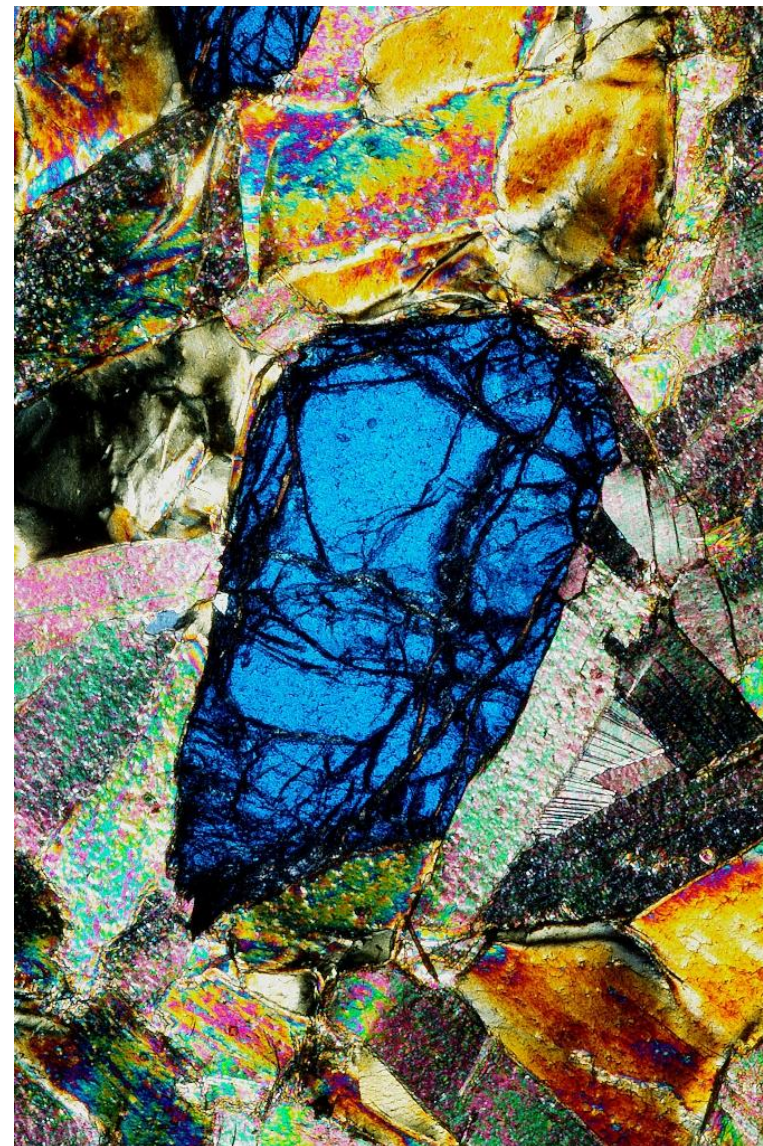
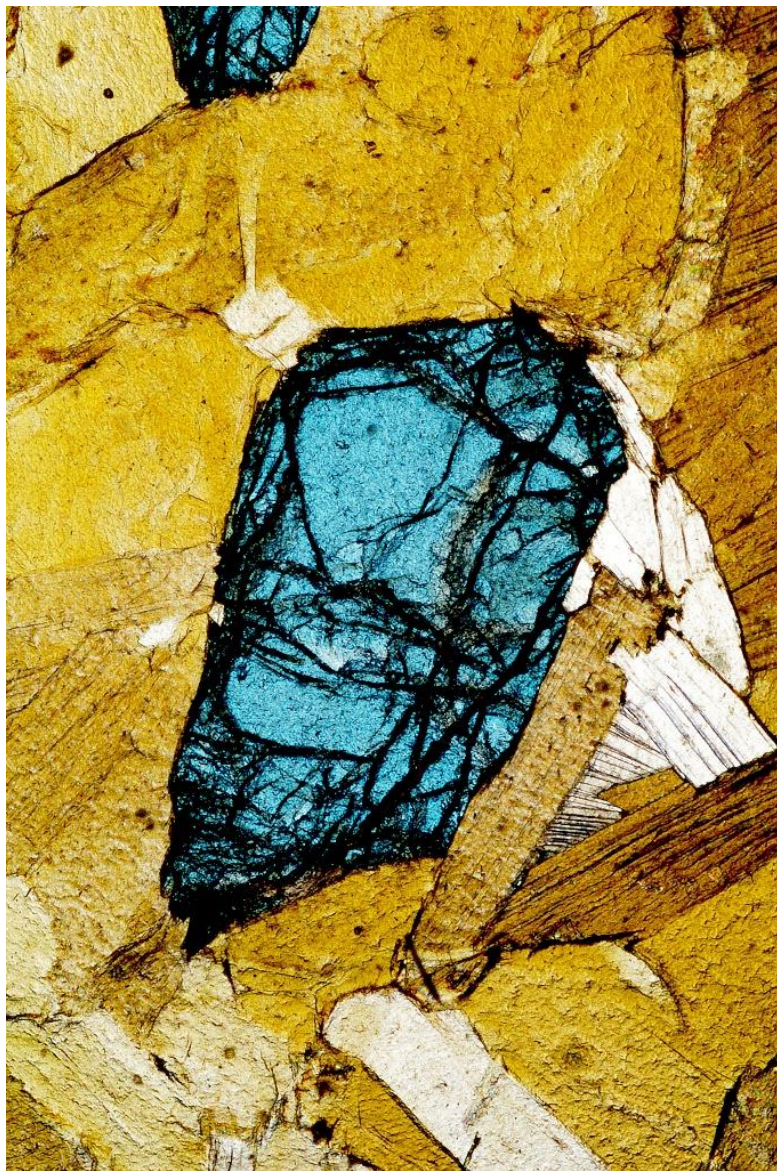
Диафторированный Grt-Opx-Qtz-Spr—гранофельс с реакционной каймой Crd на Spr. Vale-Codera, Италия. С анал. 2 mm. Фото A. Da Mommio

Метапелитам этой субфации свойственно развитие регрессивных парагенезисов по минералам, отвечающим кульминации метаморфизма. Причина этому – незаторможенная кинетика реакций при высоких Т и длительность выведения таких пород из глубины на поверхность.



Шл. 384. Сильно диафторированный Opx-Spr-Qtz-гранофельс с реакционными каймами Crd, «поедающего» Spr и Qtz. Алдан. 1,1 mm. Без анализ. С анализ. 48





Минерал сине-голубого цвета, не очень изменяющийся при включении анализатора ввиду низкой интерференционной окраски, которую «забивает» его собственный голубой цвет – сапфирин, коричневый – биотит, бесцветный – мусковит

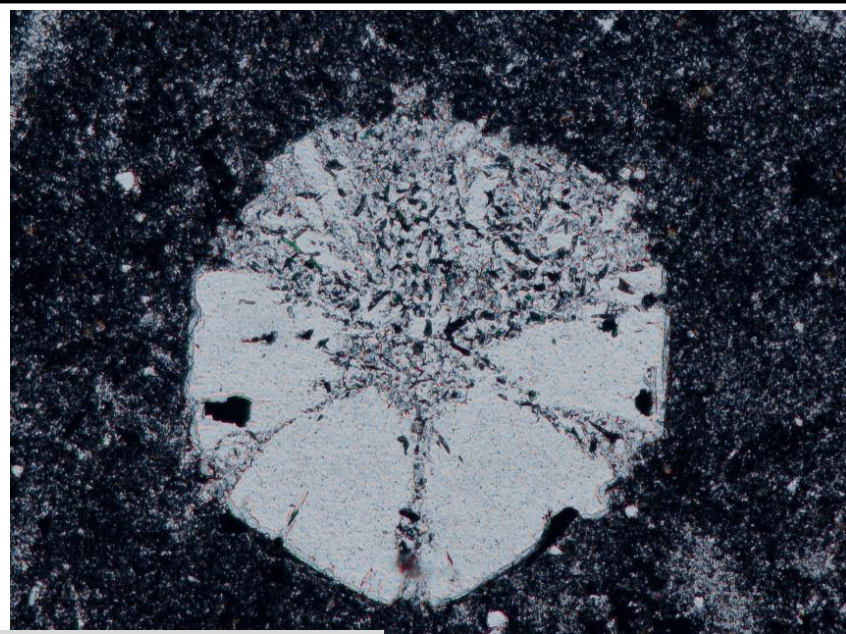
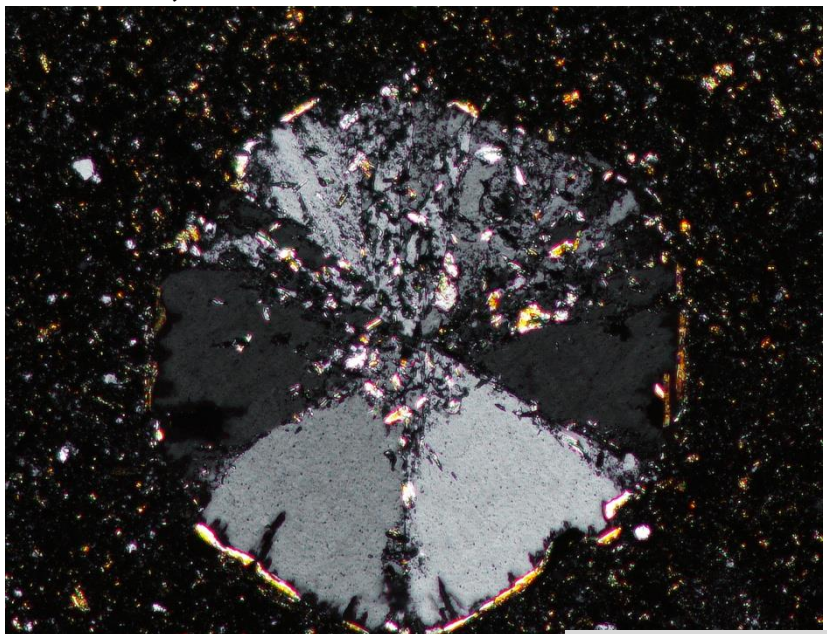
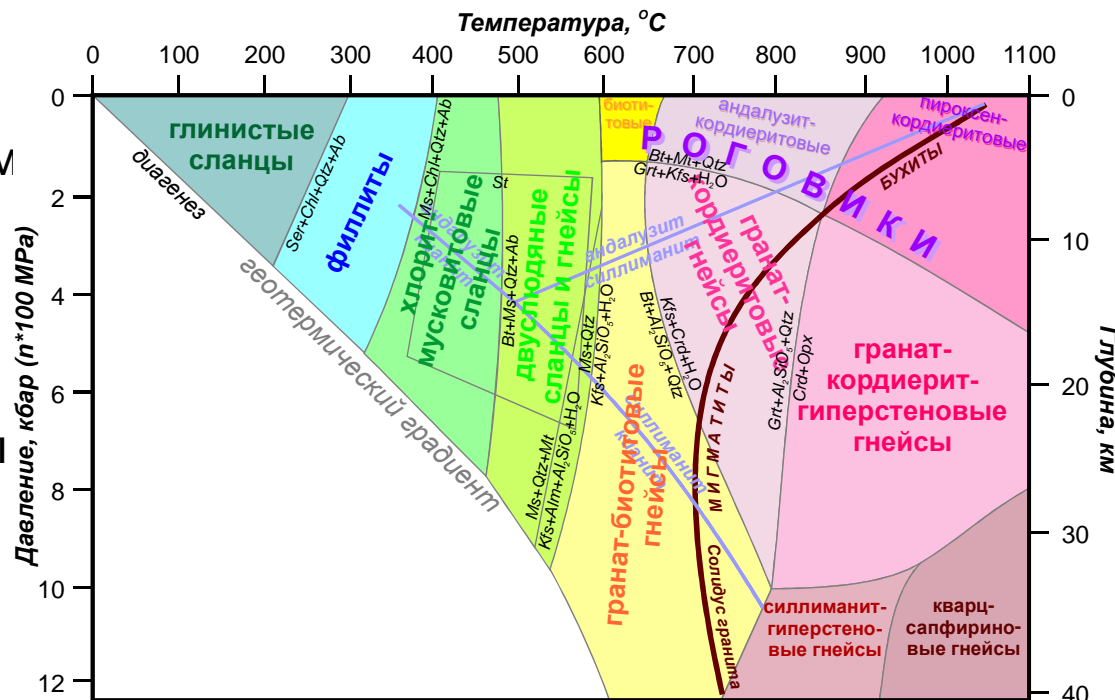


# Роговики. Бухиты

Породы, образующиеся при низком литостатическом давлении и высокой температуре при обязательном присутствии флюидной фазы:

По мере возрастания температуры выделяют:

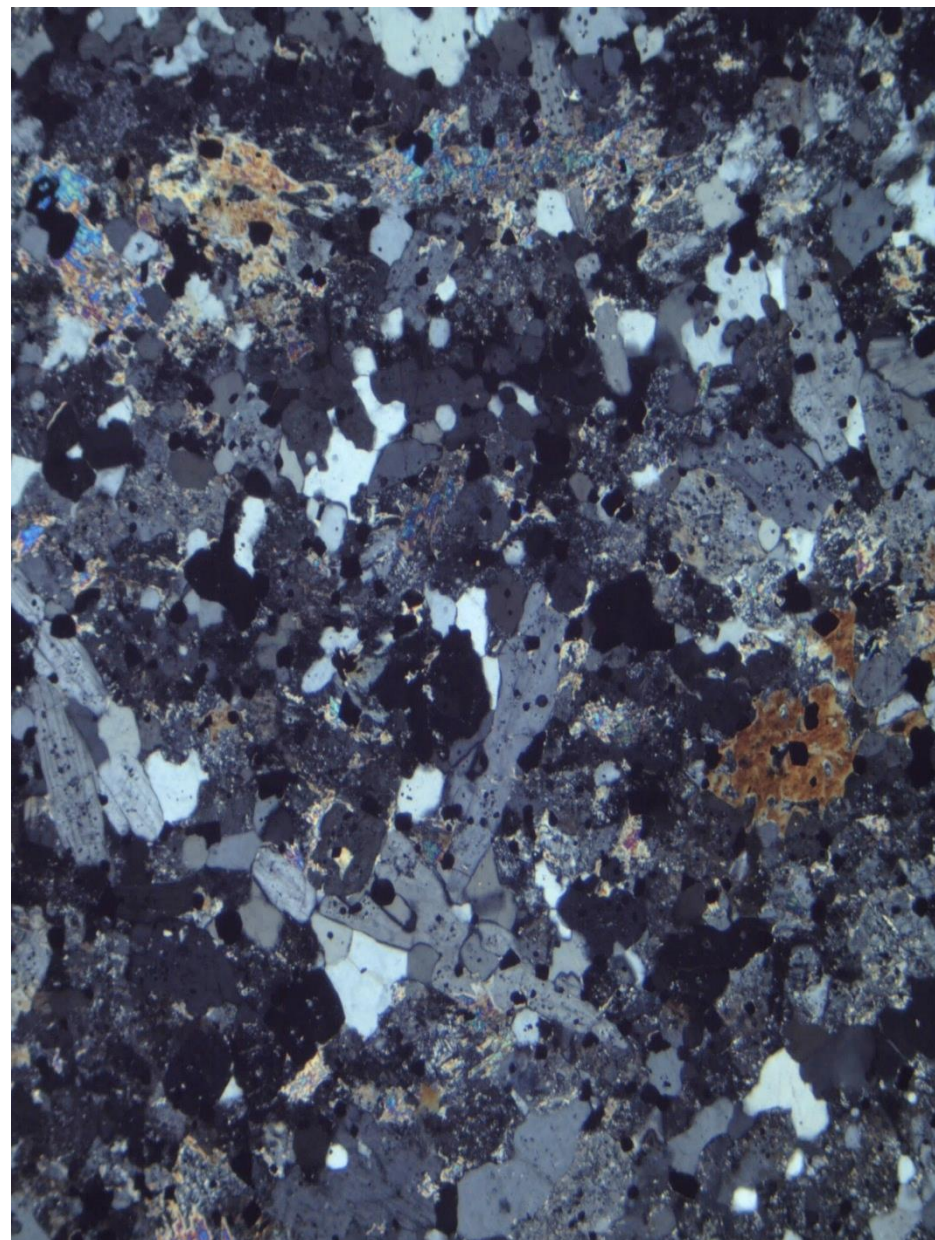
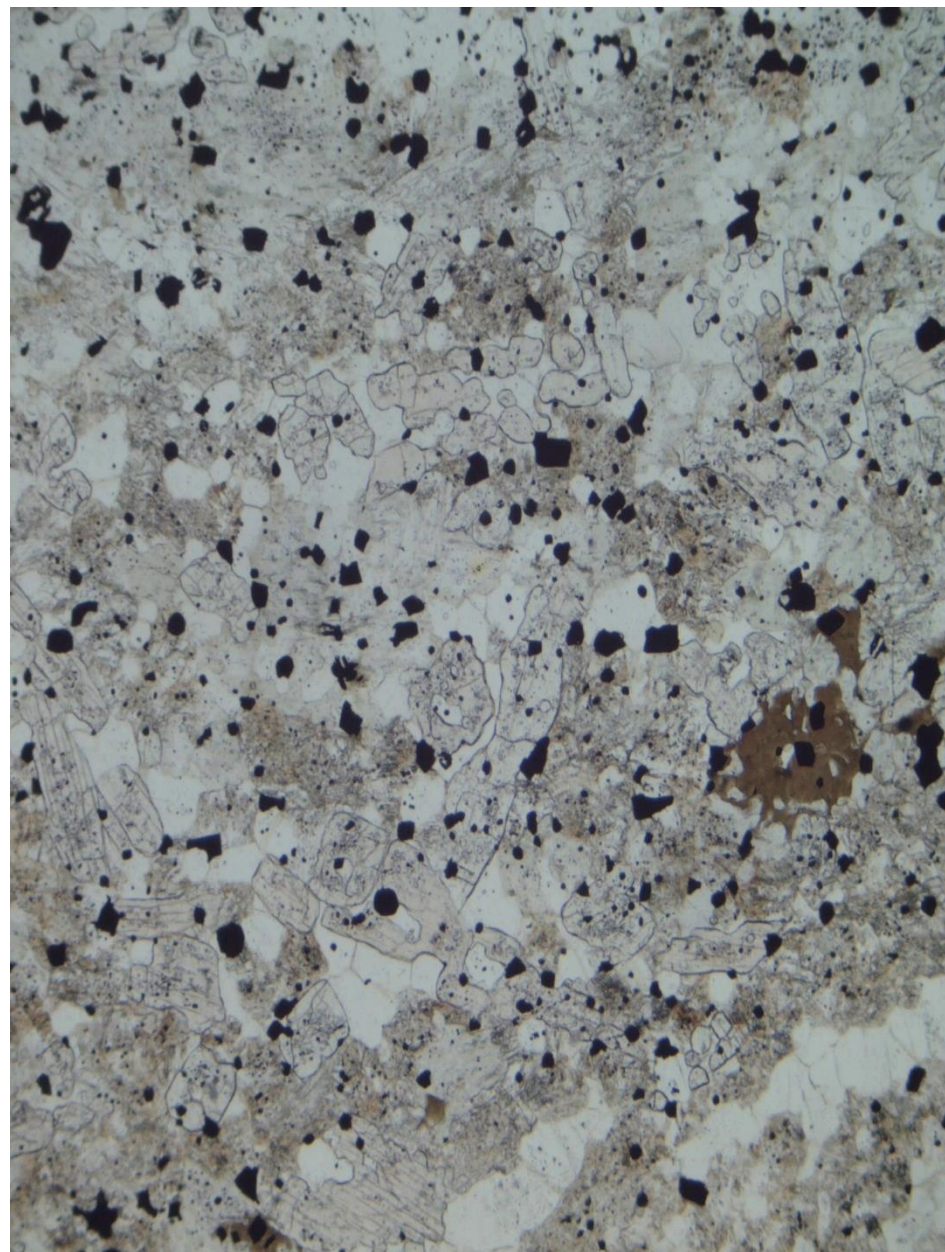
- Бiotитовые роговики;
- Андалузит-Кордиеритовые роговики;



Порфиробласты кордиерита



# Вт-Q- андалузитовый роговик





**Бухиты** – контактовые роговики, возникающие при частичном плавлении вмещающих песчаников, глинистых пород и филлитов.

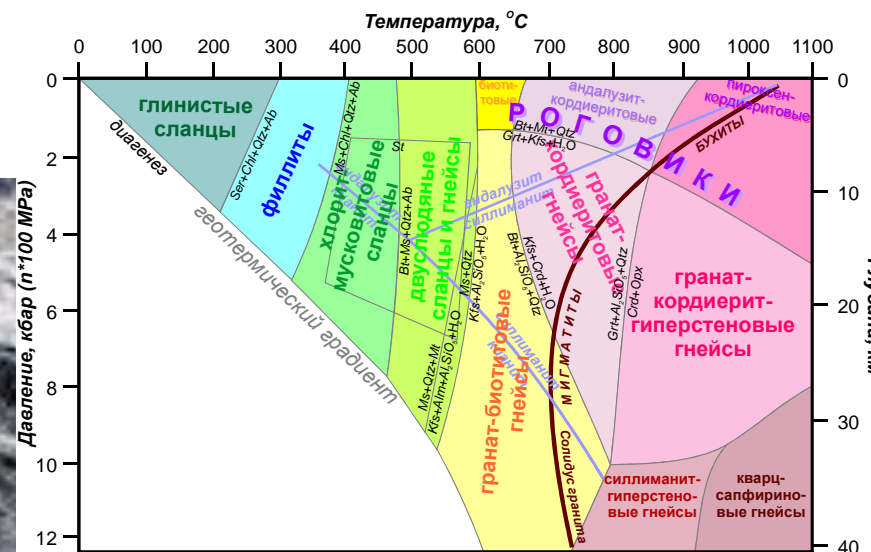
Высокая температура внедряющихся магм вызывает разогрев вмещающих пород с образованием высокотемпературных минералов – санидина, муллита и плавлением вещества.



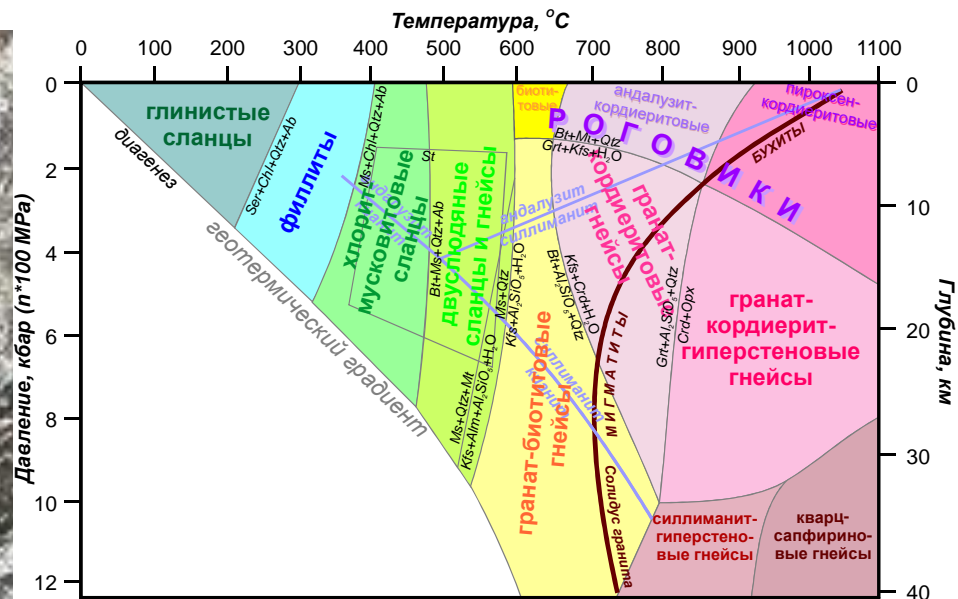
Муллит-  
корундовый  
роговик (бухит)



**Мигматит** [от греч . *migma* - смесь] – состоит из субстрата темного цвета (меланосомы), сложенного метаморфическими образованиями средней и высокой степени метаморфизма (амфиболиты, сланцы) и светлого материала гранитоидного состава (лейкосомы), содержащего кварц и полевые шпаты с малым количеством цветных минералов.







Мигматиты образуют крупные тела в сочетании с гранитами и гнейсами. Он встречаются в пределах древних складчатых поясов и архейских щитов. Мигматитовые комплексы слагают существенную часть Карелии, Кольского п-ова, известны на Урале, Кавказе, Забайкалье, Скандинавии, Канаде, Австралии и др.





## ГИПОТЕЗЫ ОБРАЗОВАНИЯ МИГМАТИТОВ:

1. частичное плавление вещества при метаморфизме (анатексисе). При увеличении температуры метаморфизма, водосодержащие минералы (мусковит, частично биотит и амфибол) разлагаются, выделяют воду и создают условия для появления водонасыщенного гранитного расплава. Для анатексиса характерны глубины 10-20 км.





2. Разделение вещества при метаморфизме и перемещение компонентов (метаморфическая дифференциация).
3. Инъекционная природа мигматитов, за счет послойного внедрения гранитной магмы в метаморфические породы.





4. По представлениям Д.С. Коржинского образование мигматитов происходит в результате магматического замещения (гранитизации) при участии флюидов, которыми вызывается интенсивное замещение пород (развитие биотита, кварца, замещение плагиоклаза калиевым полевым шпатом ), приближающее их состав к составу развивающихся гранитов.



# Спасибо за внимание!



Порфиробласт граната в гранат-слюдяном гнейсе