

Лекция № 33

Метабазиты высшей степени

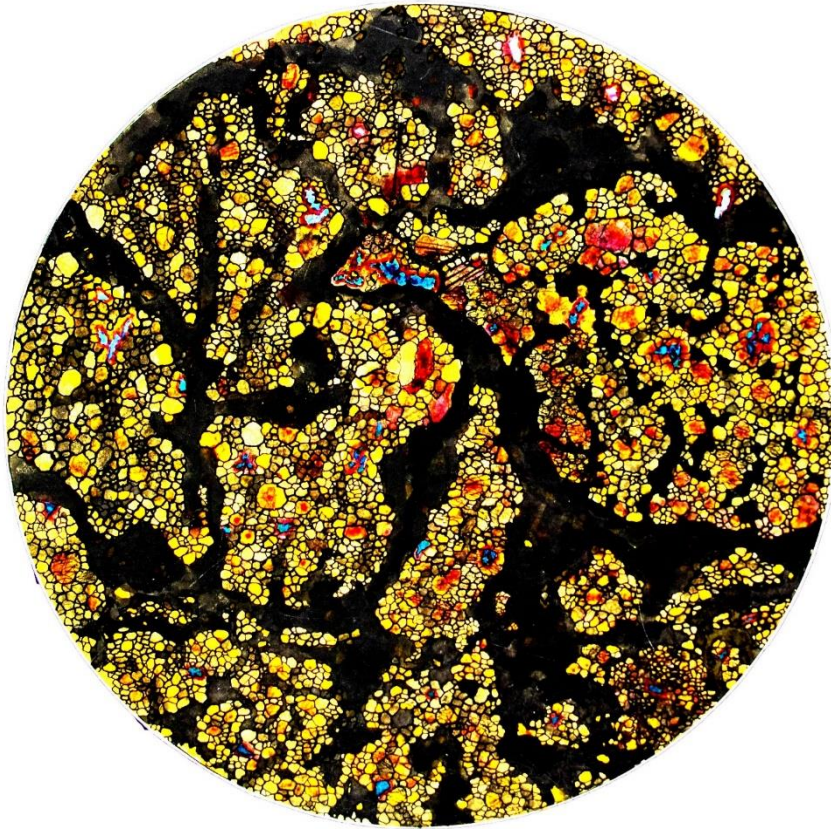
К породам **высшей степени метаморфизма** относятся роговики (условия низких давлений), гранулиты основного состава, глаукофановые сланцы и эклогиты (условия высоких давлений).

Контактовые роговики метабазитового ряда

В условиях **низких давлений** метаморфизм пород метабазитового ряда происходит лишь при высоких температурах ($>500^{\circ}\text{C}$). Вокруг магматических пород локально возникают экзоконтактовые ареолы. Метаморфические преобразования пород происходят под воздействием магматических флюидов (преимущественно H_2O и CO_2), высоких температур и небольших давлений.

Даже при достижении максимальных для метаморфизма температур ($>1000^{\circ}\text{C}$), что возможно при продолжительном тепловом воздействии магматических образований на вмещающие породы, например, при последовательных излияниях потоков базальтов, метабазиты не плавятся в силу их тугоплавкости, и породы типа *бухитов* по ним не образуются.

Минералы роговиков метабазитового ряда



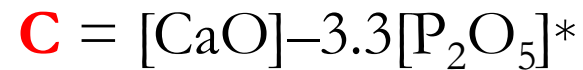
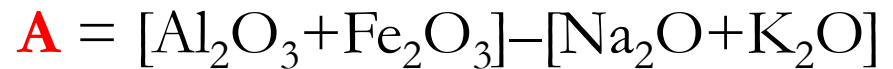
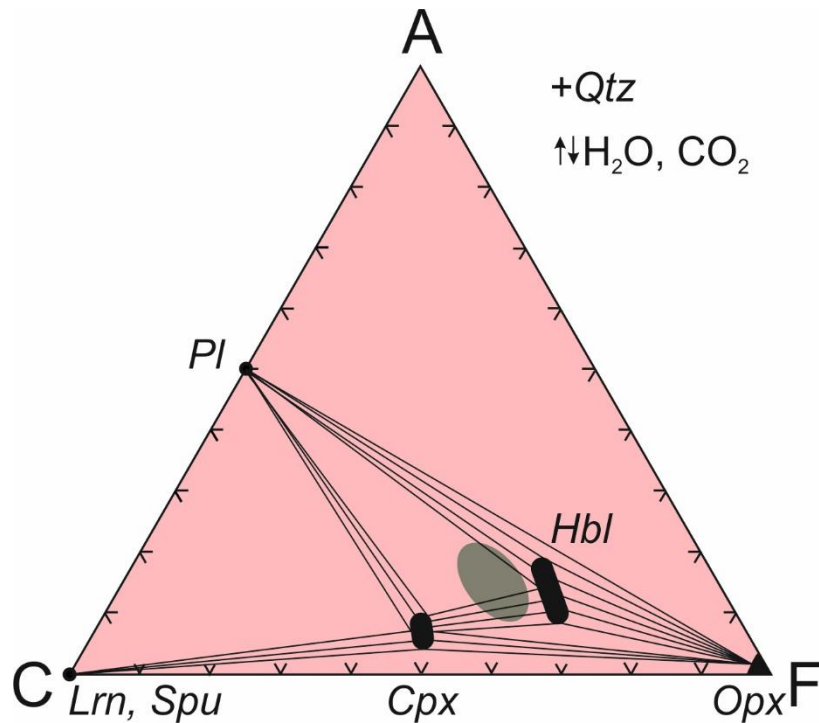
Диопсидовый роговик

В зависимости от *температуры* минеральный состав роговиков меняется следующим образом:

- ❑ плагиоклаз-слюдяные (600–670°C);
- ❑ плагиоклаз-биотит-роговообманковые (670–720°C);
- ❑ плагиоклаз-пироксен-роговообманковые (720–860°C);
- ❑ плагиоклаз-двупироксеновые (860–1050°C);
- ❑ ларнит-спурритовые (900–1100°C).

Ларнит Ca_2SiO_4 и **спуррит** $\text{Ca}_5[\text{SiO}_4]_2(\text{CO}_3)$ – минералы самых высокотемпературных пород, аналогов роговиков *санидинитовой фации* среди метапелитов.

Парагенезисы контактовых роговиков

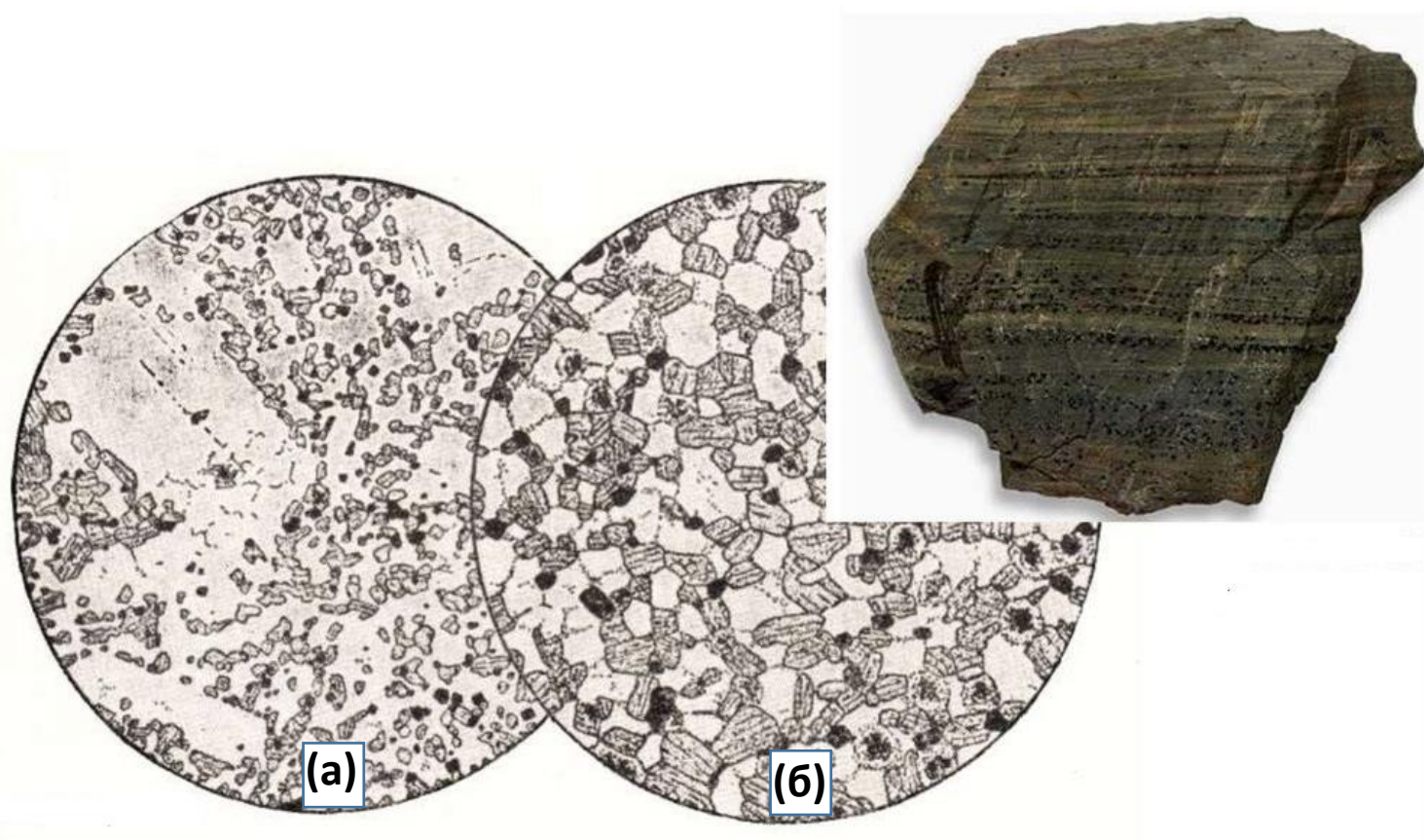


* Ca в составе апатита

Кварц – **избыточный** минерал (может присутствовать во всех парагенезисах и не показывается на диаграмме). H_2O , CO_2 – **вполне подвижные** компоненты.

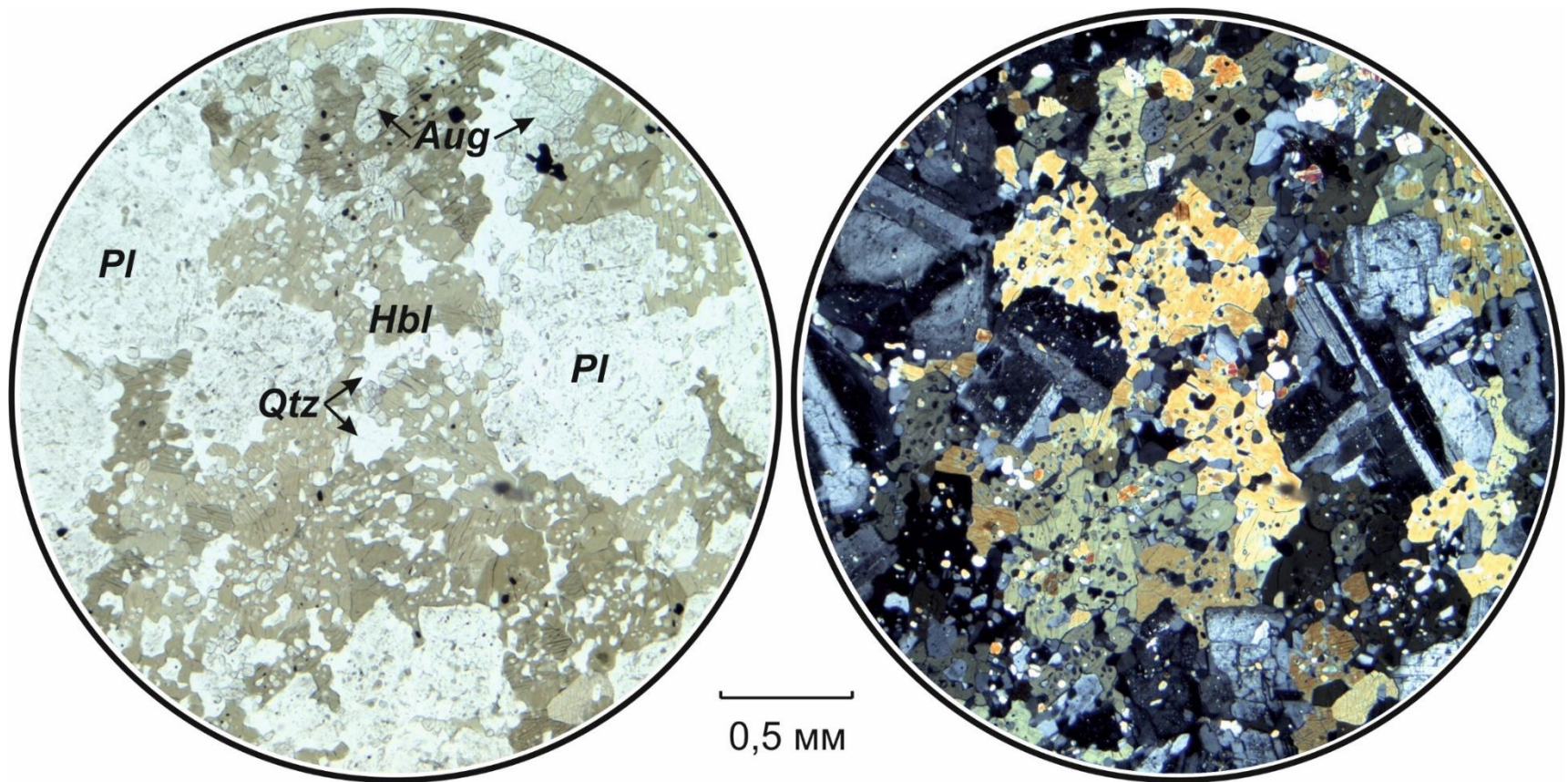
Pl – плагиоклаз, *Qtz* – кварц, *Hbl* – роговая обманка, *Orx* – ортопироксен, *Sprx* – клинопироксен, *Lrn* – ларнит, *Spu* – спуррит. Серое поле – область химического состава ортопород метабазитового ряда (состав наиболее распространенных базальтов).

Структуры контактовых роговиков



Ороговикованный базальт, превращенный в плагиоклаз-пироксеновый роговик, захваченный интрузией габбро: (а) бластопорфировая структура (сохранились реликты структуры базальта); (б) микрогранобластовая структура (реликтовая структура не наблюдается).

Реконструкция протолита роговика



Авгит (*Aug*)–роговообманковый (*Hbl*) роговик имеет бластопорфировую структуру, обусловленную сохранением вкрапленников плагиоклаза в микрогланобластовой кварц-пироксен-амфиболовой основной массе. Это **ортопорода** – бывший авгитовый (плагио)базальт.

Структуры роговиков и температура

- ❑ Более низкотемпературные роговики часто имеют гетеробластовые (бластопорфировые или порфиробластовые) структуры. Для таких пород чаще всего *можно установить протолит.*
- ❑ Чем более высокотемпературным является роговик, тем равномернее зернистость пород. Они становятся более мелкозернистыми и наиболее плотными. В большинстве случаев *протолит* таких пород *определить невозможно.*

Гранулиты

В условиях *умеренного давления* самые высокотемпературные метабазиты представлены породами с массивной, реже сланцеватой и гнейсовидной текстурой и гранобластовой структурой, состоящими из основного плагиоклаза, диопсида или авгита и гиперстена, в которых иногда могут присутствовать гранат и бурая роговая обманка. Такие породы называются ***(дву)пироксен-плагиоклазовыми гранофельсами, кристаллическими сланцами и гнейсами***. Они имеют свое поле на схеме минеральных фаций метабазитов А.А. Маракушева и занимают нижнюю часть области **гранулитов** на международной схеме фаций. С глубиной двупироксен-плагиоклазовые породы сменяются ***гранат-пироксеновыми гранофельсами, сланцами и гнейсами***.

Метаморфизм гранулитовой фации

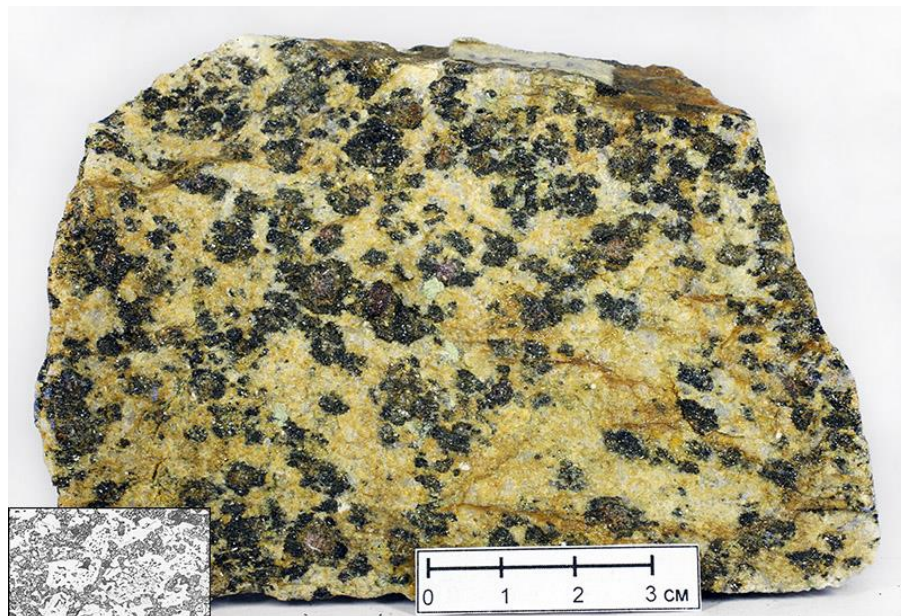
УСЛОВИЯ: $T = \sim 700\text{--}1100^{\circ}\text{C}$, $P \sim 5\text{--}25$ кбар.

Переход амфиболитов в гранулиты (ключевые реакции):

❑ антофиллит $\rightarrow$ гиперстен + кварц + H_2O ;

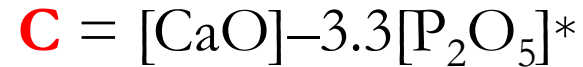
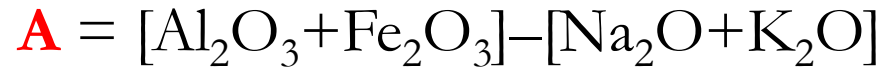
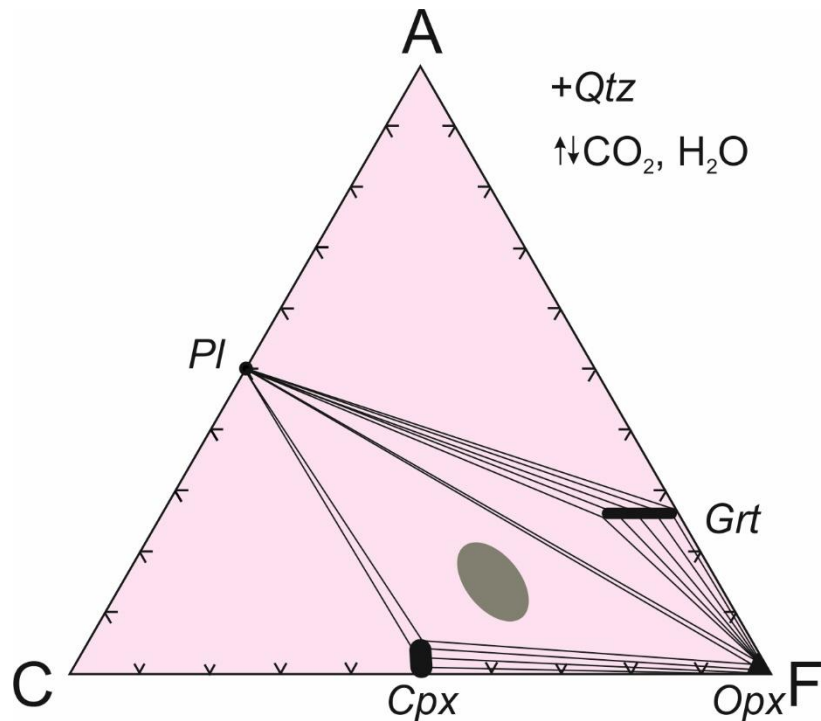
❑ **роговая обманка + кварц $\rightarrow$ плагиоклаз (Ab) + диопсид + гиперстен;**

❑ роговая обманка $\rightarrow$ **гранат** + плагиоклаз (An) + гиперстен + H_2O .



Гранулит пироксен-плагиоклазовый. Порода с неравномерным чередованием участков, обогащенных плагиоклазом, гранатом и пироксеном.

Парагенезисы гранулитов умеренного давления



* Ca в составе апатита

Кварц – **избыточный** минерал (может присутствовать во всех парагенезисах и не показывается на диаграмме). CO₂ (роль увеличивается в гранулитовой фации), H₂O – **вполне подвижные** компоненты.

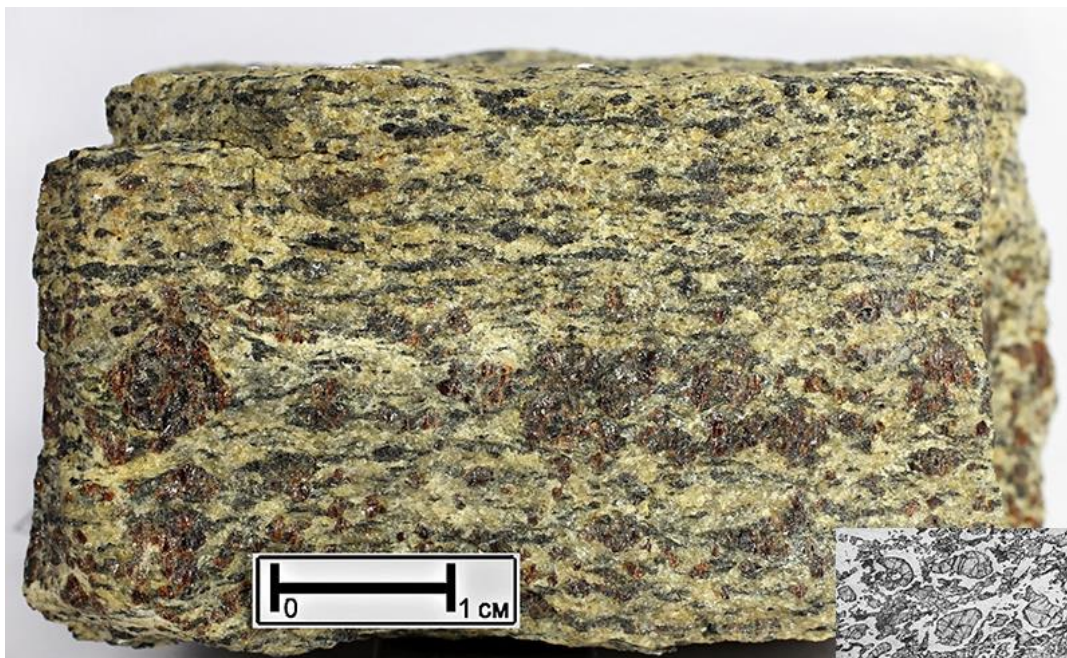
Pl – плагиоклаз, Qtz – кварц, Orpx – ортопироксен, Crpx – клинопироксен, Grt – гранат. Серое поле – область химического состава ортопород метабазитового ряда (состав наиболее распространенных базальтов).

Гранат-пироксеновые гранулиты

Повышение давления в пределах гранулитовой фации будет приводить к реакции, в ходе которой образуются **гранат-пироксеновые ассоциации**:

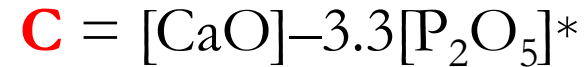
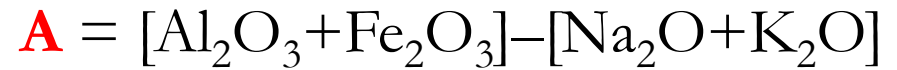
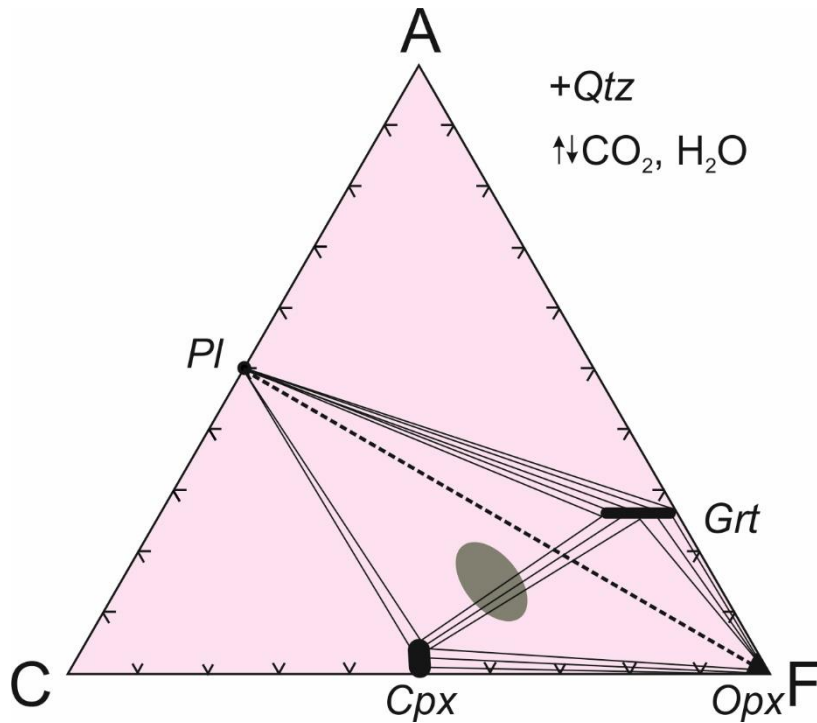
плагноклаз + ортопироксен → гранат + клинопироксен.

Гиперстен в таких породах содержит до 10 мас.% Al_2O_3 , что является полуколичественным показателем глубинности таких пород.



Гранат-пироксеновый гранулит. Порода с отчетливо различимыми порфиробластами граната. Структура порфиробластовая. Текстура полосчатая.

Парагенезисы гранулитов высокого давления



* Ca в составе апатита

Кварц – **избыточный** минерал (может присутствовать во всех парагенезисах и не показывается на диаграмме). CO₂ (роль увеличивается в гранулитовой фации), H₂O – **вполне подвижные** компоненты.

Pl – плагиоклаз, Qtz – кварц, Opx – ортопироксен, Cpx – клинопироксен, Grt – гранат. Серое поле – область химического состава ортопород метабазитового ряда (состав наиболее распространенных базальтов).

Гранат в гранулитах

Гранат в породах метабазитового ряда имеет гроссуляр-пироп-альмандиновый состав и, в отличие от метапелитов, практически не содержит спессартиновый (Mn) минал.

В равновесной ассоциации гранат + диопсид в кальция всегда больше в пироксене, но содержание его в этом минерале обычно несколько меньше теоретического, что указывает на большее сродство граната к кальцию, чем к магнию, и обменная реакция между Mg-Fe гранатом и диопсидом смещена вправо:

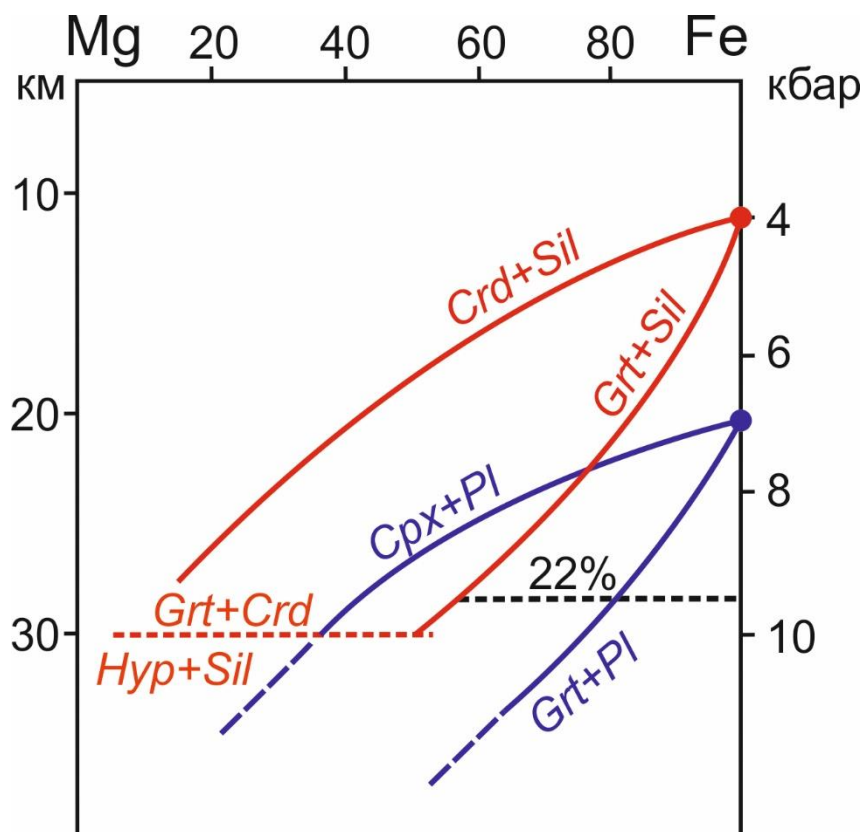


Этим объясняется высокая устойчивость парагенезиса граната с гиперстеном даже в породах, богатых кальцием.

Содержание кальциевого компонента в гранате (гроссуляра), находящемся в равновесии с гиперстеном, может достигать 20 мол. %.

Гранат в метабазитах и метапелитах

Появление граната в метабазитах возможно на глубине не менее 20 км, при давлении ~ 7 кбар. В метапелитах, как уже отмечалось первое появление граната фиксируется уже при давлении ~ 4 кбар (12 км).



В глубинных метаморфических комплексах часто наблюдается совместное присутствие метапелитов и метабазитов. Состав граната в породах, образовавшихся на одной глубине, закономерно отличается: в метабазитах гранат существенно более железистый.

Глаукофановые (голубые) сланцы

Глаукофановые сланцы образуются при температурах 150–500°C в довольно широком интервале давлений (5–25 кбар) и глубин (15–75 км). Стабильность Na-амфиболов и пироксенов в значительной степени определяется равновесием с *водными хлоридно-натриевыми растворами*. Такие растворы имеют эндогенное происхождение или представляют собой захороненные морские воды, вовлеченные в субдукционный процесс.



Минералы глаукофановых сланцев



- ☐ Глаукофан $\text{Na}_2\text{Mg}_3\text{Al}_2[\text{Si}_8\text{O}_{22}](\text{OH})_2$;
- ☐ Лавсонит $\text{CaAl}_2[\text{Si}_2\text{O}_7](\text{OH}) \cdot 2\text{H}_2\text{O}$;
- ☐ Пироксен, богатый жадеитом $\text{NaAlSi}_2\text{O}_6$ и эгирином $\text{NaFeSi}_2\text{O}_6$;
- ☐ Гранат;
- ☐ Стильпомелан;
- ☐ Фенгит;
- ☐ Арагонит;
- ☐ Альбит;
- ☐ Кварц;
- ☐ Титанит и рутил;
- ☐ Хлорит
- ☐ Минералы группы эпидота.

<https://twitter.com/Mashavushanke/status/1123578573095350273>

Лавсонит сменяется эпидотом с ростом температуры по реакции:
лавсонит + глаукофан → **эпидот** + хлорит + альбит + кварц + H_2O .

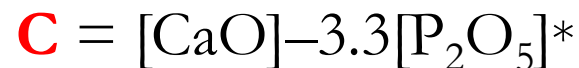
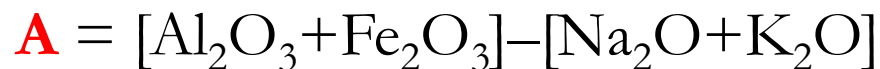
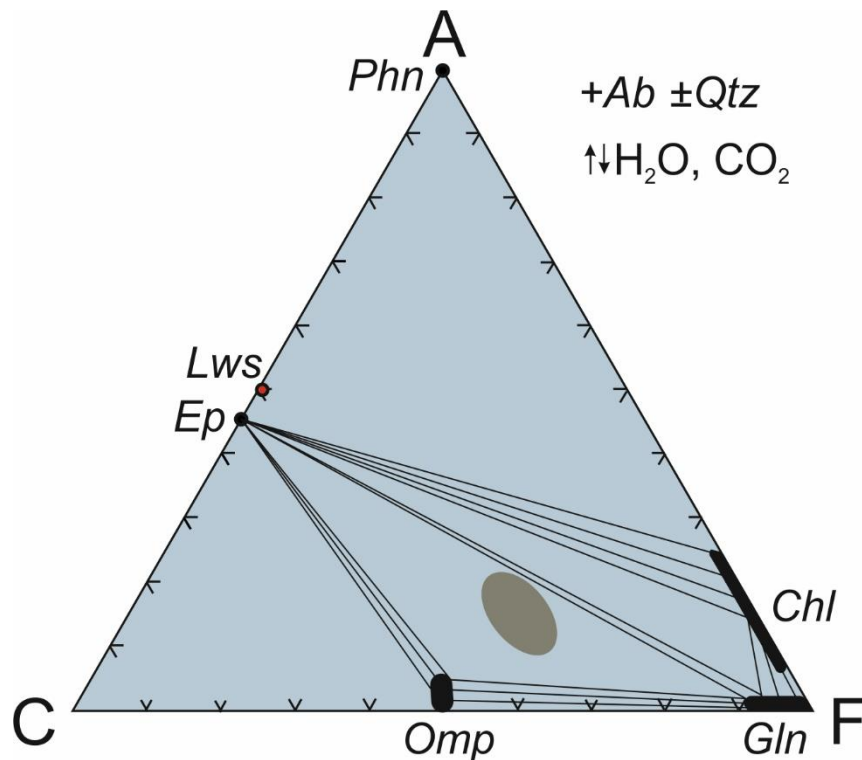
Природа глаукофановых сланцев

Образование глаукофановых сланцев может происходить в результате *аллохимического* и *изохимического* метаморфизма.

Свидетельством ***аллохимического метаморфизма*** является развитие глаукофановых сланцев по породам широкого химического спектра (например, от серпентинитов до метасилицитов во Францисканской формации, Калифорния, США), а также образование в породах многочисленных прожилков кальциевых минералов (в первую очередь, эпидота).

При *изохимическом* метаморфизме валовый состав пород не меняется: в них обычно меньше натрия и, как следствие, глаукофана. В этом случае глаукофановые сланцы могут образовываться в ходе прогрессивного (по пренит-пумпеллиитовым и зеленым сланцам) или регрессивного (по амфиболитам и эклогитам) процессов.

Парагенезисы глаукофановых сланцев

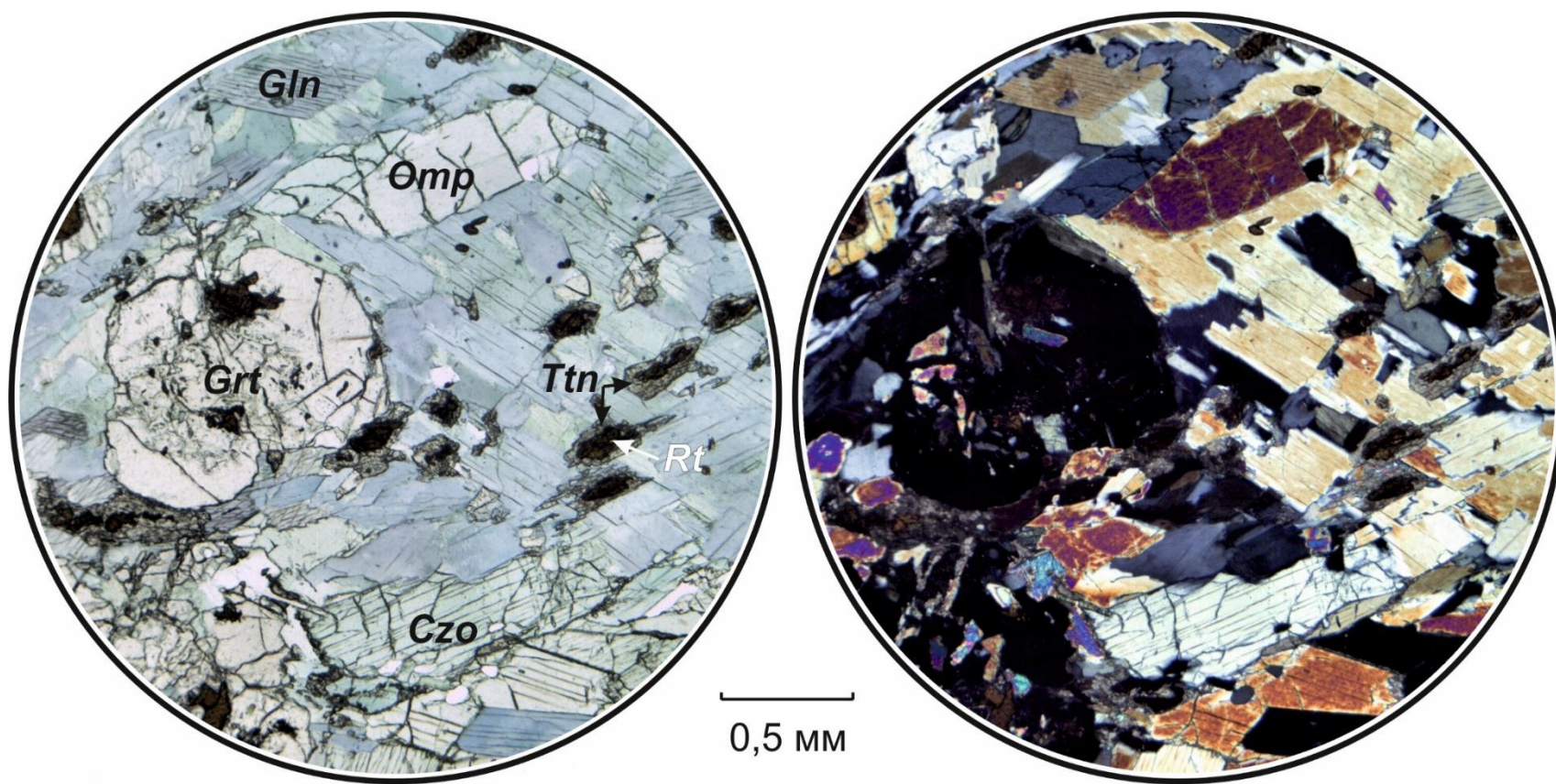


* Ca в составе апатита

Кварц – **избыточный** минерал (может присутствовать во всех парагенезисах и не показывается на диаграмме). H_2O , CO_2 – **вполне подвижные** компоненты.

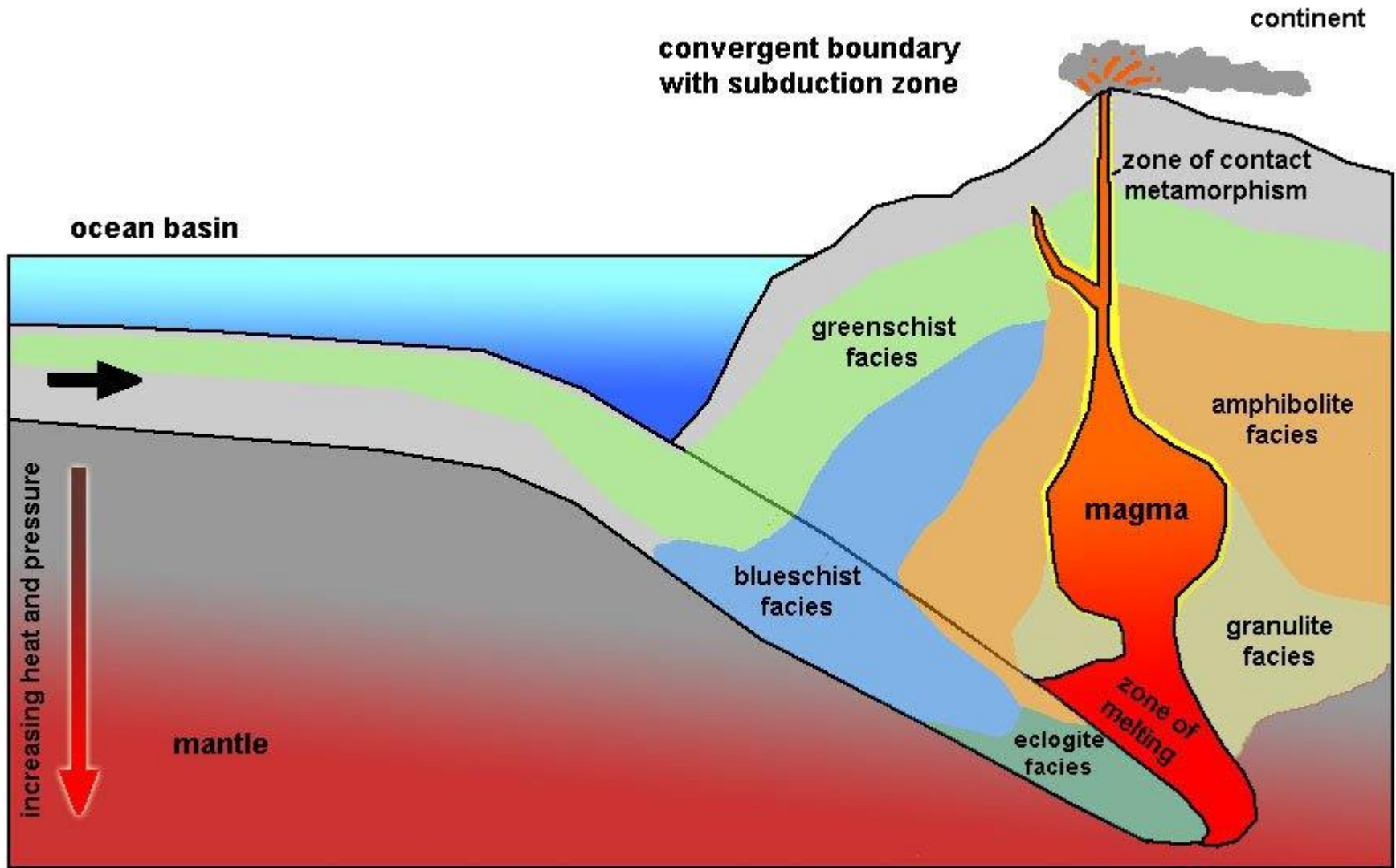
Pl – плагиоклаз, *Qtz* – кварц, *Hbl* – роговая обманка, *Orx* – ортопироксен, *Srx* – клинопироксен, *Lrn* – ларнит, *Spr* – спуррит. Серое поле – область химического состава ортопород метабазитового ряда (состав наиболее распространенных базальтов).

Глаукофановый сланец в шлифе



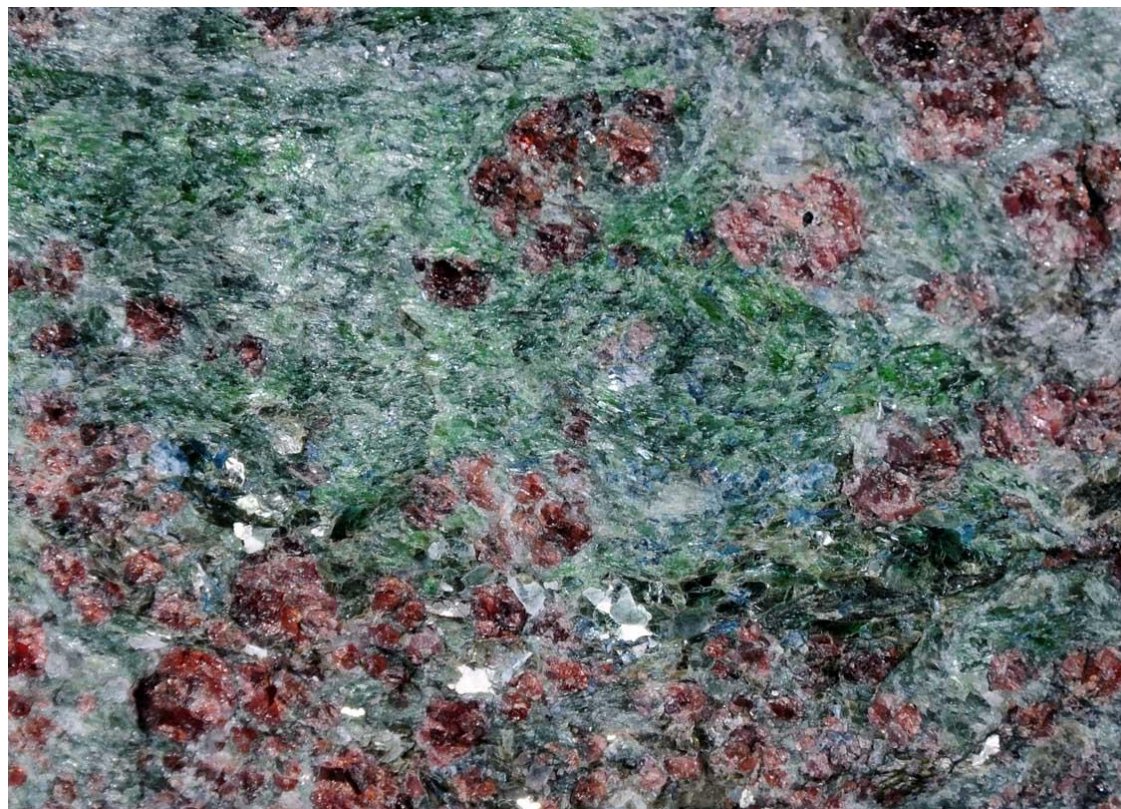
Апоэклогитовый (гранат + омфацит, *Grt* + *Omp*) клиноцоизит (*Czo*)-глаукофановый (*Gln*) сланец с рутилом (*Rt*), зерна которого повсеместно окружены каймами титанита (*Ttn*) – признак регрессивных преобразований.

Глаукофановые сланцы в зонах субдукции



Фация эклогитов

Эклогиты образуются при температурах выше 450 – 500 °С и давлениях не менее 10 кбар. Встречаются разновидности, образовавшиеся при гораздо более высоком давлении (30–40 кбар и более). Условия генезиса таких пород могут соответствовать *алмазной фации глубинности*.



Эклогит. Nordfjord, Норвегия. Красные зерна – гранат, зеленая масса – омфациит, мелкие голубые кристаллы – кинанит.

Минеральный состав эклогитов

Главные породообразующие минералы:

- ❑ **гранат** пироп-гроссуляр-альмандинового состава;
- ❑ **омфацит** – пироксен жадеит-геденбергит-диопсидового состава (концентрация жадеита $\text{NaAlSi}_2\text{O}_6$ – качественный индикатор давления).

Указанный парагенезис соответствует составу *биминеральных эклогитов*.

Прочие минералы (преимущественно второстепенные и акцессорные):

Кварц, кианит, эпидот, фенгит (твердый раствор мусковита и селадонита), амфиболы (в основном, глаукофан) и другие.

Эклогиты не содержат плагиоклаза!

Куда исчезает плагиоклаз?

При увеличении давления сначала *альбитовый*, а затем и *анортитовый* компоненты плагиоклаза вступают в метаморфические реакции, приводящие к образованию компонентов ***пироксена*** и ***граната***.

Альбит $\rightarrow$ жадеит + кварц.

Мы снова сталкиваемся с увеличением координационного числа Al с давлением в ходе метаморфической реакции: *альбит* $\text{Na}\{\text{Al}^{(\text{IV})}\text{Si}_3\text{O}_8\}$, **жадеит** $\text{NaAl}^{(\text{VI})}[\text{Si}_2\text{O}_6]$.

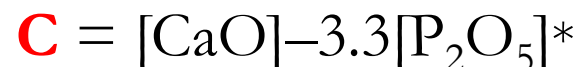
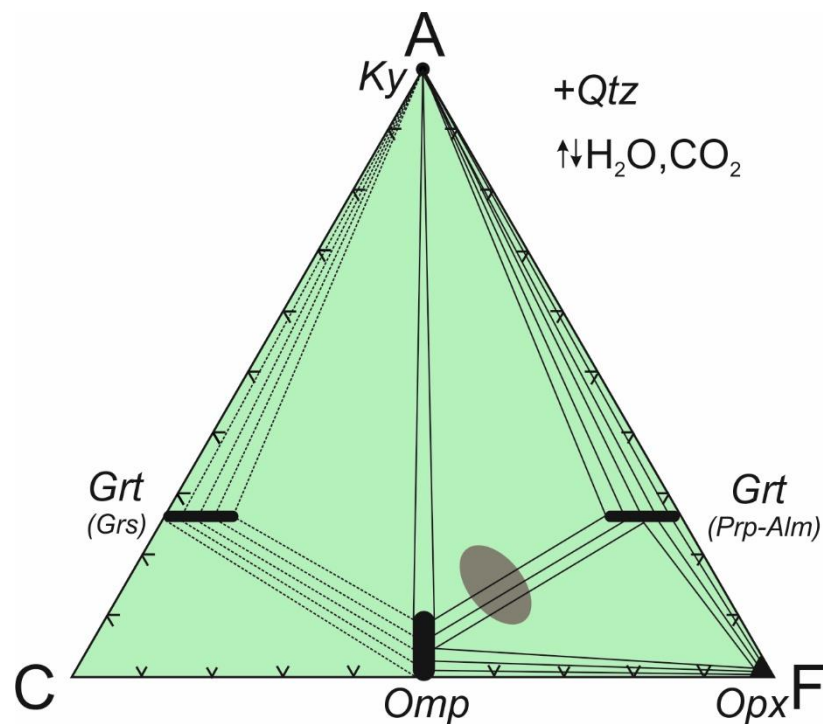
3 *Анортит* $\rightarrow$ **гроссуляр** + 2 кианит + кварц.

Координационное число Al тоже увеличивается: анортит $\text{CaAl}^{(\text{IV})}_2\text{Si}_2\text{O}_8$, гроссуляр $\text{Ca}_3\text{Al}^{(\text{VI})}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$.

Анортит + диопсид $\rightarrow$ 2/3 **гроссуляр** + 1/3 **пироп** + кварц.

Анортит + 2 энстатит $\rightarrow$ 1/3 **гроссуляр** + 2/3 **пироп** + кварц.

Парагенезисы эклогитов



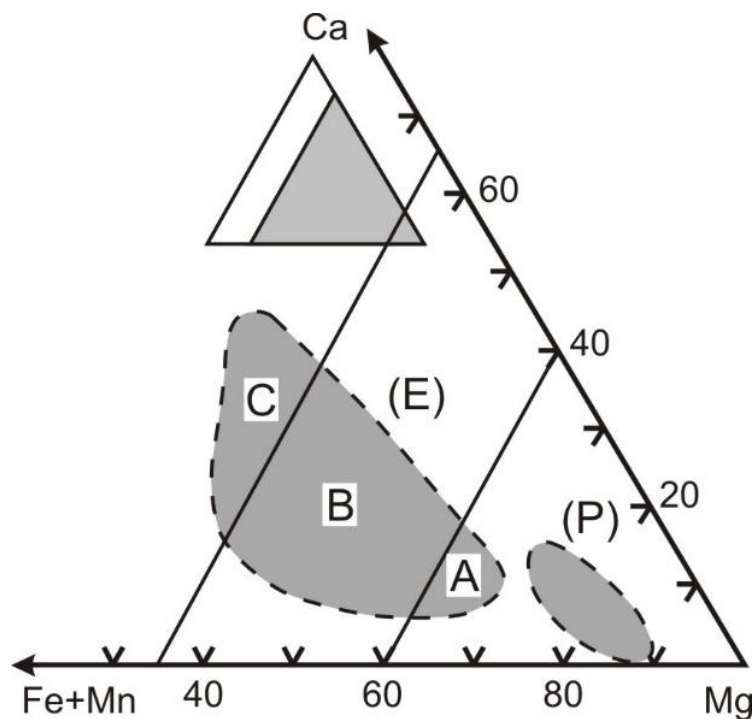
* Ca в составе апатита

Кварц – **избыточный** минерал (может присутствовать во всех парагенезисах и не показывается на диаграмме). H_2O , CO_2 – **вполне подвижные** компоненты.

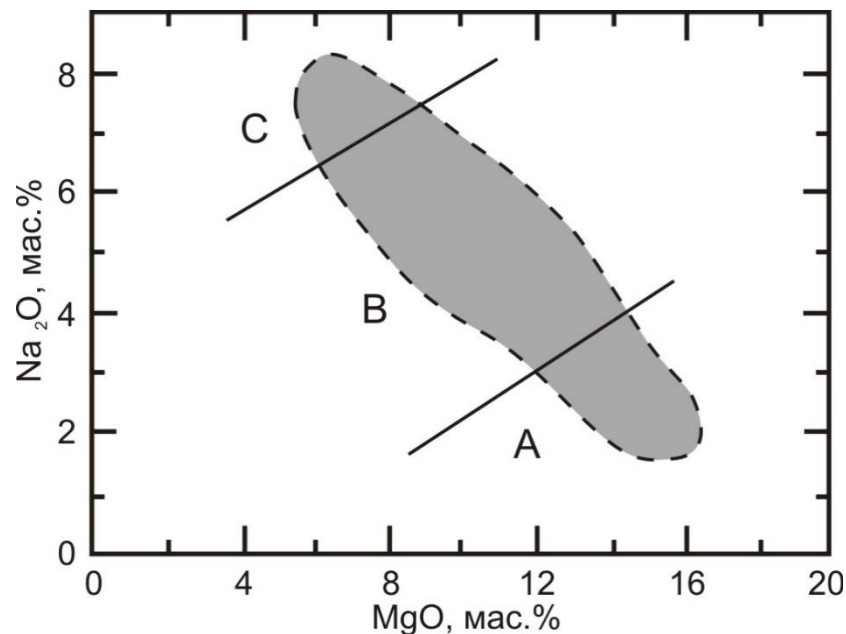
Grt – гранат (*Prp-Alm* – пироп-альмандин, *Grs* –grossуляр), *Omp* – омфациит, *Qtz* – кварц, *Orx* – ортопироксен, *Ky* – киданит. Серое поле – область химического состава ортопород метабазитового ряда (состав наиболее распространенных базальтов). Левая часть диаграммы (ассоциация *Grs*–*Omp*–*Ky*) соответствует *гросидитам* (редкие породы).

Разделение эклогитов на группы

Эклогиты традиционно подразделяются на три генетические группы: (А) мантийные; (В) коллизионные; (С) субдукционные. Это деление находит отражение в составах граната и клинопироксена эклогитов.



Гранат



Клинопироксен

Парагенезисы: (Е) эклогитовый; (Р) перидотитовый.

Разделение эклогитов на группы

(А) Мантийные эклогиты — ксенолиты в кимберлитах и лампроитах.

Образуются при высоких температурах ($>800^{\circ}\text{C}$), могут содержать в своем составе алмаз.



Ксенолит эклогита в кимберлите
из трубки им. В. Гриба
(Архангельская провинция)



Кристалл алмаза на поверхности
ксенолита эклогита в кимберлите
из трубки Удачная (Якутия)

Разделение эклогитов на группы

(В) Коллизионные эклогиты — линзовидные и пластовые тела в гнейсах, мигматитах и амфиболитах.

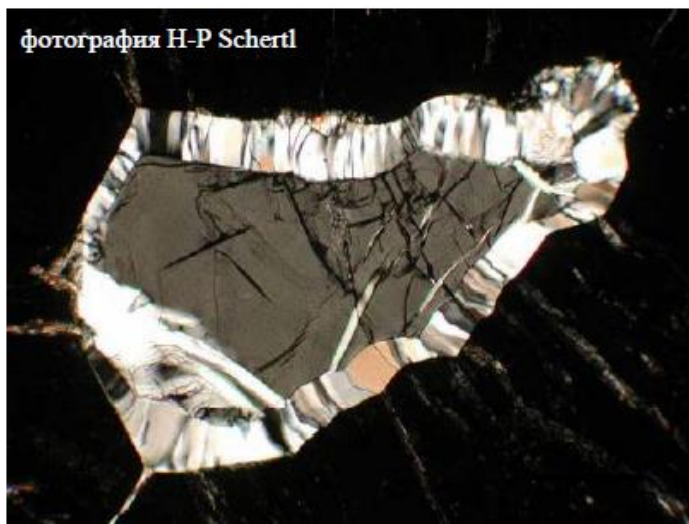
Они представляют собой коровые метаморфические породы, образованные при умеренных температурах в широком диапазоне давлений (Западная Норвегия, Передовой хребет Большого Кавказа, Западное Беломорье).

(С) Субдукционные эклогиты — будины и слои в глаукофановых и слюдяных сланцах.

Для этих пород характерны относительно низкие температуры (Францисканская формация, Калифорния, США; пояс Самбагава, Япония).

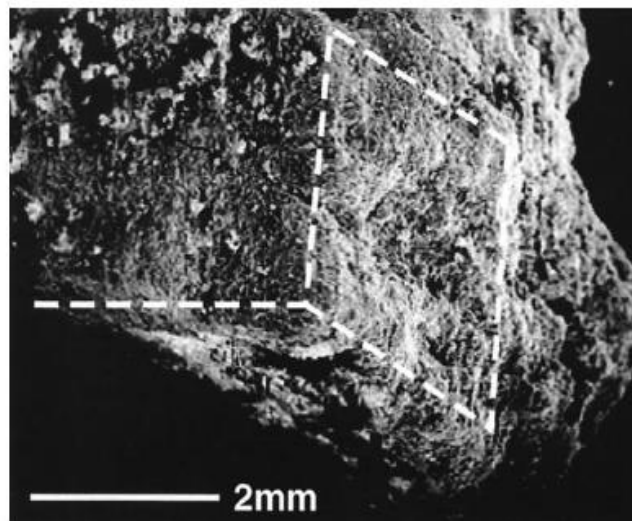
Метаморфические комплексы сверхвысокого давления (UHP)

Минералогическими индикаторами таких комплексов является присутствие в породах **минералов высоких давлений** (алмаза, коэсита), или достоверно установленных продуктов их регрессивных преобразований.



Включение коэсита в гранате из пиропового кварцита, Дора Майра, Зап. Альпы.

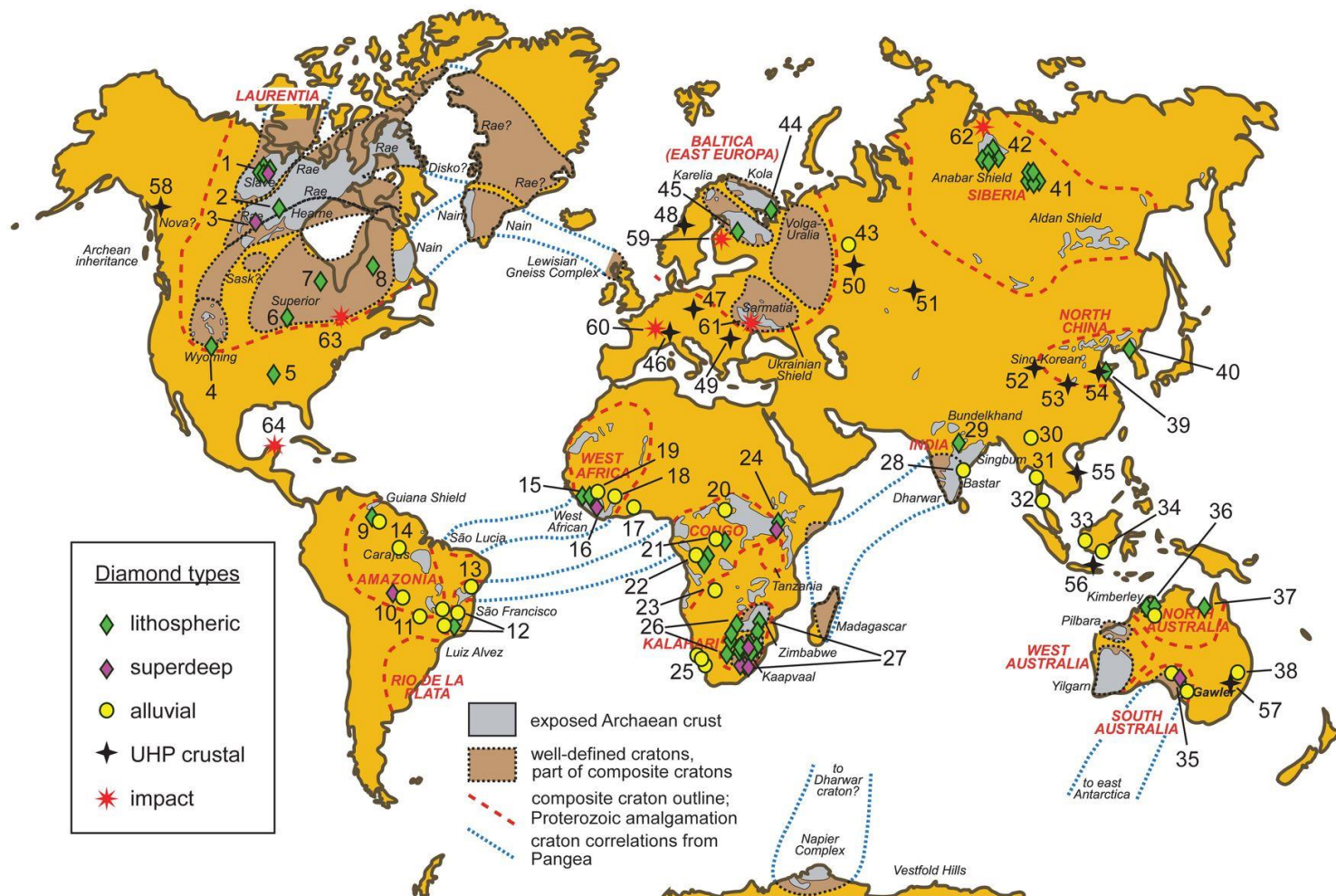
(фото из лекции А.Л. Перчука)



Кубическая парамарфоза графита по алмазу в эклогитах Максютковского комплекса, Южный Урал.

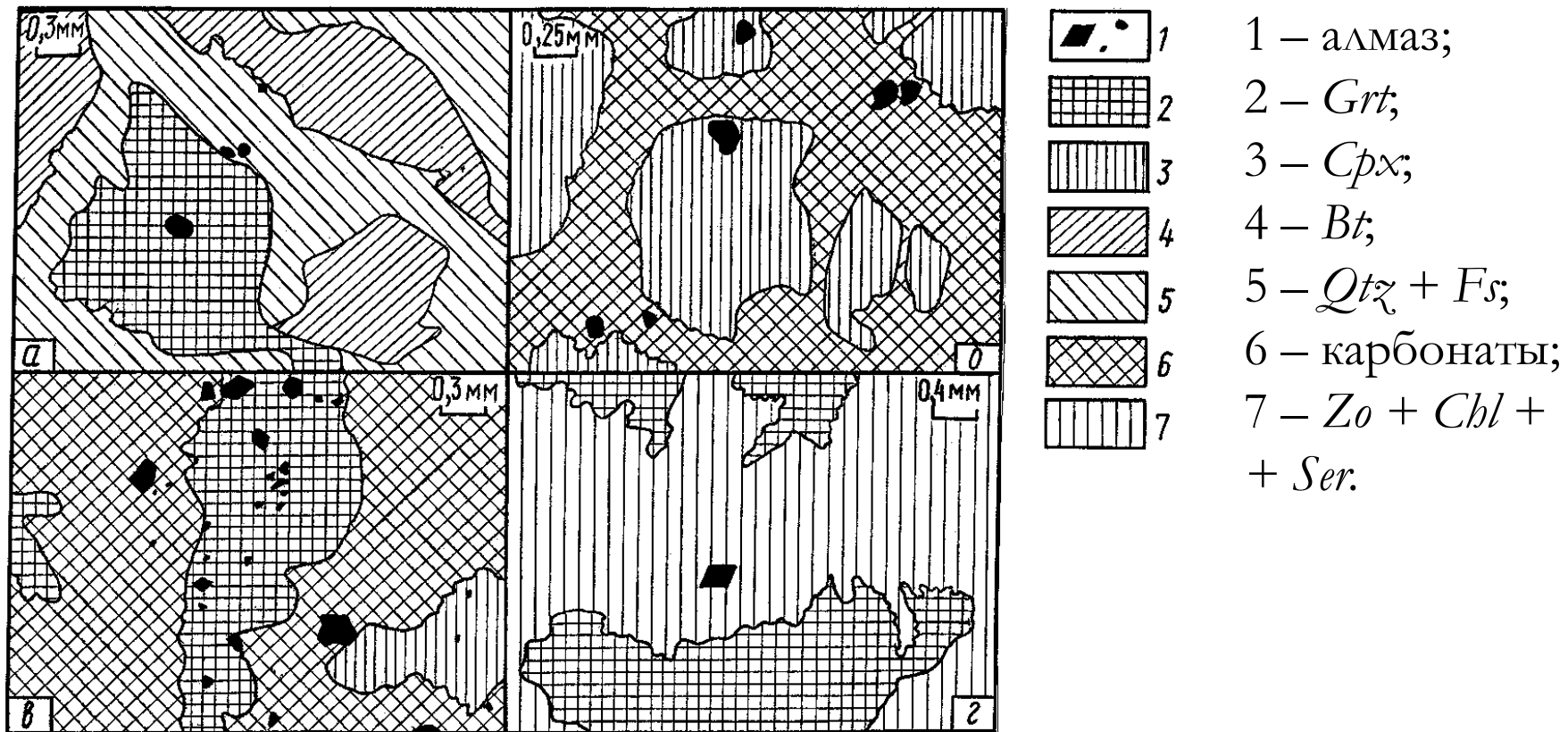
(Leech & Ernst, 1998)

Алмазоносные UHP комплексы

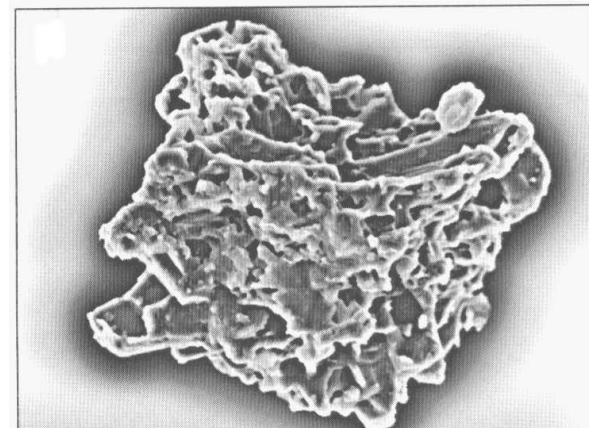
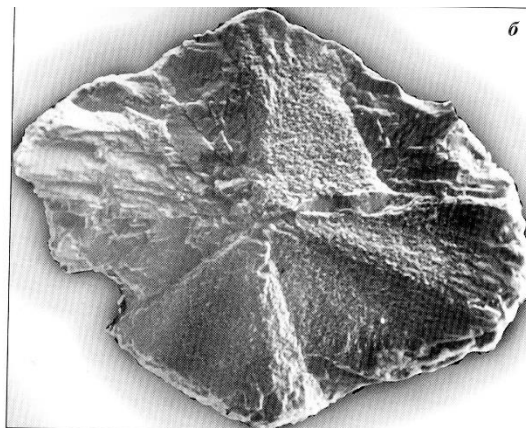
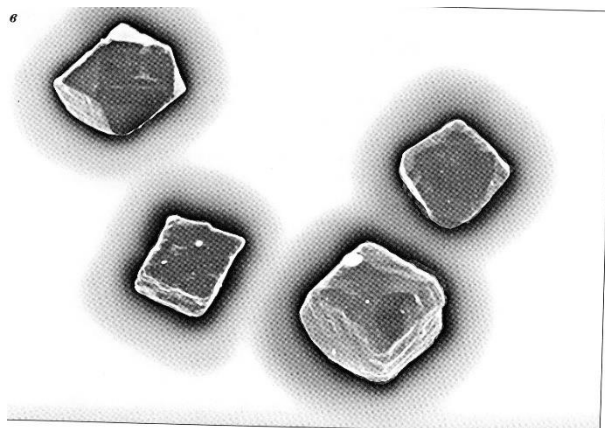
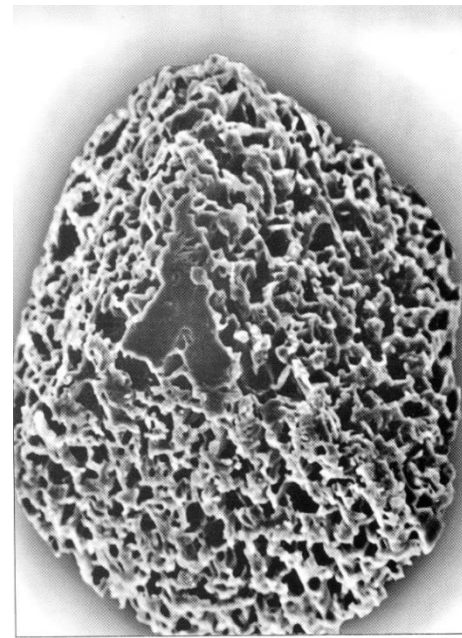
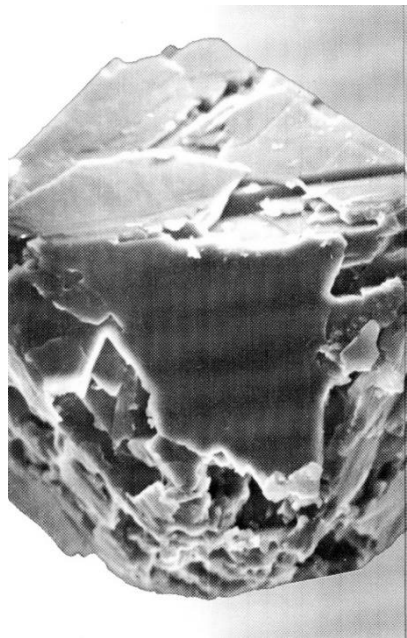
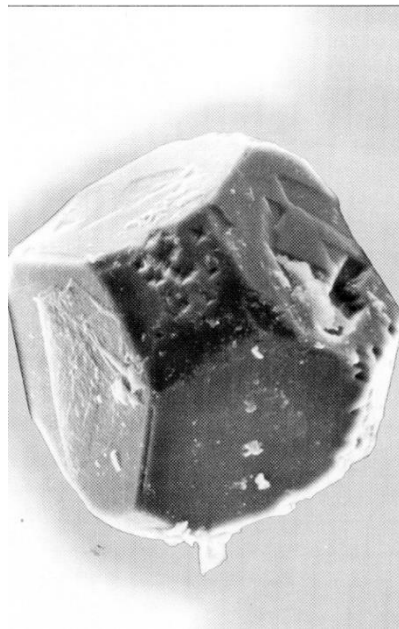
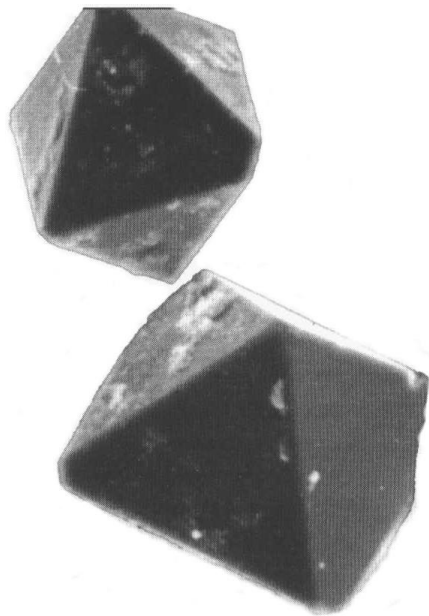


48 – Вестерн Гнейс Риджн (Норвегия); 49 – Родопы (Греция); 50 – Максютровский комплекс; 51 – Кокчетав; 53 – Дабешань; 54 – Сулу.

Алмаз Кокчетавского комплекса



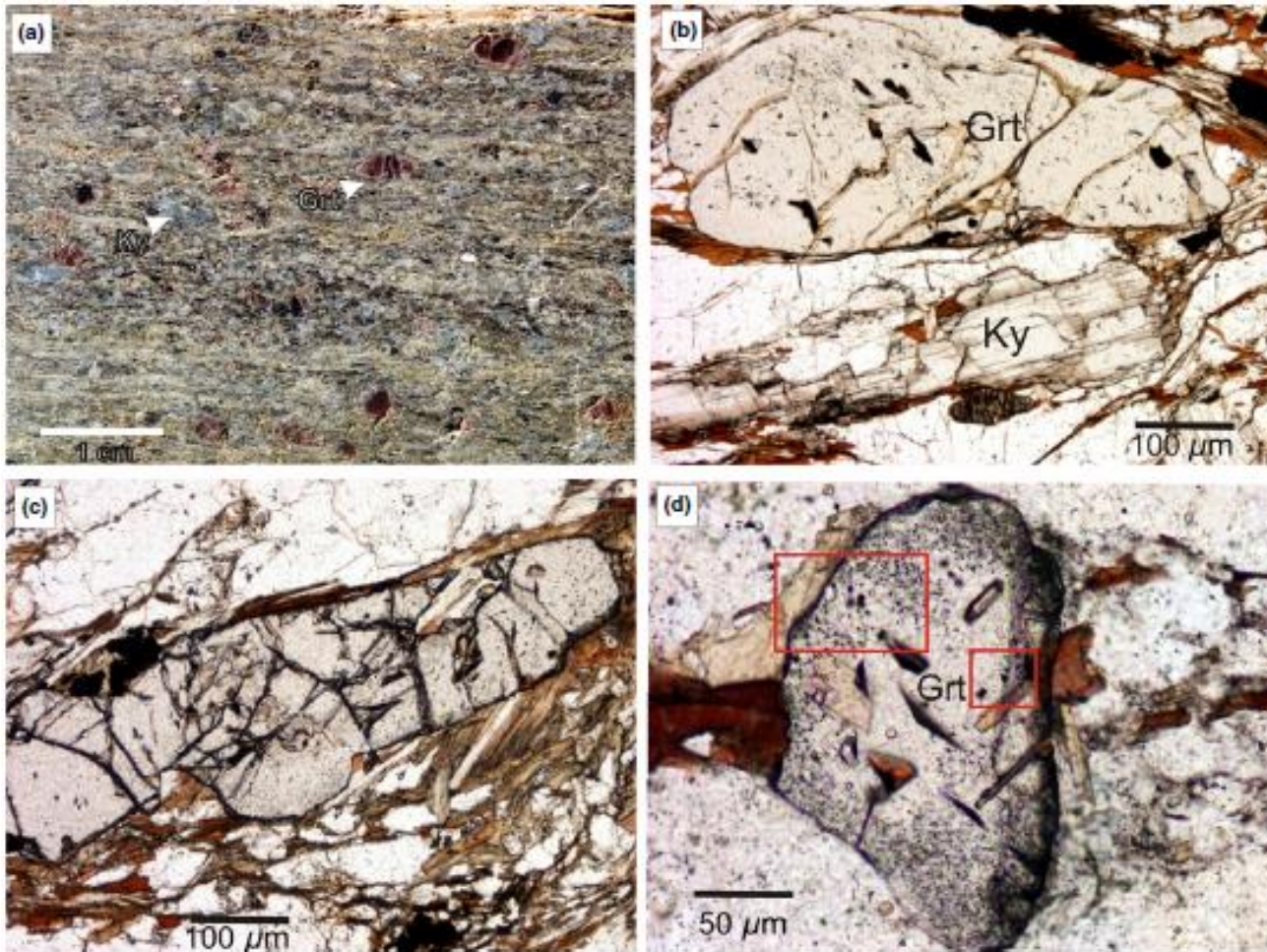
Алмаз Кокчетавского комплекса



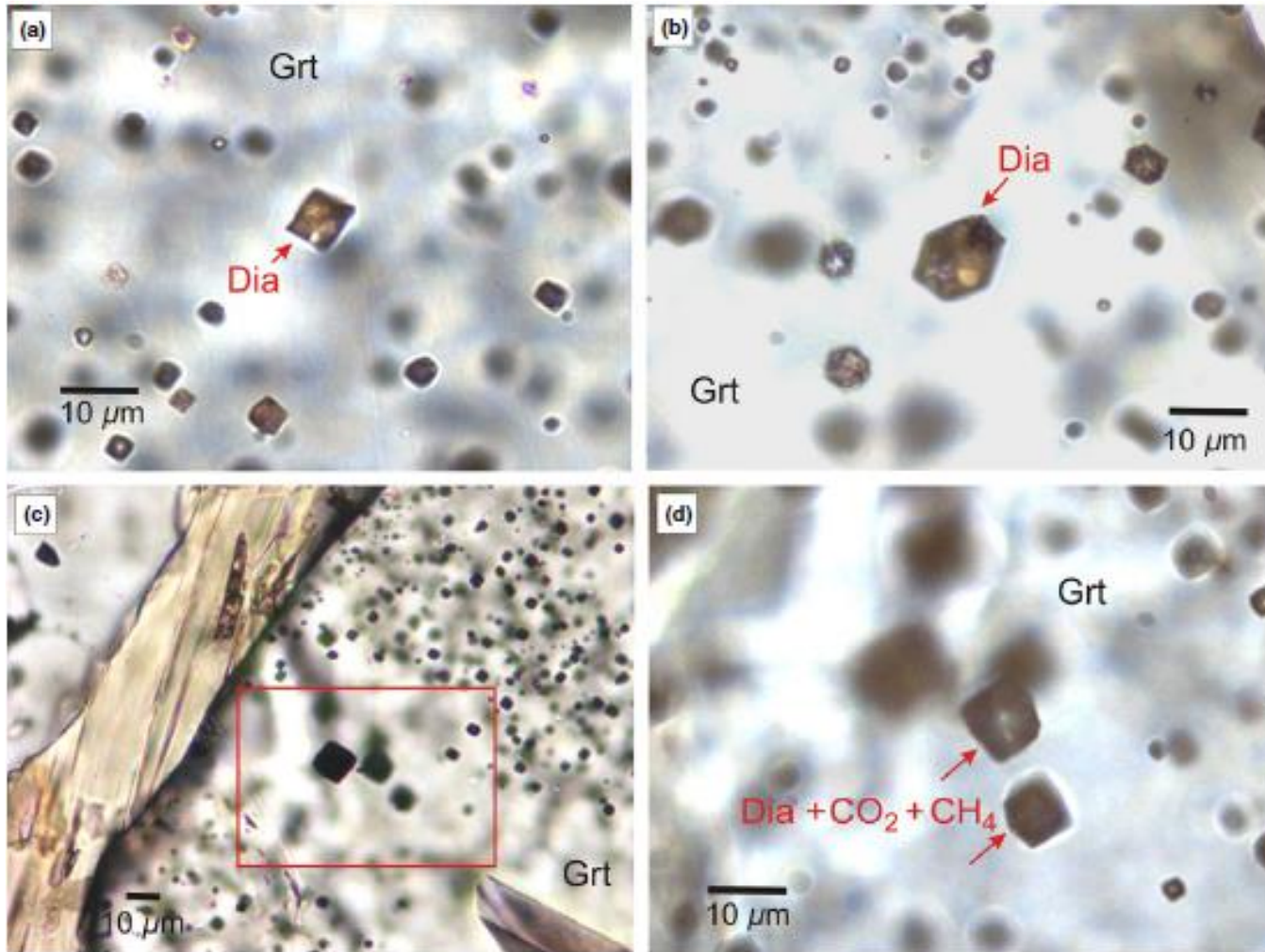
Размеры кристаллов — десятые — сотые доли мм.

[Заячковский, Надеждина, 1995]

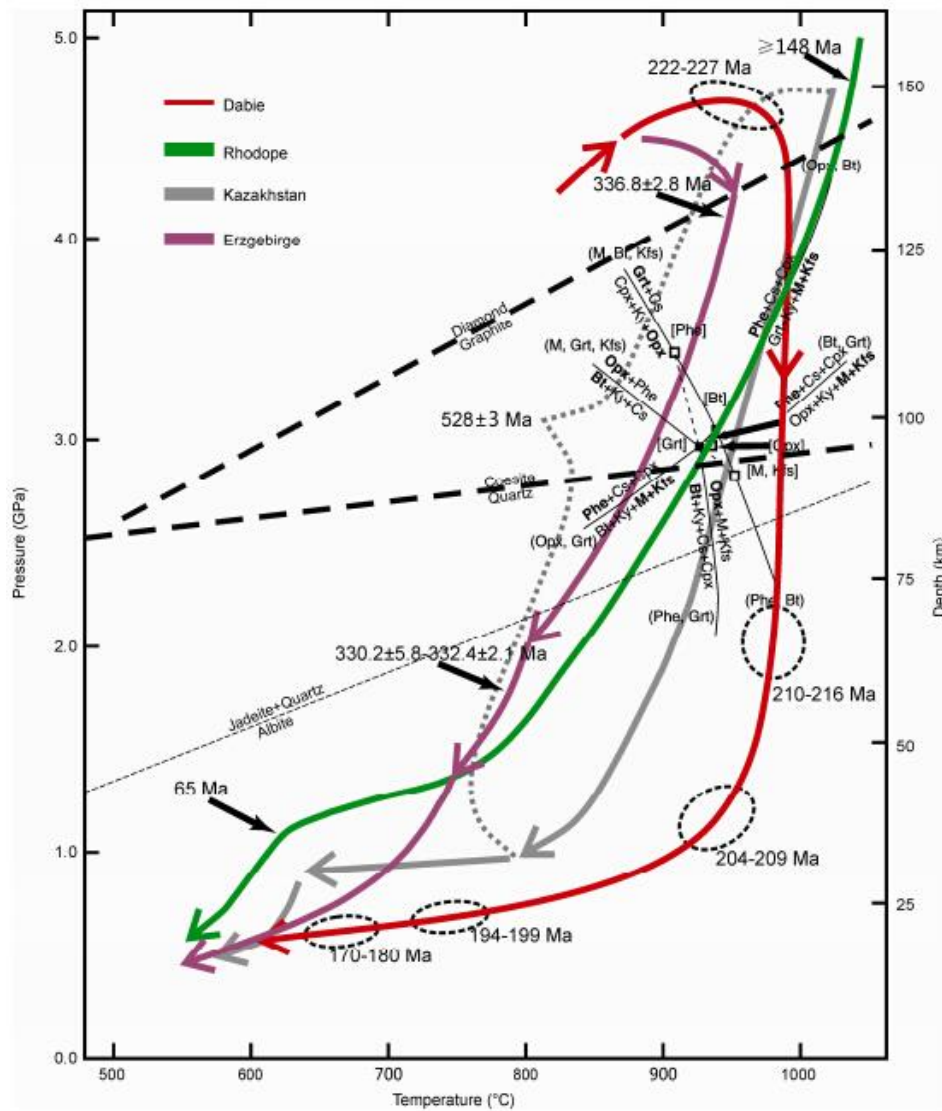
Гранат-кианитовые алмазоносные гнейсы (Восточные Альпы)



Гранат-кианитовые алмазоносные гнейсы (Восточные Альпы)



P-T тренды алмазоносных комплексов



(Liu et al., 2015)

Гипотеза метаморфизма коровых пород в процессе субдукции при ультравысоких давлениях возникла в конце 1970-х годов. Она была предложена для объяснения происхождения эклогитов Норвегии, образованных по габбро в Норвегии. Возможность погружения корового материала на глубину 85–95 км была обоснована находками коэсита в этих породах, образование которого соответствует давлениям 26–30 кбар при $T = 1100^{\circ}\text{C}$.

Происхождение алмазоносных комплексов

Позднее глубины погружения корового материала при субдукционных процессах были расширены до 150 км, что соответствует давлениям 31–45 кбар и температурам 600–1100°C, при которых возможна кристаллизация алмаза. Его связь именно с коровыми породами доказывается резко облегченным составом углерода алмаза.

Позднее блоки алмазоносных пород были снова подняты на поверхность, причем, согласно расчетным моделям (например, Перчук и др., 1998), скорость подъема может составлять 2–10 см/год. Алмазы метаморфогенного происхождения не всегда могут выдержать подъем из земных глубин на поверхность. В результате вместо алмаза в таких высокобарических образованиях могут возникать кубические параморфозы графита по его кристаллам, т. е. графит со всеми морфологическими признаками алмазов. Такие необычные образования на сегодняшний день известны на Урале (Максютовский комплекс), в Испании и Марокко.