

# 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



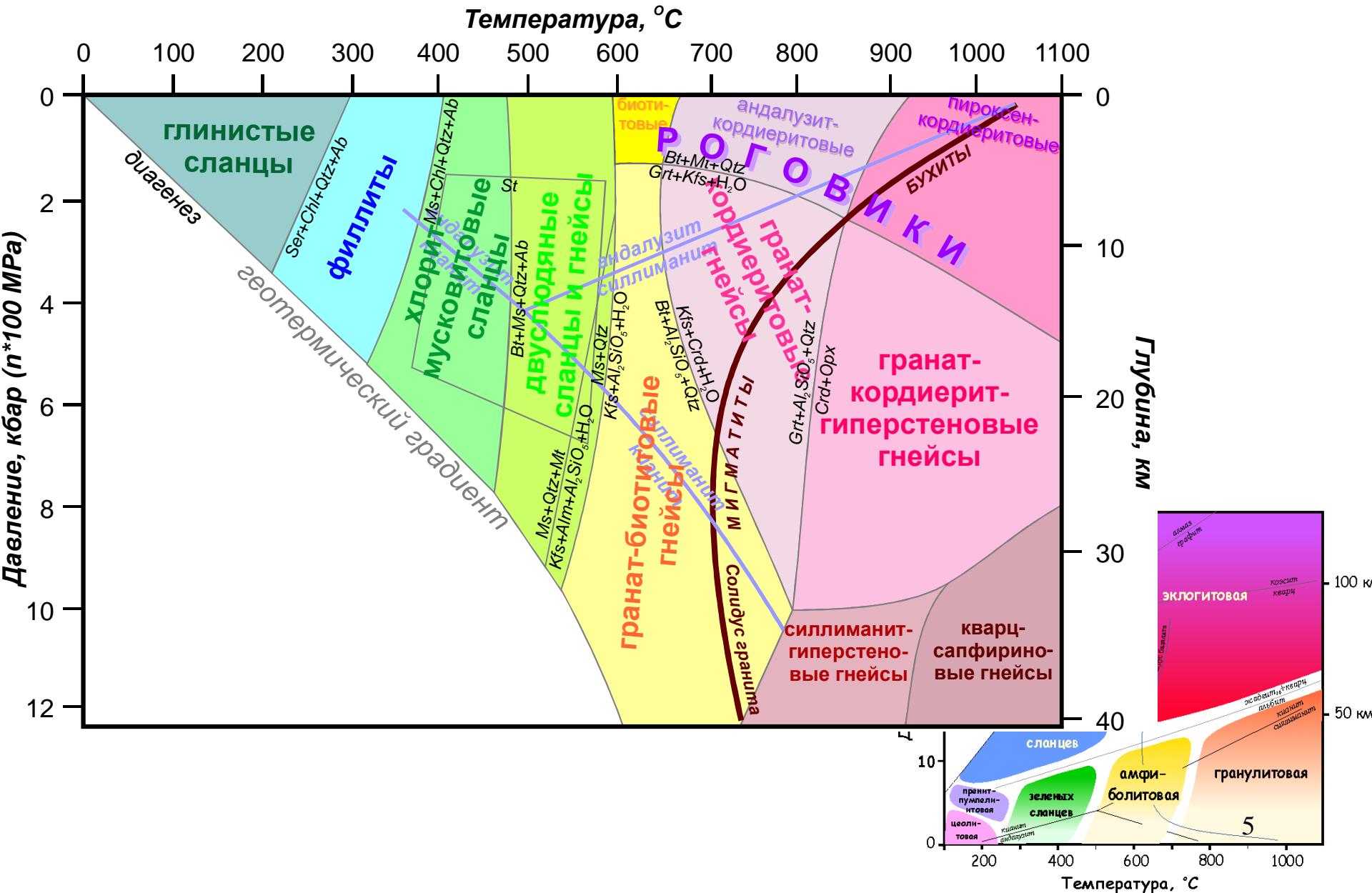
Исходные породы (протолит) метапелитов сложены тонкообломочными минералами:

- 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  $Al_2O_3$  и  $SiO_2$ , преобладание  $K_2O$  над  $Na_2O$  и крайне низкое содержание  $CaO$  (<5%).

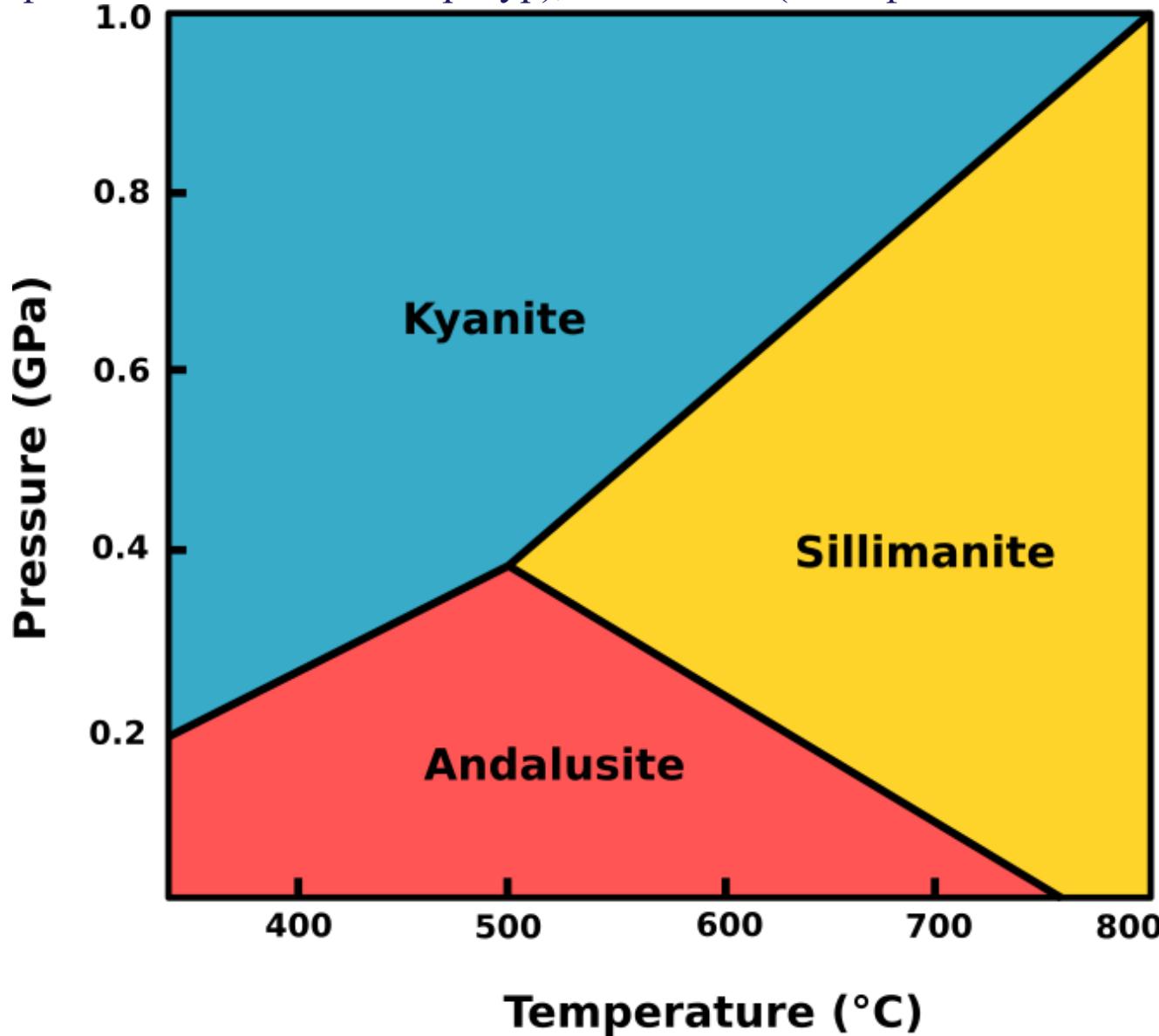
Парагенезисы метапелитов обладают очень высокой чувствительностью к валовому химическому составу породы, соотношению содержания Fe и Mg и составу флюида, что затрудняет выделение для них фаций метаморфизма. Поэтому на данный момент не существует общепринятой схемы метаморфических фаций для метапелитов,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

# Метапелиты. Обзор фаций регионального метаморфизма

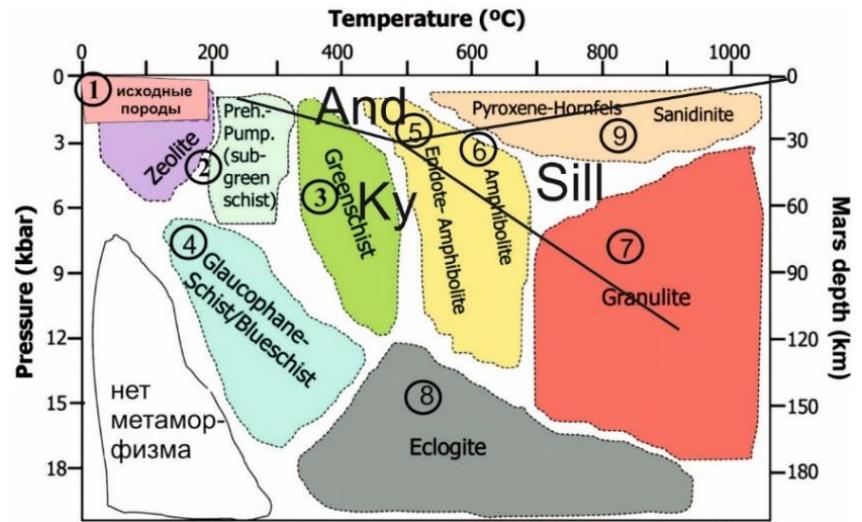
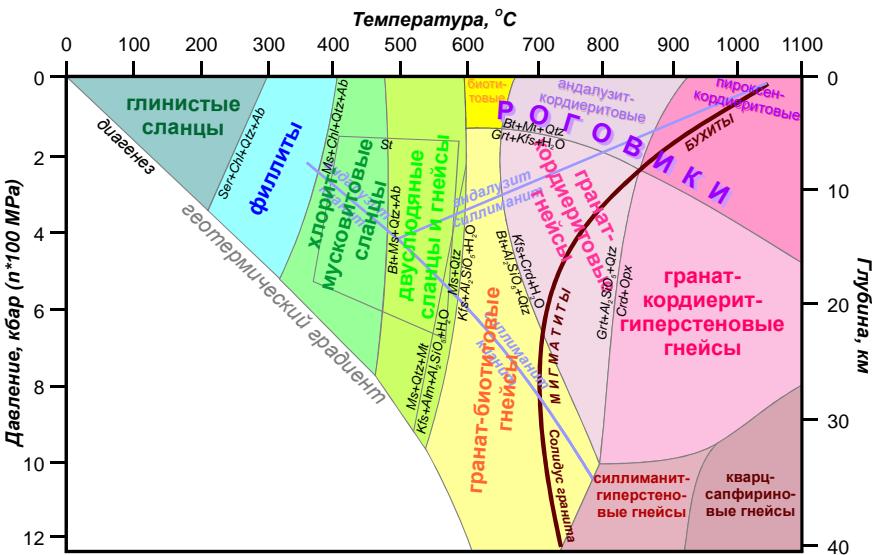
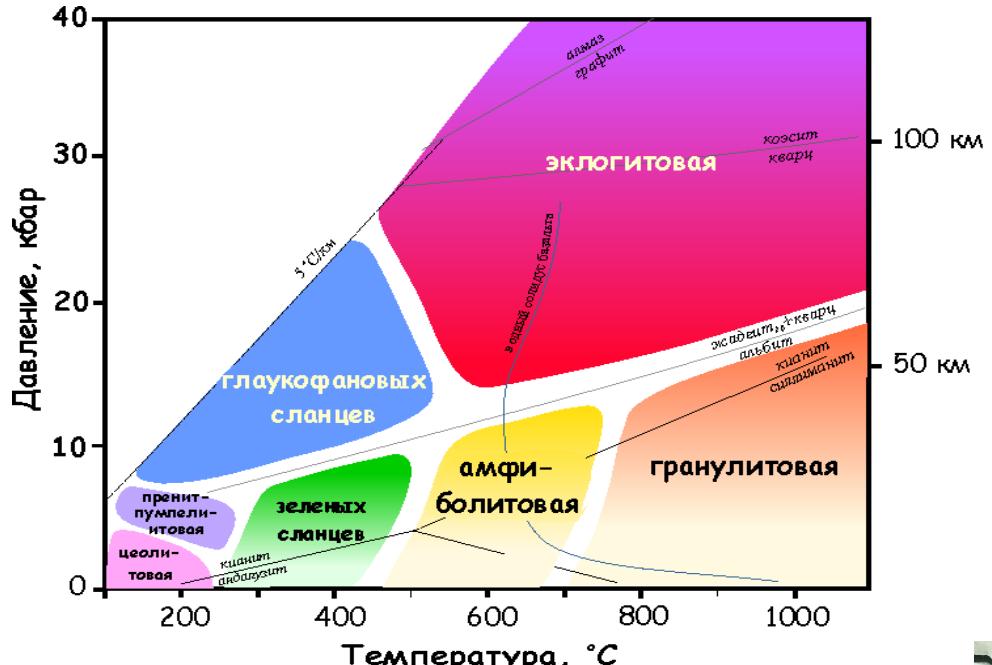


В метапелитах появляется много новых минералов, с которыми мы не встречались ни среди магматических пород, ни в метабазитах, так как исходные породы метапелитов очень богаты глиноземом ( $\text{Al}_2\text{O}_3$  ).

В первую очередь это **полиморфные модификации силикатов глинозема  $Al_2SiO_5$ : 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.

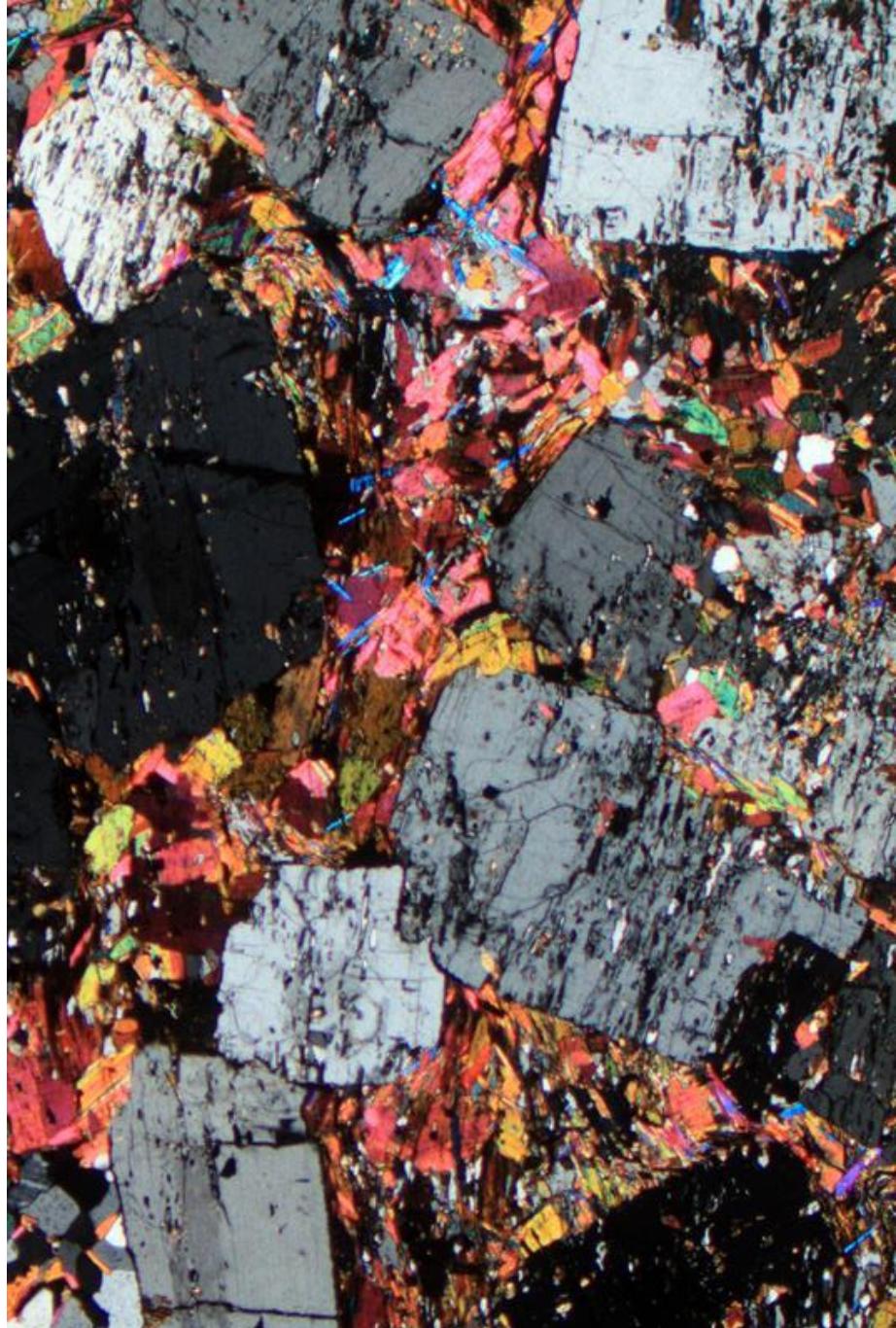
Без анализатора они бесцветны или обладают очень слабой розоватой окраской.

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

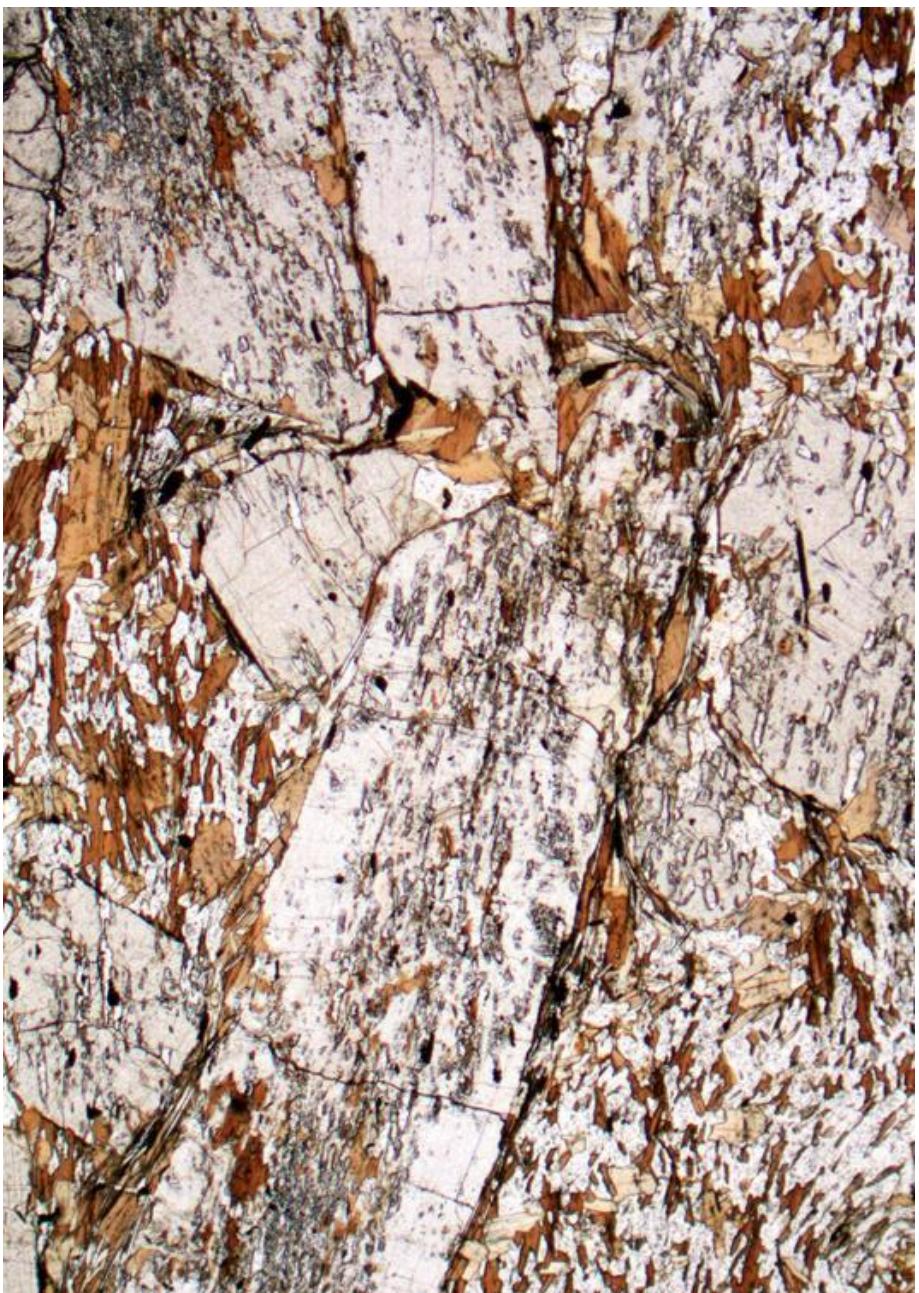
Для андалузита характерны два направления спайности под углом 89 градусов

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

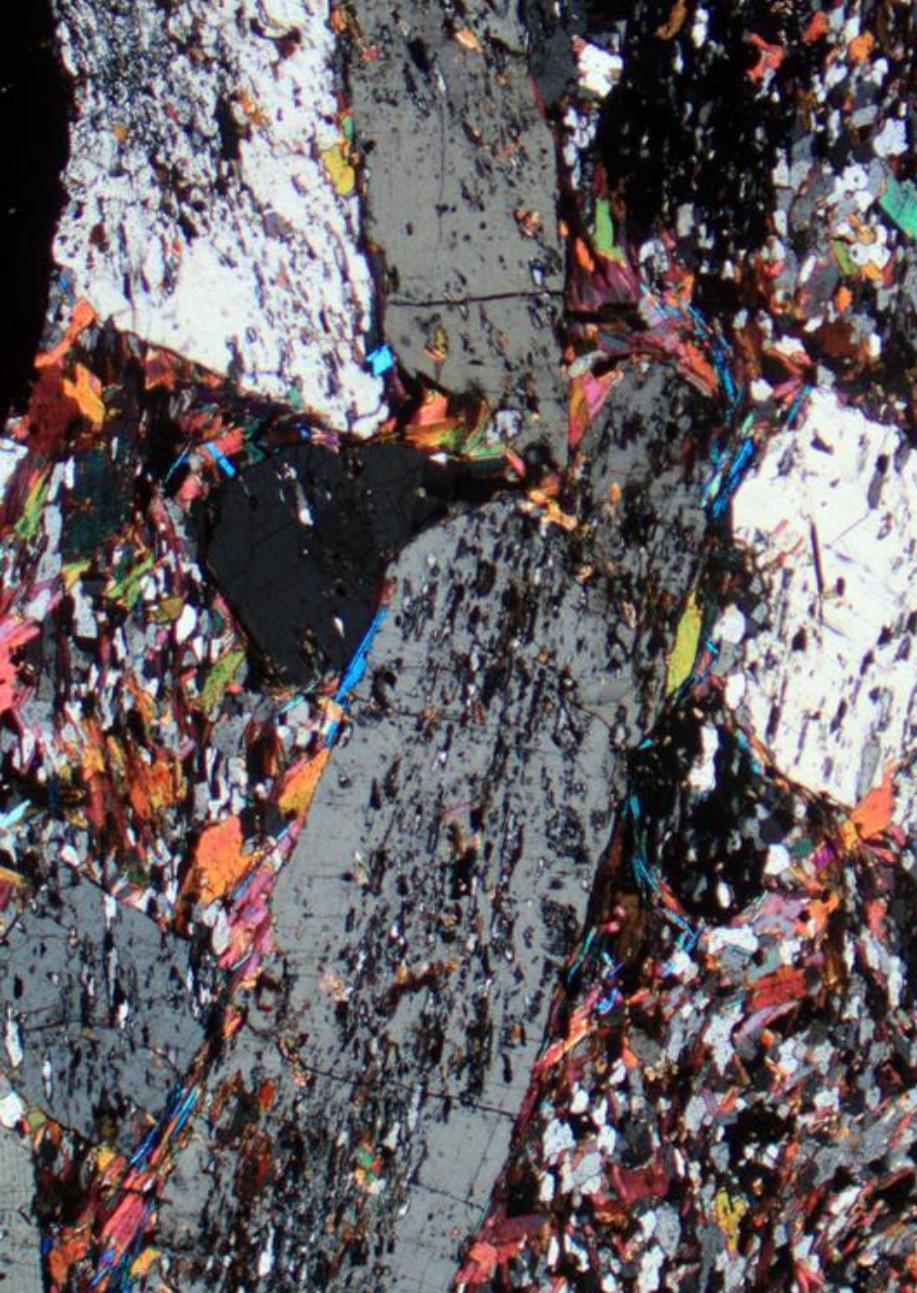
Погасание прямое, удлинение отрицательное.



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 разрезы 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.

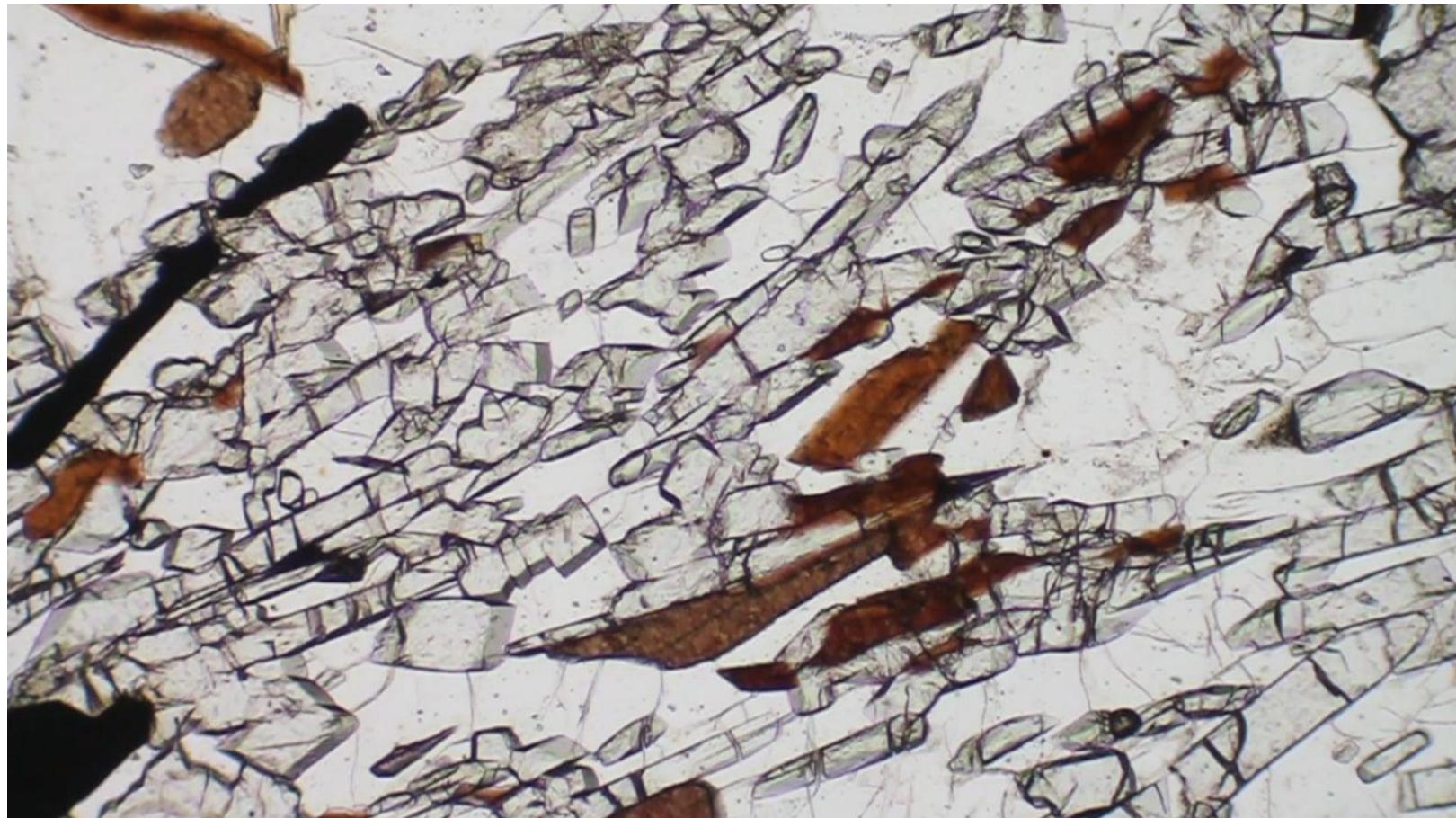


Фото при одном Николе, длина фото 3,5 мм.

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

Погасание силлиманита прямое. Удлинение положительное



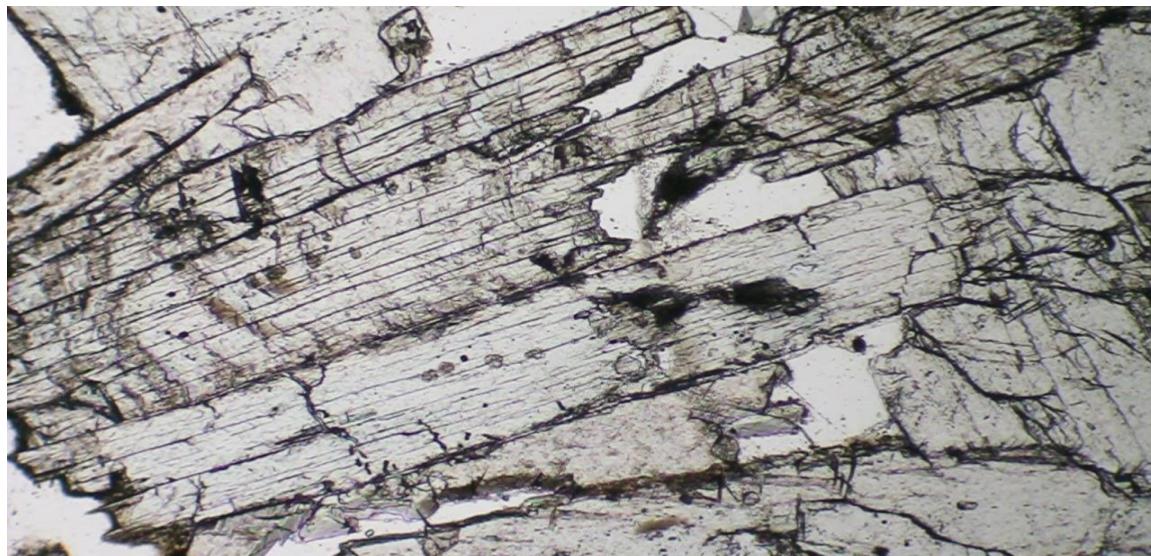
Фото в скрещенных Николях,  
длина фото 3,5 мм.

## 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.

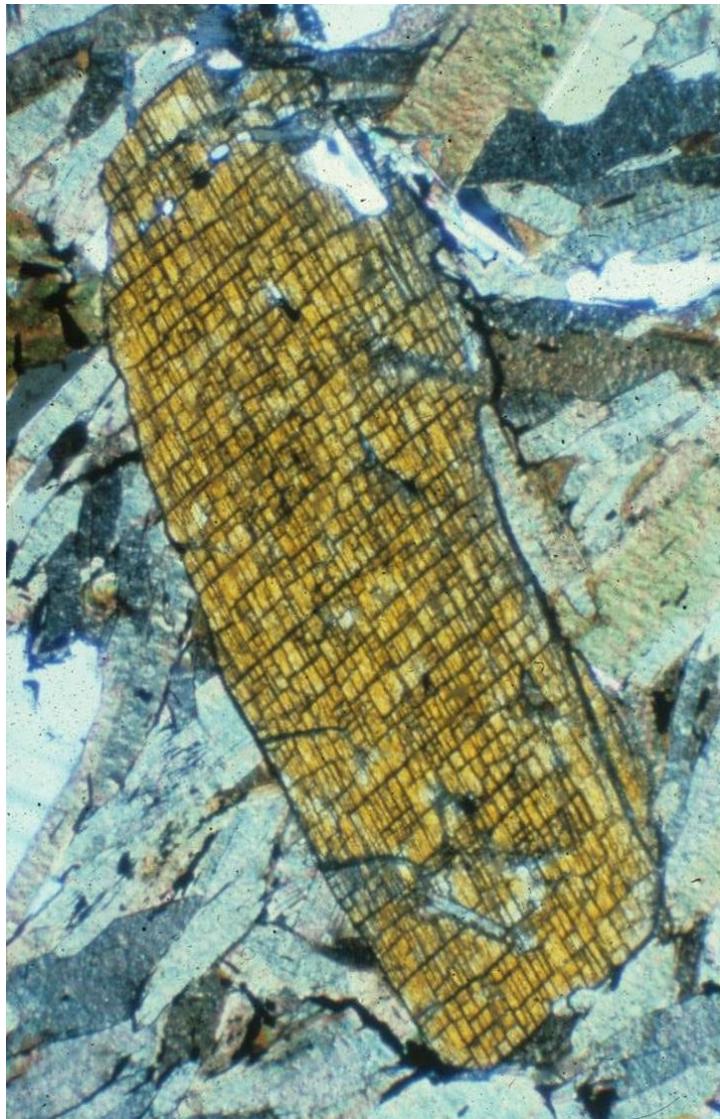
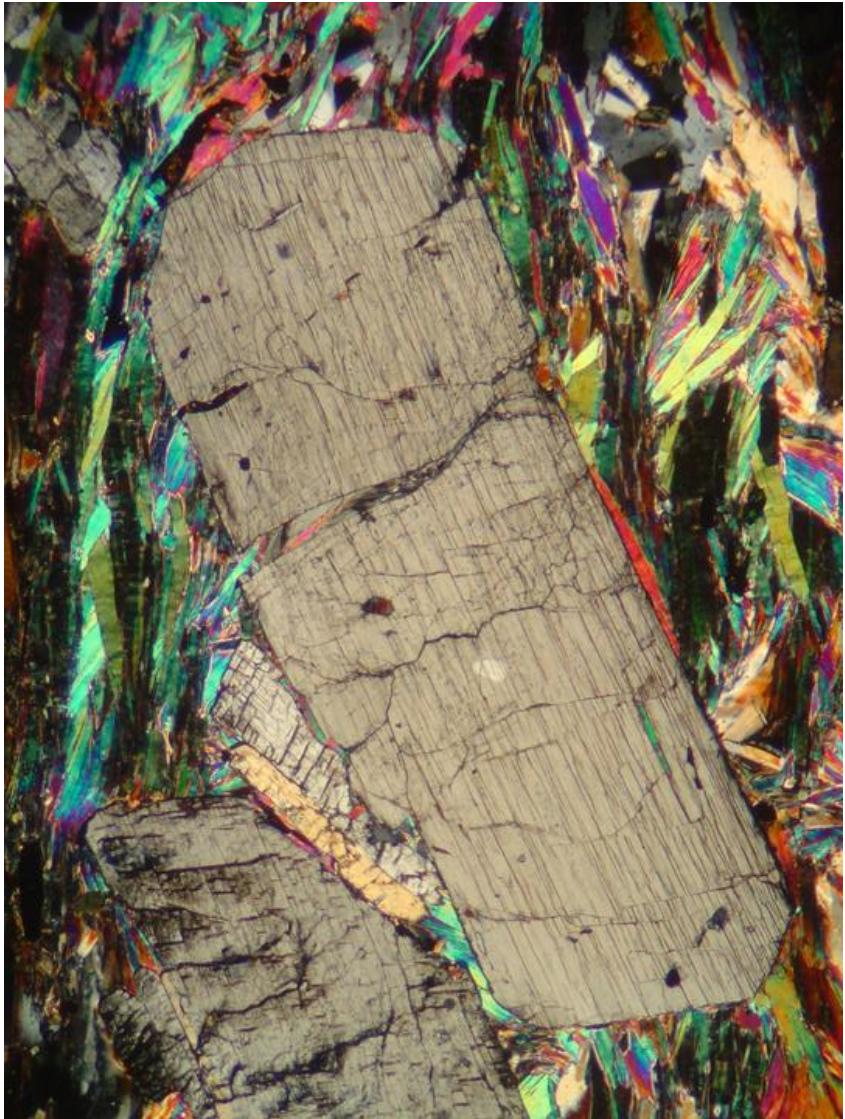
Рельеф высокий. Группа по показателям преломления 1,7-1,8.



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

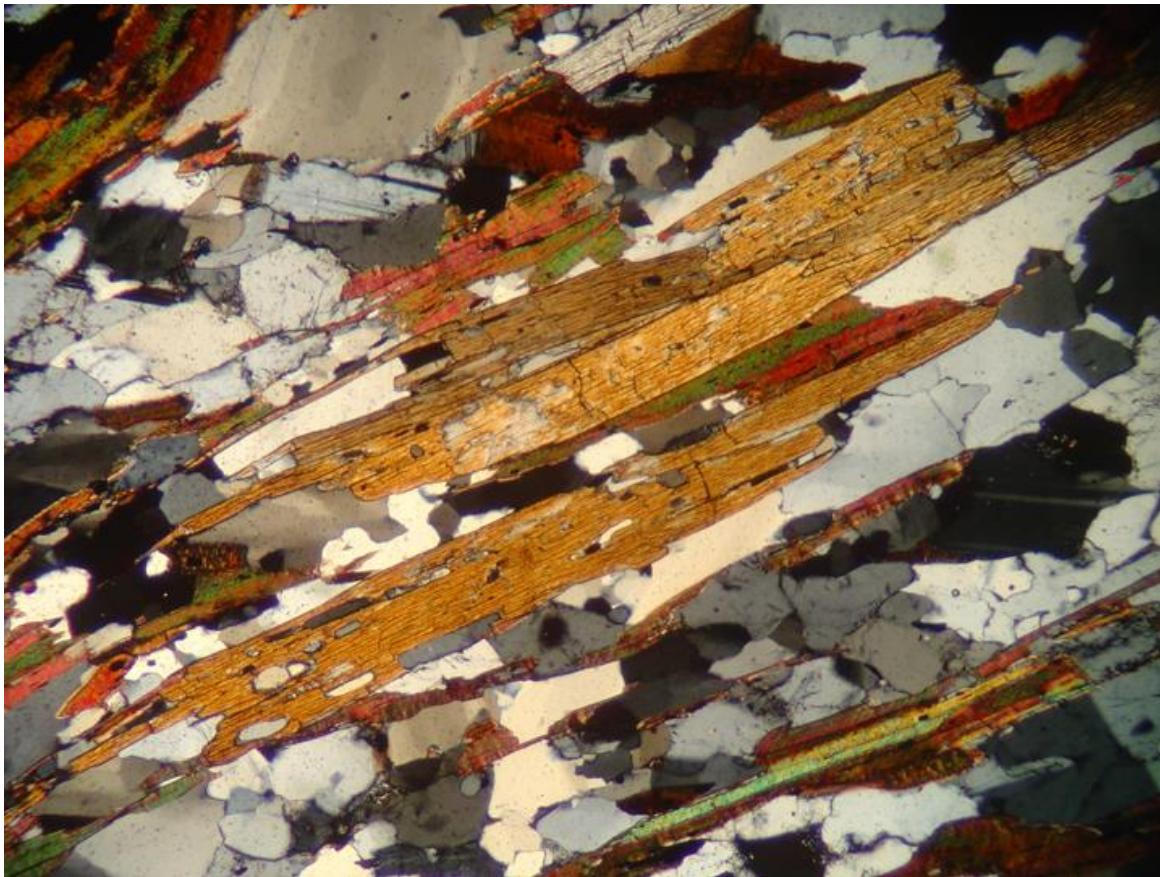


Кианит имеет слабое двулучепреломление ( $ng-np=0,012-0,016$ ) и низкие интерференционные окраски до желтой первого порядка.



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.

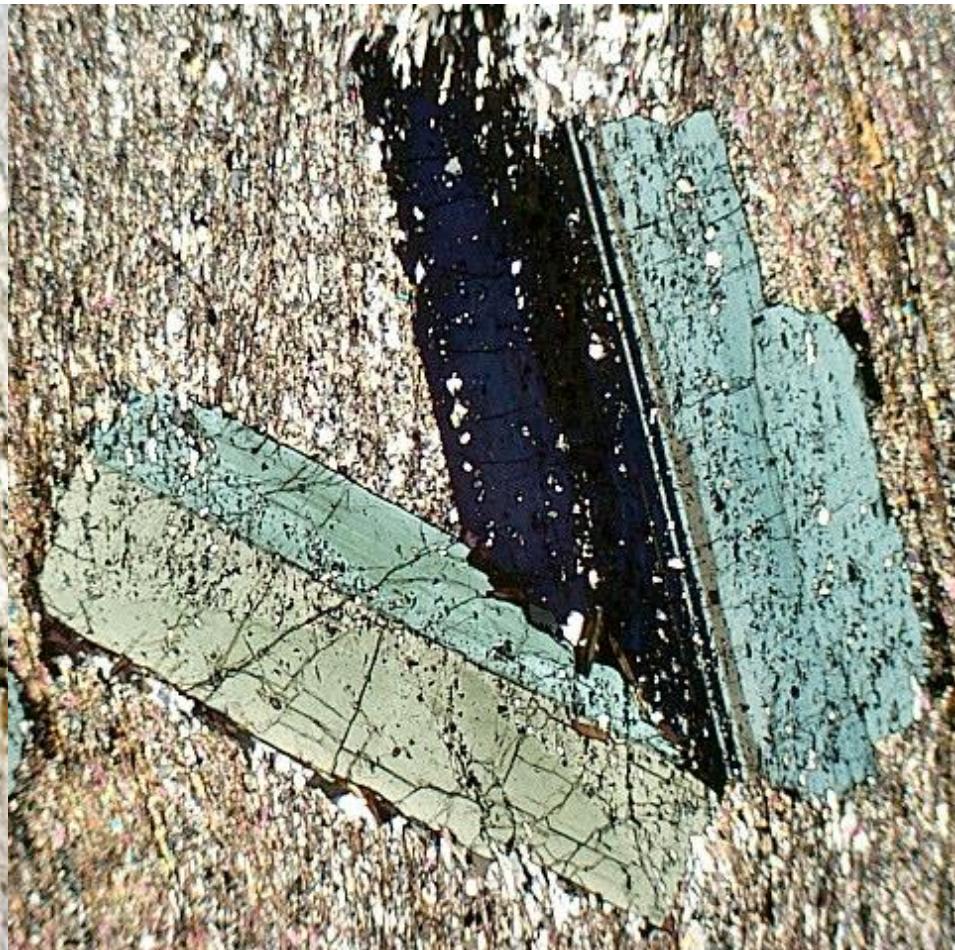


Таким образом, кианит в шлифах схож с ортопироксеном.  
Но! Орх – минерал высшей ступени метаморфизма, а кианит, указывая на высокое давление, часто встречается с низкотемпературными минералами.  
Чтобы их не перепутать нужно следить за ассоциацией!

## 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



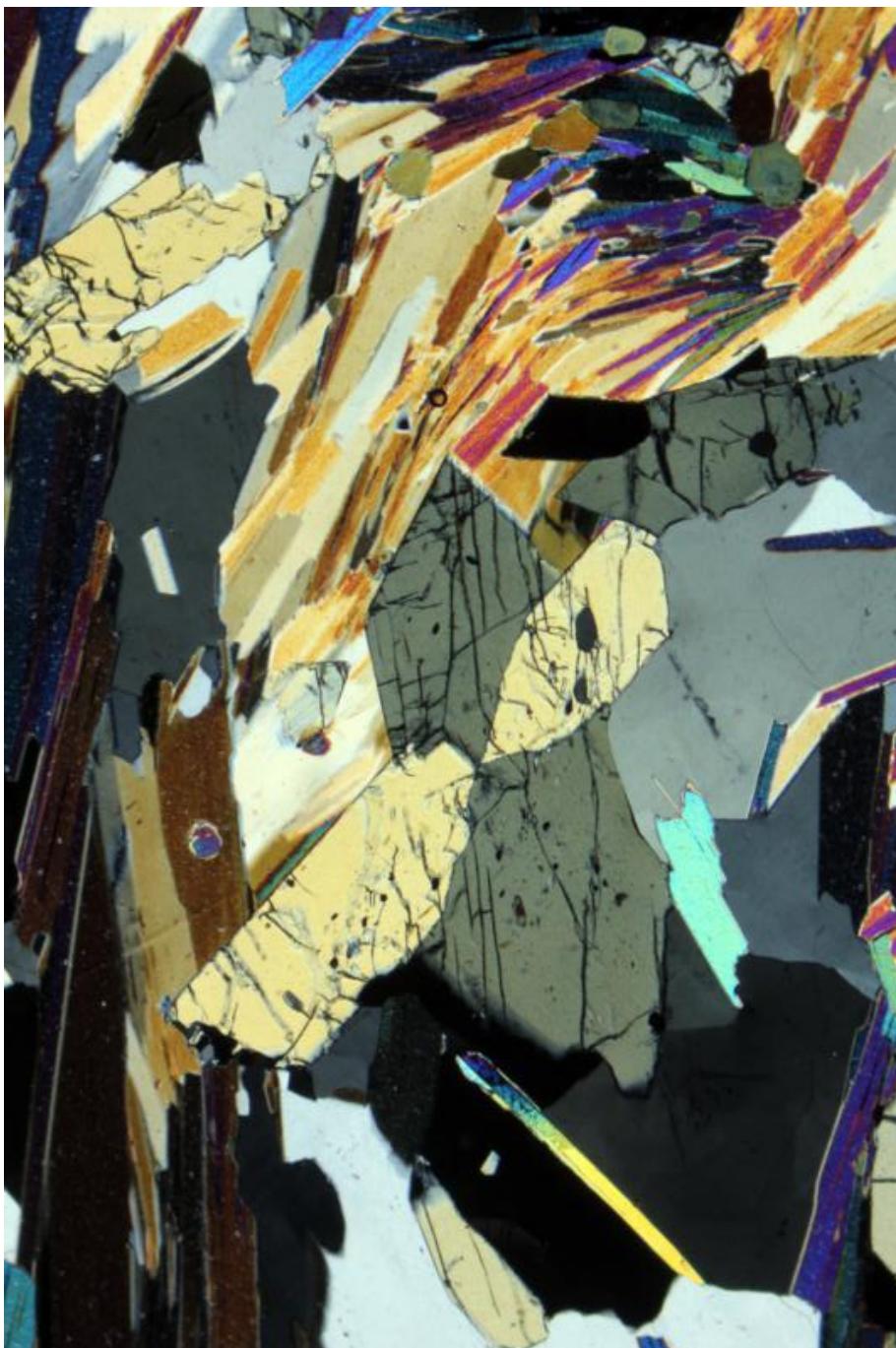
## Ставролит $(\text{Fe},\text{Mg})_2(\text{Al},\text{Fe})_9\text{O}_6[(\text{Si},\text{Al})\text{O}_4]_4(\text{O},\text{OH})_2$

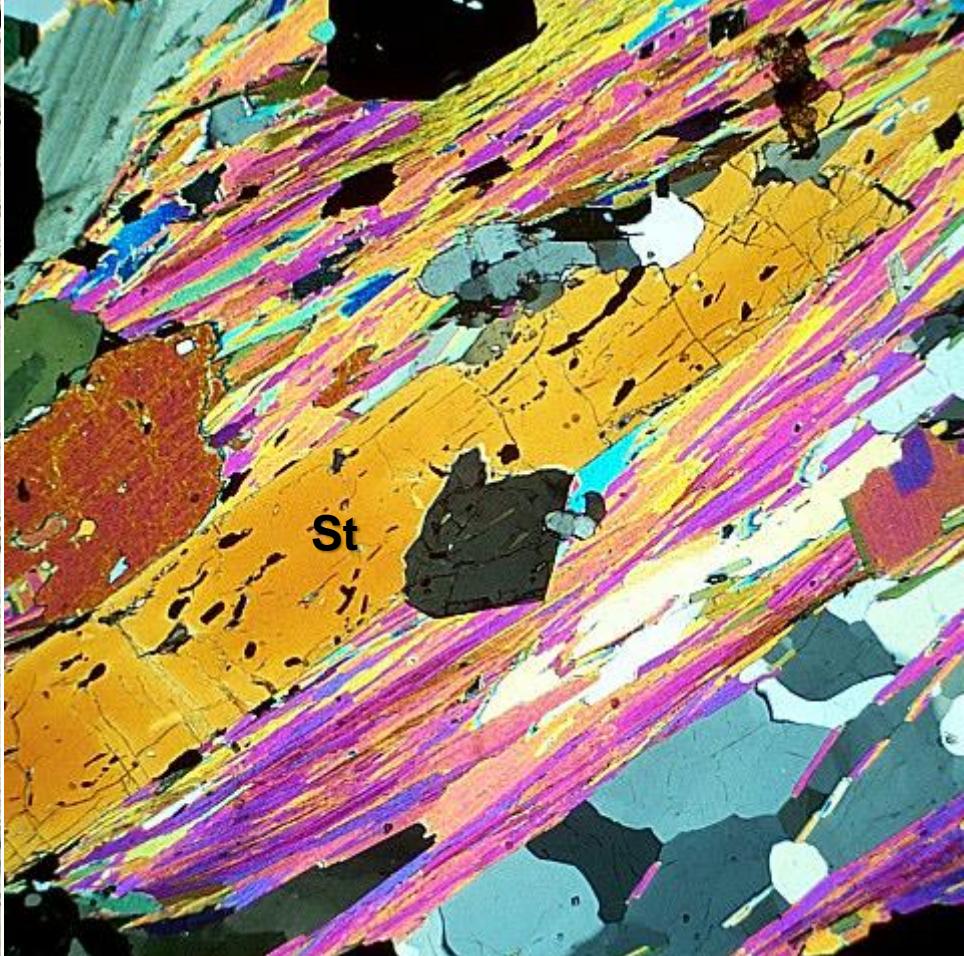
Образуется при условиях низшей и средней ступеней метаморфизма, то есть в при Р-Т параметрах фаций зеленых сланцев и амфиболитовой на схеме фаций метабазитов.



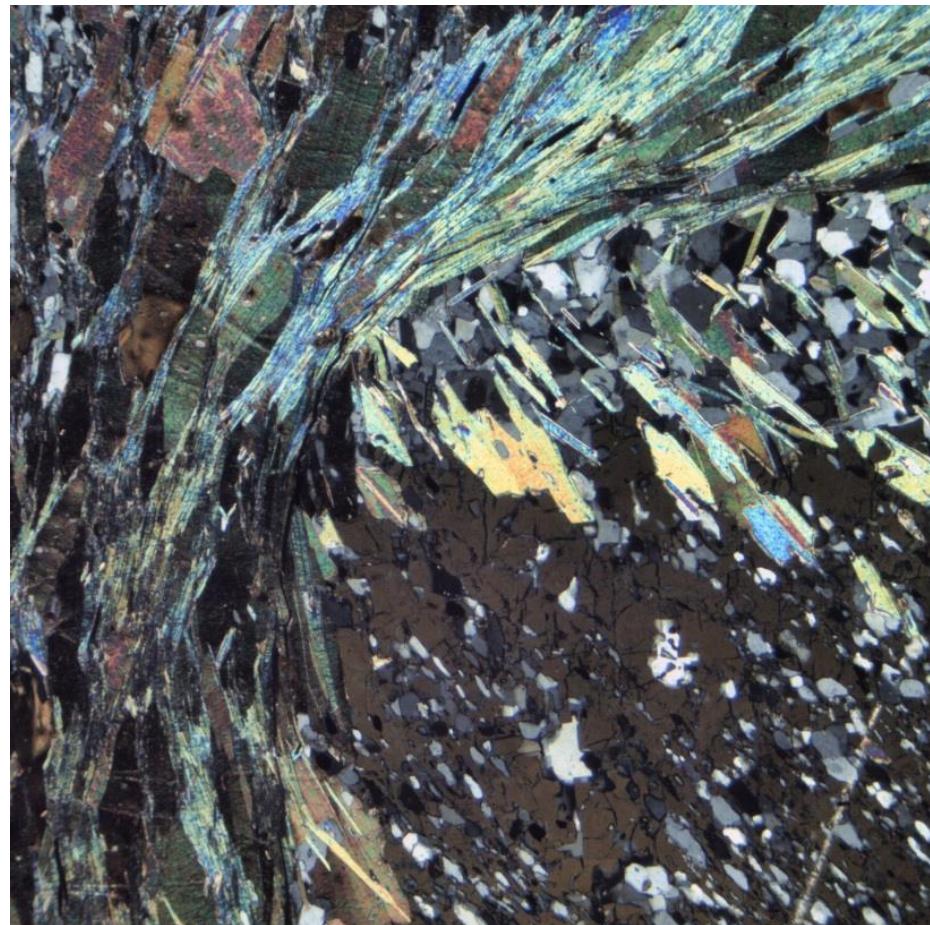
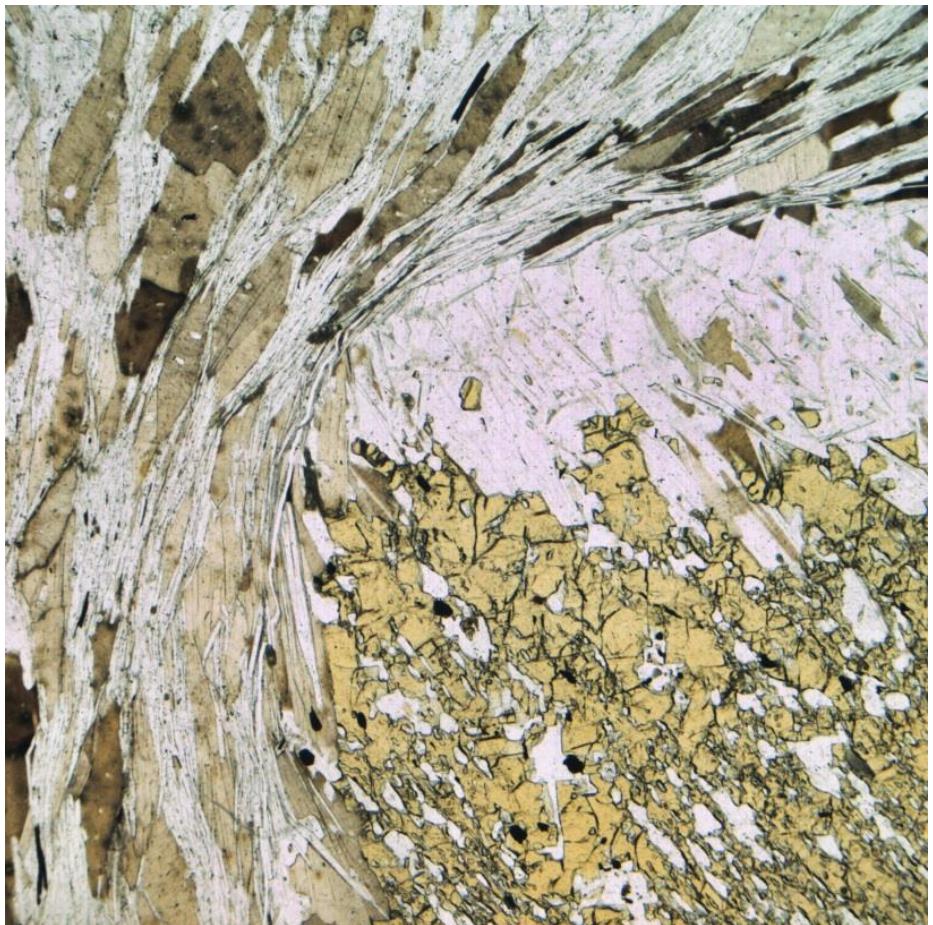
На данной схеме  
фаций  
метапелитов поле  
стабильности  
ставролита  
обведено линией  
бежевого цвета.





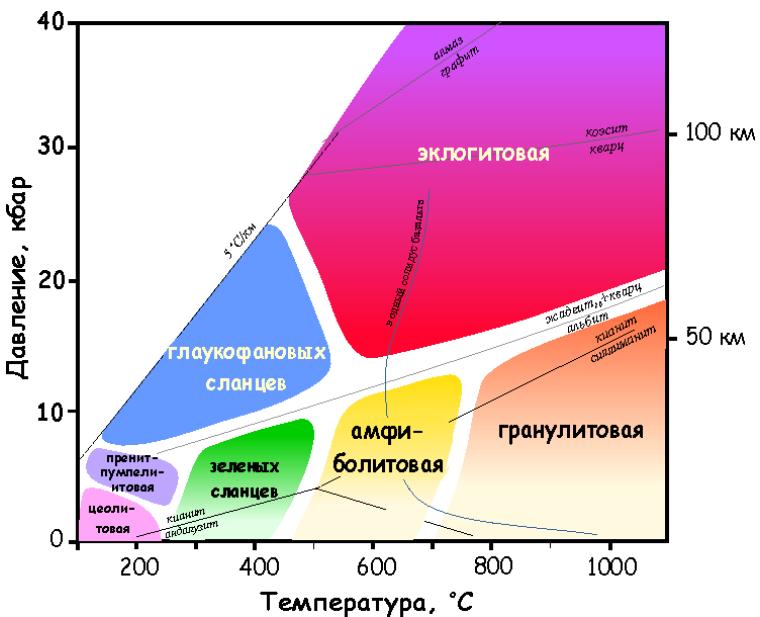
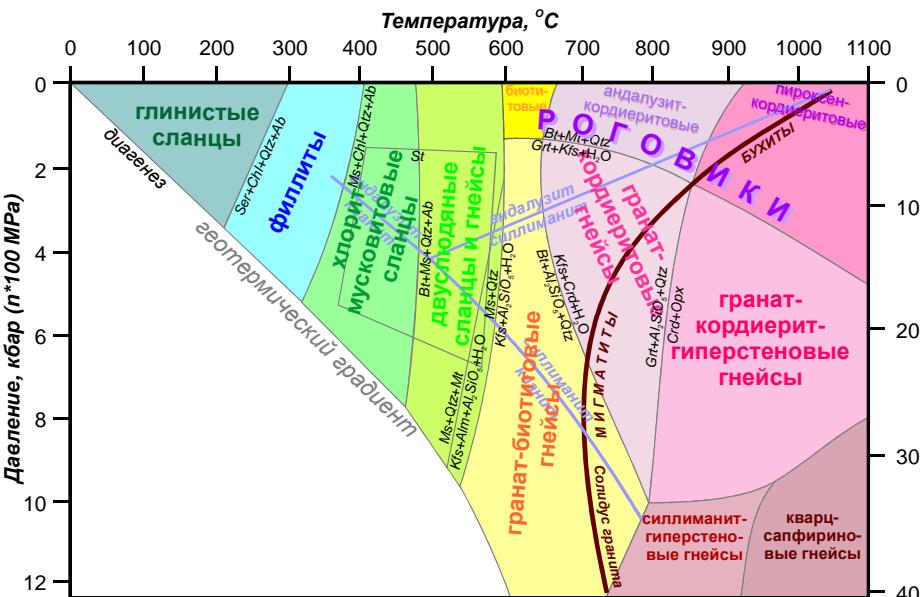


Ставролит обычно легко определяется в шлифах по характерному медово-желтому плеохроизму, интенсивность которого зависит от содержания железа в минерале, высокому рельефу и низким интерференционным окраскам (до желтой первого порядка). Ставролит часто образует порфиро- и пойкило-блэсты.



Ставролит очень часто образует пойкилобласти.

Последовательно рассмотрим преобразования метапелитов, начиная с самых низких ступеней метаморфизма



## Глинистые сланцы:

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

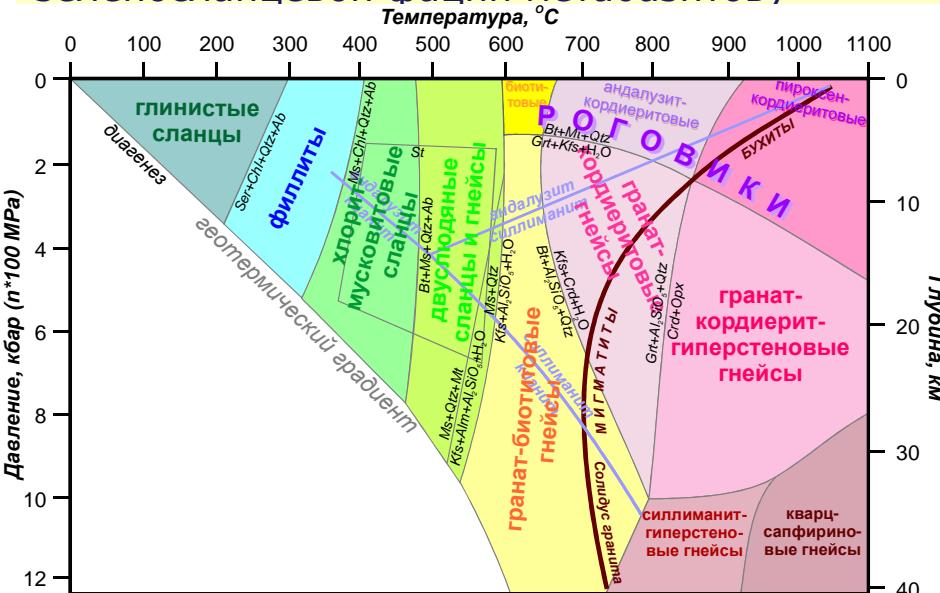
Преобразования достаточно слабые, сохраняется парагенезис исходных пород с преобладанием глинистых минералов и других слоистых силикатов.

При наличии стресса породы приобретают сланцеватую текстуру.



## Филлиты:

(соответствуют условиям верхней зеленосланцевой фации метабазитов)



части  
пренит-пумпелиитовой и нижней части

При условиях фации филлитов разлагаются гидрослюды и глинистые минералы.

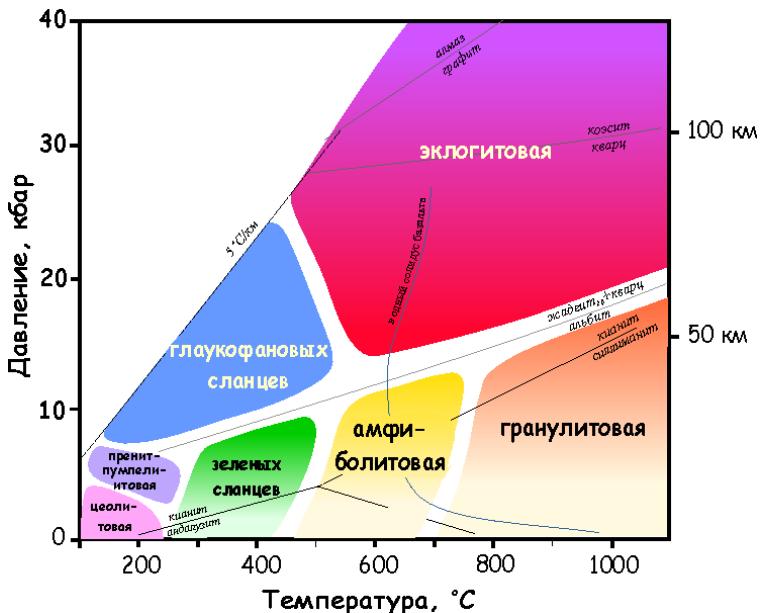
Возможный набор минералов филлитов:

серицит+хлорит+кварц+альбит+турмалин+графит+фенгит(Mg-Fe-слюда) + парагонит (Na-слюда).

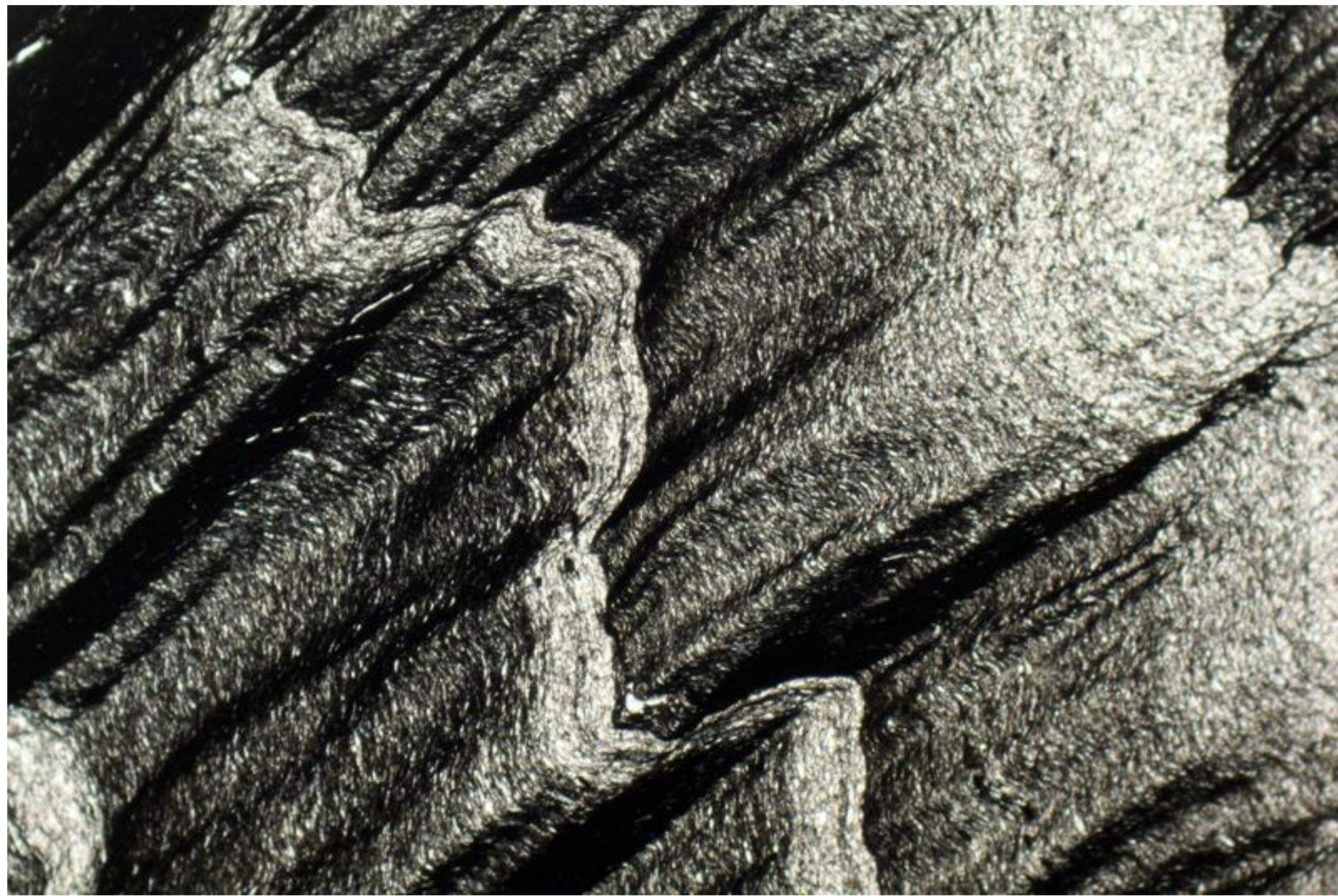
При условиях фации филлитов начинается реакция серицит+хлорит=биотит

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

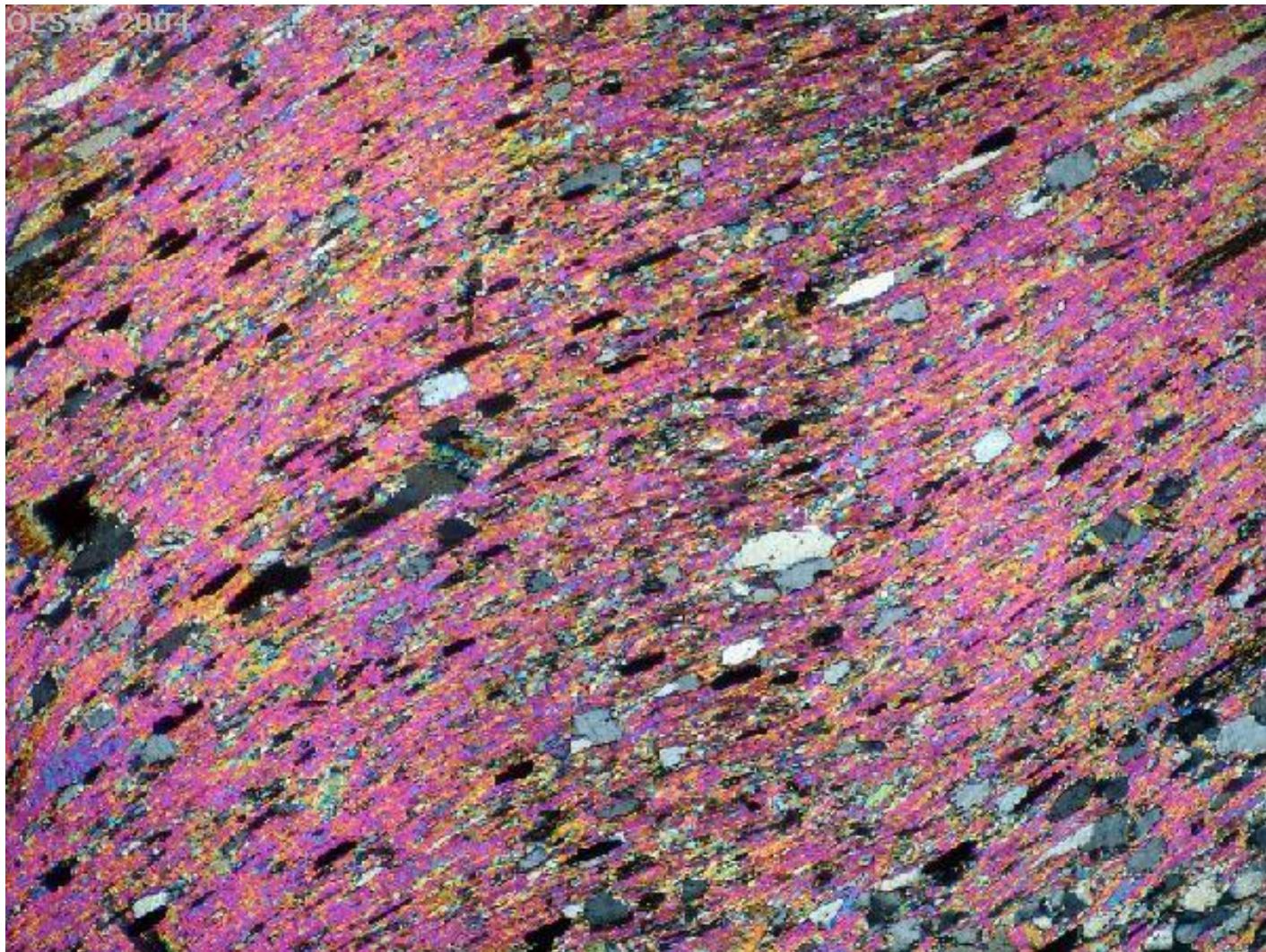
\*филлит (от греческого филлитес – листоватый) – мелко или скрытозернистая сланцеватая порода, обычно имеющая шелковистый блеск, создаваемым серицитом и другими мелкочешуйчатыми слюдами











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

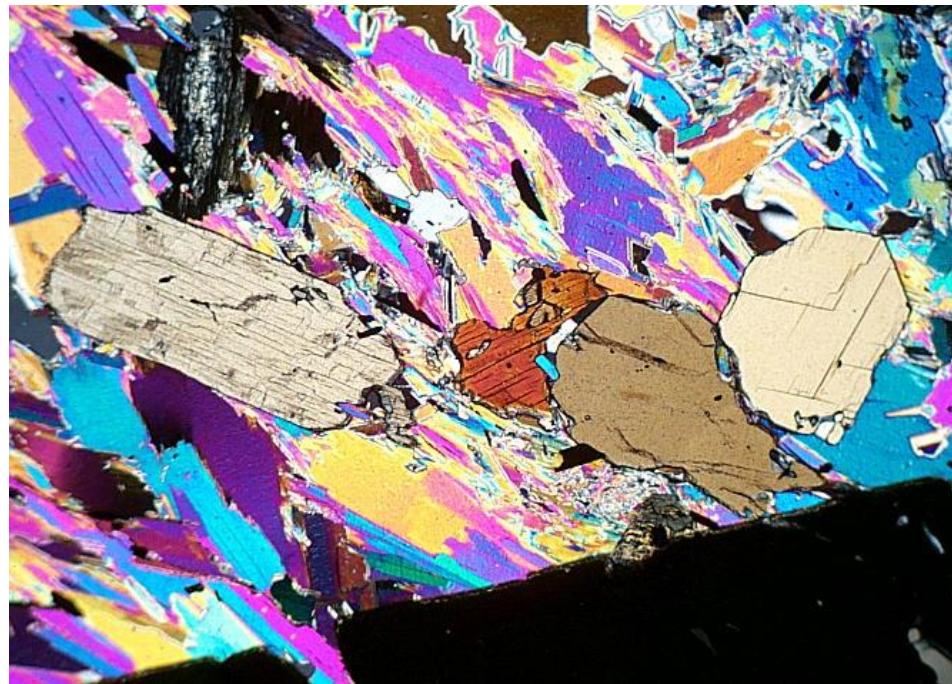
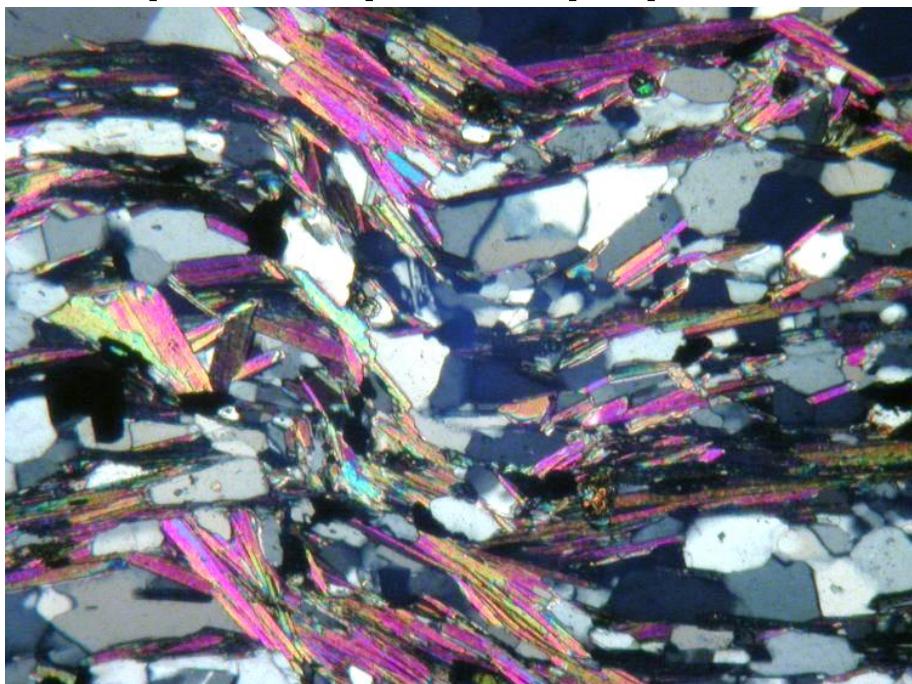
## Хлорит-мусковитовые сланцы

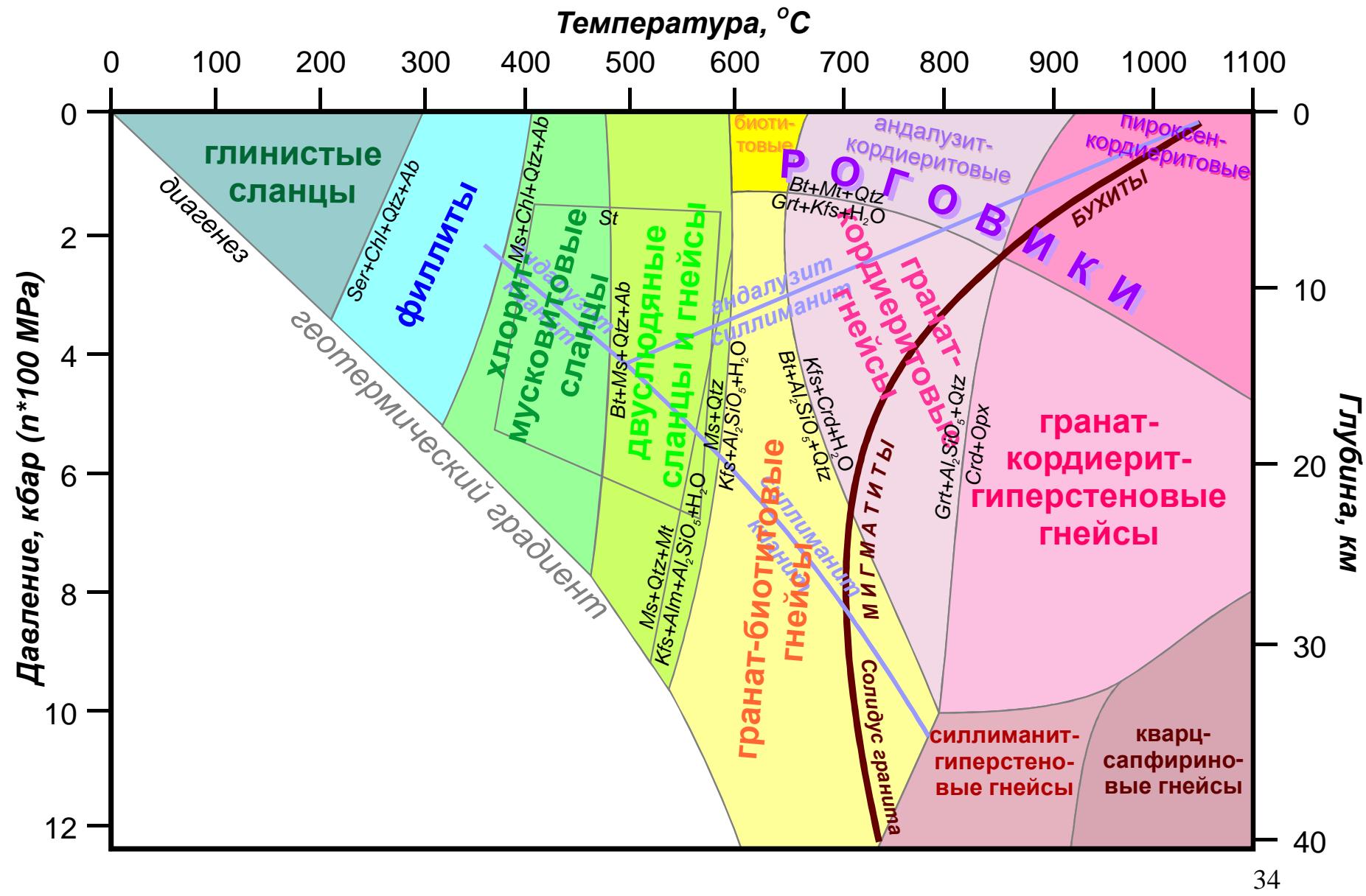
(с андалузитовой и кианитовой субфациями)

(соответствует условиям зеленосланцевой фации метабазитов)

Размер зерен укрупняется, Серицит переходит в Мусковит.

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





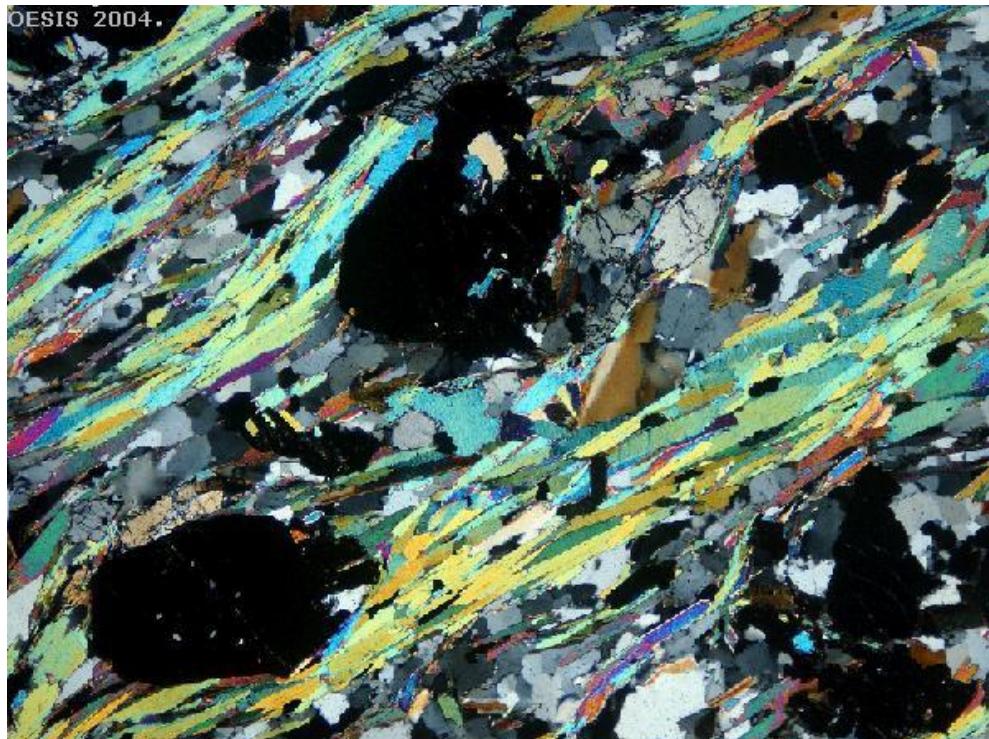
С повышением температуры Хлорит полностью вытесняется Биотитом и происходит переход в **фацию Двуслюдяных гнейсов и сланцев**  
(соответствует условиям амфиболитовой фации метабазитов)

Андалузит, Силлиманит и Кианит – определяют субфацию глубинности.

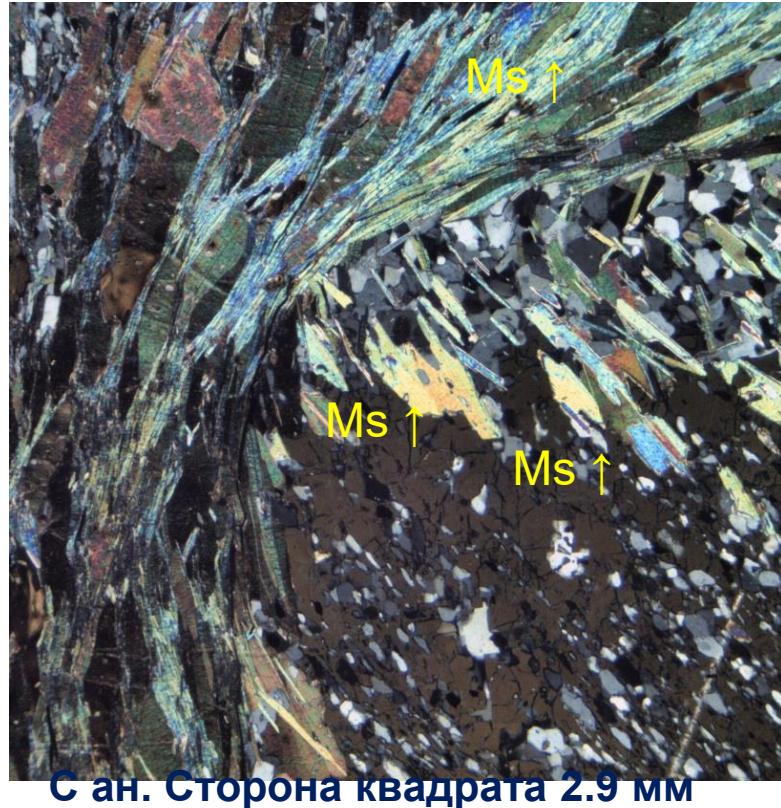
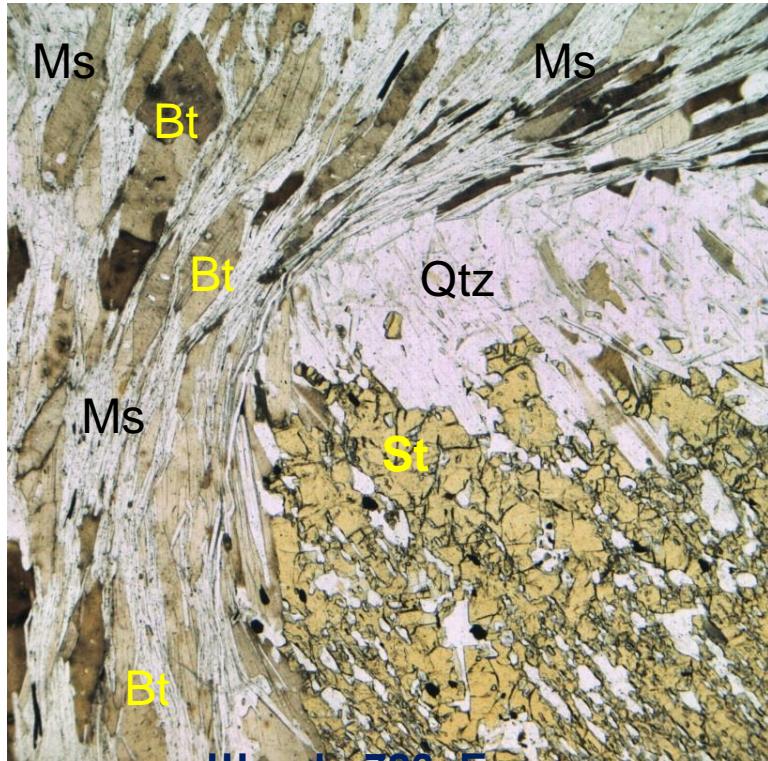


Гранат, Андалузит и Ставролит  
часто образуют порфиро- и  
пойкилобласти.

В различных соотношениях могут присутствовать:  
Кварц+Биотит+Мусковит+Полевой шпат+ Андалузит (Силлиманит, Кианит) + Гранат+Ставролит и т.д.



# Пойкилобласти как консерваторы структур и парагенезисов

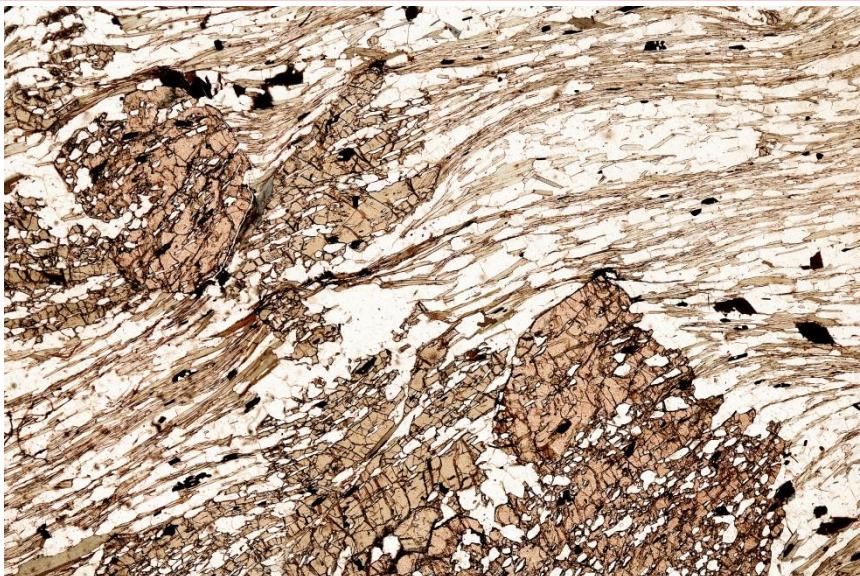


## Кварц-ставролит-двуслюдяной сланец

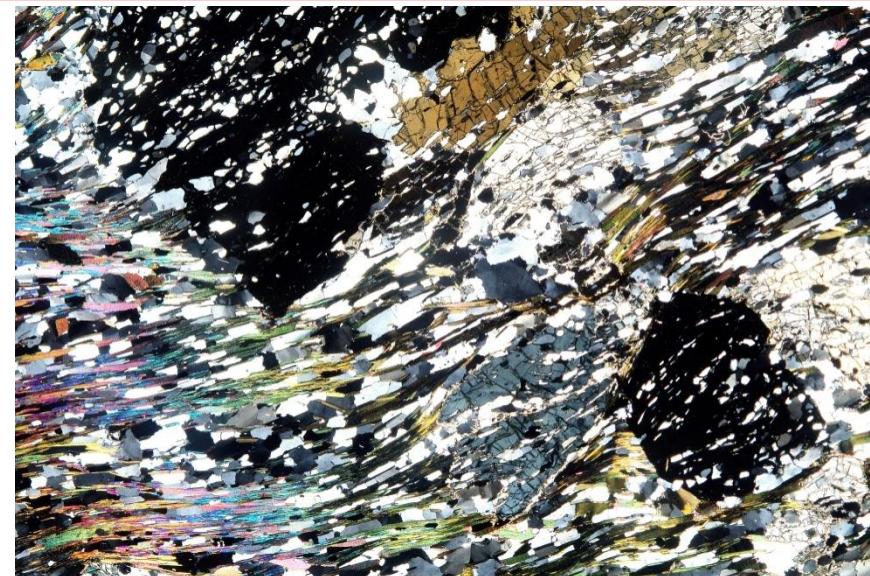
Прогрессивный метаморфизм нередко сопровождается пластическими деформациями породы под действием дифференциального стресса. С этим связано формирование директивных текстур, по-новому ориентированных относительно прежних. В данном случае в Ms-Q -St пойкилобласте «законсервировано» старое направление сланцеватости,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

## Гранаты в метапелитах средней ступени

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 плойчатой. В Grt цепочками зерен Qtz зафиксирована полосчатость, совпадающая со сланцеватостью основной ткани породы: пойкилобласти Grt - посткинематические

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

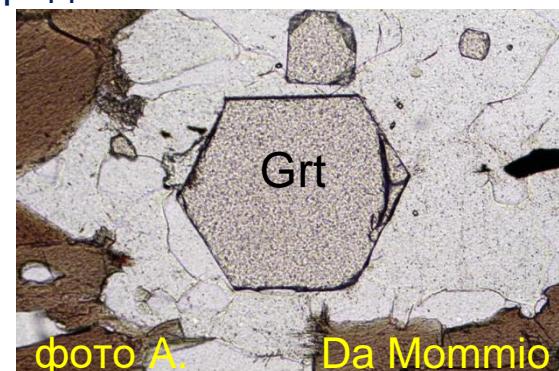


фото А.

Da Mommio

# Биотит-Гранатовые сланцы и гнейсы

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

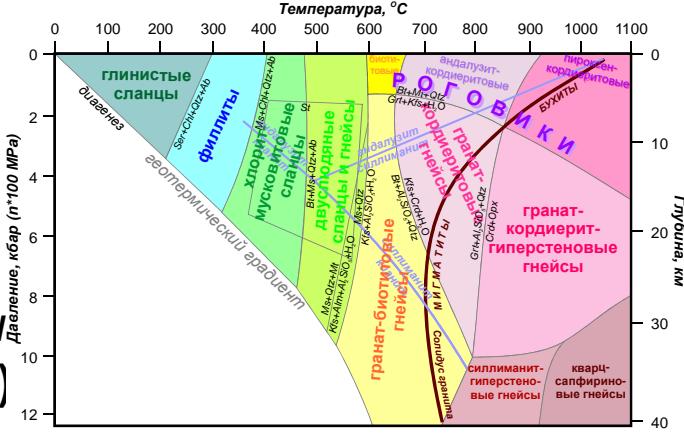
**Андалузит, Силлиманит и Кианит определяют субфацию глубинности.**

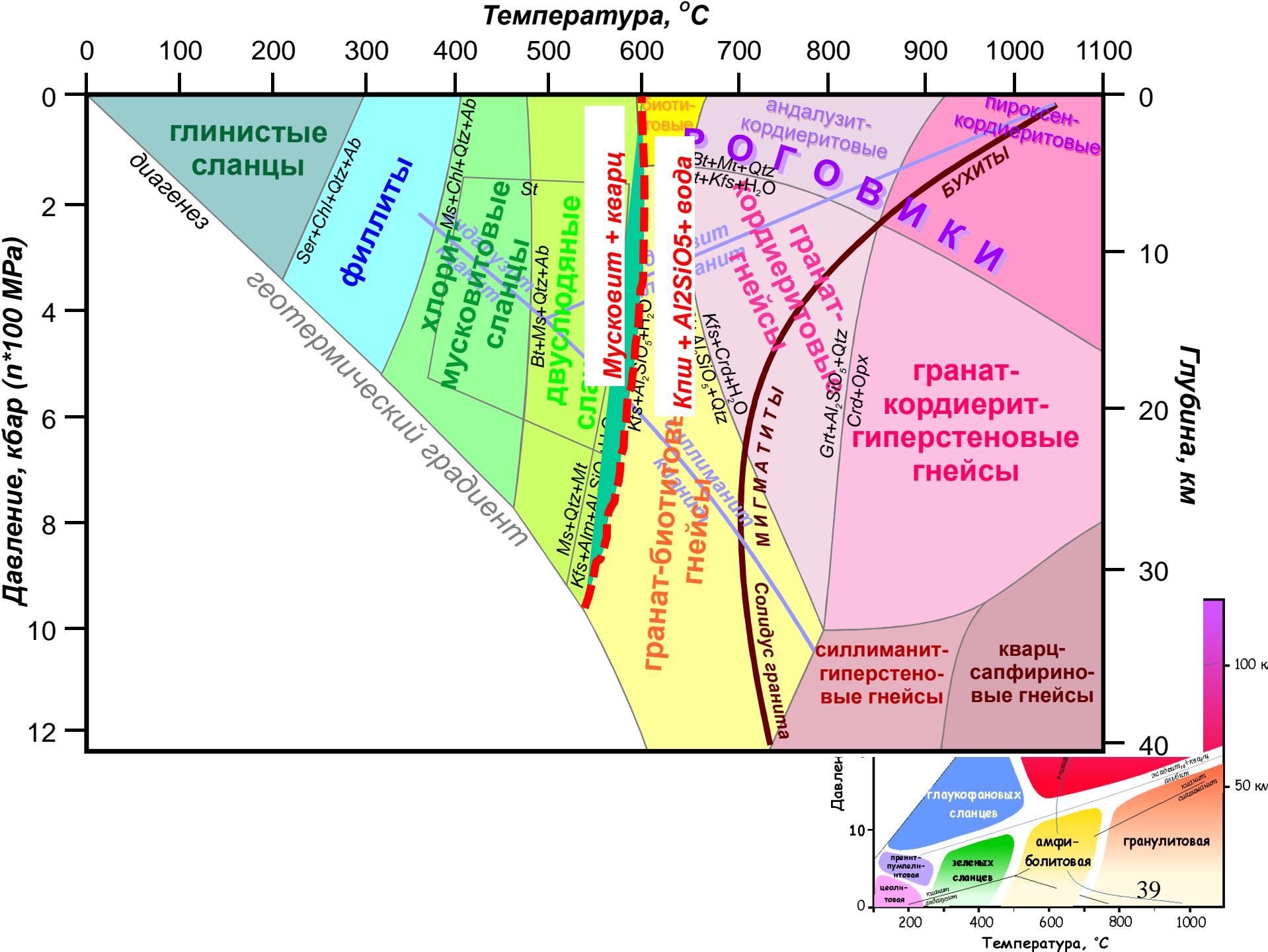
Здесь исчезает Мусковит, в соответствии с реакцией

**Мусковит+Кварц = Ортоклаз + Андалузит(Силл, Ки)**

Возможные минералы: Биотит+Кварц+Полевой шпат+

Гранат и т.д.

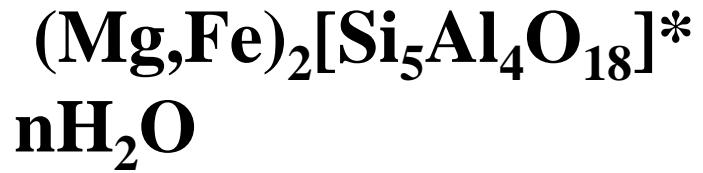




**Гранат-кордиеритовые гнейсы** (соответствуют нижней и средней части гранулитовой фации). Из силикатов глинозем характерен только Силлиманит.

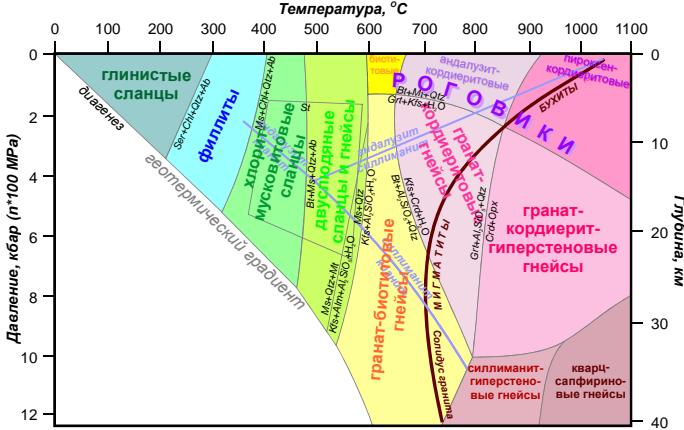
Здесь появляется Кордиерит:

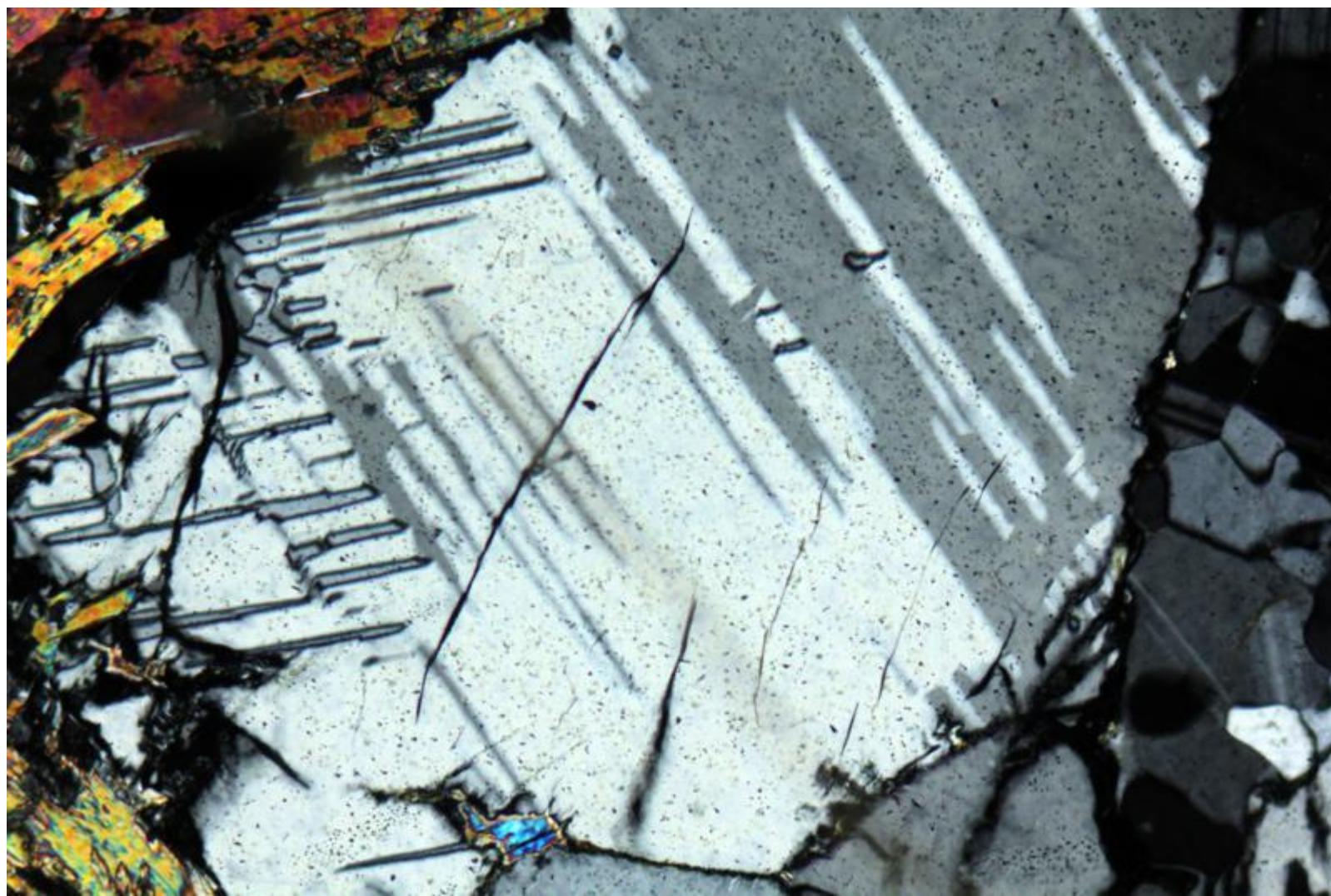
# Кордиерит



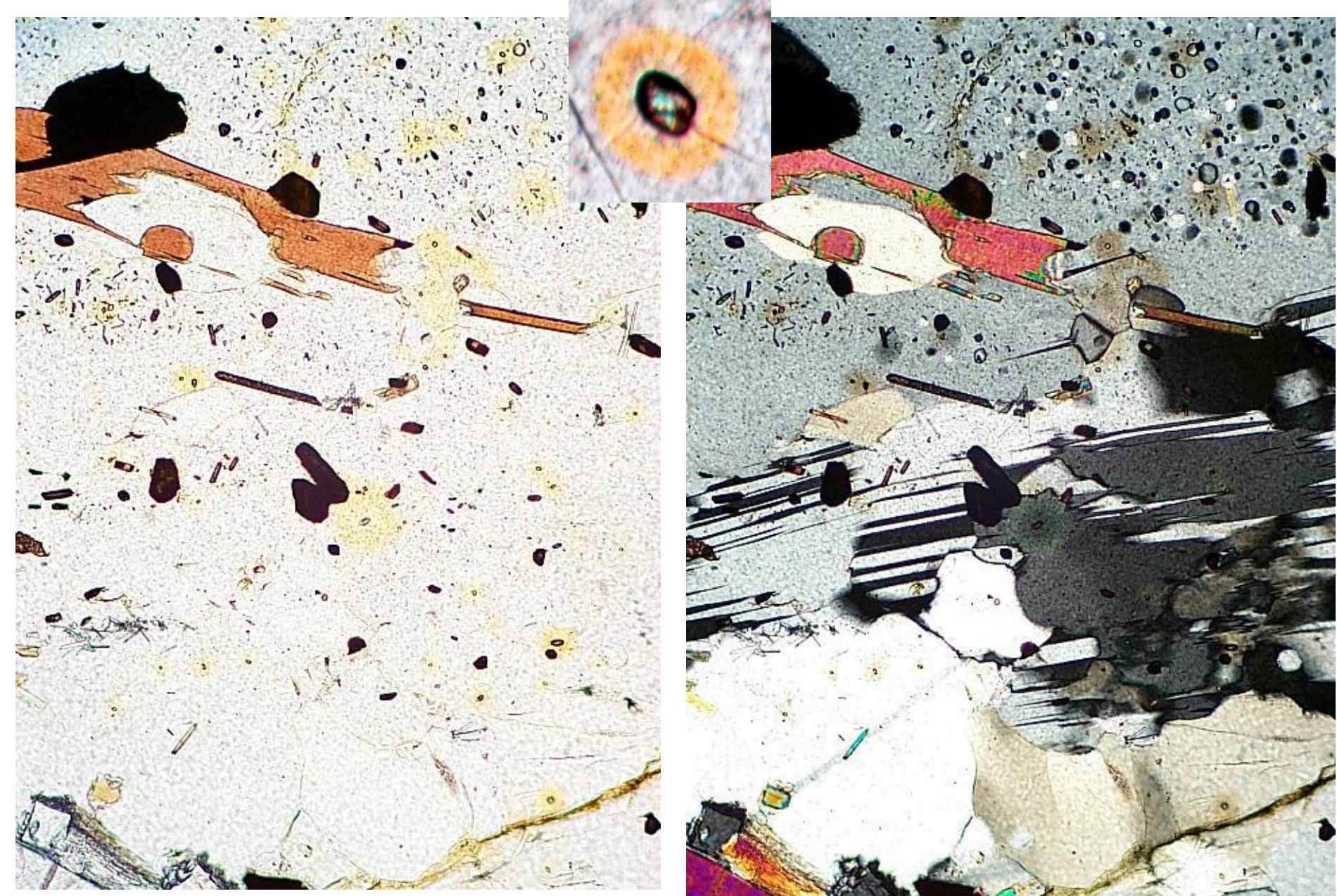
в шлифах зачастую не отличим от плагиоклаза.

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

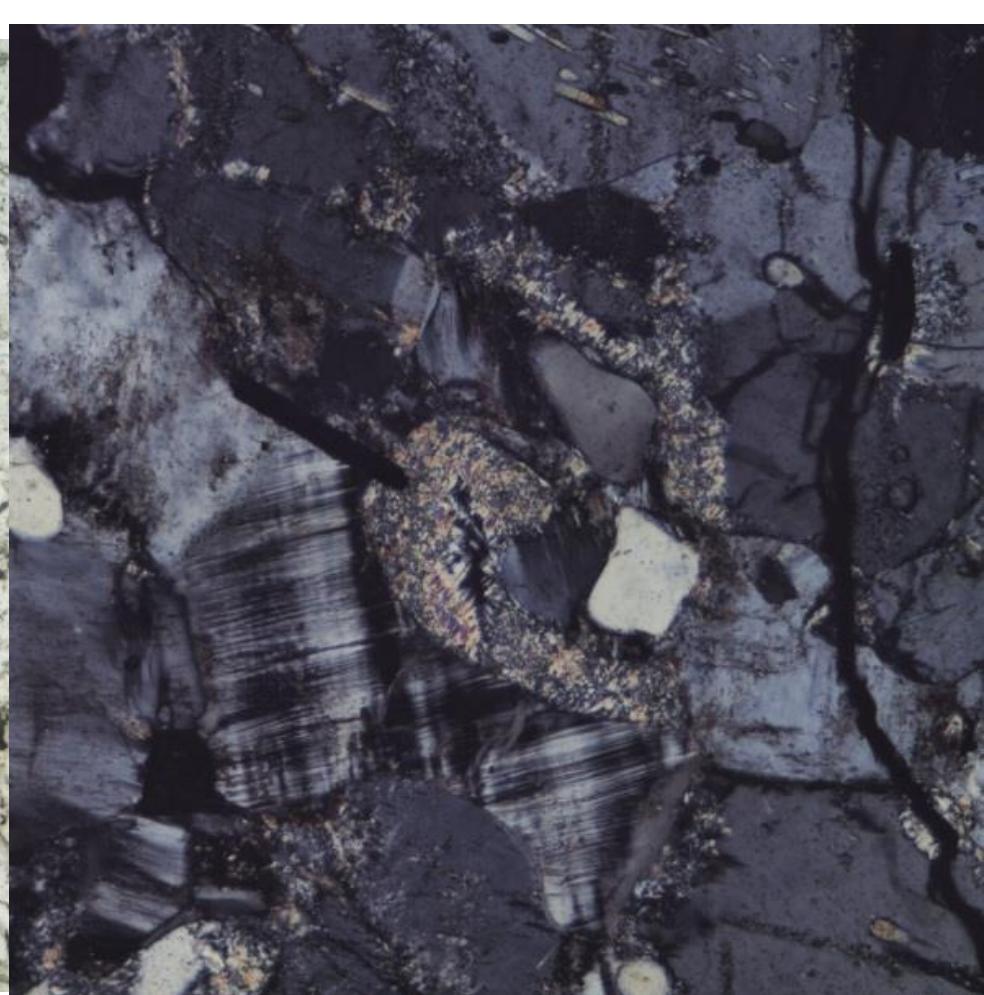
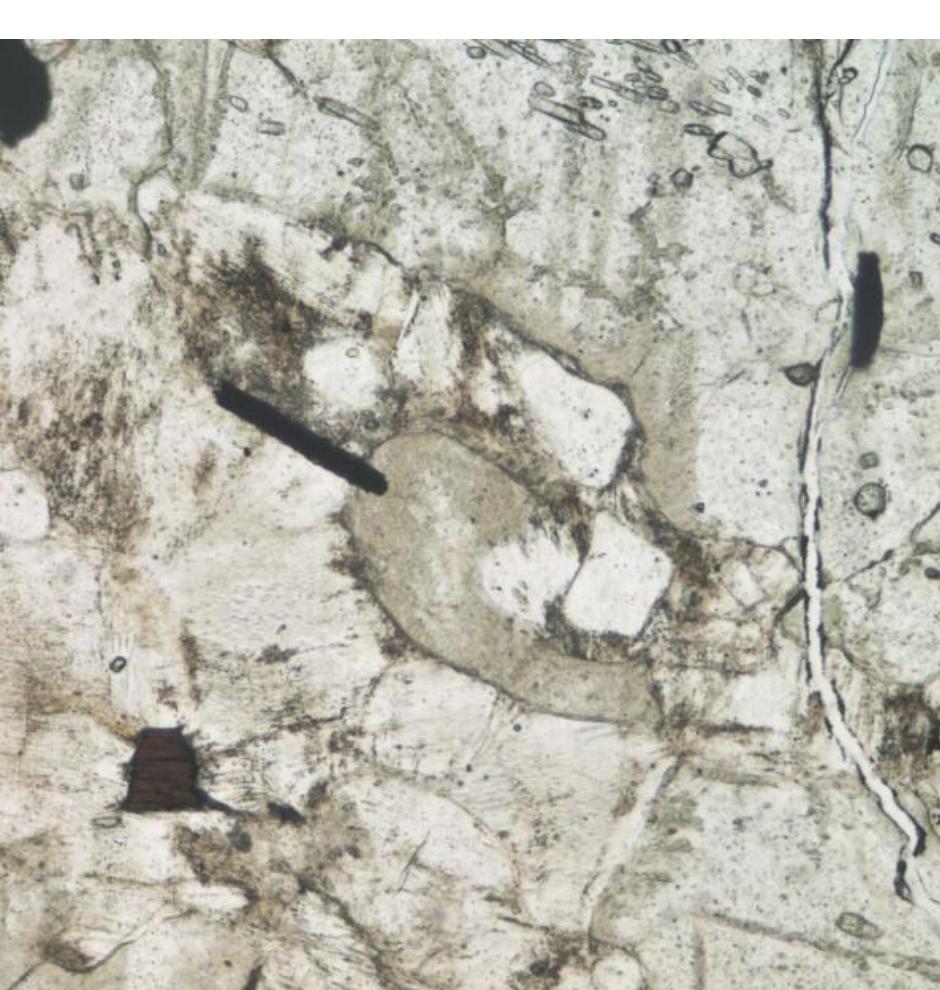




Особый характер двойников Crd с пересекающимися под  $60^\circ$  и нередко скругленными, выклинивающимися двойниковыми полосками, не всегда проявлен, и не позволяет уверенно различать Crd и Pl, хотя у последнего двойниковые полоски более четкие, ограничены прямыми линиями, и обычно протягиваются через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

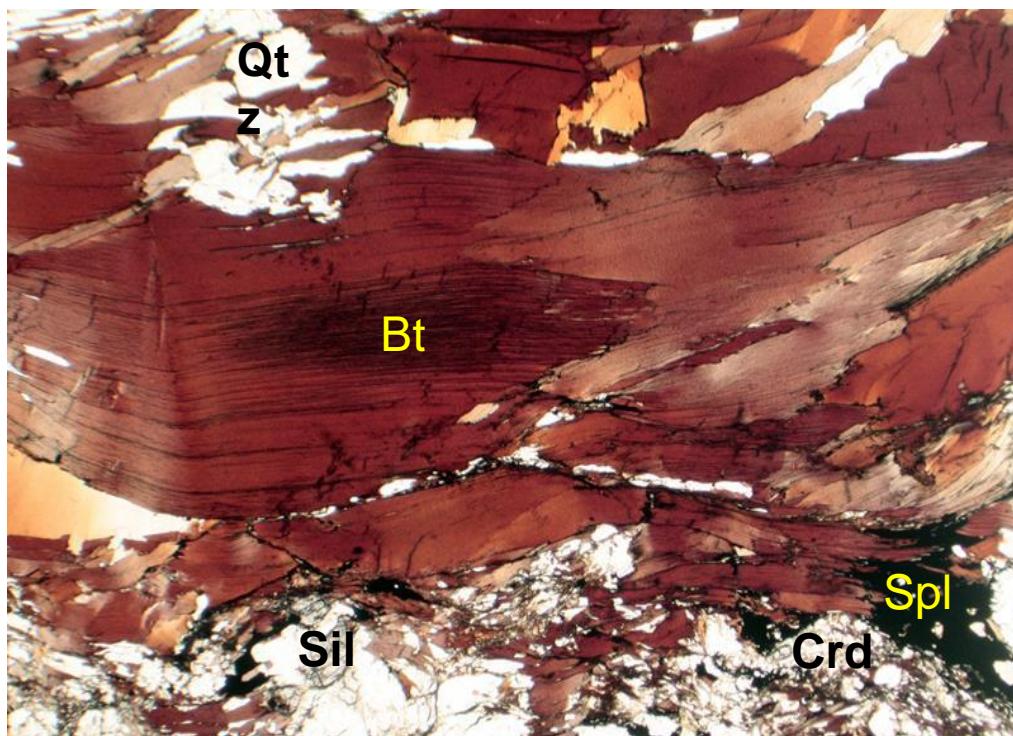


Плеохроичные дворики желтого цвета вокруг радиоактивных минералов - отличительная особенность кордиерита



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



**Ти-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) –  $2\text{Bt} + 6\text{Qtz} = 2\text{Kfs} + 3\text{Opx} + 4\text{H}_2\text{O}$ , по мере роста  $T$  Bt расходуется постепенно: её продукты – остаток Bt с большей магнезиальностью (Mg#), чем исходный Bt, и Opx с меньшей Mg#, чем остаток Bt.

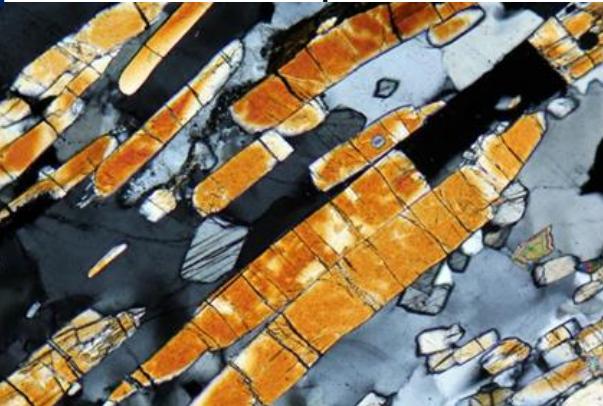
Во второй, (при  $P \simeq 7$  kBar до  $T \simeq 870^\circ$ , в богатых Mg метапелитах) протекает реакция  $\text{Bt} + \text{Sil} \rightarrow \text{Kfs} + \text{Grt} + \text{Crd}$ , в равновесии с кордиеритом ещё «долго» сохраняются богатые Mg и Cl маловодные титанистые биотиты (скорее уже – флогопиты,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

# Силлиманит – ведущий силикат Al в высшей ступени

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



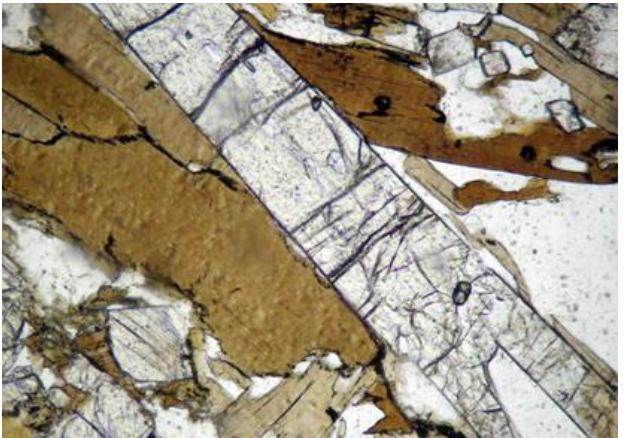
1. Без анализатора



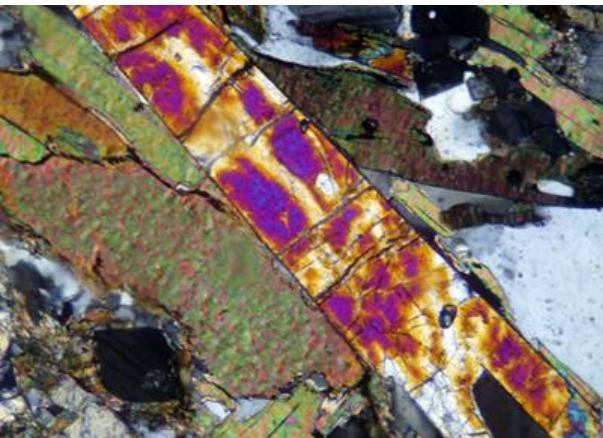
1. С анализатором



2. Без анализатора



3. Без анализатора



3. С анализатором



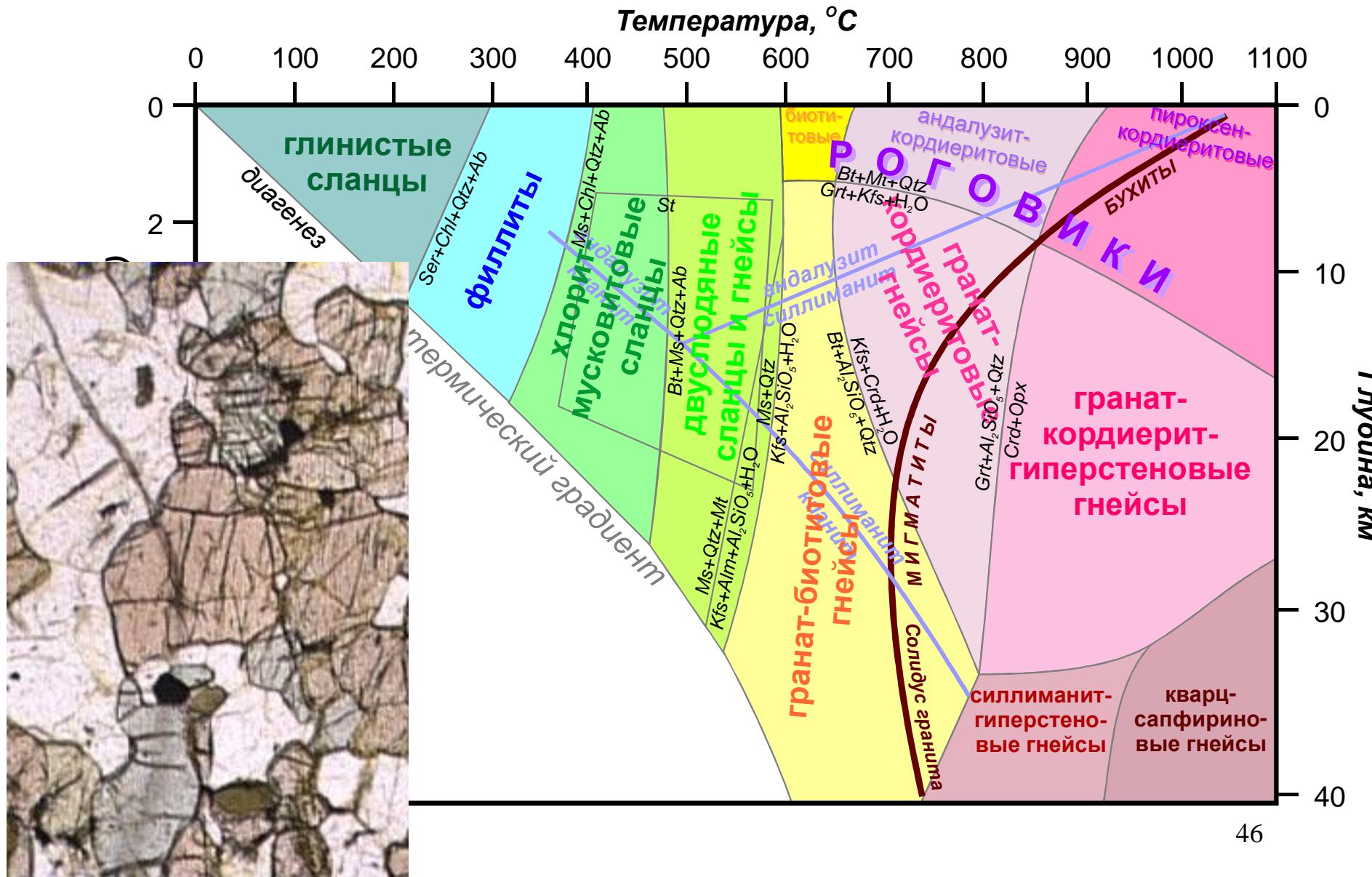
4. Без анализатора

Длинная сторона всех фото 2 мм

Автор всех фото на этом слайде Alessandro Da Mommio

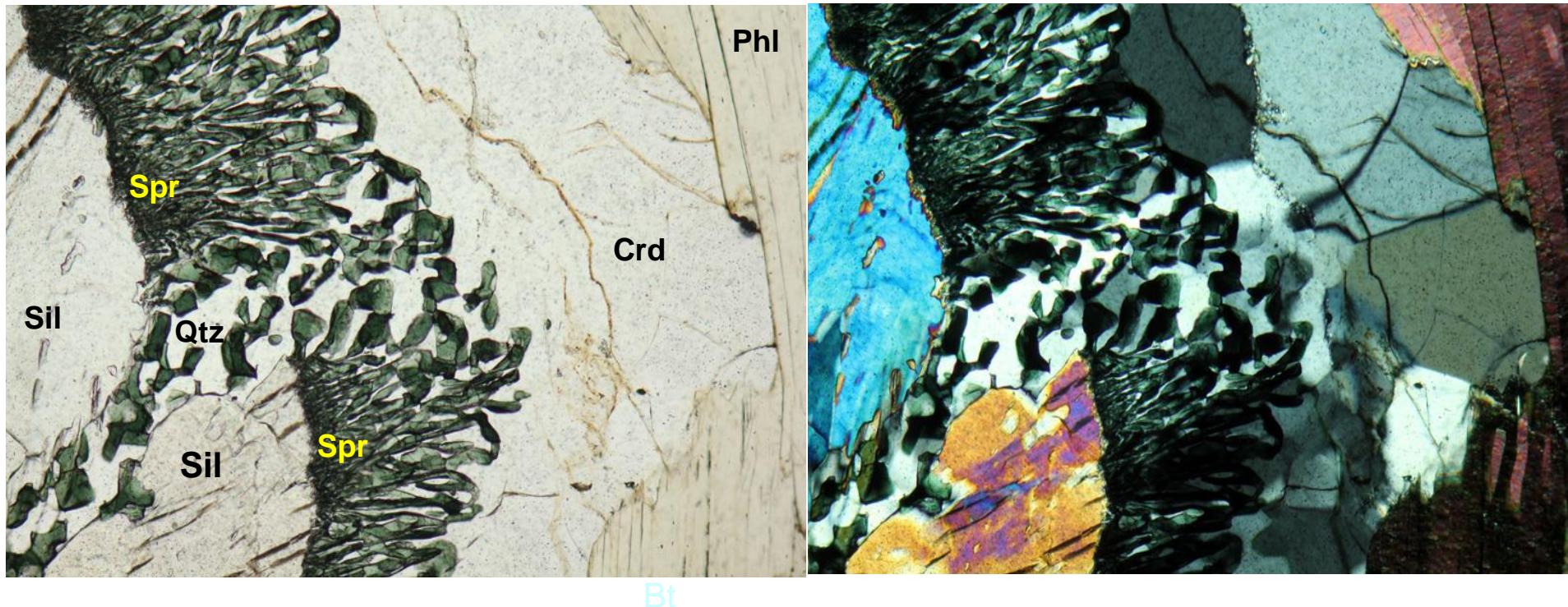
**Sil** – индекс-минерал гранулитовой фации. Форма – призмы от длинностолбчатого до игольчатого и волокнистого облика. Рельеф средний, переходный к высокому, интерференционные окраски – до голубой II порядка, погасание прямое. Ромбовидные поперечные разрезы Sil со следами сов. спайности по диагонали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

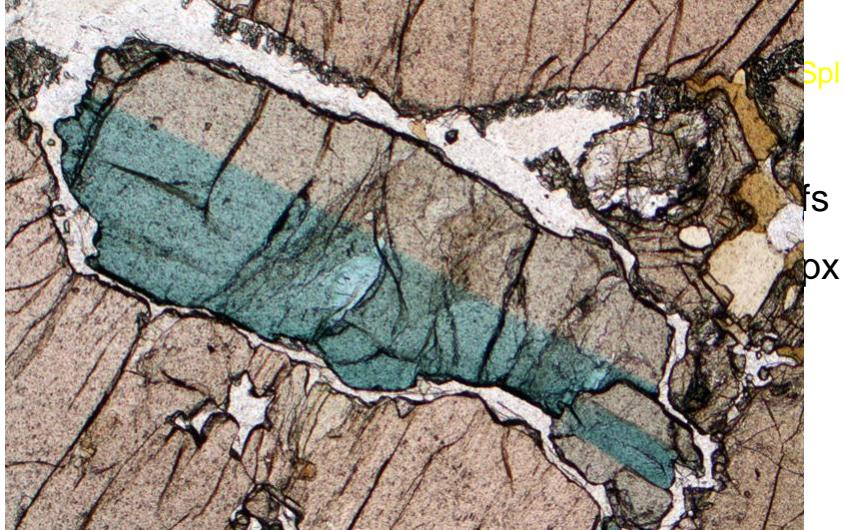
Для пород гранулитовой фации метаморфизма характерны **коронарные реакционные структуры**, в которых записывается история метаморфических преобразований пород.



Коронарная реакционная структура: Сапфирин-кварцевые симплектиты вокруг Силлиманита – продукты реакции  $Crd + Sil = Spr + Qtz$ . Итальянские Альпы..  
Длина 2 мм. (Фото A. Da Mommio)

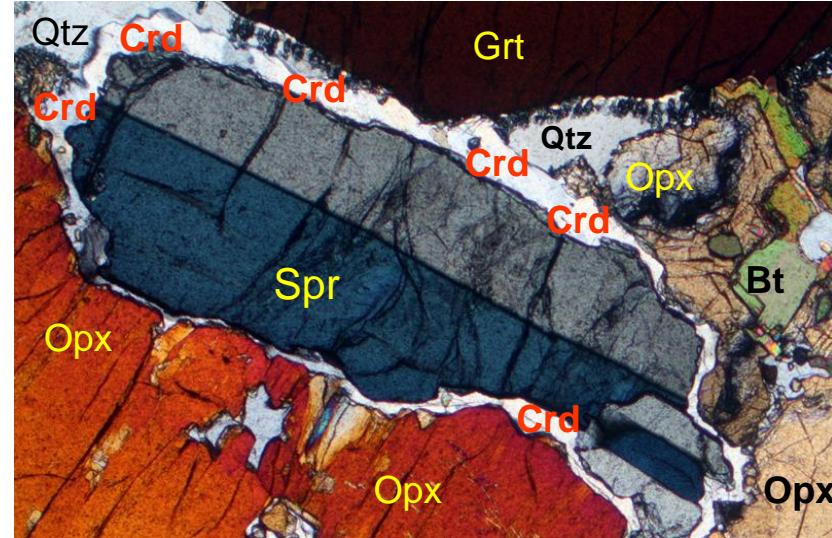
# Фация кварц-сапфировых гнейсов (очень высоких Т и Р)

## Сапфирин+Qtz – глубинная альтернатива кордиериту

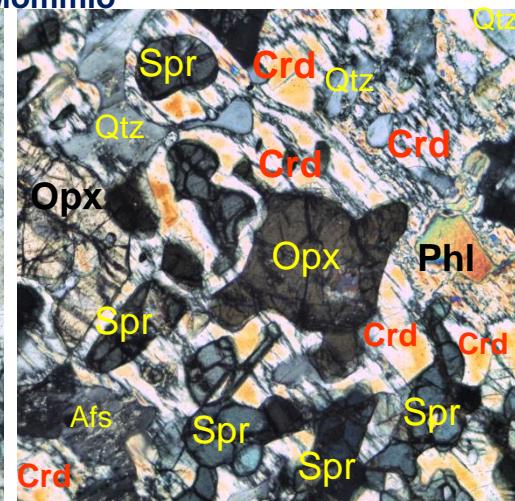
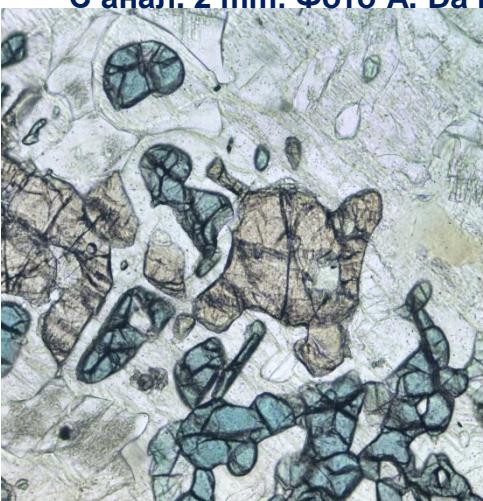


Диафторированный Grt-Opx-Qtz-Spr—гранофельс с реакционной каймой Crd на Spr. Vale-Codera, Италия. Без анал. 2 mm. Фото A. Da Mommio

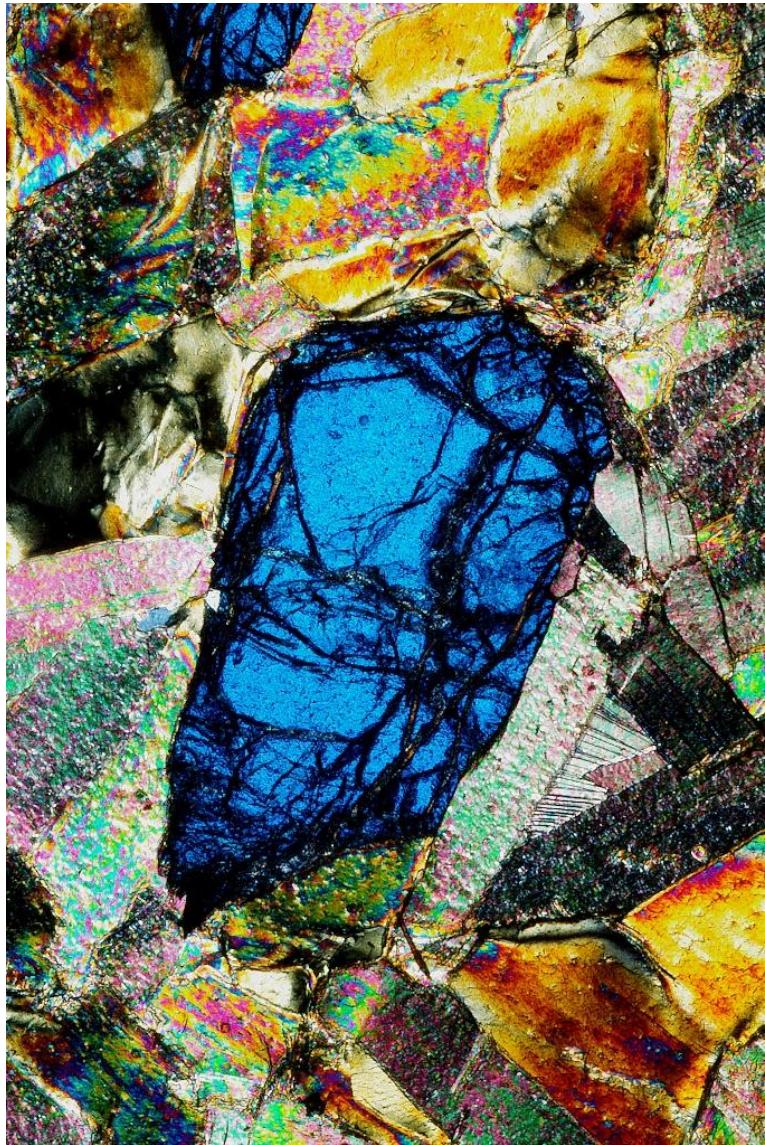
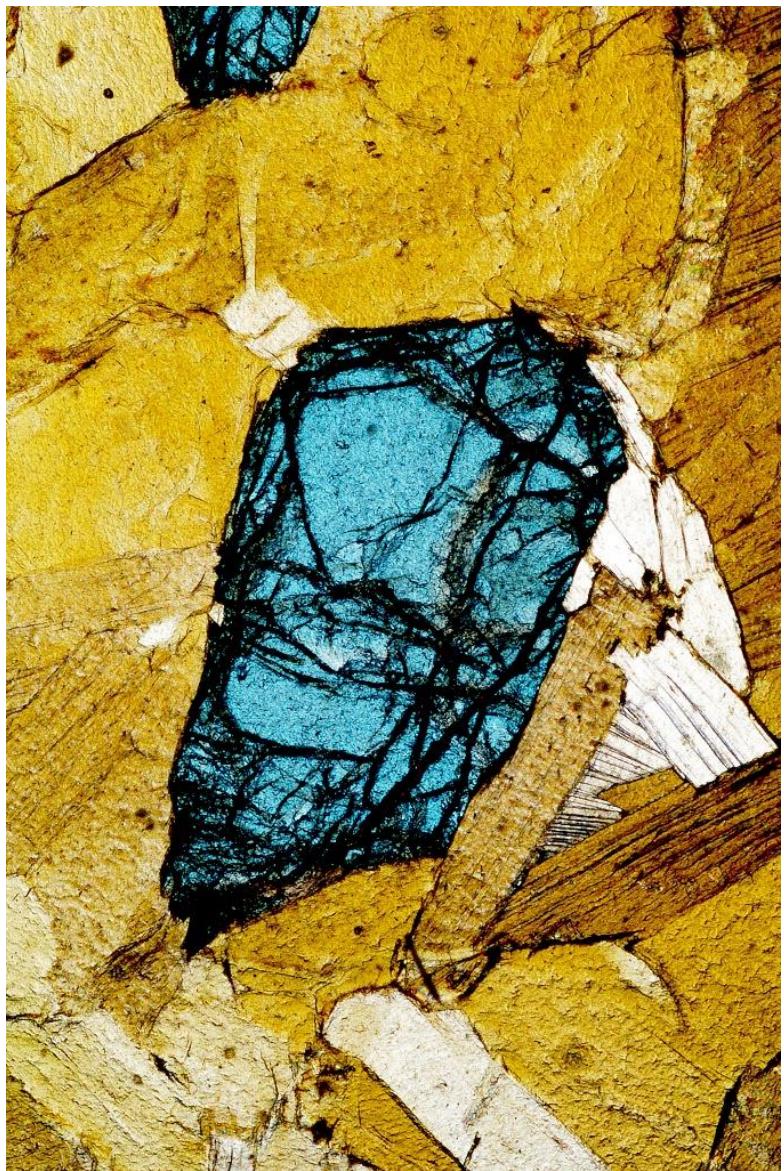
Метапелитам этой субфации свойственно развитие регressiveных парагенезисов по минералам, отвечающим кульминации метаморфизма. Причина этому – незаторможенная кинетика реакций при высоких Т и длительность выведения таких пород из глубины на поверхность.



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



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



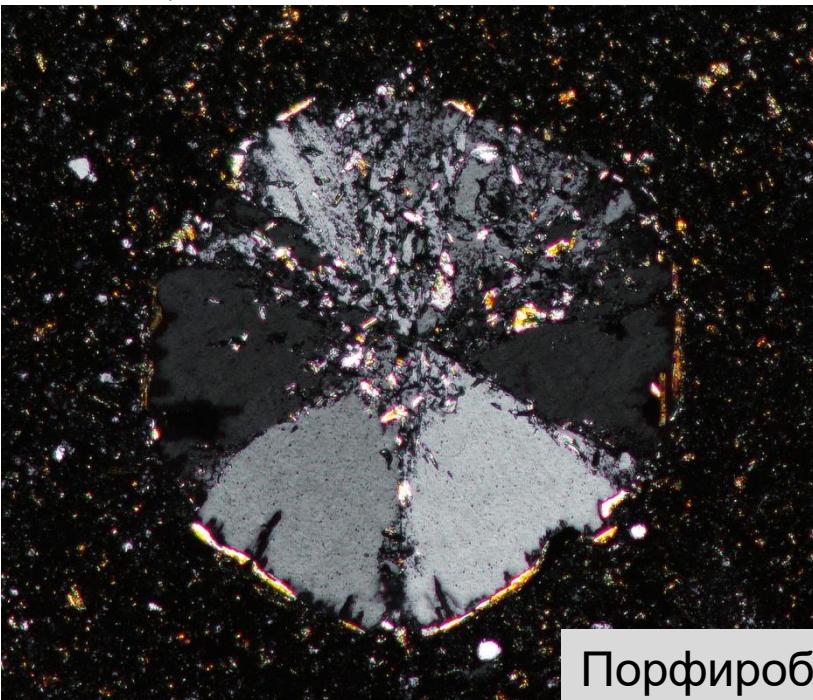
Минерал сине-голубого цвета, не очень изменяющийся при включении анализатора ввиду низкой интерференционной окраски, которую «забивает» его собственный голубой цвет – сапфирин, коричневый – биотит, бесцветный – мусковит

# Роговики. Бухиты

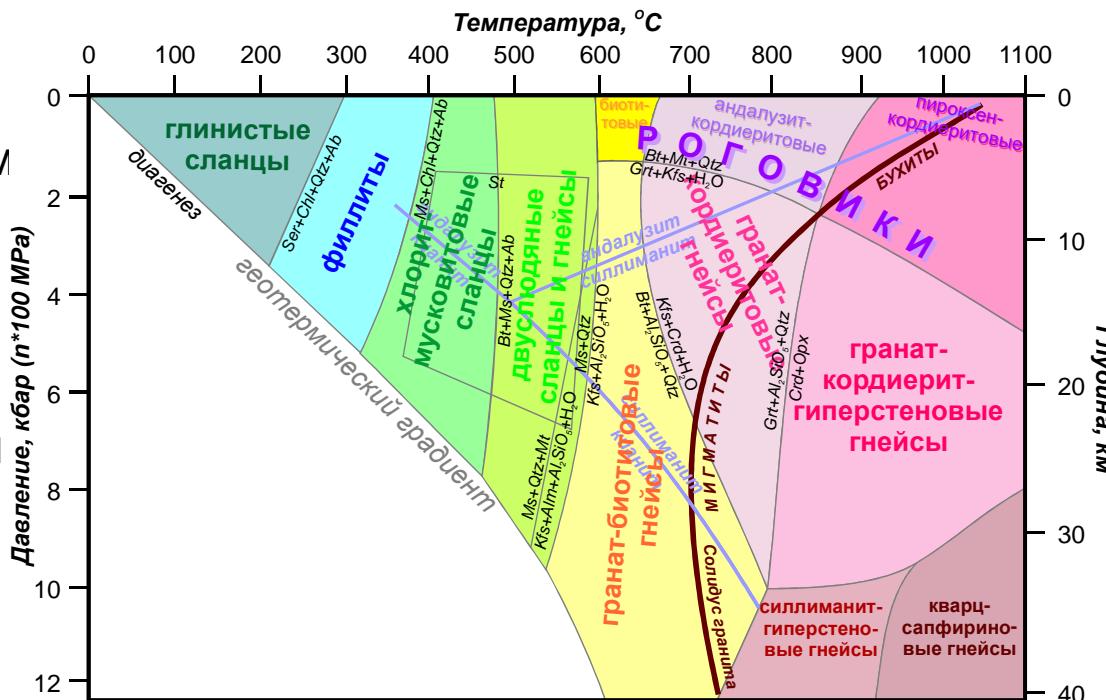
Породы, образующиеся при низком литостатическом давлении и высокой температуре при обязательном присутствии флюидной фазы:

По мере возрастания температуры выделяют:

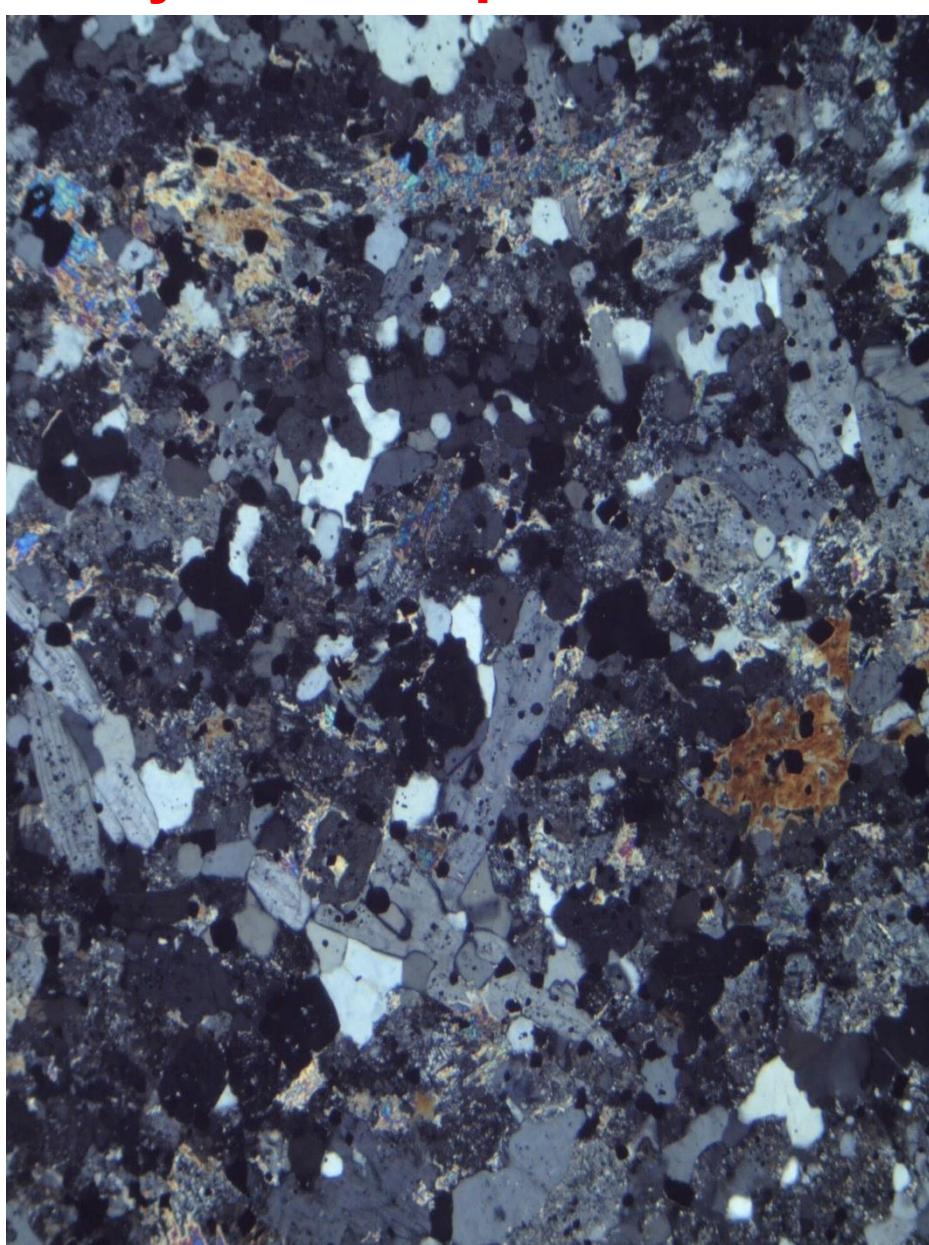
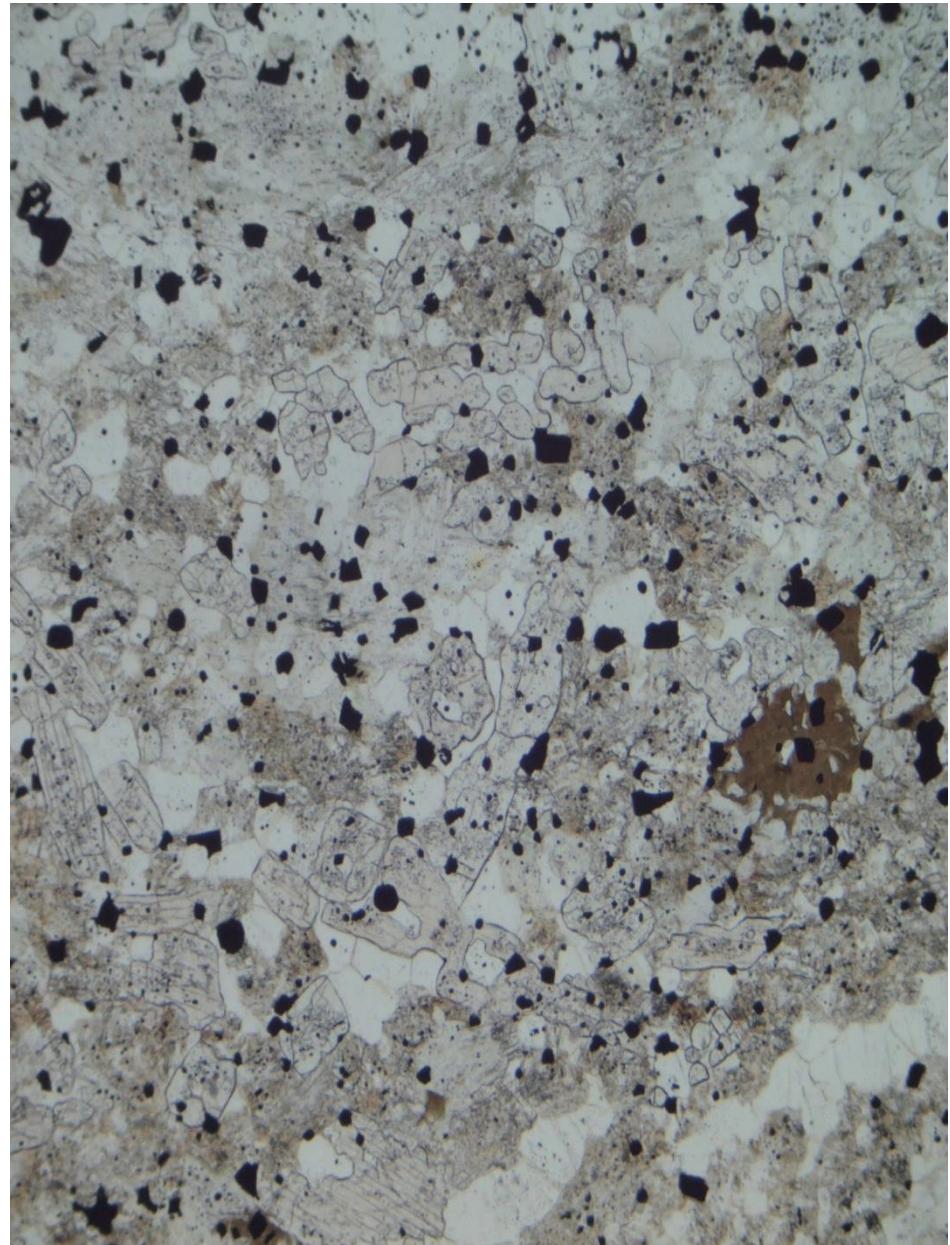
- Биотитовые роговики;
- Андалузит-Кордиеритовые роговики;



Порфироблазты кордиерита



# Bt-Q- андалузитовый роговик



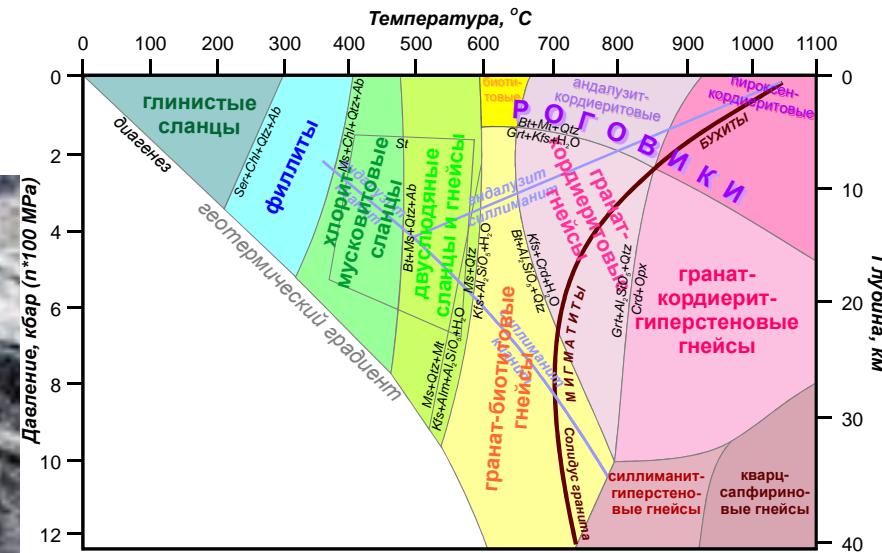
Бухиты – контактовые роговики, возникающие при частичном плавлении вмещающих песчаников, глинистых пород и филлитов.

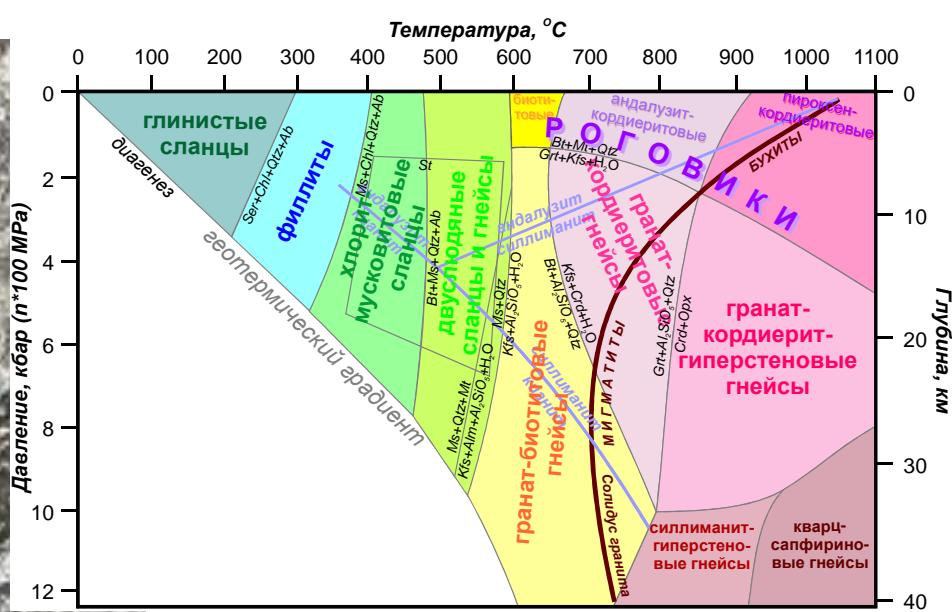
Высокая температура внедряющихся магм вызывает разогрев вмещающих пород с образованием высокотемпературных минералов – санидина, муллита и плавлением вещества.



Муллит-корундовый роговик (бухит)

**Мигматит** [от греч. *migma* - смесь] – состоит из субстрата темного цвета (меланосомы), сложенного метаморфическими образованиями средней и высокой ступени 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.

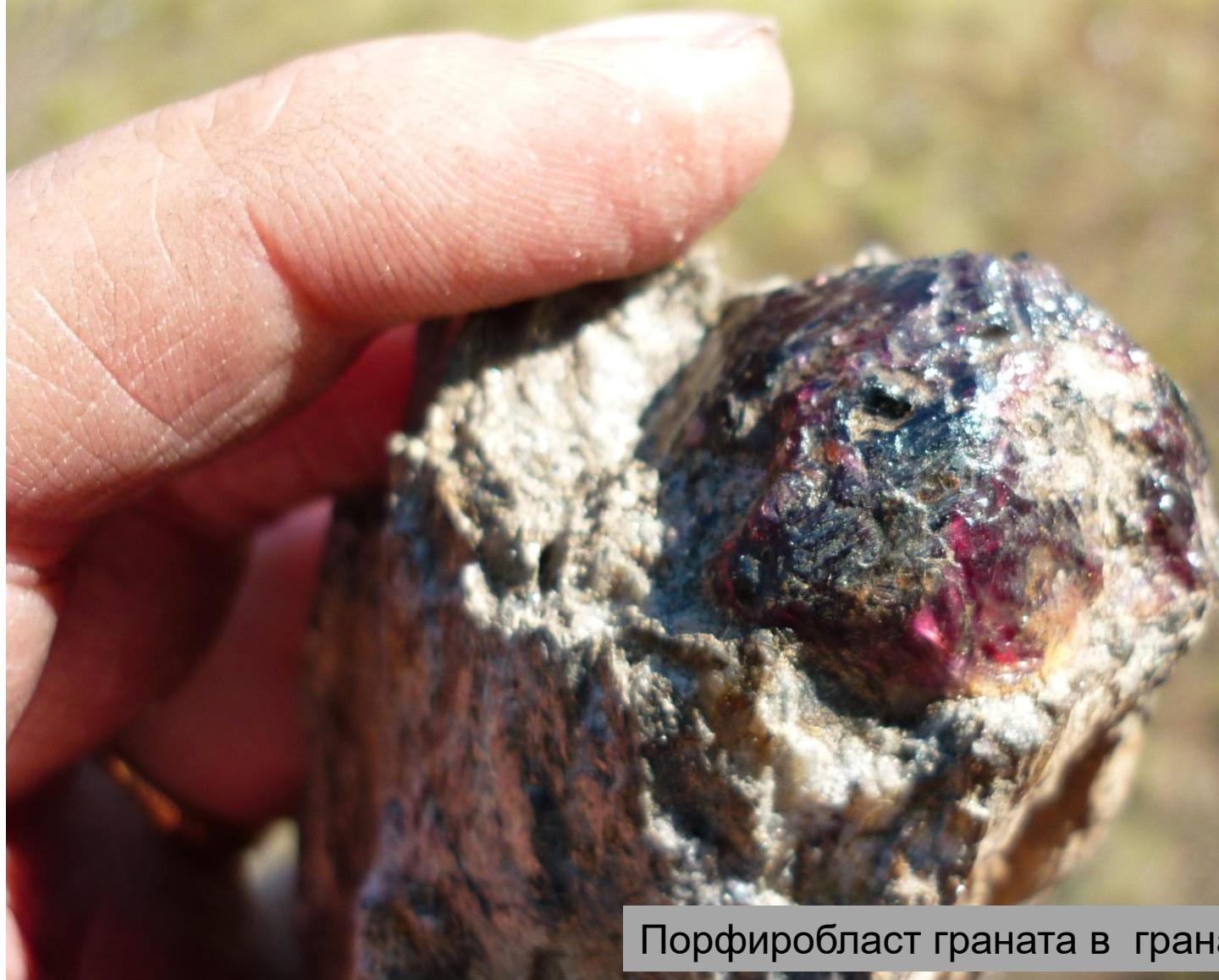


2. Разделение вещества при метаморфизме и перемещение компонентов (метаморфическая дифференциация).
3. Инъекционная природа мигматитов, за счет послойного внедрения гранитной магмы в метаморфические породы.



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