

Процессы минералообразования

Онтогения минералов

«Драгоценные камни не только живут, но и страдают от болезней, впадают в старость и умирают». Трактат «О самоцветах и цветах», Джироламо Кардано, 1501-1576.

Михаил Александрович Толстопятов (1836-1890) – говорил о анатомии кристаллов.

"Минералы рождаются, живут, борются и погибают побежденные. Их место занимают победители, чтобы подвергнуться той же участи. Идет непрерывный обмен веществ". Павел Прокопьевич Пилипенко, 1877-1940.

В.И.Вернадский и А.Е.Ферсман заложили основы генетической минералогии. Неудивительно, что учение о онтогении минералов начало развиваться именно в СССР.

Онтогения минералов

Григорьев Дмитрий Павлович
(1909-2003) — основоположник
онтогении минералов.

Онтогения — раздел генетической
минералогии, в котором изучается
зарождение, развитие, преобразование и
разрушение минералов и их агрегатов.



Д.П.Григорьев



А.Г. Жабин

Значительный вклад в развитие
этого направления внесли Г.Г.
Леммлейн, И.И. Шафрановский,
Ю.М. Дымков, А.Г. Жабин, Н.П.
Юшкин и др.

Среды минералообразования

1. Жидкие (расплавы, водные растворы - эндогенные и экзогенные)
2. Газ (вулканические газы, горючие газы, атмосфера)
3. Коллоидные растворы
4. Твердые вещества

Жидкие среды

Магма — обычно силикатный расплав; в магме существуют простые и комплексные катионы, анионы, а также анионные группы, например, $(\text{Si}_2\text{O}_7)^{6-}$, $(\text{SiO}_3)^{4-}$, $(\text{Si}_6\text{O}_{18})^{12-}$, $(\text{SiO}_4)^{4-}$ и т.д. Помимо этого присутствуют летучие компоненты (флюиды).

Флюид - надкритическая фаза, в которую переходит жидкость при повышении T (выше $375\text{--}400\text{ }^\circ\text{C}$). Основными компонентами флюидных систем являются H_2O и CO_2 , часто роль могут играть F , Cl , H , S , CH_4 . Флюиды влияют на T кристаллизации расплавов и являются важными комплексообразователями.

Среды минералообразования

Гидротермальные растворы образуются как за счет поверхностных (метеорных) вод, так и за счет глубинных (ювенильных), отделяющихся от магматических расплавов или при дегидратации пород/минералов в ходе прогрессивного метаморфизма.

Растворенные компоненты гидротермальных р-ов могут выноситься непосредственно из источника данных р-ов, а также попадать в них при растворении компонентов вмещающих пород. Основной формой переноса веществ являются комплексные ионы (например $(\text{CuCl}_2)^-$, $(\text{Cu}(\text{HS})_2)^-$, $(\text{KHM}_\text{o}\text{O}_4)$, $(\text{HM}_\text{o}\text{O}_4)^-$, $(\text{Au}(\text{HS})_2)^-$, $(\text{AuCl}_2)^-$ и т. д).

Среды минералообразования

- Газ редко является средой минералообразования. Прежде всего, это вулканические газы, из которых могут кристаллизоваться, например, самородная сера, гематит, нашатырь NH_4Cl , разнообразные сульфаты, арсенаты и т.д. Из газа также отлагаются кристаллы льда.
- Коллоидные растворы – среда образования минералов в придонных условиях водных бассейнов (многие глинистые минералы, гидроксиды), иногда в низкотемпературных гидротермальных процессах.
- Твердые среды минералообразования - раскристаллизация вулканического стекла, полиморфные превращения веществ, распад твердых растворов, метамиктные превращения радиоактивных минералов под воздействием собственного излучения.

Движущая сила кристаллизации

1. Снижение температуры (кристаллизация из расплавов и гидротермальных растворов, соляные отложения; распады твердых растворов)
2. Изменение давления (гейзеры, сольфатары, фумаролы; дегидратация; перекристаллизация)
3. Испарение летучего компонента (приповерхностные условия)
4. Кристаллизация продуктов химической или электрохимической реакций (в том числе в результате жизнедеятельности организмов)
5. Смешение растворов (например, водных с органическими, речных вод с морскими) с изменением pH и Eh

ЗАРОЖДЕНИЕ КРИСТАЛЛОВ

Зарождение кристаллов

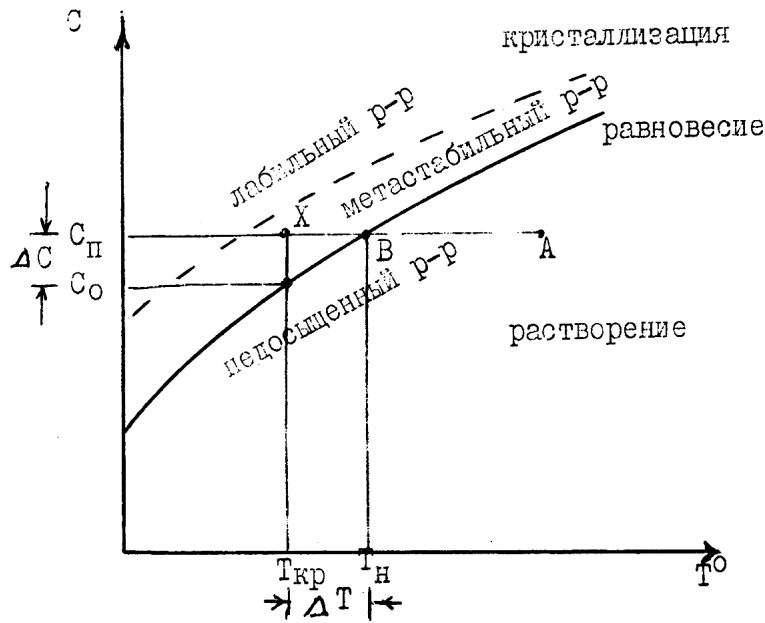


Диаграмма растворимости и состояния раствора в отношении роста и растворения кристаллов

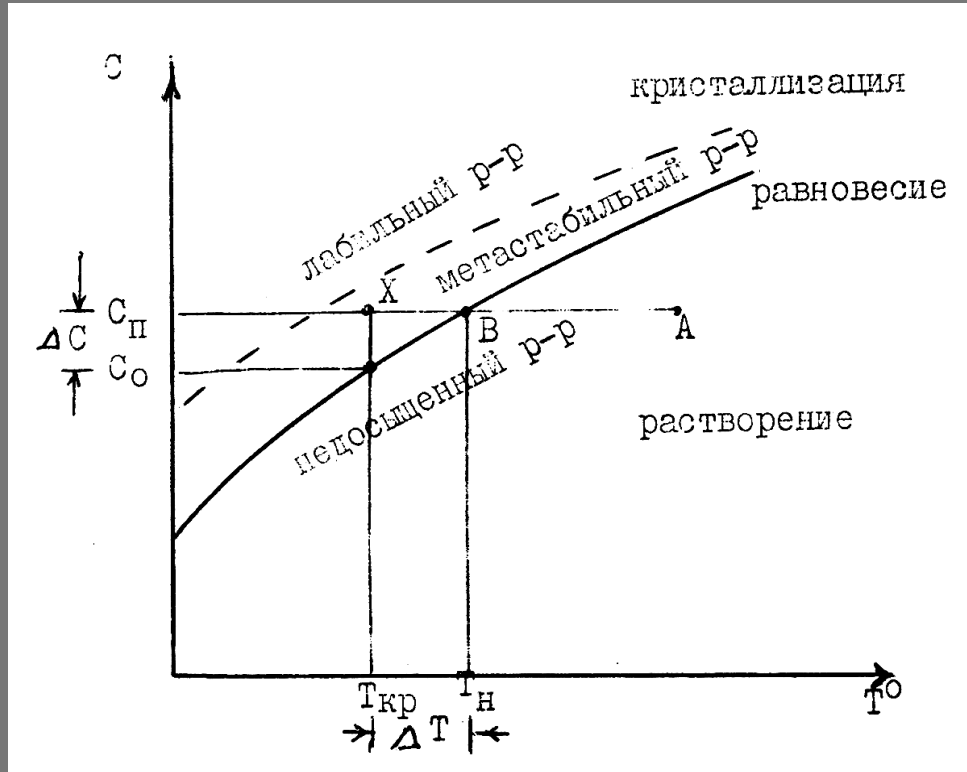
Метастабильная система – неравновесная система, в которой *не происходит кристаллизации при отсутствии затравки или зародышей равновесной для данных условий фазы*. В таком состоянии система может находиться длительное время.

Для формирования зародышей требуется преодоление энергетического барьера, требуется некая *энергия активации*.

Управляемый синтез кристаллов возможен только из метастабильного раствора!



Зарождение кристаллов



Лабильная система – неустойчива, сильно пересыщена, быстро происходит переход системы к равновесию часто за счет самопроизвольного зарождения кристаллов.

Диаграмма растворимости и состояния раствора в отношении роста и растворения кристаллов

Зарождение кристаллов

Процессы зарождения кристаллов:

1. самопроизвольное из пересыщенных сред (кристаллизация расплавов, стекол, распад твердых растворов и т.д.);
2. гетерогенное на готовых зародышах или затравках.

В природе, видимо, второй тип зарождения кристаллов проявлен гораздо шире, т.к. наличие границы раздела фаз по сравнению с гомогенным зарождением сильно *снижает энергетический барьер* начала кристаллизации.

Появление новых центров кристаллизации происходит на готовых затравках – пылинках, кристаллах собственного вещества, на чужеродных поверхностях и т.д.

Зарождение кристаллов

Некоторые эмпирические закономерности:

а) зарождение на поверхности заряженных частиц энергетически выгоднее, чем на нейтральных. Поэтому зарождение, в том числе осаждение рудного вещества, активно происходит на свежих сколах кристаллов — там, где возникают нескомпенсированные заряды.

Нередко нарастание вещества на собственные или родственные кристаллы наиболее интенсивно идёт на его вершину, далее на ребра, наименее интенсивно на грани кристалла;

б) кристаллизация вещества идет при меньших пересыщениях на частицах, структура которых ближе к этому веществу.

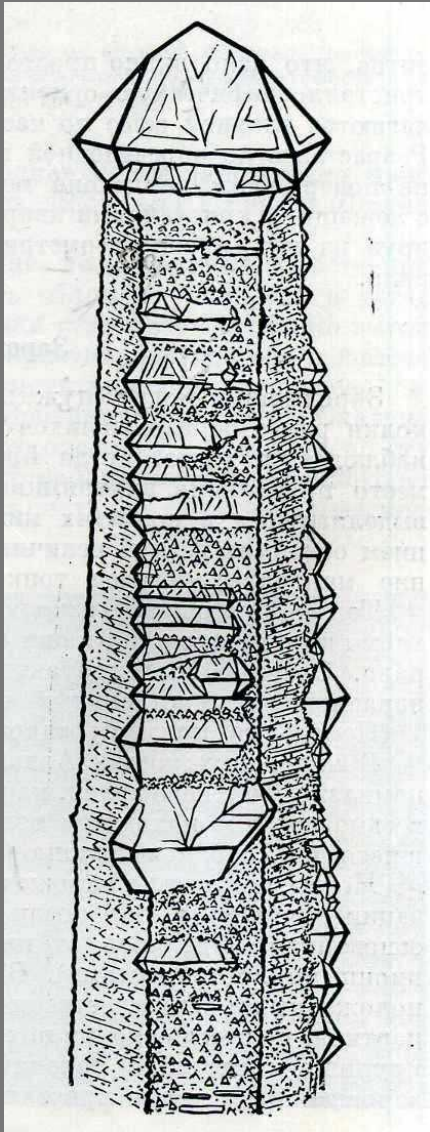
В природе широко проявлено явление **эпитаксии** - закономерного кристаллохимически обусловленного нарастания минералов друг на друга.

Автоэпитаксия.

Эпитаксические нарастания кристаллов рутила на гематит (Бразилия)



Автоэпитаксия.



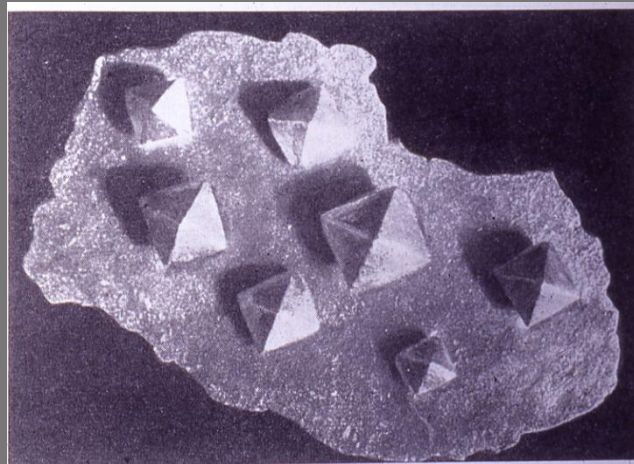
Зарождение позднего кварца на определенных гранях призматического кристалла (Леммлейн, 1937).



Скипетровидный кристалл кварца



Скипетровидный кристалл берилла. Забайкалье



Октаэдры золота на пластинчатом монокристалле золота. Южный Урал

РОСТ КРИСТАЛЛОВ

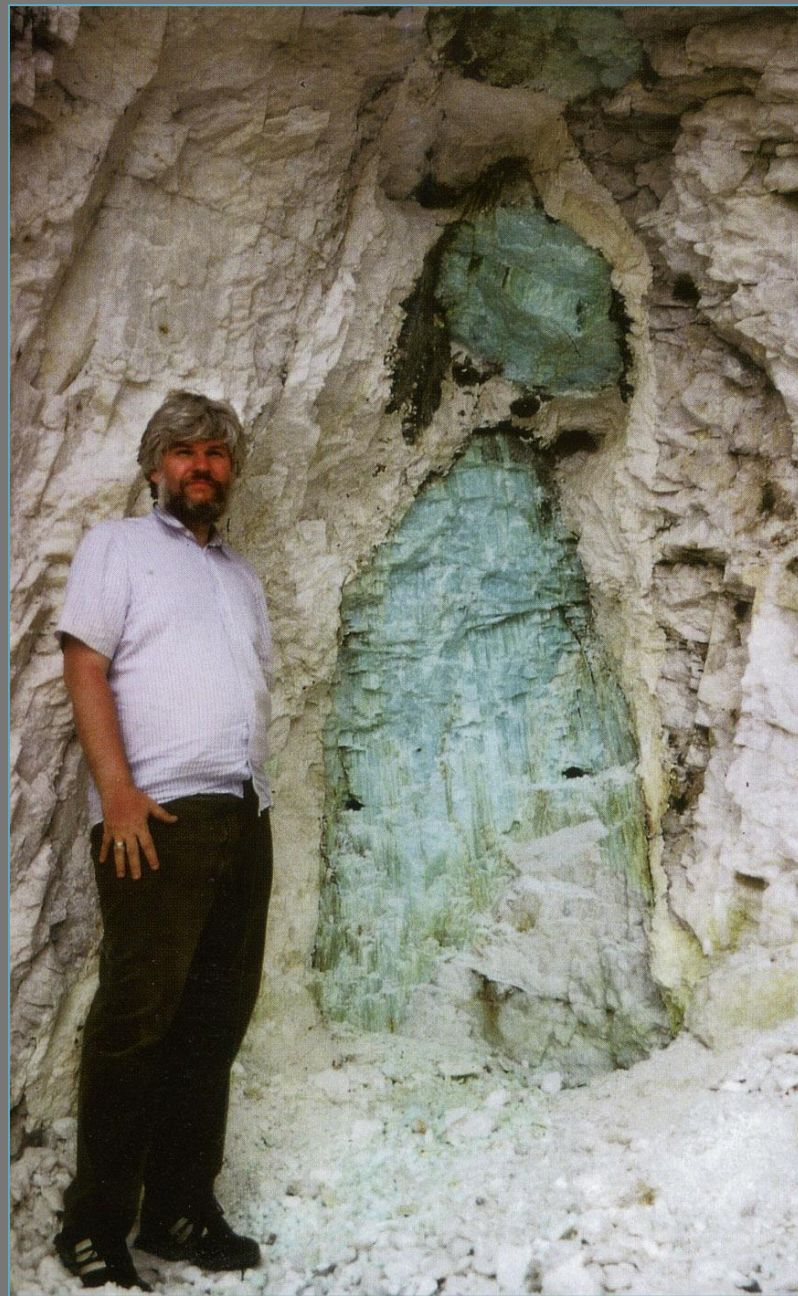
Размеры кристаллов и скорости их роста

Скорости роста кристаллов сильно варьирует. В вулканических возгонах отмечалась скорость роста кристаллов гематита до 5 см в сутки!

Минимальный размер - это предел, за которым объект теряет свойства минерала (обычно менее 0.1 микрона; данная граница спорна).

Максимальный размер кристаллов К-Na полевого шпата в гранитных пегматитах может превышать 50 м (на Урале когда-то целым карьером отрабатывали один кристалл полевого шпата, крупнейший точно измеренный в Devils Hole mine, Колорадо, США – 49x36x14 м массой 16.000 т); кварца до 9 м, берилла до 18x3.5 м и массой более 380 т (Malakialina, Malagasy Republic), сподумена до 16 м, гипса до 11 м, в редчайших случаях до многих десятков м (в XVIII веке под Парижем целым карьером отрабатывали один кристалл гипса, судя по спайности минерала).

Размеры кристаллов



Крупный кристалл кварца, шт. Минас-Жерайс, Бразилия.

<http://geo.web.ru/druza>

Размеры кристаллов



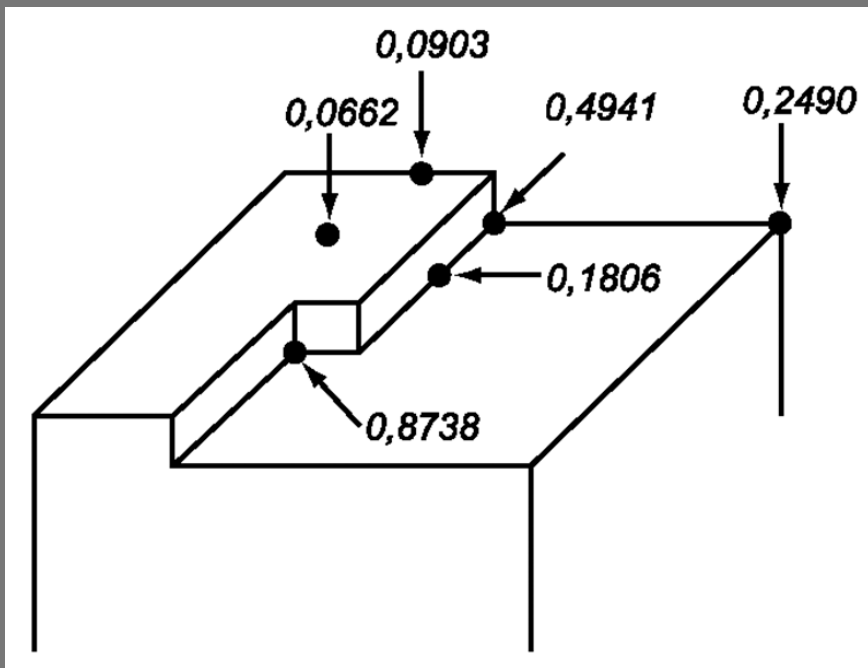
Гигантские кристаллы (до 11 м) гипса, р-к Найка, Мексика

Размеры кристаллов



Механизмы роста кристаллов

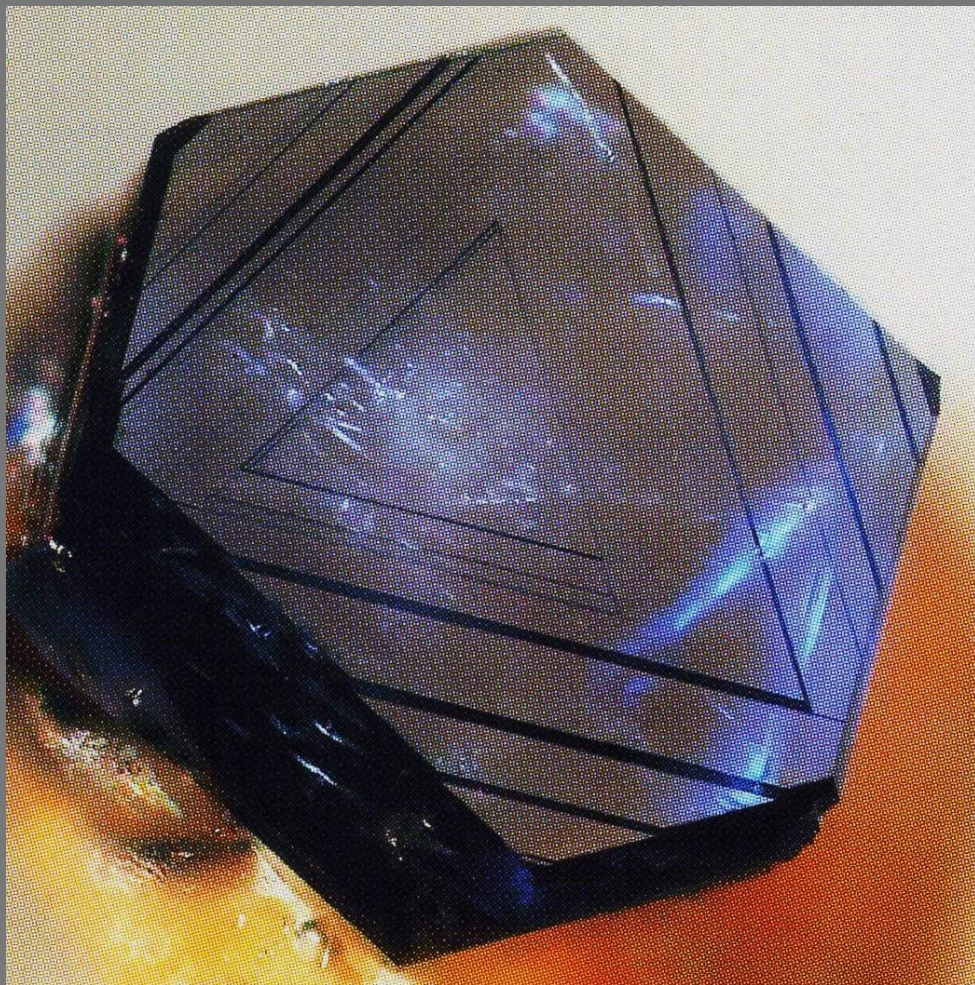
1. Послойный рост



Значения энергии (относительные величины), которая выделяется ионом, вследствие его присоединения к разным частям кристалла галита.

При модели послойного роста сначала растет ряд, потом — слой и только после этого происходит формирование нового слоя.

Слои роста



Кристалл корунда. Эйфель, Германия



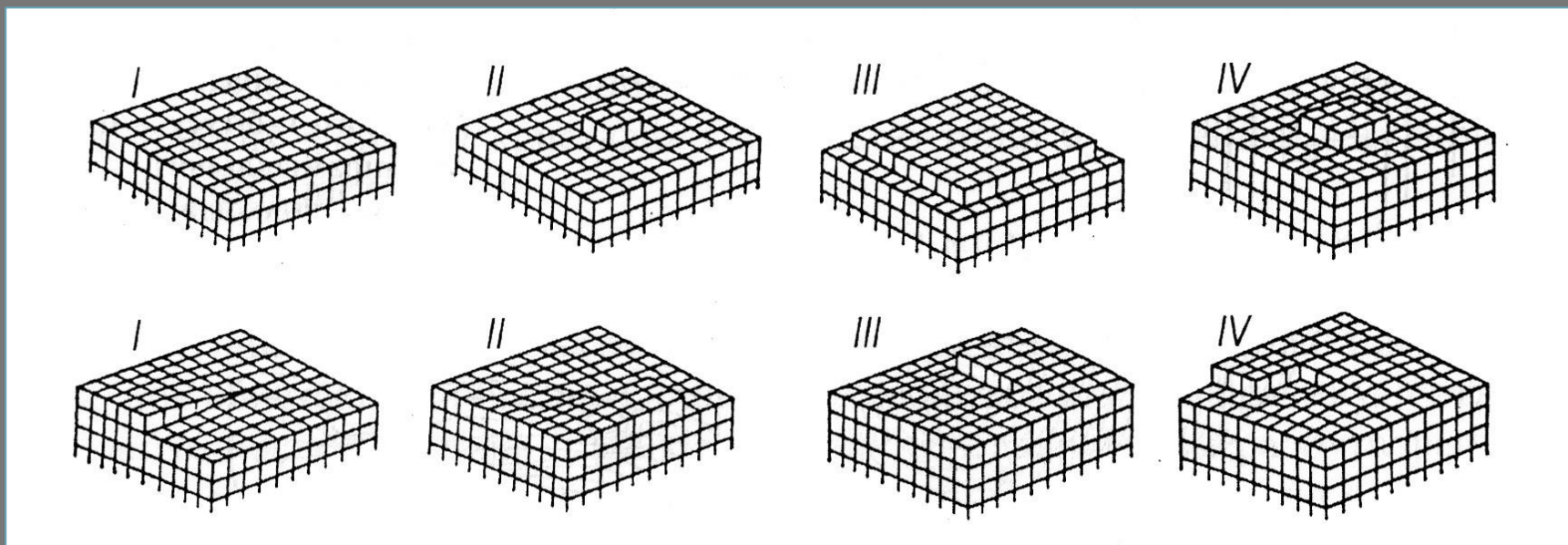
Слои роста на кристалле
биотита. Октаэдры пирохлора.
Лаахер, Эйфель,
Германия

Механизмы роста кристаллов

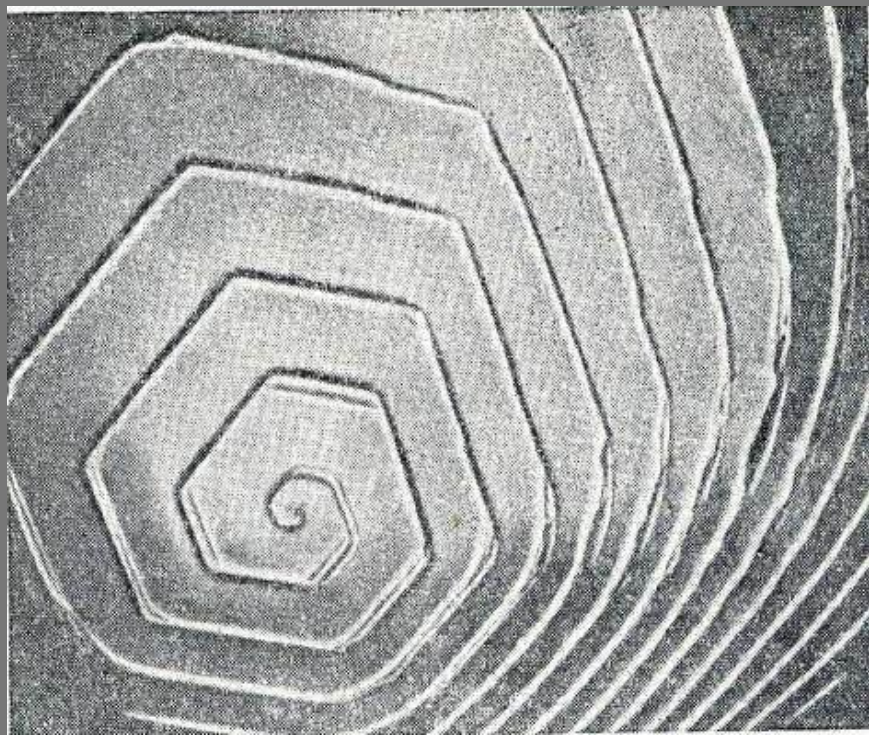
2. Послойный рост кристаллов при дислокационном механизме.

На выходе винтовой дислокации на грань кристалла прямолинейная ступень превращается в спиральную, далее возникает конусообразное возвышение, затем - спиральные холмы.

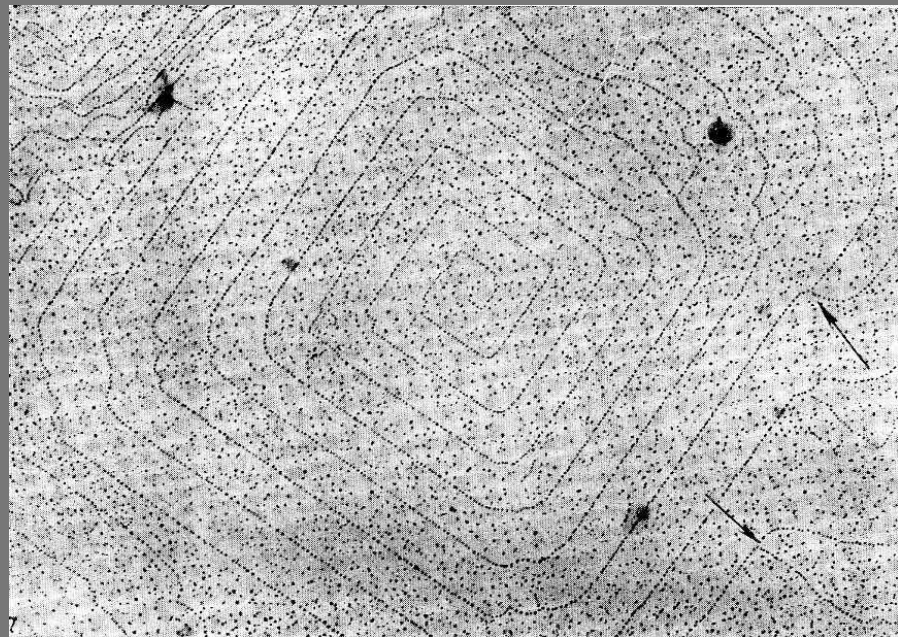
Дислокационный механизм объясняет высокие скорости роста и растворения граней и их рельеф!



Послойный рост при дислокационном механизме роста кристаллов



Муассанит, SiC



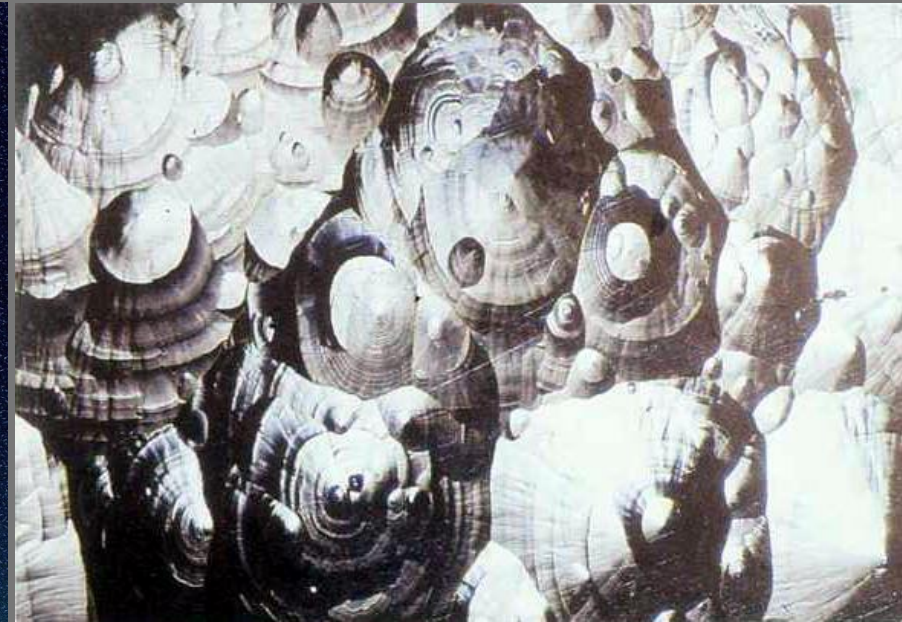
Галит, (декорировано золотом)

Форма площадок спиралей роста при больших пересыщениях (при быстрой скорости роста) близка к круговой, при малых пересыщениях (при меньшей скорости роста) приобретает геометрически правильную форму, отвечающую симметрии кристалла.

Послойный рост при дислокационном механизме роста кристаллов



Двойник гипса.
49 мм. Salinas de Paracas



Топаз. 2 мм

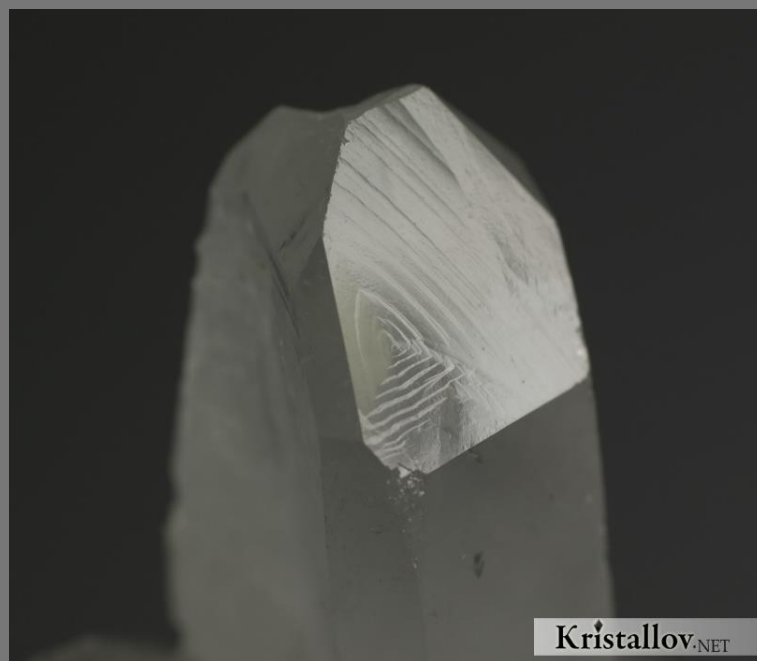


Данбурит
0.5 мм

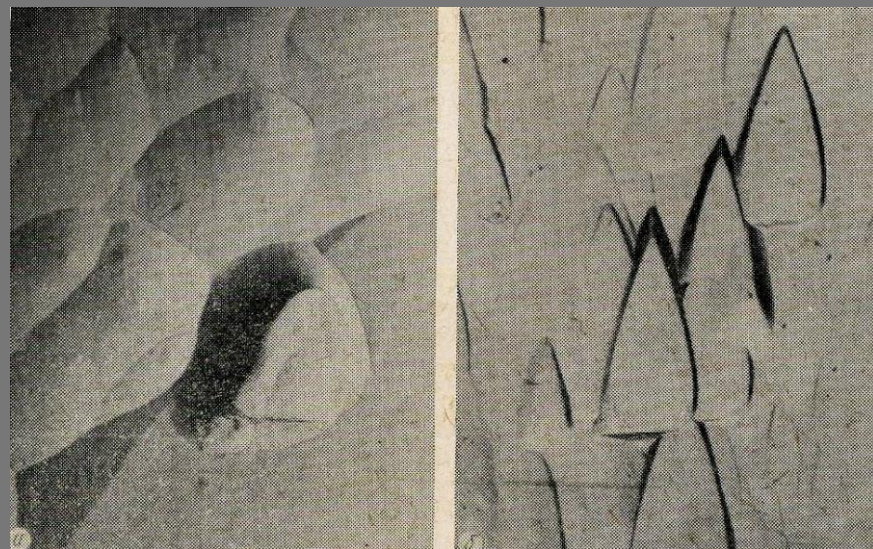
Послойный рост при дислокационном механизме роста кристаллов



Титанит. Сарановское
м-е, Урал



Крупная винтовая дислокация на грани
ромбоэдра кварца



Вицинали роста на гранях ромбоэдра кристаллов кварца

Рост кристаллов

Весь объём кристалла был когда-то на его поверхности. Кристалл сложен *пирамидами* нарастания граней, *поверхностями* нарастания ребер и *линиями* нарастания вершин.

Анатомия индивида — важный источник генетической информации.

Реальные кристаллы всегда *зональны*, т.к. их рост происходил за счёт отложения вещества на поверхности кристалла микро- и макрослоями.



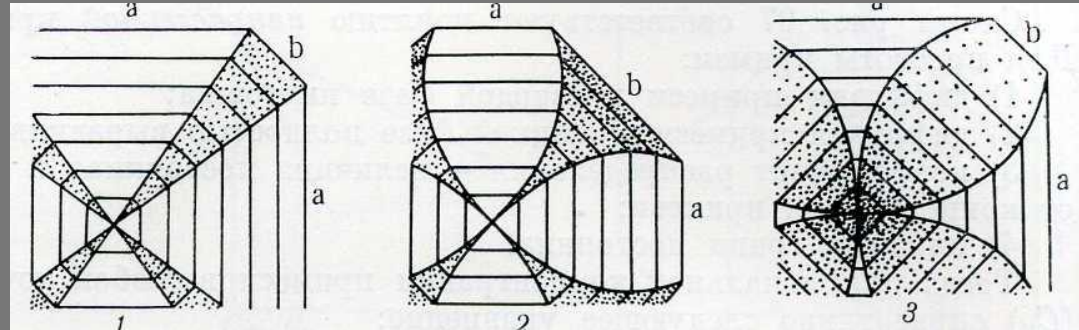
Секториально-зональные кристаллы турмалина из пегматитов Мадагаскара

Рост кристаллов

Пирамиды роста фиксируют все особенности формирования кристалла. В идеально развитом кристалле все пирамиды роста исходят из одной точки - центра кристаллизации.

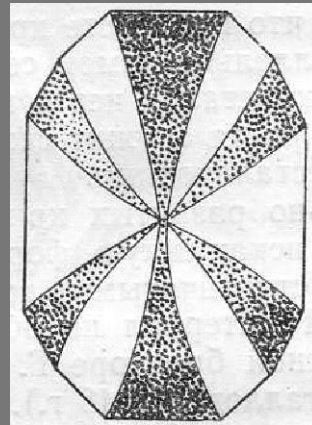
Реальная форма пирамид роста бывает копьевидной, чётковидной, с неправильными кривыми границами. Это свидетельствует о переменной скорости роста граней, вплоть до прерывистого.

На форму пирамид роста влияют пересыщение, поглощение кристаллом примесей, ориентировка кристалла относительно потока минералообразующего флюида и т.д.

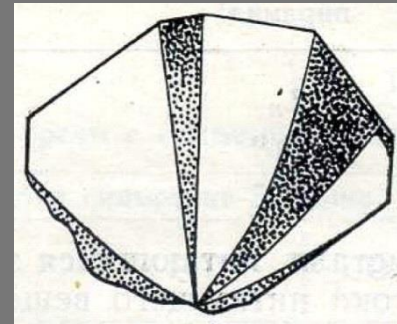


Скорость роста граней одинакова

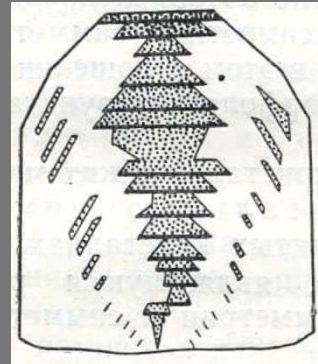
Изменение скорости роста граней



Изотропное питание



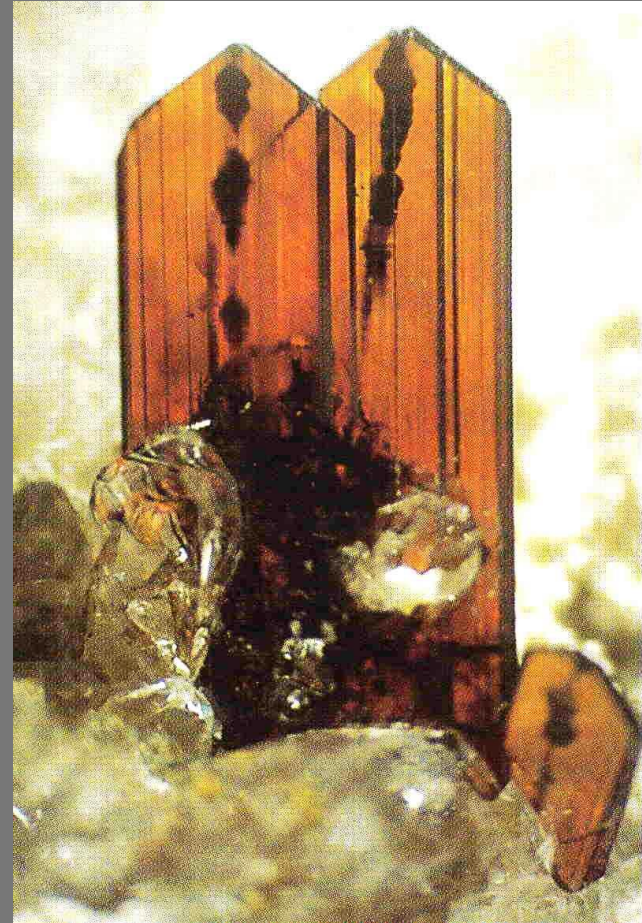
Одностороннее питание



Рост с остановками

Пирамиды роста

Неравномерное распределение примесей (дефектов) по пирамидам роста приводит к секториальному строению кристалла.



Кристаллы брукита из альпийских жил. Monte Brigaceto, Северо-Итальянские Альпы

Рост кристаллов

Скелетные кристаллы

Скелетные кристаллы - кристаллы, сформированные не плоскими гранями, а рёберными и вершинными формами.

В одних случаях кристалл с самого начала растёт в виде скелета, в других - скелетный рост начинается после стадии нормального полногранного роста.

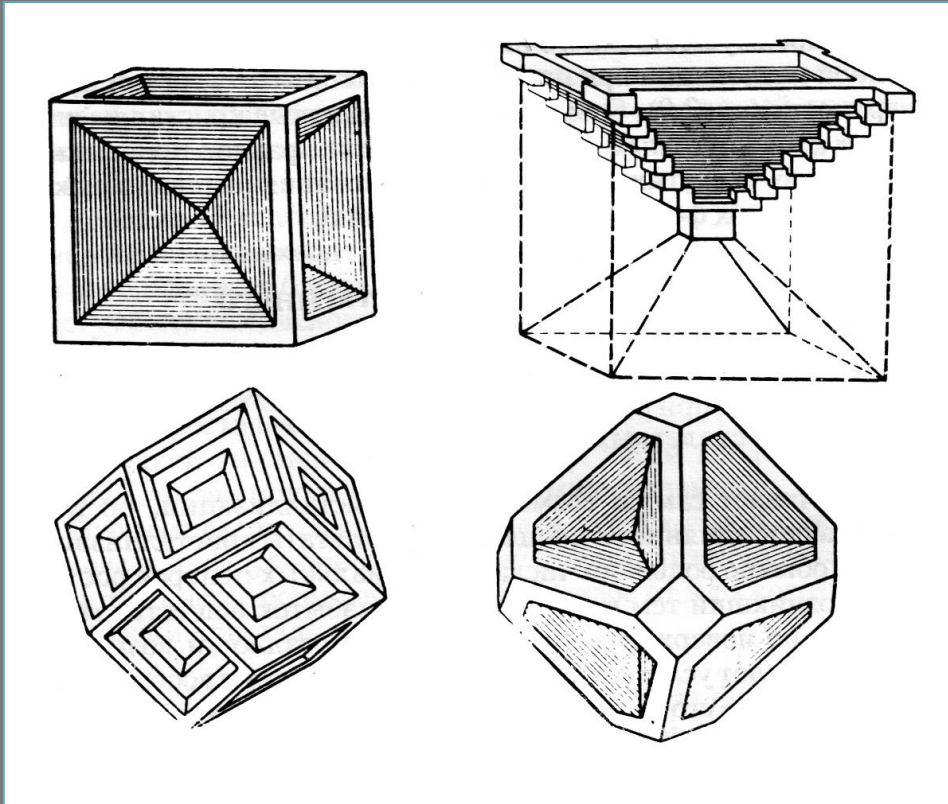
Типичные скелетные формы характерны для продуктов кристаллизации из газовой фазы при вулканической деятельности, кристаллизации из расплавов или растворов при сильном переохлаждении и/или пересыщении.

Конкретная форма скелетных кристаллов зависит от пересыщения раствора; при повышенных пересыщениях возникают рёберники, при очень больших - вершинники.

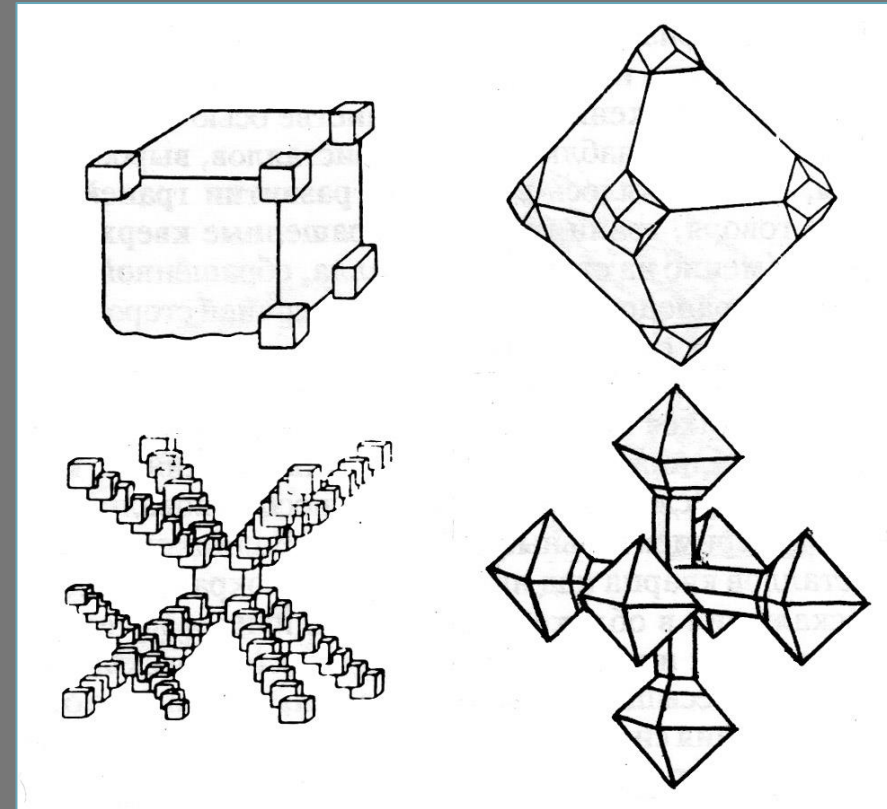
Скелетные кристаллы энергетически неустойчивы, при смене условий внешней среды на более стабильные они способны дорасти до полногранных кристаллов.

Рост кристаллов

Скелетные кристаллы



Реберные формы скелетных кристаллов



Вершинные формы скелетных кристаллов

Рост кристаллов

Скелетные кристаллы



Куприт (кристаллы до 15 мм).
Джезказган, Казахстан.
<http://geo.web.ru/druza>



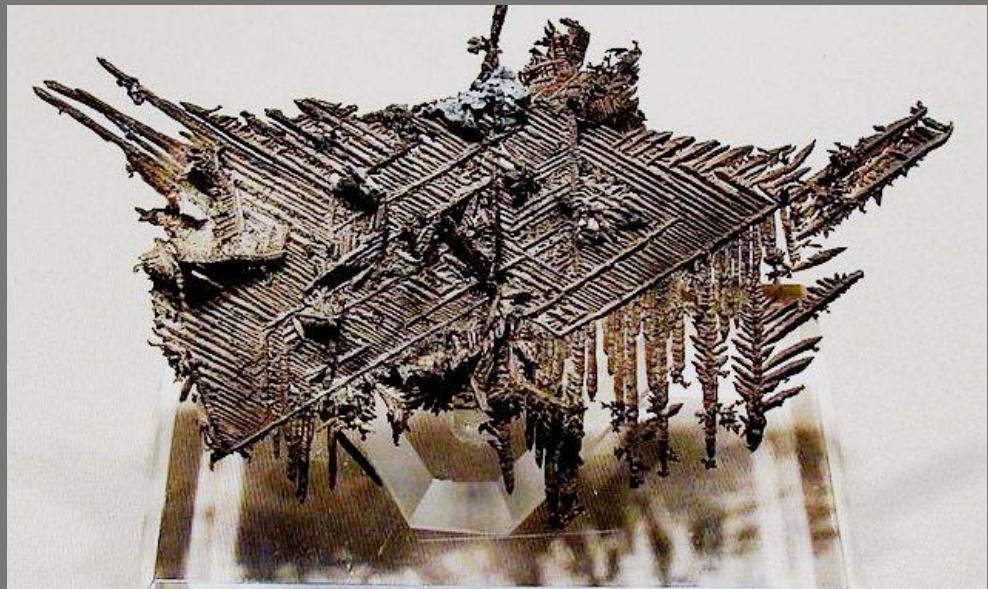
Скелетный кристалл самородной меди
(6 см), с участками начала дендритного
роста. М-ние Джезказган, Казахстан.

Рост кристаллов

Скелетные кристаллы



Перовскит, Graulai, Эйфель,
Германия



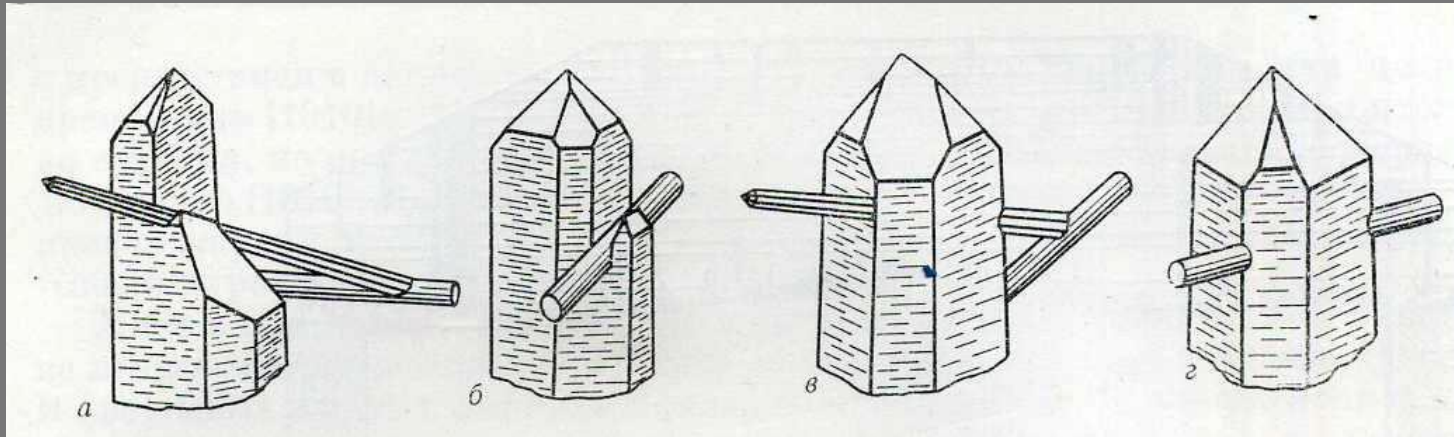
Самородное серебро
New Nevada mine, Batopilas, Чили



Самородное золото

Расщепление кристаллов

Расщепление - довольно обычная особенность роста кристаллов. Ранее полагали, что основная причина расщепления - наличие препятствий на поверхности растущего кристалла или включений в кристаллах. Многочисленные наблюдения срастаний минералов показали, что это не так.



Расщепление является следствием деформаций в приповерхностных участках растущего кристалла, возникших за счёт неравномерного вхождения примесей.

В результате несколько различаются параметры элементарной ячейки пирамид, секторов, зон роста и отдельных их участков, т.е. возникает гетерометрия и обусловленные ею внутренние напряжения в кристалле и автодеформации.

Расщепление кристаллов



Стильбит, расщеплённый кристалл.
Эвенкия, Якутия. <http://mindraw.web.ru/>



Кальцит, Дальнегорск



Адамин, Мексика.

Расщепление кристаллов

Крайний случай расщепления - образование сферолитов – сферокристаллов.

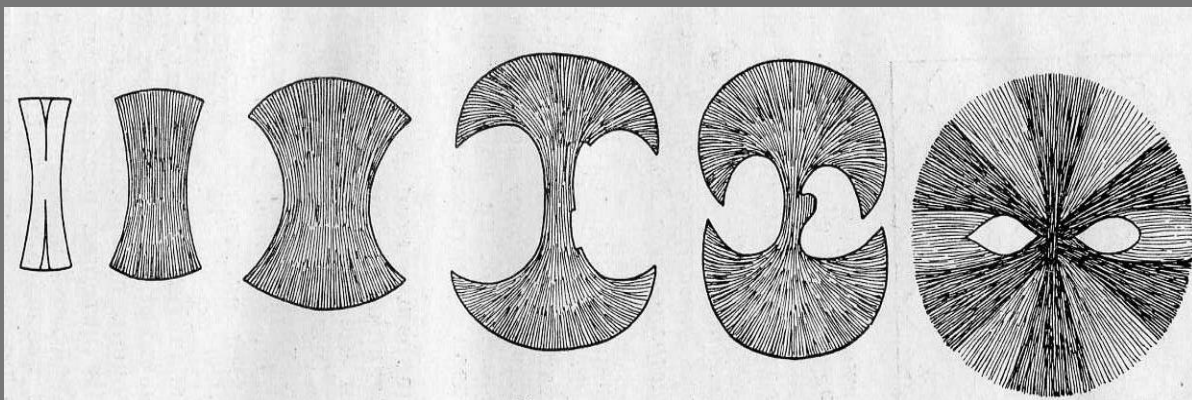


Схема расщепления
кристаллов
вплоть до образования
сферолита



Сферокристалл
малахита 8 мм.
Джезказган

Сферолиты азурита и малахита

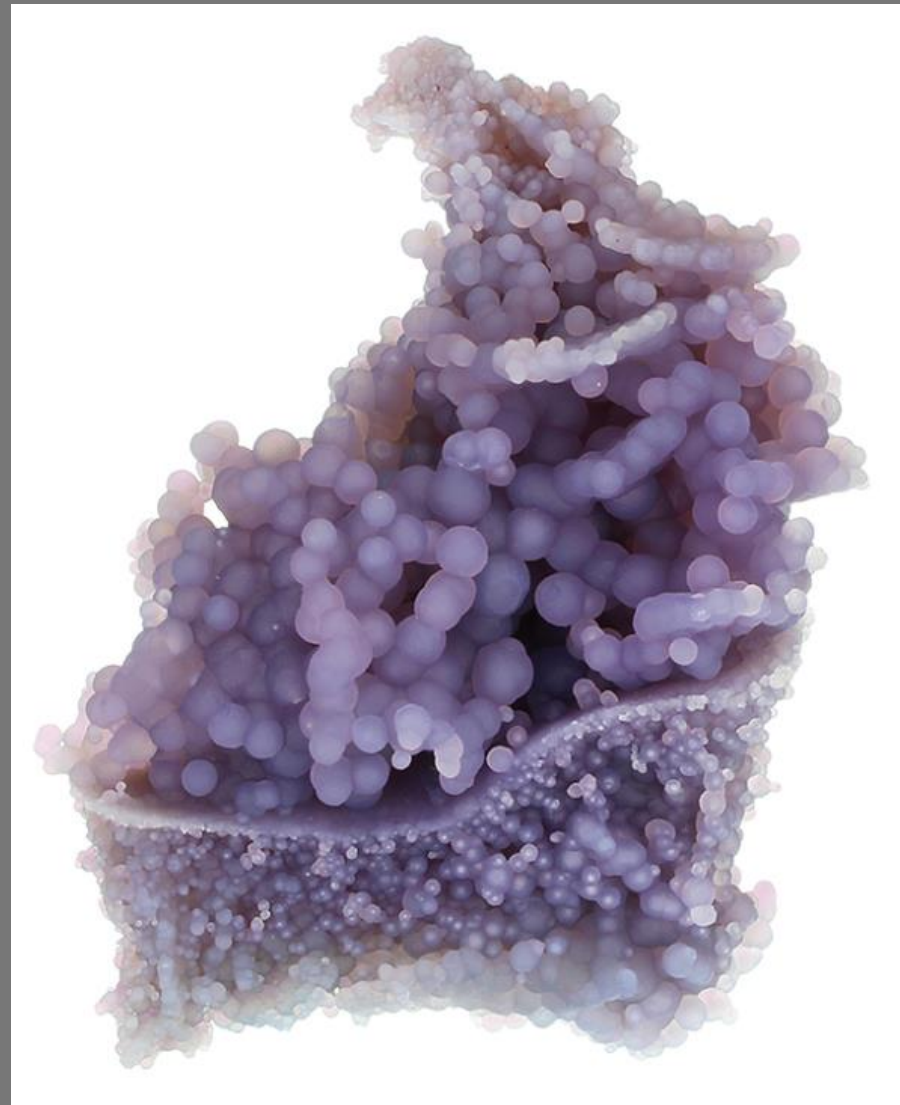


Morenci Mine,
Аризона, США



Mashamba West Mine, Katanga,
ДР Конго

«Виноградный» халцедон



Mamuju area , West Sulawesi
Province, Indonesia

<http://mindraw.web.ru/>

<https://www.mindat.org>

Двойникование кристаллов

Двойники - закономерные срастания двух или более кристаллов одного вещества по определённым законам симметрии.

По облику выделяют двойники срастания и двойники прорастания. По числу двойникующихся индивидов - двойники, тройники, четверники, шестерники, восьмерники и полисинтетические двойники.

Двойники кристаллов могут образовываться в процессе роста, при фазовых превращениях или при механическом воздействии извне.

Двойники роста. Двойникование обычно происходит на ранних этапах кристаллизации, при срастании двух или более кристаллических индивидов на стадии их зарождения. Двойниковые пластинки у них обычно правильной формы, толстые, следуют через весь кристалл в отличие от двойников полиморфных превращений и двойников деформации.

Кристаллы – двойники роста

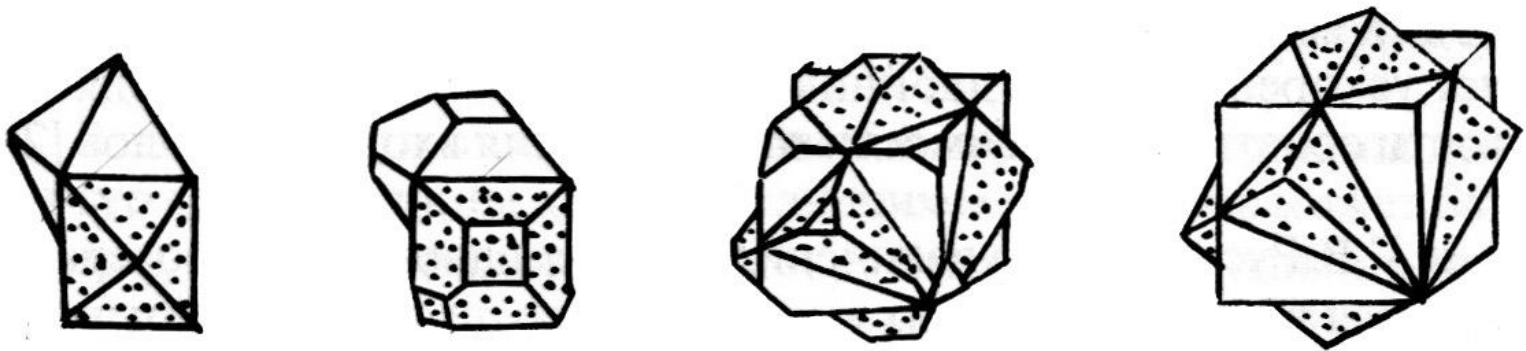


Схема формирования двойника прорастания по флюоритовому закону

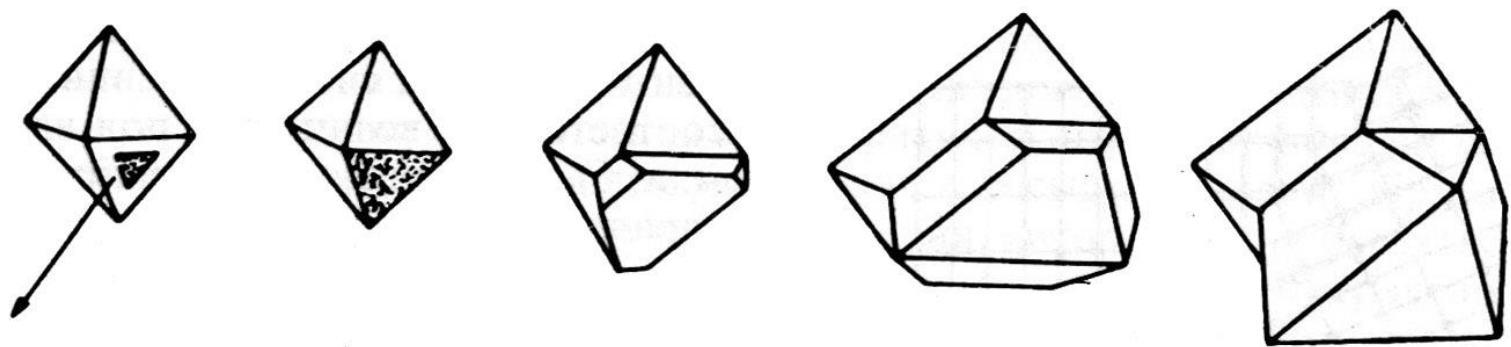


Схема формирования двойника срастания по шпинелевому закону

Кристаллы – двойники роста



Двойники прорастания киновари

Никитовка, Украина

<https://www.mindat.org/>



Двойник
лопарита в
альбитизирован-
ной пегматитовой
породе.
Лопаритовая
жила, Ньюкпахк
гора, Хибины

<https://webmineral.ru/>



Tongren Mine, Bijiang District, China

Кристаллы – двойники роста

Двойники прорастания. Ставролит. Кейвы, Кольский п-ов



Кристаллы – двойники роста



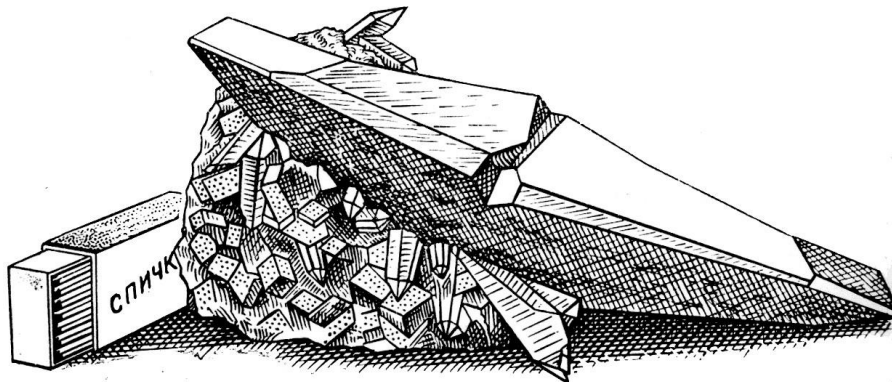
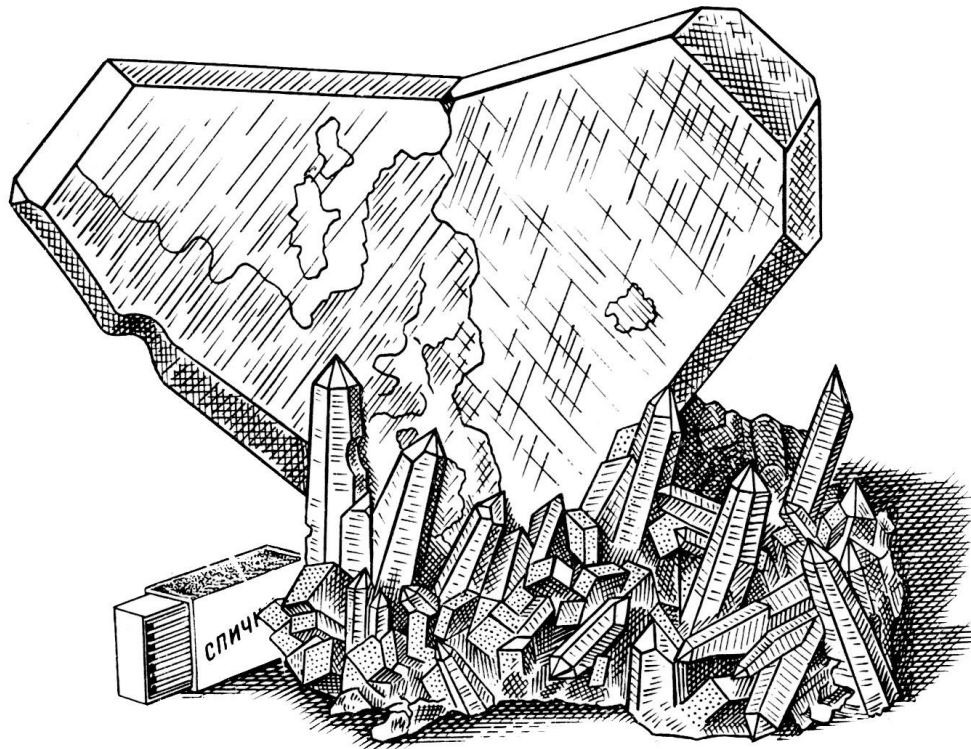
Тройник хризоберилла.
Бразилия.



Двойник гипса



Двойник кальцита, Китай



Подавляющее большинство ростовых двойников характеризуется наличием входящих углов на сложной поверхности сростка.

Входящие углы - места наиболее благоприятные для роста кристаллов. По этой причине в друзах кристаллов двойники роста выделяются своими крупными размерами.

Кристаллы – двойники роста



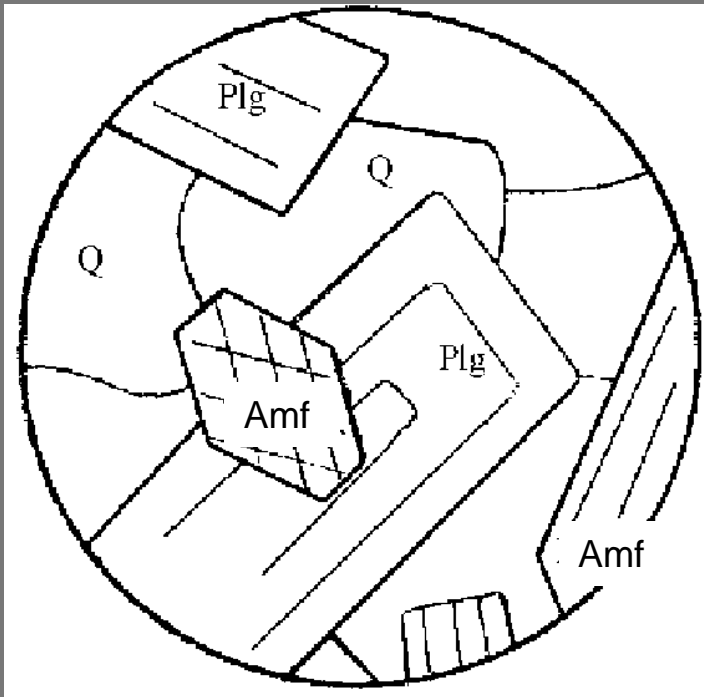
Крупные двойники прорастания по (111) флюорита на фоне мелких несдвойникованных монокристаллов



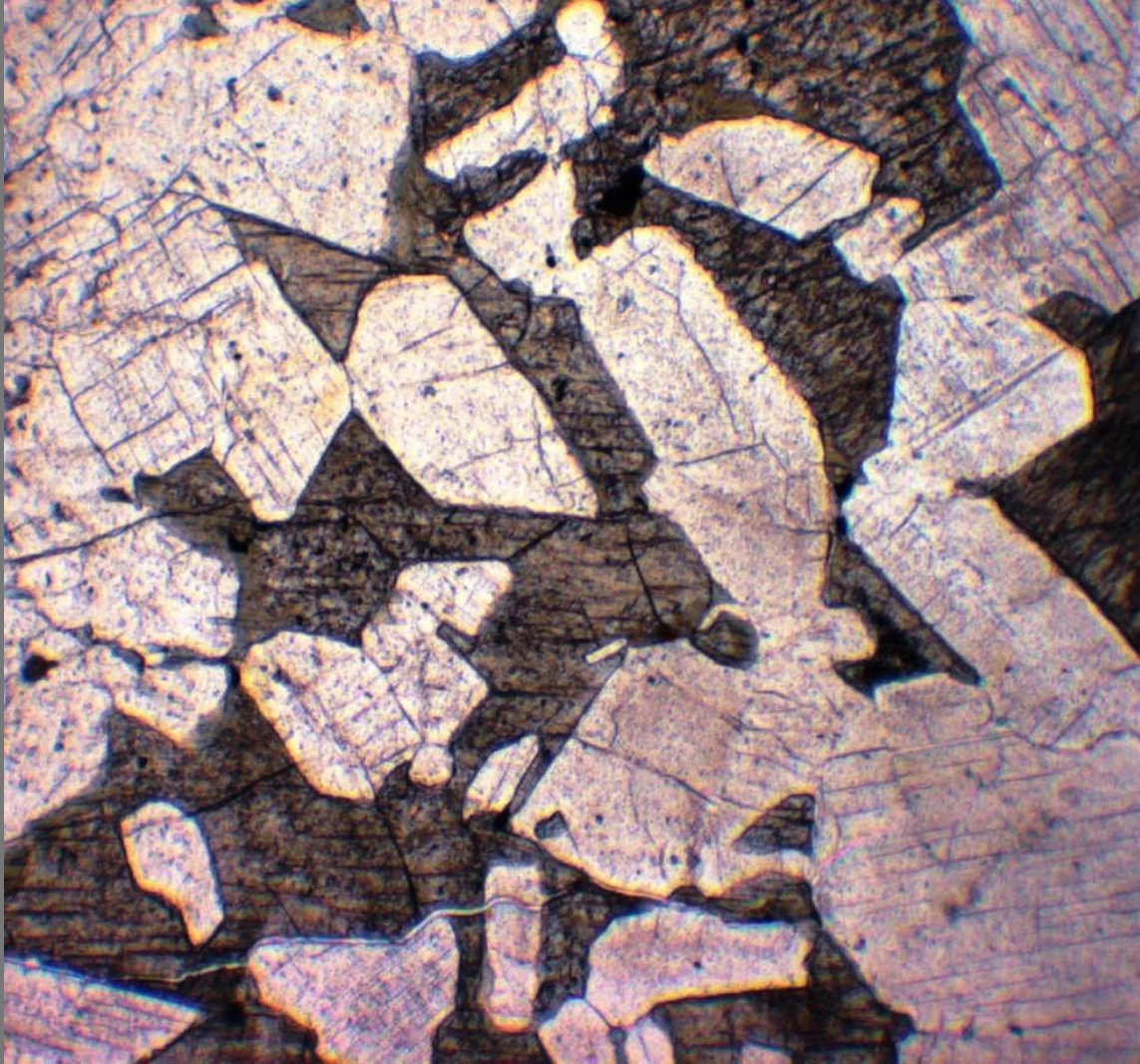
Двойники срастания кварца по японскому закону

Установление порядка кристаллизации минералов

Магматические процессы – степень идиоморфизма (от греч. *ídios* — свой, своеобразный, особый и *morphé* — форма).



Установление порядка кристаллизации минералов



Идиоморфный анортит,
ксеноморфный авгит.
Анортитовые габбро.
Куянбай, Северный
Казахстан
Фото Э.М. Спиридонова

Установление порядка кристаллизации минералов

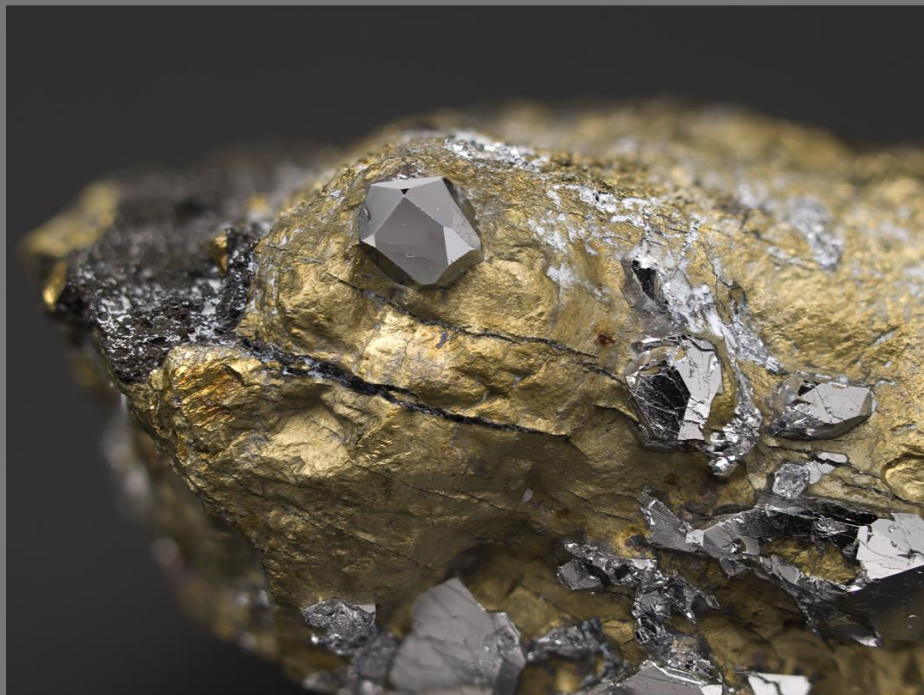


Идиоморфный
нефелин,
ксеноморфный
эвдиалит.
Кукисвумчорр,
Хибины
Фото Э.М.
Спиридонова

Установление порядка кристаллизации минералов

Гидротермально-метасоматические процессы, метаморфизм – идиоморфизм кристаллов не всегда указывает на более раннее образование минерала. Важные признаки порядка отложения минералов - **обрастания, пересечения, замещения.**

Метакристаллы - хорошо сформированные кристаллы, выросшие в твердой среде монокристалла или агрегатов, сложенных другими минералами.



Метакристаллы сперрита в талнахитовом агрегате. Талнах, Норильск
mindat.org

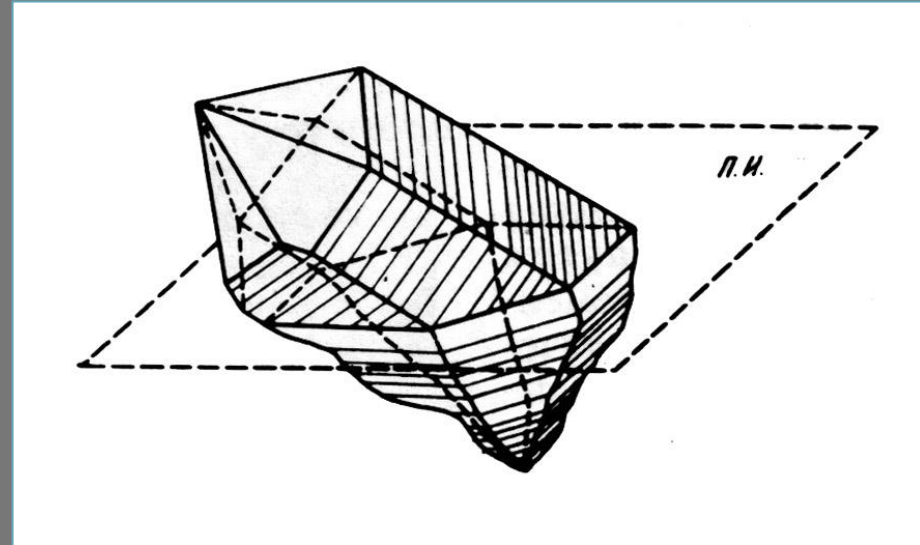


Апограниты с полосчатой текстурой. Видны метакристаллы позднего густо окрашенного амазонита и дымчатого кварца. Этыка, Забайкалье.
Колл. Мин. музея РАН. Фото Э.М. Спиридонова

Установление порядка кристаллизации минералов

Признак одновременного роста кристаллов – индукционные поверхности.

Индукционная поверхность (термин А.Е. Ферсмана), иначе компромиссная поверхность совместного роста, возникающая в процессе борьбы за пространство растущих индивидов.



Индукционные поверхности – это ступенчатые блестящие поверхности, покрытые характерной штриховкой.

Индукционные поверхности совместного одновременного роста имеют одинаковые морфологические проявления как при росте минеральных агрегатов в открытых полостях, так и при метасоматическом росте – в метасоматических и в метаморфических горных породах.

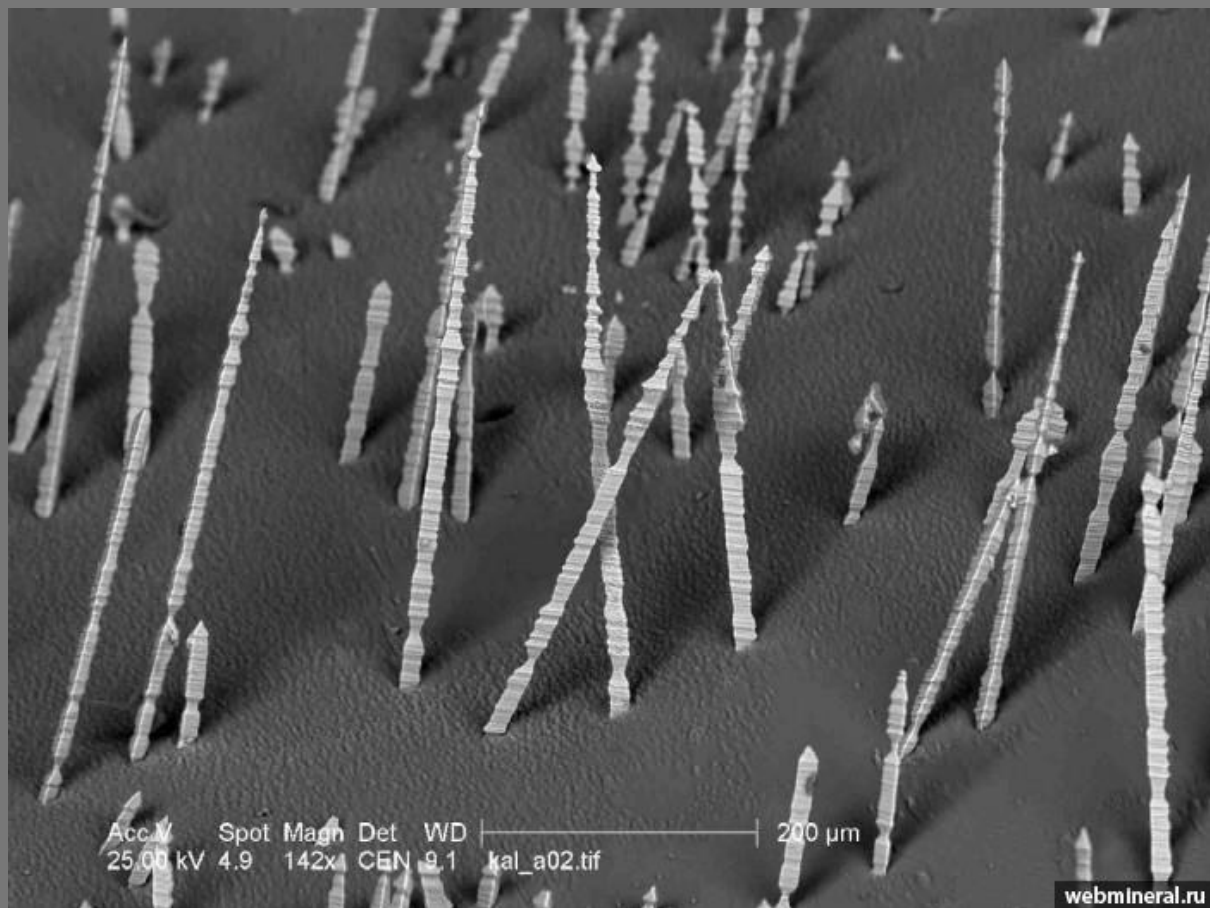
Установление порядка кристаллизации минералов



Границы совместного роста между кристаллами кварца.
Мангышлак, Запад. Казахстан
Фото Э.М. Спиридонова

Установление порядка кристаллизации минералов

Совместный рост марказита (пирита?) с кальцитом,
Белореченское месторождение.



Кальцит частично растворен. Фото Галускина Е.В.



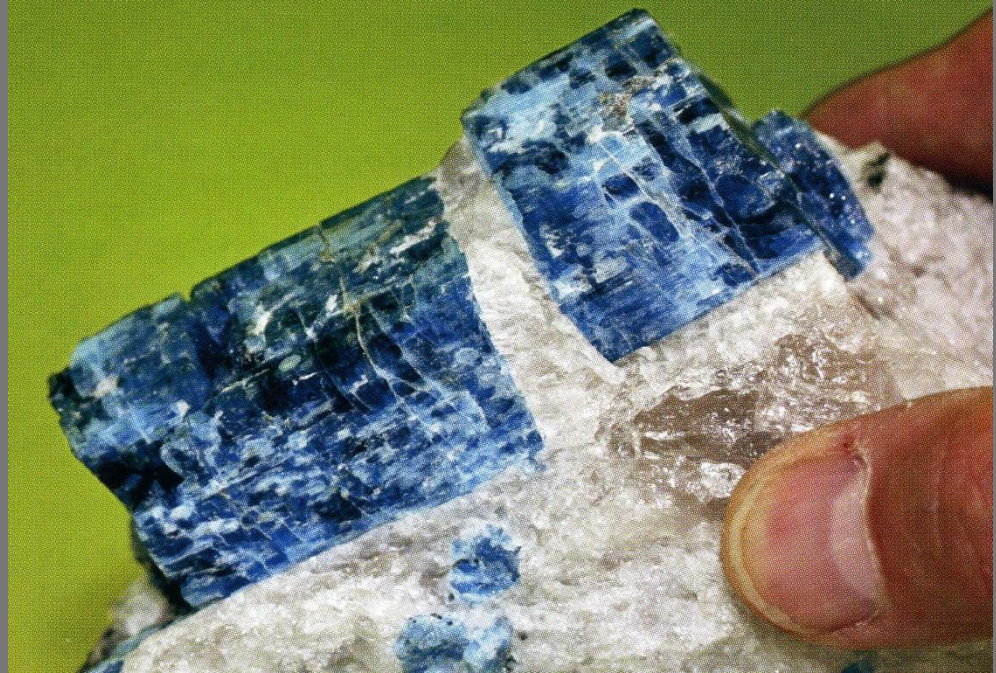
Фото П.Мартынова

ИЗМЕНЕНИЕ КРИСТАЛЛОВ

Хрупкие деформации и будинаж кристаллов



Кристалл изумруда 40 мм
в слюдитах. Изумрудные
Копи, Средний Урал

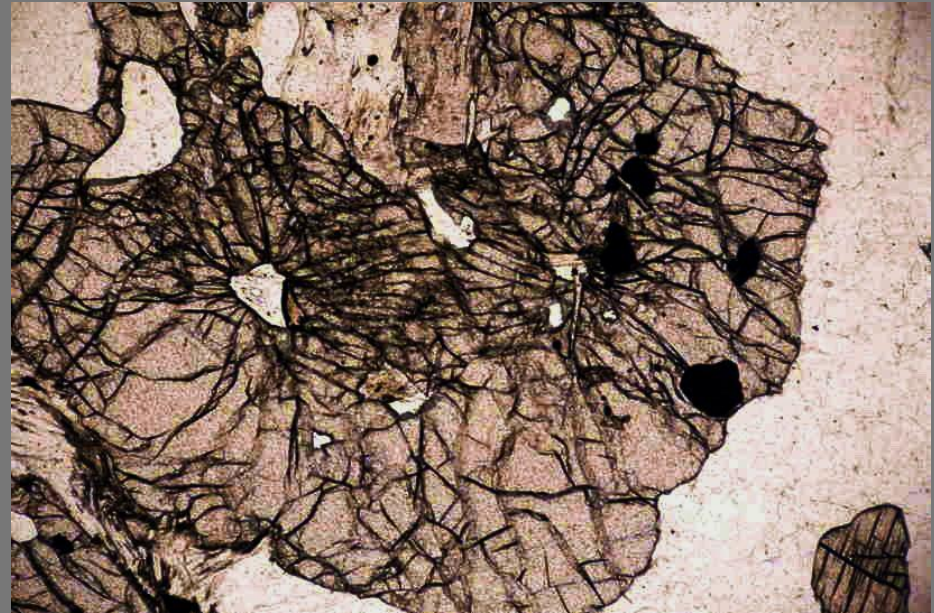


Кристалл аквамарина в кварце.
75x35 мм. Альпийская жила.
Binntal, Швейцария

Хрупкие деформации



Сотовый кварц из гранитных пегматитов Волыни, испытавший $\beta \rightarrow \alpha$ переход. Трещины возникли при увеличении объёма, в них масса газожидких включений



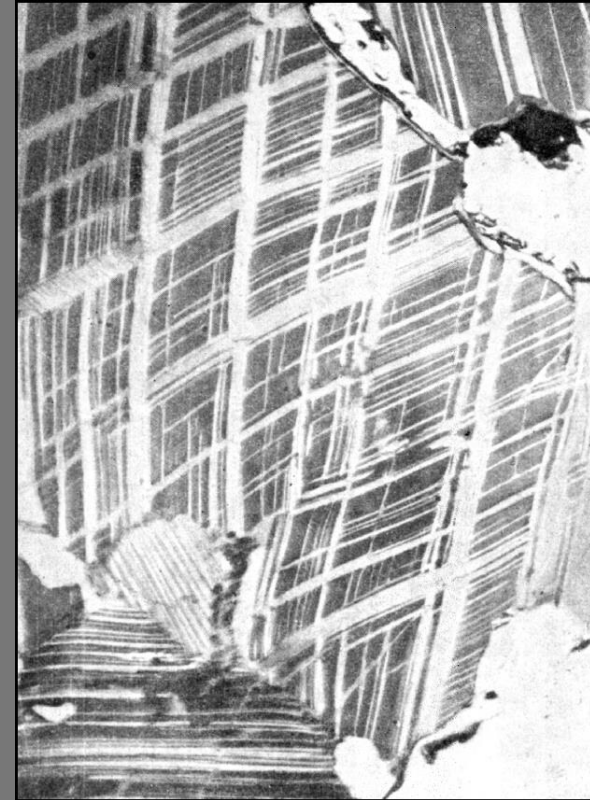
Механические деформации кристаллов пиропы около включений коэсита, частью превращённого в кварц. Пироп-коэситовые кварциты. Дора-Майра, Сев. Италия

Пластические деформации

Пластические деформации нередко сопровождаются проявлением двойникования кристаллов.

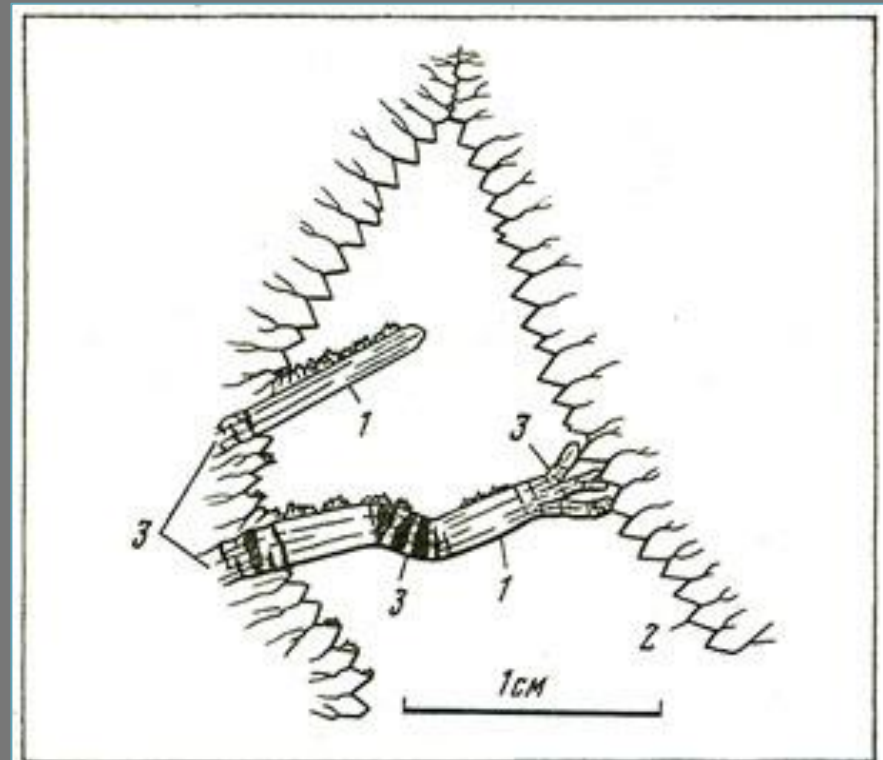
Двойники деформации развиты в виде пластинок примерно одинаковой ширины, которые часто пересекаются, выклиниваются, часто сопровождаются изгибами, катаклазом и частичной перекристаллизацией (или рекристаллизацией).

Пластинки деформации нередко проходят через несколько соседних зерен. Если в исходных кристаллах были посторонние включения, то они деформируются вместе с кристаллами - хозяевами.



Деформационные
двойники в
кальците (по П.
Рамдору. Увелич.
170).

Пластические деформации



Деформация и расщепление головки кристалла антимонита (1) растущей друзовой коркой кварца (2); 3 – области полисинтетического двойникования антимонита

Пластические деформации кристаллов стибнита (антимонита), возникающие вследствие давления подвижных стенок полости (трещины) или за счет роста самих кристаллов. Кадамджай, Киргизия

ИЗМЕНЕНИЕ МИНЕРАЛОВ

Полиморфные переходы.

Для переходов искажения характерно двойникование. **Двойники полиморфных превращений** обычно развиты в виде веретенообразных сетчатых срастаний, часто пересекающихся.



КПШ

Разупорядоченный санидин –

$\text{K}[(\text{Al}_{1/4}\text{Si}_{3/4})_4\text{O}_8]$ – мон.

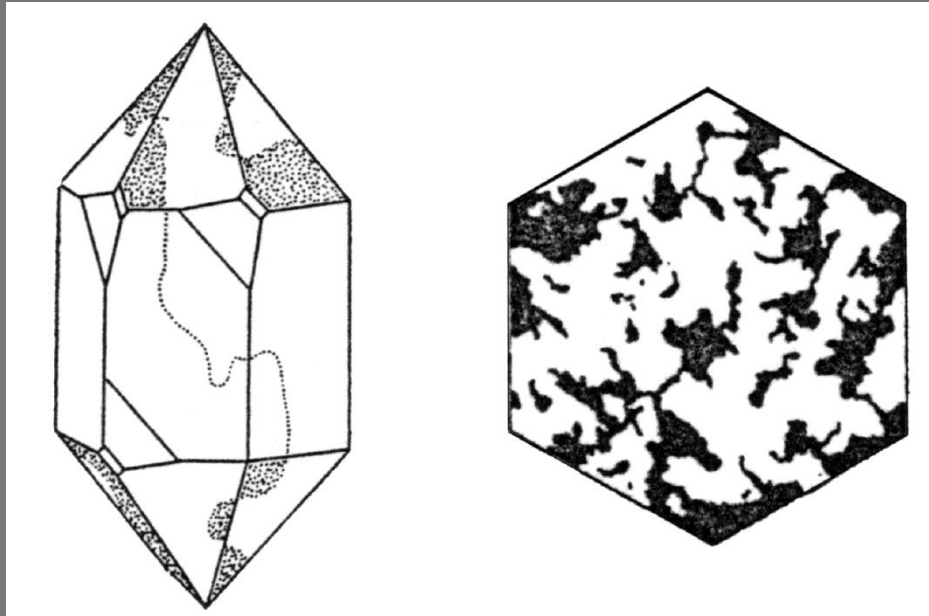
Полностью упорядоченный

микроклин $\text{K}[\text{AlSi}_3\text{O}_8]$ –

трикл.

Двойники превращения в микроклине
(микроклиновая решетка)

ИЗМЕНЕНИЕ МИНЕРАЛОВ



a

б

Схема размещения в кристалле трансформационного дофинейского двойника кварца, который возник вследствие $\beta \rightarrow \alpha$ перехода. *a* — общий вид; *б* — разрез $\perp[0001]$



Abb. 378

Vergr. 150mal
China

RAMDOHN

Переход высокий кубический халькопирит → низкий тетрагональный халькопирит. При этом превращении однородные кристаллы кубической фазы превращаются в кристаллы, состоящие из пластинчатых и сложной формы двойников полиморфных переходов.

РАСТВОРЕНИЕ КРИСТАЛЛОВ

Растворение кристаллов

Когда кристалл входит в контакт со своей недосыщенной материнской средой (обычно жидкой или газообразной) или с одной из реагирующих с ним жидкой или газообразных сред, то, как правило, кристалл частично или полностью растворяется.

Растворение не всегда одноактный процесс. Существуют все стадии растворения от образования мельчайших структур травления до полного уничтожения минерала.

Особенно охотно растворение происходит вдоль плоскостей спайности, отдельности и в зонах дробления внутри кристалла. Установлена теснейшая связь ямок травления (растворения) с дислокационной структурой кристалла.

По форме фигур травления и по их ориентации можно определить присутствие тех или иных элементов симметрии и то, представляет ли данное тело монокристалл, поликристалл или двойник.

Растворение кристаллов



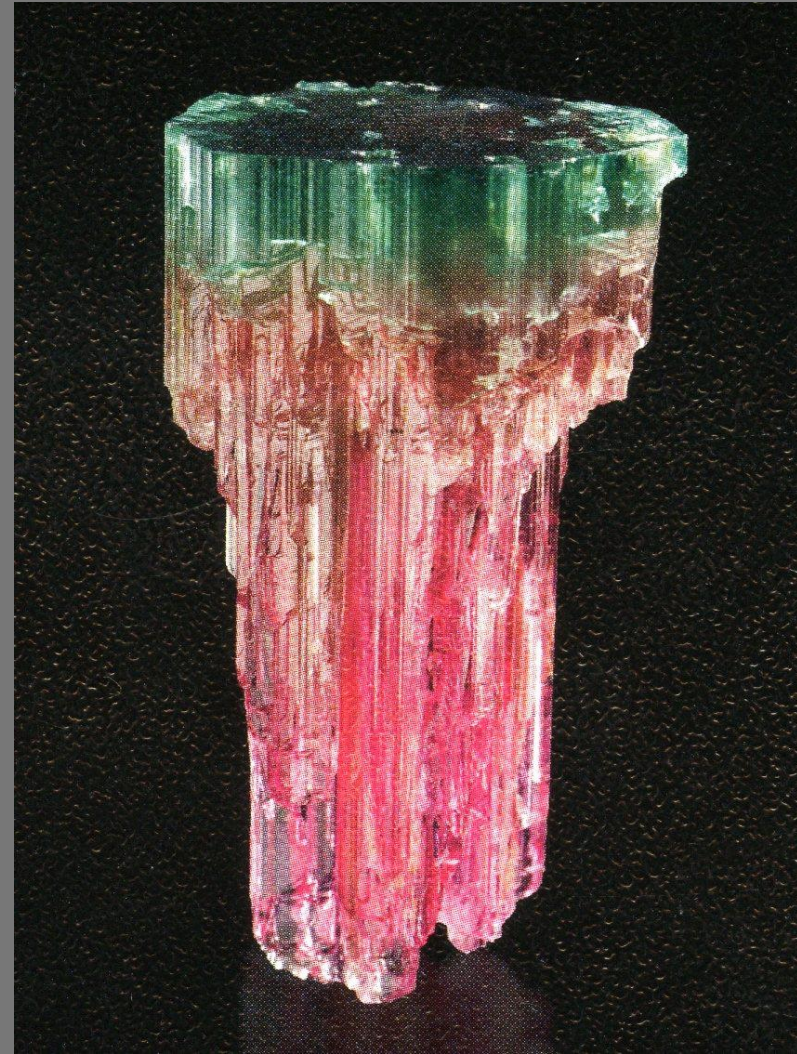
Формы растворения кристалла берилла,
Володарск-Волынское пегматитовое поле,
Украина.

<https://webmineral.ru/>



Растворение кристаллов

Турмалин - эльбаит. Гранитные пегматиты



Растворение кристаллов. Галенит.



Дальнегорск

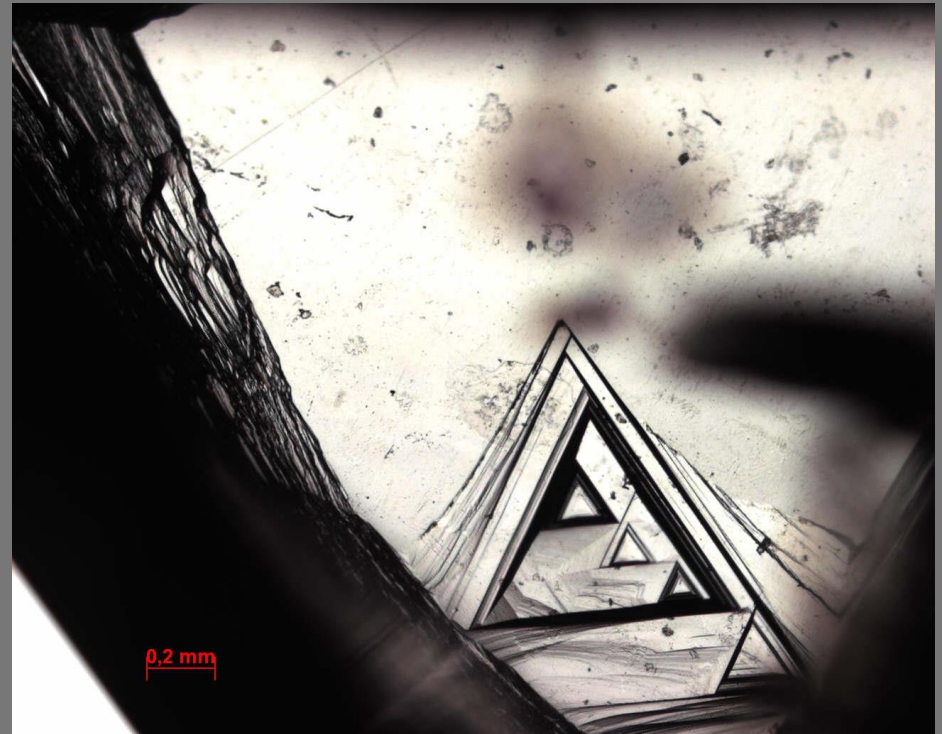


Фрайберг, Рудные Горы,
Германия

Растворение кристаллов. Алмаз



10x10 мм, 17.8 карат.
Mato Grosso, Бразилия



Треугольники
травления
на гранях
кристаллов



Кубический кристалл
с заметными
следами растворения

Регенерированные кристаллы



Кварц.
70x50 мм.
Гора Пирамида



Кристалл турмалина двух
генераций, Пакистан

Процессы минералообразования

Магматические процессы минералообразования

Типы магмы:

- Силикатные
- Сульфидные (Fe, Fe-Ni-Co, Fe-Cu, Fe-Cu-Ni...)
- Карбонатные (Ca, Ca-Mg, Ca-Fe, Ca-Mn, Sr-Ba)
- Пегматитовые расплавы - растворы

Силикатные магмы.

В магме существуют простые и комплексные катионы, анионы, а также анионные группы, например, $(\text{Si}_2\text{O}_7)^{6-}$, $(\text{SiO}_3)^{4-}$, $(\text{Si}_6\text{O}_{18})^{12-}$, $(\text{SiO}_4)^{4-}$ и т.д. Помимо этого присутствуют летучие компоненты (флюиды).

Температура от 1500° до 550° С, обычно от 1200 до $700-650^{\circ}$ С.

Р обычно 0-20 кбар, реже до 50 и более. Высокое Р способствует удержанию в расплаве летучих компонентов магмы.

Магматические процессы минералообразования

Флюид - надкритическая фаза, в которую переходит жидкость при повышении T .

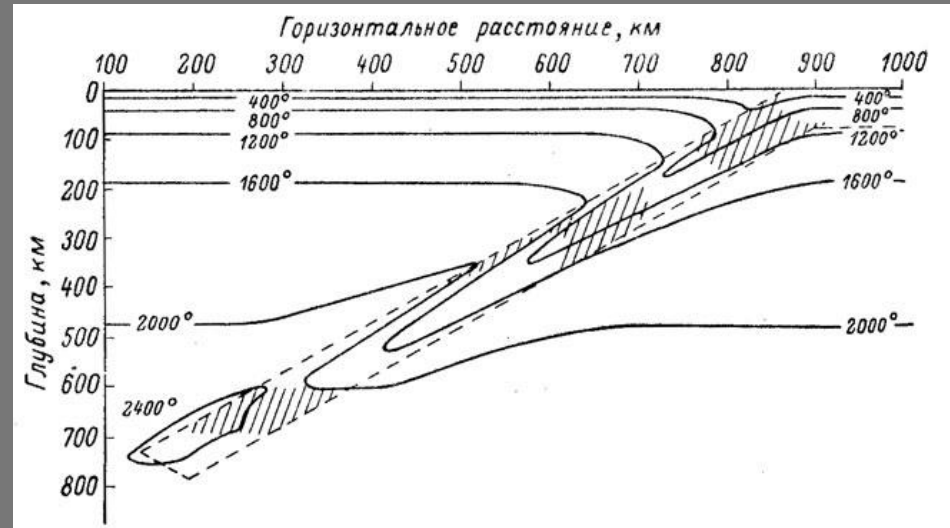
Основными компонентами флюидных систем являются H_2O и CO_2 , часто значительную роль могут играть O_2 , HF , HCl , SO_2 , H_2S , H_2 , CH_4 . Флюиды снижают T кристаллизации расплавов (T кристаллизации Li-F гранитов понижается до $550^\circ C$!) и являются важными комплексообразователями.

Количество флюидов от следов ($\sim 0.5\%$) до 50% (иногда более) объёма магмы. Нередко флюиды после раскристаллизации рассеиваются, но при этом оставляют «следы» - газы при вулканических извержениях, газовые пузыри в лавах, пено-лавы и пемзы, миаролы и пегматиты в интрузивных породах.

Обстановки проявления магматизма

Межплитная:

1. В срединноокеанских хребтах – «малоглубинный» магматизм
2. В активных континентальных окраинах – островных дугах, на границах континент – океан – разноглубинный магматизм, главным образом «среднеглубинный»



Распределение T в плите океанической литосферы толщиной 80 км, заглубляющейся в мантию со скоростью 8 см/год (М. Токсёз, Дж. Минеар, Б. Джулиан, 1971).

Внутриплитный:

в зависимости от степени кратонизации (жёсткости) структур глубинный и сверхглубинный магматизм

Магматические процессы минералообразования

- Интрузивные магматические образования.
- Эффузивные магматические образования.
- Пегматиты

Интрузивные образования

К интрузивным образованиям относятся магматиты, формирующиеся в условиях сжатия, в условиях закрытой системы при повышенном давлении.

Скорости подъёма магм от менее 1 см/год (для некоторых гранитоидов) до многих м/год.

Интрузивные тела формируются на глубинах от 1 км до 10-30 км и более.

Фации глубинности интрузивов:

гипабиссальная фация – 1-3 км (четкие контакты с породами рамы);

мезоабиссальная фация – 3-7 (иногда до 10) км (гипабиссальные интрузии резко отграничены от пород рамы);

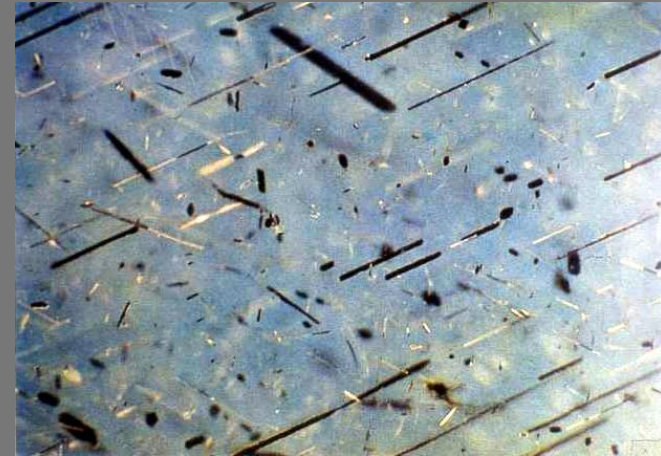
абиссальная фация – от 7-10 до 30 и более км (нередки пегматоидные структуры, в контактовых ореолах часто развиты мигматиты, иногда трудно провести линию контакта интрузивных пород и пород рамы).

Интрузивные образования

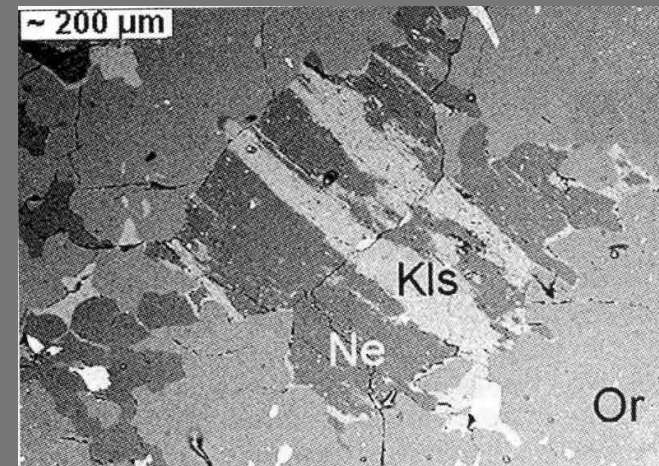
Длительность остывания обычных по размеру интрузивов составляет сотни тыс. лет, наиболее крупных - около млн. лет!

Следствие:

- даже малые по размеру интрузивы гипабиссальной фации окружены ореолами контактового метаморфизма. Вокруг более крупных и более глубинных интрузивов развиты ореолы контактового метаморфизма шириной до нескольких км.
- нередко интенсивно проявлены разнообразные постмагматические процессы.
- для пород характерны массивные текстуры, средне-крупно-гигантокристаллические (пегматоидные) структуры;
- минералы, как правило, однородны (не проявляют зональности), характерны распады твердых растворов, образование упорядоченных структур;



Ламелли распада гемоильменита в лабрадоре (лабрадориты Ньюфаунленда, Канада)



Распад нефелин – кальсилит. Хибины

Эффузивные магматические образования

Магматиты, формирующиеся в условиях растяжения, при низком давлении – эффузивы.



Скорости подъёма магм от первых см/день (у вязких и бедных флюидами кремнекислых пород – дацитов и риолитов) до десятков м/с (у флюидонасыщенных пенолав типа щелочных базальтов, кимберлитов, лампроитов, кремнекислых пенолав – игнимбритов).

Эффузивные магматические образования

Скорость раскристаллизации эффузивных пород большая или очень большая. Для эффузивных пород характерно:

- Порфировые структуры, флюидальные, пористые, брекчиевые текстуры;
- Минералы в значительной степени структурно неупорядочены (пироксены, КПШ, нефелин и др.);
- Сложные, часто «замороженные» твердые растворы;
- Минералы, как правило, проявляют зональное строение, иногда формируются скелетные кристаллы.



Водяно-прозрачные вкрапленники и мегакристаллы санидина из трахитов позднечетвертичного возраста в Рейнском грабене – вулканическая группа Эйфеля.



Магматические процессы

Наиболее важные показатели состава магмы - содержание в расплаве SiO_2 и щелочей ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$).

По содержанию кремнезема магматические породы делятся на:

- ультраосновные (гипербазиты) - SiO_2 менее 45 вес. %
- основные (базиты) - SiO_2 45–52 вес. %
- средние - SiO_2 52–65 вес. %
- кислые - SiO_2 более 65 вес. %

Магматические породы и их главнейшие минеральные ассоциации

| Группа | Породы | | Главные минералы | Второстепенные и акцессорные минералы |
|-----------------|--------------------------|----------------------|--|--|
| | Интрузивные | Эффузивные | | |
| Ультра-основные | Дуниты Перидотиты | Пикриты Коматииты | Магнезиальный оливин, пироксены | Хромшпинелиды, магнетит, ильменит, пирротин |
| Основные | Габбро, нориты | Базальты | Основные плагиоклазы, пироксены | Оливин, роговая обманка, биотит, титаномagnetит, ильменит, апатит |
| Средние | Диориты, гранодиориты | Андезиты, дациты | Средние плагиоклазы, роговая обманка | Биотит, пироксены, кварц, апатит, циркон |
| | Сиениты | Трахиты | КПШ, кислые плагиоклазы, роговая обманка | |
| Кислые | Граниты | Риолиты | Кварц, кислые плагиоклазы, КПШ, слюды. | Роговая обманка, альмандин, циркон, турмалин, магнетит, апатит |

Магматические процессы

Важнейшие механизмы дифференциации магматических расплавов

- 1. Кристаллизационная дифференциация.** При кристаллизации расплава на фоне снижения T происходит закономерное изменение составов остаточного расплава и кристаллизующихся минералов. Возможно получить весь ряд *дифференциатов* от ультраосновных до средних пород.
- 2. Гравитационная дифференциация.** Гравитационная дифференциация характерна для ультраосновных, основных и щелочных магм.
Кристаллизующиеся первыми рудные и феррические минералы (существенно Mg-Fe), имеющие бо́льшую плотность, чем плотность расплава, под действием сил гравитации могут опускаться на дно магматической камеры.
В щелочных магмах возможно иное проявление гравитационной дифференциации. Кристаллизация каркасных алюмосиликатов с низкой плотностью (лейцит, нефелин, ПШ) приводит к их всплыванию и накоплению в верхней части магматической камеры.

Ряд Боуэна – порядок кристаллизации минералов в силикатном расплаве нормальной щелочности.



Признак раннего образования минерала – идиоморфизм

Парагенетические ассоциации щелочных пород не находят своего отражения в ряде Боуэна.

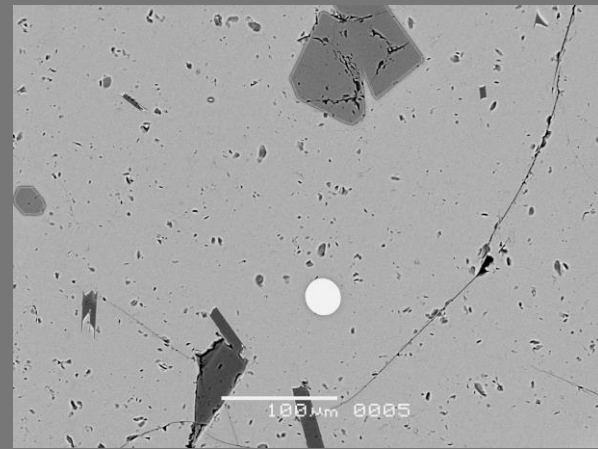
Магматические процессы

3. Ликвационная дифференциация.

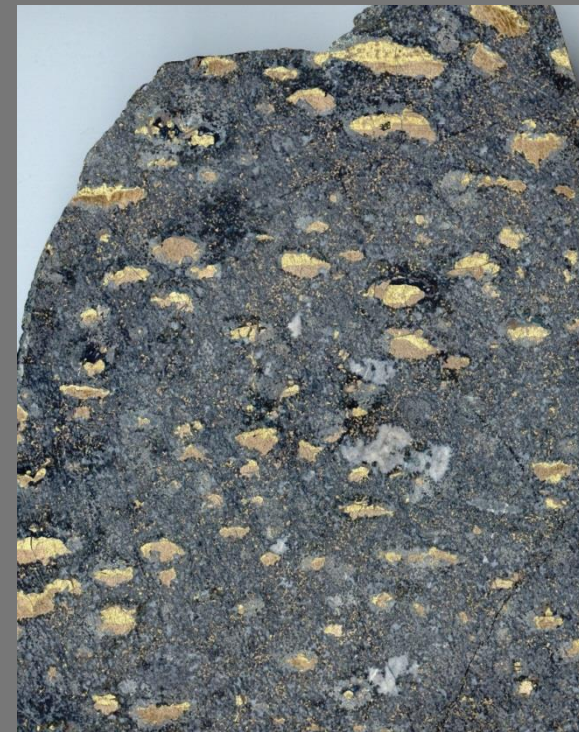
При обогащении магмы некоторыми компонентами (S, P, летучие) в ходе ее кристаллизации может произойти *ликвация* - разделение единого расплава на две несмешивающиеся жидкости (например, силикатный расплав и сульфидный расплав).

Эти жидкости будут обладать различной подвижностью и плотностью; дальнейшая их эволюция может вызвать явления гравитационной дифференциации.

4. **Ассимиляция** расплавом вмещающих толщ с образованием гибридных пород.



Капля сульфидного твердого раствора в базальтовом стекле, СХХ



Капельники в интрузивных породах Норильского рудного поля

Важнейшие типы руд магматического генезиса

| Тип руд | Минералы | | Примеры месторождений |
|--|--|--|--|
| | Главные | Второстепенные | |
| Платиновые | Брэггит, куперит, висоцкит | | Бушвельд |
| Cu-Ni сульфидные руды с платиноидами | Пирротин, пентландит, халькопирит, кубанит, талнахит, моихукит, МПГ | Магнетит, пирит | М-я Норильска, Мончегорск, Печенга, Садбери |
| Хромитовые | Хромшпинелиды , оливин, пироксены, серпентин | Магнетит, МПГ | М-я Полярного, Среднего и Южного Урала, Бушвельд |
| Титаномагнетитовые и титаномагнетит-ильменитовые | Титаномагнетит, ильменит | Гематит, шпинель, рутил, пирротин, халькопирит, пирит, МПГ | Качканарское и Гусевогорское м-я (Урал), Бушвельд |
| Алмазные | Алмаз , оливин, пироксены, флогопит, пироп, ильменит | Шпинелиды, перовскит, апатит, карбонаты | Кимберлитовые трубки ЯАП, ААП, Южной Африки и др.; лампроитовые тела З.Австралии |
| Апатит-нефелиновые | Апатит , нефелин | Титаномагнетит, ильменит, эгирин, КПШ, титанит, эвдиалит | Хибинский массив |
| Лопаритовые | Лопарит | | Ловозерский массив |

Магматические процессы

Ультраосновные породы.

Парагенетическая ассоциация минералов – одна из наиболее высокотемпературных.

Главные породообразующие минералы – оливин (Ol), пироксены (Px), главные акцессорные минералы – хромшпинелиды.

Два важнейших типа ультраосновных пород:

- а) реститовые, остаточные от выплавления базальтов.
- б) кумулятивные – продукты дифференциации магмы, как правило, базитового состава.

Состав хромшпинелидов и оливина весьма информативен.

Оливин. $Mg^{2+} (Ni, Cr^{2+}, Co, Ca) \rightarrow Fe^{2+} \rightarrow Mn^{2+} \rightarrow Zn^{2+}$

Магматический оливин всегда содержит Ca, Ni, Cr. Индикатор степени дифференциации: f, Mn, Ni/Co (с увеличением магнезиальности возрастает содержание никеля до первых мас.%).

Индикатор f O₂ – железистость, индикатор T – магнезиальность, Ca

Магматические процессы

Ультраосновные породы.

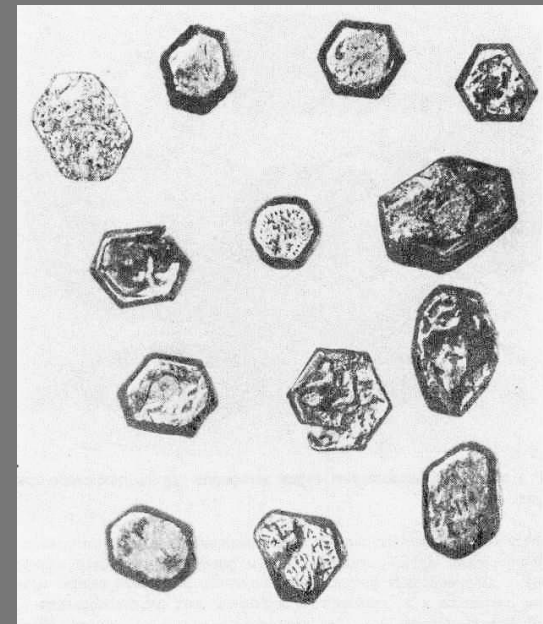
Парагенетические ассоциации минералов — одни из наиболее высокотемпературных. Главные породообразующие минералы — оливин, пироксены, главные акцессорные минералы — хромшпинелиды.

Офиолитовые комплексы — месторождения Cr, источники россыпей ЭПГ (Os-Ru-Ir)

Зональные массивы платформ и складчатых областей — источники россыпей ЭПГ (Pt)

Кимберлиты — алмазы

Самородок платины «Уральский великан» - самый крупный в мире из сохранившихся. Размер 12,7*12,4*9,9; масса 7860 г.

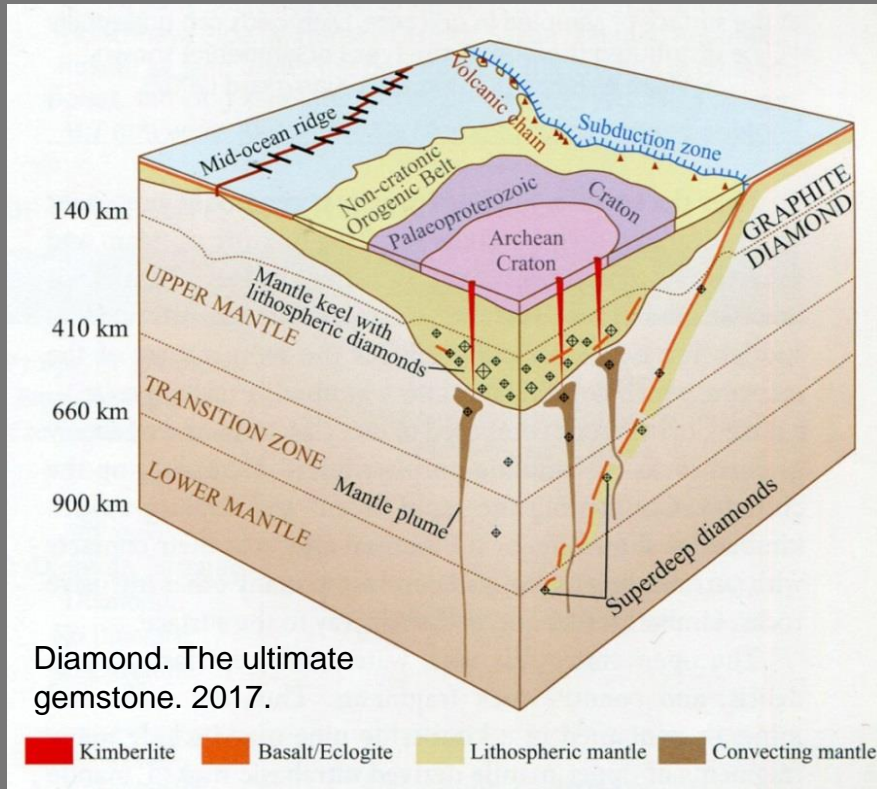


Самородный осмий
Россыпи Среднего Урала



Магматические процессы

Кимберлиты



Большинство алмазоносных кимберлитовых тел приурочены к древним кратонам, жестким весьма устойчивым блокам литосферы (правило Клиффорда).

Расплав кимберлитов формируется в астеносфере и внедряется в литосферу, достигая в конечном итоге земной поверхности. Расплав обогащен водой и летучими (в первую очередь, CO_2). При подъеме к поверхности расплав ассимилирует прежде всего мантийные, а затем и коровые компоненты.

Кимберлиты являются гибридными породами.

Кимберлиты и лампроиты - “лифт”, который транспортирует мантийные алмазы к поверхности Земли.

Изучение включений в алмазах позволило установить кристаллы, сформированные на экстремально больших глубинах, вплоть до **700 километров**. Таковыми оказались алмазы (и захваченные ими минералы) из алмазоносной провинции Juina из Бразилии.

Кимберлиты

Наблюдаемые вариации состава кимберлитов зависят от множества факторов - состав мантийного субстрата, тип мантийного метасоматоза, степень плавления, динамика подъема, флюидный режим при подъеме и др. Эти факторы влияют и на алмазоносность, иногда в значительной степени уменьшая ее.

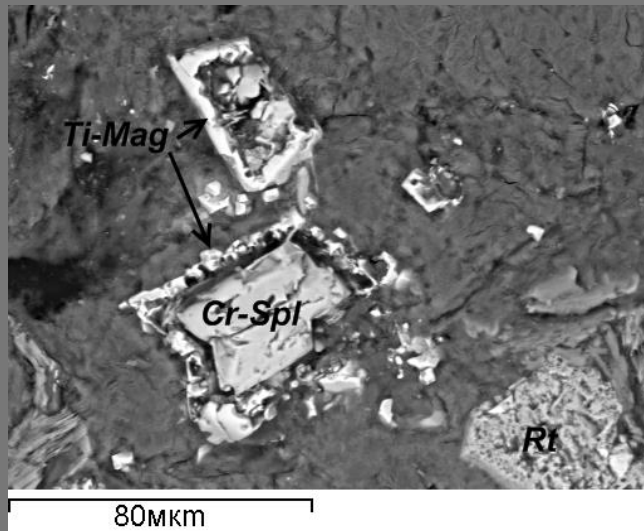
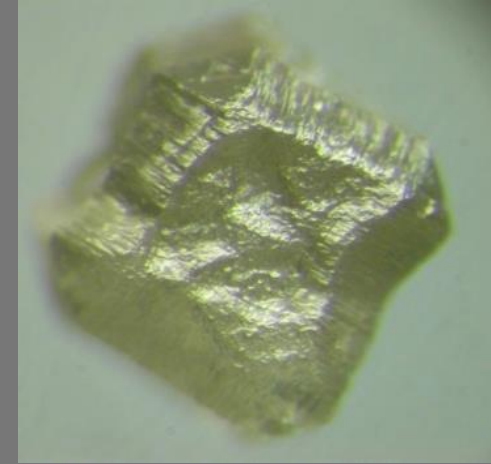
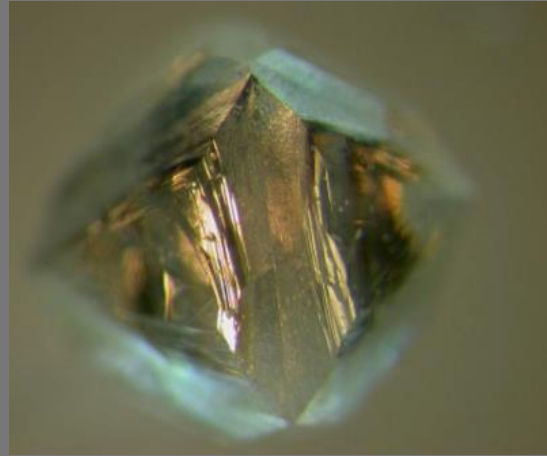
Для сохранности алмаза требуется высокая скорость внедрения кимберлитового расплава, высокая скорость кристаллизации, восстановительные условия.

Главные минералогические критерии алмазоносности кимберлитов:

- а) морфология кристаллов алмаза,
- б) состав минералов-спутников алмаза (пироп, хромшпинелиды, ильменит и др.),
- в) состав минералов связующей массы.

Кимберлиты

Минералогические методы весьма эффективны при поисках кимберлитов и оценки их потенциальной алмазоносности.



Кристаллы алмаза с признаками растворения, трубка им. В. Гриба

Зональные хромшпинелиды с каймами титаномагнетита, Кепинское поле

Материалы Криулиной Г.Ю.

Магматические процессы

Основные породы.

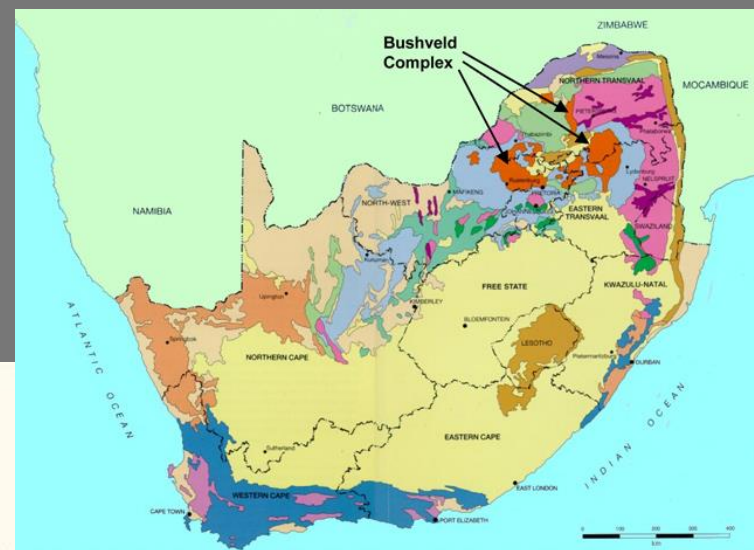
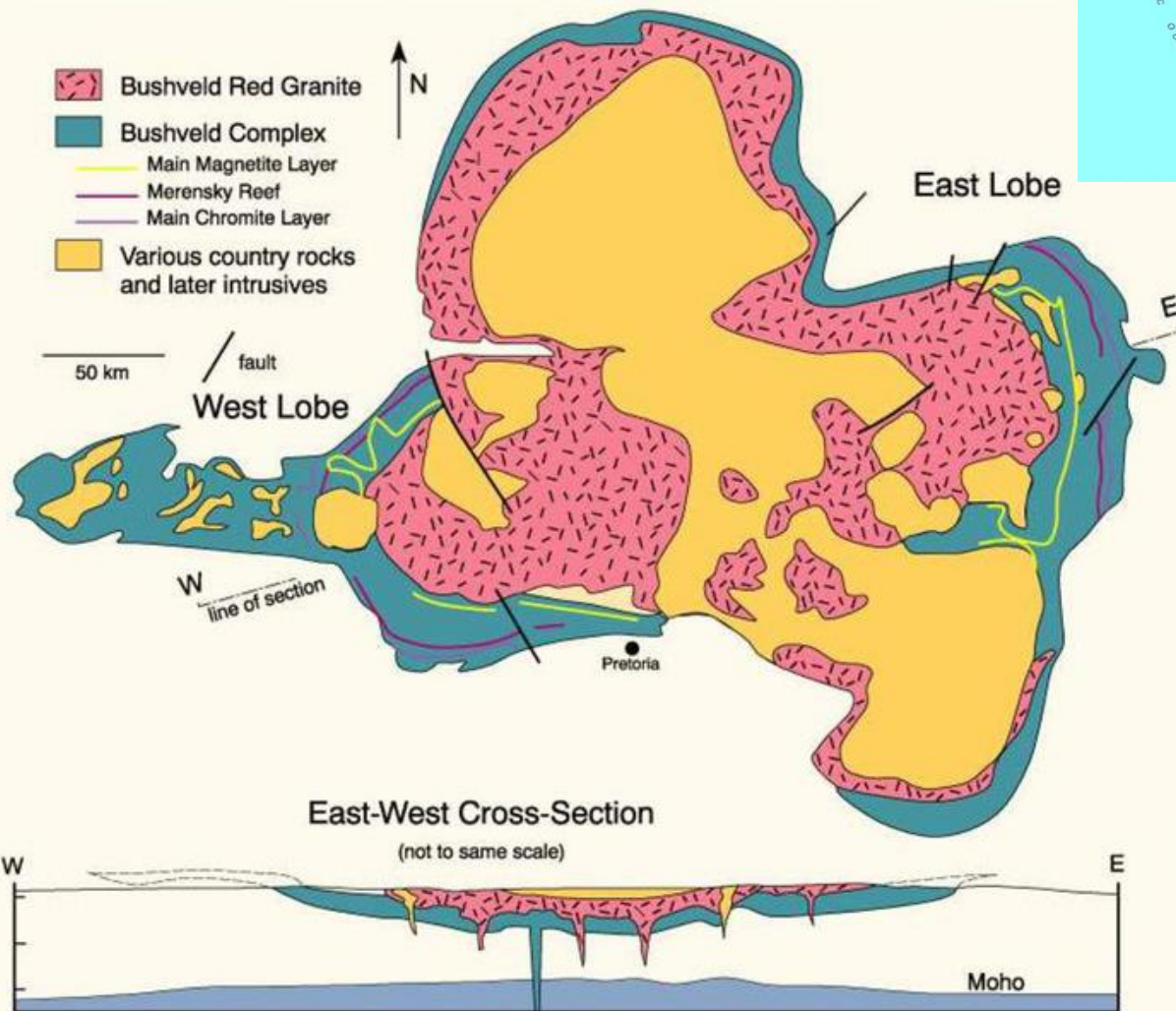
Главные минералы — оливин, пироксены, основной плагиоклаз, в подчиненном количестве может быть роговая обманка.

Важнейшие интрузивные породы - габбро ($\text{Cpx} + \text{Pl}$), габбронориты ($\text{Cpx} + \text{Opx} + \text{Pl}$), нориты ($\text{Opx} + \text{Pl}$); эффузивные - базальты.

Расслоенные комплексы (*магматические сульфидные руды Норильского рудного поля — ЭПГ, Cu, Ni, Co, Ag, Au; Бушвельдский комплекс - ЭПГ, Cr, Ti, Fe*).

Габбровые и габбро-пироксенитовые массивы - *Fe, Ti, V*.

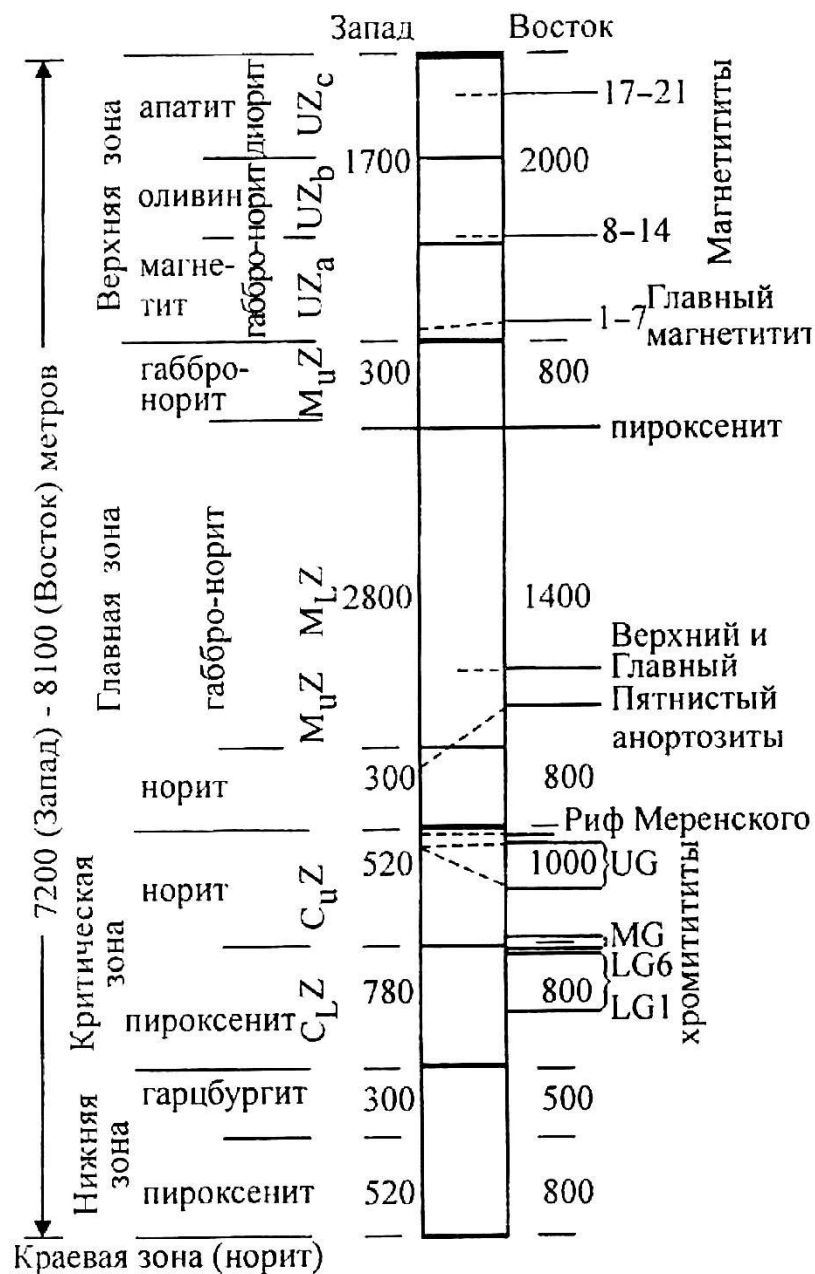
Бушвельдский расслоенный комплекс



Бушвельдский комплекс — самый крупный на Земле расслоенный плутон

350 x 450 км при мощности до 10 км. Объем около 500000 км³

Исходный расплав базитовый



Бушвельдский расслоенный комплекс

Крупнейшие в мире месторождения ЭПГ, Cr и Fe-Ti-V руд;

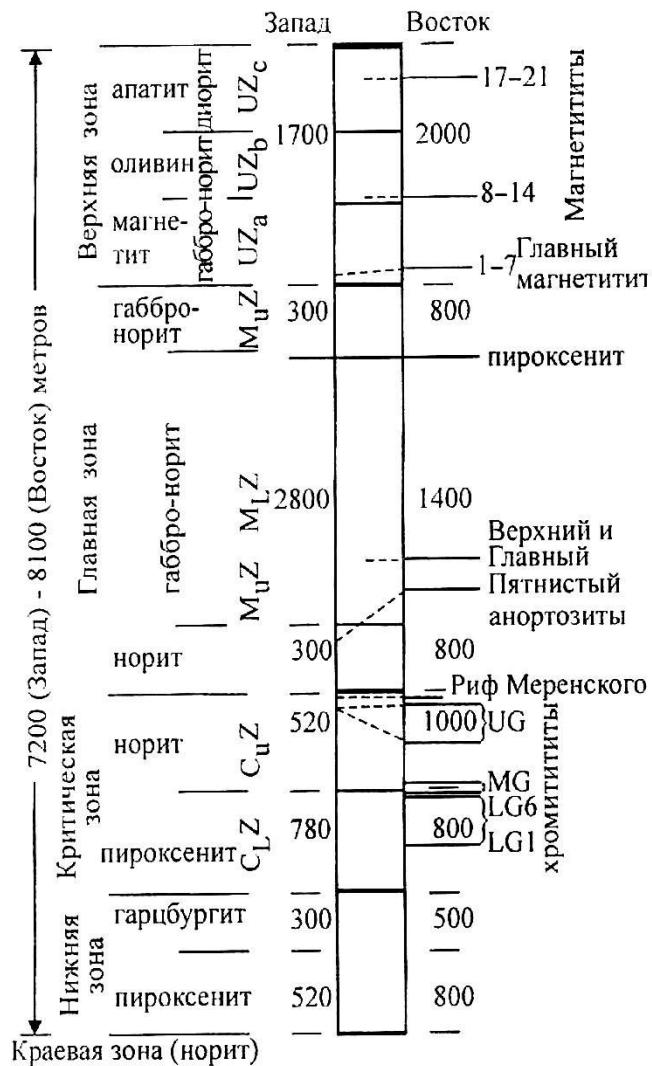
значительные запасы Au, Cu, Ni, Sn, апатитовых руд.



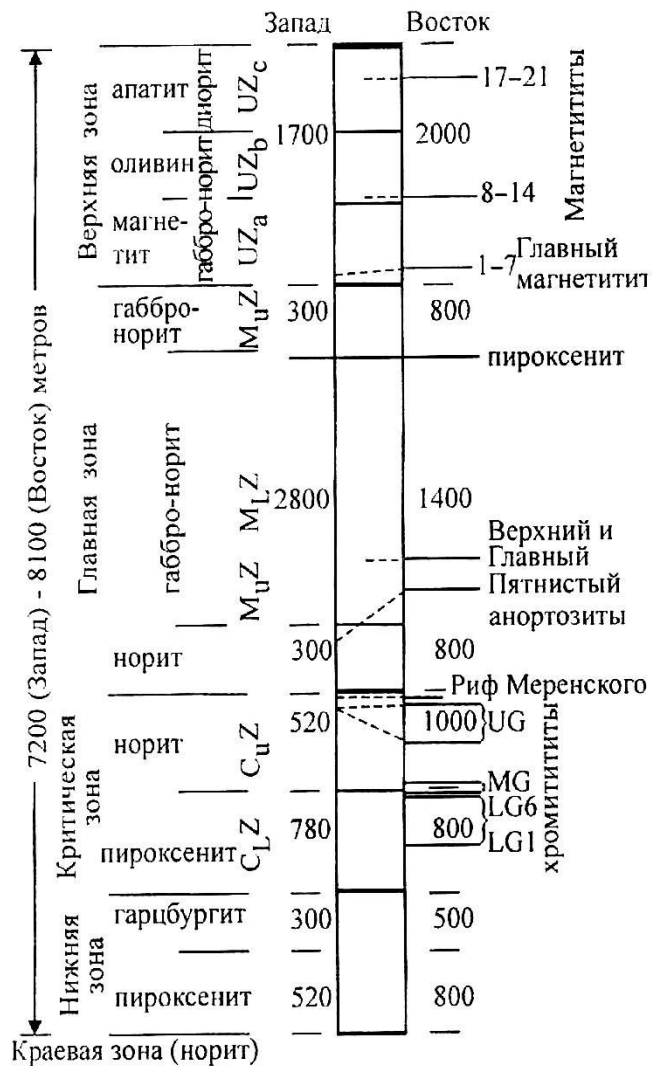
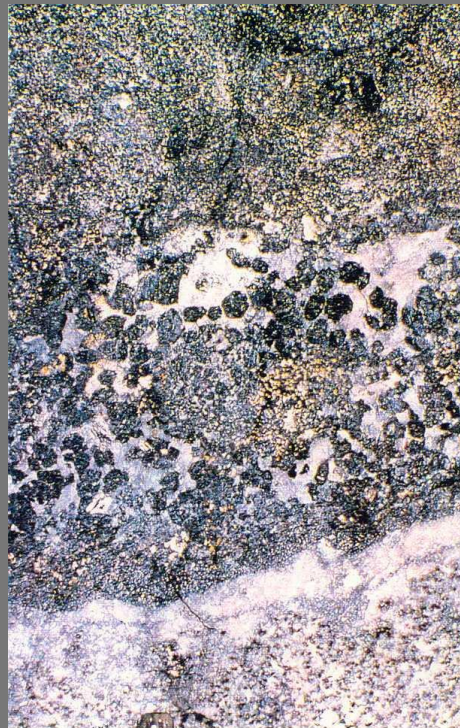
UG-1 и UG-2 – хромитовые горизонты с повышенными конц. ЭПГ (Ir,Os,Ru)

Риф Меренского - протяженный горизонт (мощность 0,4-6 метров) на контакте анортозитов и пород переменного состава от клинопироксенитов

Риф Меренского - протяженный горизонт (мощность 0,4-6 метров) на контакте анортозитов и пород переменного состава от клинопироксенитов



до норитов. На контакте развиты хромшпинелиды, сульфиды.

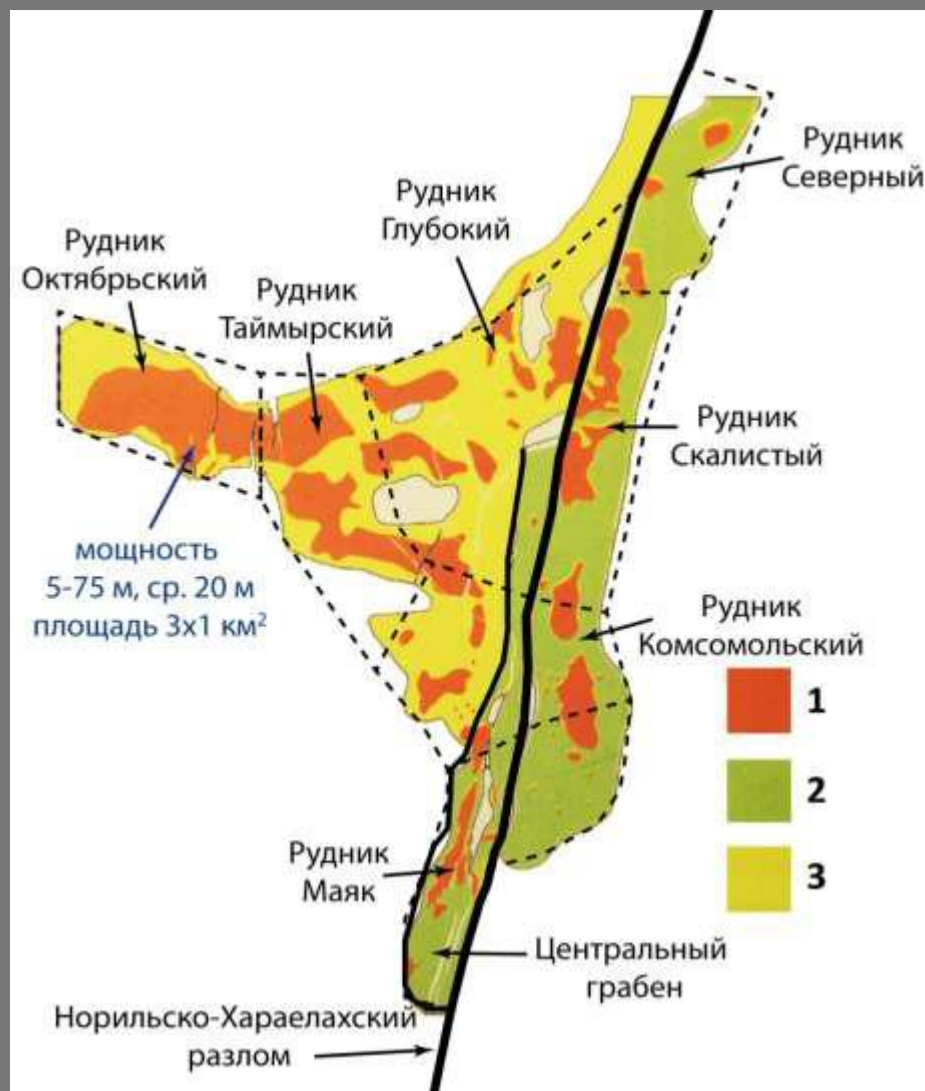


Норильские Cu-Ni-ЭПГ месторождения

Основные промышленные месторождения расположены вдоль глубинного Норильско-Хараелахского разлома.

Сульфидные медно-никелевые руды локализуются в придонных частях стратиформных пологозалегающих интрузий габбро-долеритов или в подстилающих их породах.

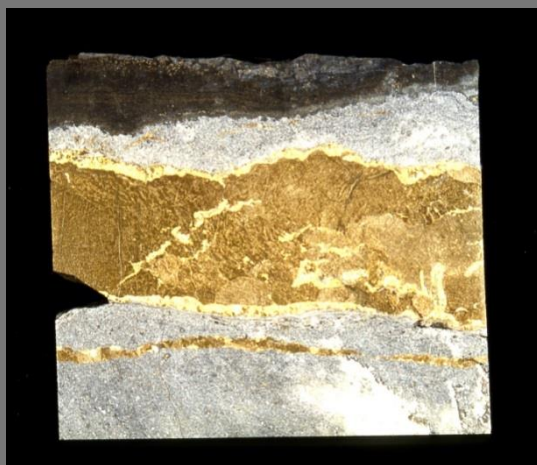
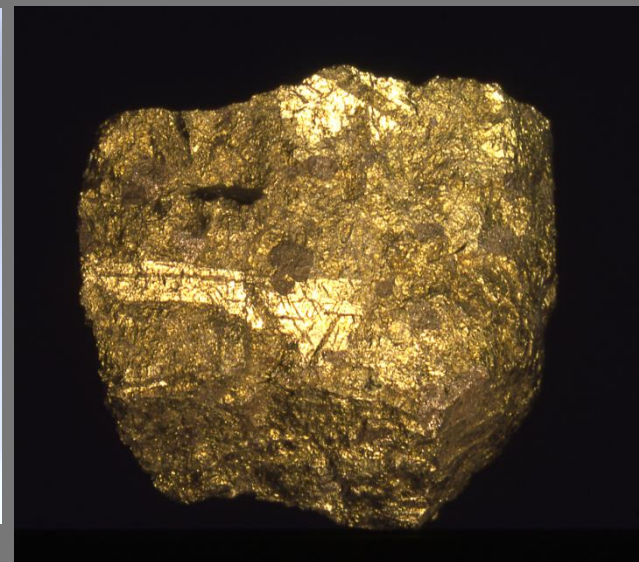
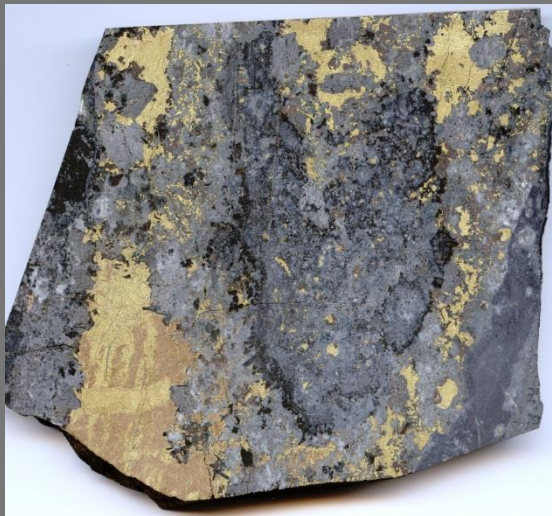
Мощность сульфидных залежей может достигать 75 м!



1 — залежи магматических сульфидов; 2 — Талнахский рудоносный интрузив; 3 - Таймырский рудоносный интрузив.

Данные Спиридонова Э.М.

Типы сульфидных руд Норильских м-ний



Руды Норильска - «мир сульфидных твердых растворов»!

МПГ сульфидных руд месторождений Норильского района

1. Захват ЭПГ в Mss-Iss-PbSss

Mss-совместимые ЭПГ: Ru, Os, Ir, Rh.

Iss-совместимые ЭПГ: Pt, Pd (Au, Ag)

2. Флюидная переработка ЭПГ- содержащих Mss - Iss - PbSss и кристаллизация интерметаллидов Pd и Pt в резко восстановительных условиях при $T \approx 450-350^\circ\text{C}$ при очень низкой fS_2



Вкрапленники - Mss, основная масса- Iss



Метакристаллы сперрилита – наиболее позднего из пневматолитовых МПГ Норильского рудного поля

Магматические процессы

Средние породы.

Диориты - ассоциация роговой обманки (и частично — биотита) со средними плагиоклазами, возможно появление свободного кремнезема (кварц). Эффузивные аналоги диоритов — андезиты, гранодиоритов — дациты.

Сиениты - ассоциация роговой обманки и/или биотита с калиевым полевым шпатом и плагиоклазом.

Эффузивный аналог — трахиты.

Кислые породы.

Граниты. Важнейшие минералы — кварц, биотит, мусковит, калиевый полевой шпат, кислый плагиоклаз.

Эффузивный аналог гранитов — риолиты.

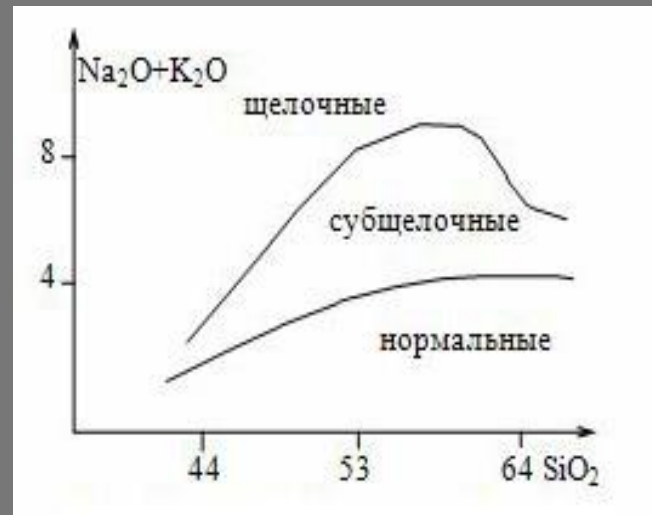
С интрузивными телами среднего или кислого состава связаны месторождения Sn, W, Mo, Cu, Li, Be, B, Rb, Bi, Ta, Au.

Магматические процессы

Породы нормальной щелочности –

низко и умеренно щелочные с кислотными флюидами - H_2O , HCl , HF , SO_2 , H_2S , H_3BO_3 и др.; основная форма железа Fe^{2+}

Продукты их кристаллизации не содержат щелочные пироксены и амфиболы, фельдшпатоиды и иные щелочные минералы



Породы щелочные (Na, K) с щелочными флюидами – CO_2 , Na_2CO_3 , K_2CO_3 , NaF , NaCl , NaOH , KCl , KF , KOH , LiF и др.; основная форма железа - Fe^{3+}

Продукты их кристаллизации обычно содержат фельдшпатоиды и/или щелочные пироксены и амфиболы и иные щелочные минералы. С ростом щёлочности в силикатных расплавах резко возрастают концентрации Ti, P, Zr, Nb, U, Th, REE.

Магматические процессы

Щелочные породы. По содержанию кремнезема эти породы обычно соответствуют средним, реже – ультраосновным, основным и кислым. *Парагенетическая ассоциация этих пород не находит своего отражения в ряде Боуэна.*

Коэффициент агпаитности $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} / \text{Al}_2\text{O}_3$

Нефелиновые сиениты разделяется на 2 подгруппы:

- а) агпаитовые, в которых коэф. агпаитности > 1 ;*
- б) миаскитовые с коэф. агпаитности < 1 .*

В первом случае количества щелочей хватает, чтобы связать весь глинозем и соответствующее количество кремнезема в нефелине и ПШ, и еще остается для образования щелочных темноцветных минералов (эгирин + арфведсонит + эвдиалит + астрофиллит-лампрофиллит + титанит + апатит и др.). Типичный пример - нефелиновые сиениты Кольского полуострова (массивы Хибин и Ловозера).

В миаскитовых нефелиновых сиенитах щелочей хватает только на образование нефелина и ПШ (парагенезис нефелин + КПШ + биотит (или роговая обманка, или эгирин-диопсид) + циркон + пироклор + апатит + титанит).

Широко развито позднее замещение нефелина и ПШ содалитом, канкринитом, альбитом, цеолитами.

Магматические процессы

Щелочные породы.

В целом, распространенность щелочных пород невелика, но с ними связаны важные промышленные скопления апатита, флогопита, магнетита, лопарита, редкоземельных, титановых и циркониевых минералов.



Рудник «Карнасурт»



Рудник "Центральный" на
плато Расвумчорр



Карбонатиты

Состав – карбонаты (кальцит, доломит, анкерит, сидерит) 50-99 %, силикаты (форстерит, мин. группы гумита, щелочные клинопироксены и амфиболы, флогопит и др.), магнетит, перовскит, апатит, флюорит, минералы Nb, Ta, REE.

Генезис – магматический, гидротермально-метасоматический.

Карбонатиты проявляют, как правило, тесную связь с щелочными породами. С щелочными сиенитами связаны карбонатитовые месторождения REE. К этой формации относятся два самых больших из богатых месторождений REE: крупнейшее в мире – Баян-Обо (Внутренняя Монголия, Китай; комплексные руды – REE, Nb, Fe, флюорит) и второе по запасам – Маунтин Пасс (Калифорния, США; чисто редкоземельное).

С кальцитовыми и доломитовыми карбонатитами связаны богатые скопления бастнезита-(Ce), в меньшем количестве присутствуют монацит-(Ce), паризит-(Ce).

Пегматиты

Пегматиты – тела крупно- или гигантозернистого строения, по минеральному составу близкие породам, с которыми они генетически связаны.

Пегматиты могут быть различного состава - известны гранитные пегматиты, габбро-пегматиты, сиенит-пегматиты, пегматиты нефелиновых сиенитов. *Наибольшим распространением пользуются гранитные пегматиты.*

О происхождении гранитных пегматитов долгое время шли дискуссии. По А.Е. Ферсману и его последователям пегматиты являются продуктами кристаллизации флюидонасыщенного магматического расплава с подчинённой ролью метасоматических образований.

По А.Н. Заварицкому, В.Д. Никитину и их последователям – пегматиты являются метасоматическими образованиями, продуктами перекристаллизации жильных гранитов.

Наличие раскристаллизованных расплавных включений в минералах графической, блоковой зон и в кварце ядра гранитных пегматитов свидетельствует о правоте А.Е. Ферсмана.

Гранитные пегматиты

Гранитные пегматиты формируются в условиях закрытой системы в обстановке сжатия. Известны гранитные пегматиты двух петрогенетических типов. Их источники : 1) остаточные магматические дифференциаты малого объёма; 2) палингенные расплавы.

1 тип. Гранитные пегматиты – продукты кристаллизации остаточных магматических дифференциатов, насыщенных летучими (H_2O , CO_2 , HF , HCl , H_3BO_3 , H_3PO_4 ...). Они тесно сопряжены с интрузивами гранитоидов, их изотопный возраст близок возрасту материнских тел.

2 тип. Гранитные пегматиты, не связанные с гранитоидными интрузивами. Они сопряжены с полями развития мигматизированных метаморфитов амфиболитовой, реже гранулитовой фаций. Это мигматит-пегматиты и продукты кристаллизации палингенных гранитных расплавов (от греч. *palin* — снова, обратно и ...генез), возникших при высоких P (5-10 кб). *Это большая часть керамических и слюдяных пегматитов.*

Пегматиты

Зональное строение пегматитов

1. **Графическая зона** – продукт эвтектической кристаллизации.

2. По мере снижения температуры эвтектическая кристаллизация графических агрегатов сменяется образованием очень крупных индивидов полевого шпата и кварца – формируется **блоковый пегматит**.

3. При дальнейшем остывании остаточного расплава преимущественно кристаллизуется полевой шпат, формируя **полевошпатовую зону**.

4. Завершает кристаллизацию остающийся в избытке кварц, образуя так называемое **кварцевое ядро**. Важную роль в его формировании играют и постмагматические процессы. К зоне кварцевого ядра бывают приурочены полости (занорыши).

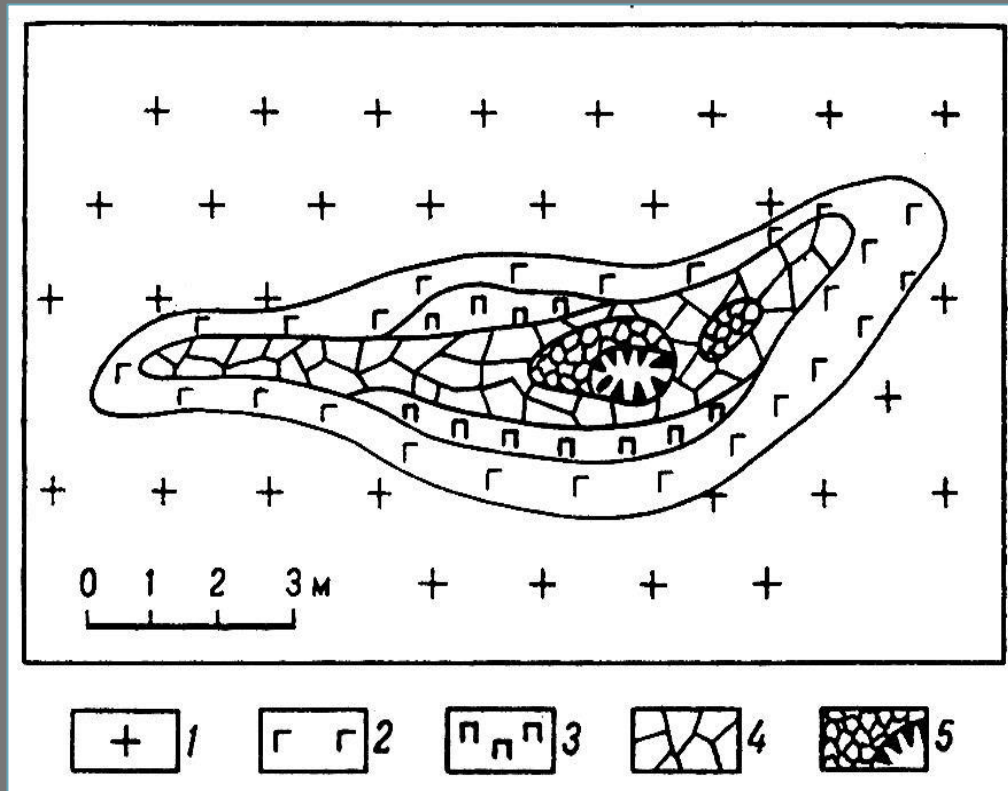


Схема строения пегматитовой жилы камерного типа. 1 – граниты; 2 – пегматит графической структуры; 3 – блоковый пегматит; 4 – полевошпатовая зона; 5 – кварцевое ядро с камерой.

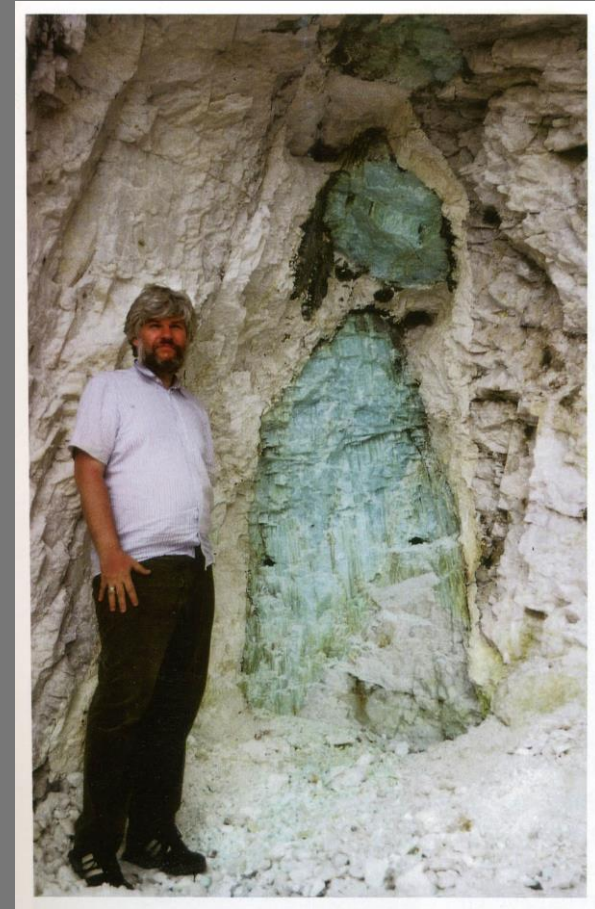
Гранитные пегматиты – природные автоклавы

На магматической “автоклавной” стадии при формировании графической, блоковых зон и кварцевого ядра тела гранитных пегматитов - *закрытые системы, в значительной степени термостатированные.*

Соленость флюидов может достигать 40 и более мас. % (хлориды, фториды, алюмофториды, бораты, борофториды).

Крупные до огромных размеры кристаллов ПШ, кварца, сподумена, берилла, мусковита, топаза и их исключительные качества свидетельствуют о чрезвычайно медленной скорости их кристаллизации.

Термостатирование и фракционная кристаллизация пегматитовых расплавов-растворов обеспечили *высочайшую степень дифференциации вещества*. Собственные минералы образовали даже те химические элементы, которые в стандартных процессах полностью рассеяны в минералах распространённых элементов. Это гафнон $\text{Hf}[\text{SiO}_4]$, поллуцит $\text{Cs}[\text{AlSi}_2\text{O}_6] \cdot \text{H}_2\text{O}$, рубиклин $\text{Rb}[\text{AlSi}_3\text{O}_8]$ и др.



Классификация гранитных пегматитов

- По минеральному составу
- По текстурным признакам
(равномернозернистые, блоковые, полнодифференцированные (присутствует кварцевое ядро) и др.)
- По практической значимости
(керамические, слюдоносные, уран-редкоземельные, редкометальные, хрусталеносные и др.)
- По глубине формирования

Классификация гранитных пегматитов

Температуры формирования пегматитов приблизительно соответствуют 800–500°С и ниже. По давлению (глубинности формирования) пегматиты подразделяются на:

- I. Гранитные пегматиты относительно низких давлений при начальном минералообразовании – 1-2 кбар, - миароловые или кристаллоносные.
- II. Гранитные пегматиты умеренных давлений при начальном минералообразовании – 2-4 кбар, - редкометальные.
- III. Гранитные пегматиты повышенных давлений при начальном минералообразовании – 4-6 кбар, - редкометально-мусковитовые.
- IV. Гранитные пегматиты высоких давлений при начальном минералообразовании – 6-10 кбар, - мусковитовые, уран-редкоземельные, керамические.

С ростом давления заметно меняется состав кварц-полевошпатовых котектик: кварц - К-На полево шпат – 1 кб ~ 40 % кварца, 2 кб ~ 35 % кварца, 4 кб ~ 30 % кварца; кварц – олигоклаз – 1 кб ~ 47 % кварца, 2 кб ~ 43 % кварца, 5 кб ~ 40 % кварца, 10 кб ~ 25 % кварца.

Гранитные пегматиты высоких давлений (глубинные гранитные пегматиты)

Начальные T кристаллизации таких пегматитов могут достигать 850°C . Наиболее глубинные из них содержат в графических сростаниях не более 20 % кварца, - это типичные керамические пегматиты.

Уран-редкоземельные гранитные пегматиты богаты алланитом, апатитом, уранинитом, монацитом, ксенотимом, цирконом, гадолинитом, эшинитом. Эти пегматиты нередко залегают среди метаморфитов гранулитовой или высокотемпературной части амфиболитовой фаций.



Бедные кварцем графические сростания



Розовый кварц характерен для ядерных зон глубинных пегматитов, Antsirabe, Мадагаскар.

Гранитные пегматиты умеренных и повышенных давлений

Редкометалльные пегматиты

Главные минералы – КПШ, альбит, кварц, сподумен, лепидолит

Второстепенные и акцессорные – минералы гр. турмалина, берилл, тантало-ниобаты, касситерит, поллуцит, фосфаты Li

Редкометалльные пегматиты имеют важное промышленное значение. Их размеры нередко весьма значительны – длина до 1500 м, мощность до 150 м.

Сподумен слагает досковидные кристаллы, с продольной штриховкой, пластинчатые, шестоватые. Сподумен может слагать до 25-50 % объёма гранитных пегматитов; в нем заключается до 90 % ресурсов пегматитового лития.

Сподумен, лепидолит, амблигонит. Якутия



Гранитные пегматиты умеренных и повышенных давлений

Лепидолит слагает агрегаты чешуйчатых кристаллов, часто расщеплённых, от мелкозернистых до крупнозернистых. Ассоциирует с альбитом—клевеландитом, кварцем, сподуменом, розовым турмалином.

Практический интерес представляют почти мономинеральные скопления лепидолита.

Лепидолит содержит 3-5 масс. % Li, 1-3 % Cs, до 1 % Rb.

Лепидолит включает около 5 % мировых запасов пегматитового Li, около 25 % мировых запасов пегматитового Cs.



Лепидолит - сферокристаллы.
Карибб, Центр. Африка

Гранитные пегматиты умеренных и повышенных давлений

Амблигонит $\text{LiAl}[\text{PO}_4]\text{F}$ - монтебразит $\text{LiAl}[\text{PO}_4]\text{OH}$

– обычно слагают массивные агрегаты белого, бледно зелёного, голубого, коричневатого цвета. Полупрозрачные до прозрачных.

Самоцветные прозрачные кристаллы золотисто-жёлтого цвета.

Ассоциируют со сподуменом, лепидолитом, розовым турмалином, розовым апатитом. В наиболее крупных дифференцированных пегматитах образуют скопления в сотни тонн. Амблигонит – третий по значимости после сподумена и лепидолита источник лития. Амблигонит и монтебразит часто замещены вторичными фосфатами.



Монтебразит
Mendes Pimentel, Minas Gerais, Brazil



Монтебразит, лепидолит, альбит
Walden Gem Quarry, Portland, Middlesex
Co., Connecticut, USA

Гранитные пегматиты умеренных и повышенных давлений

Поллуцит $\text{Cs}[\text{AlSi}_2\text{O}_6]$ – главный минерал-концентратор и носитель цезия.

Поллуцит очень похож на кварц. Отличается более низкой твёрдостью, часто пересечен сетью макро- и микро-прожилков лепидолита (один из надёжных признаков поллуцита).

Простая операция отличия кварца и поллуцита – поместить мелкие зёрна на стекле под микроскоп, поллуцит – изотропный, кварц – нет.



Крупный кристалл поллуцита.
Shengus, Пакистан

Гранитные пегматиты умеренных и повышенных давлений

Колумбит и танталит – важные промышленные минералы. В них заключена половина общих ресурсов Ta. Крупнейшее в мире пегматитовое месторождение танталита – Гринбуш в Австралии содержит около 40.000 тонн Ta.

Это типоморфные минералы гранитных пегматитов. Общий тренд эволюции их состава – ферроколумбит (FeNb_2O_6 ; ранние колумбиты иногда содержат Mg) → манганколумбит (в различной степени танталистый) → ферротанталит → мангантанталит (MnTa_2O_6). Состав данных минералов – хороший индикатор хода дифференциации гранитных пегматитов.



Pio Cabral mine,
Мозамбик

Касситерит – высокотемпературный твёрдый раствор на основе SnO_2 . Содержит значительные примеси Fe, Ti, Mn, W, Ta, Nb. Особую ценность пегматитовому касситериту придают высокие до 5 мас. % содержания Ta.

Гранитные пегматиты относительно низких давлений (малоглубинные гранитные пегматиты)

Пегматиты миароловые или кристаллоносные.

Объём кристаллоносных камер в пегматитах Волыни на Украине в апикальной части позднепротерозойского Коростенского плутона лейкогранитов достигали 250^3 м.

Кристаллы из камер имели весьма внушительную массу - морион более 1000 кг, берилл - до 16 кг, топаз - до 117 кг.



Богатые кварцем графические срастания. Волынь, Украина

Пегматит 576, отработанная камера

<http://webmineral.ru/>

Гранитные пегматиты относительно низких давлений

Важный источник кварцевого сырья и драгоценных камней



Берилл, Пакистан



Эльбаит, дымчатый кварц, альбит. Афганистан.



Топаз, Урал

Аквамарин, Пакистан



Аквамарин на кварц из Nit Mine, Shigar/Brady Valley, Пакистан. Друза состоит из 27 кристаллов аквамарина, вес 204 кг.

ГРАНИТНЫЕ ПЕГМАТИТЫ. Инверсионные образования.

В ходе кристаллизации пегматитового расплава увеличивается флюидное давление, которое в ряде случаев может возрасти до величин, превышающих литостатическое давление и прочность вмещающих пород.

При этом пегматитовая система может протекать и флюиды мигрировать во вмещающие породы.

Этому может способствовать переход α - β кварца с большим объёмным эффектом.

Около редкометальных пегматитов во вмещающих амфиболитах, кристаллических сланцах, габброидах возникают ореолы привноса F, Li, Rb, Cs с обильным образованием холмквистита ($\text{Li}_2(\text{Mg,Fe})_3\text{Al}_2[\text{Si}_8\text{O}_{22}](\text{F,OH})_2$) и биотита-флогопита (Cs до 4-6 мас. %, Rb до 1 %, Li до 0.5 %).

В некоторых пегматитовых полях это явление принимало грандиозный масштаб - в гранитных пегматитах осталось всего 20 % ресурсов Cs, 35 % Rb, 50 % Li. Запасы Cs, Rb, Li в таких ореолах достигают многих десятков тысяч тонн.

ГРАНИТНЫЕ ПЕГМАТИТЫ. Инверсионные образования.

Остаточные флюиды, проникшие во вмещающую среду, активно с ней реагируют. При этом флюиды разбавляются, их кислотность снижается (появляется возможность роста минералов с Fe^{3+} и с Mn^{3+} (рубеллит, спессартин, сподумен - кунцит). Часть вещества, заимствованного из вмещающих пород, мигрирует в пегматитовые полости.

В гранитных пегматитах, залегающих среди магнезитовых мраморов (Кухилал), появились минералы, обогащённые магнием - кордиерит, магнезиальный турмалин, магноколумбит; в гранитных пегматитах, залегающих среди гипербазитов (Липовка) — магнотанталит. В пегматитах других регионов описаны хром-содержащие минералы - сподумен-гидденит, розовый топаз, берилл-изумруд; отмечаются полихромные кристаллы берилла, в которых на розовый Li-Cs берилл нарастает голубой Fe-Mg-Na берилл.

ГРАНИТНЫЕ ПЕГМАТИТЫ. Инверсионные образования.

Инверсионный турмалин – медистый эльбаит



<https://www.mindat.org/>



<https://www.mindat.org/>

Синий эльбаит São Jose da Batalha (Параиба, Бразилия) содержит до 2,5 мас.% CuO и до 9 г/т Au (Brown, 1993).

ГРАНИТНЫЕ ПЕГМАТИТЫ. Инверсионные образования.

Сподумен $\text{LiAl}[\text{Si}_2\text{O}_6]$.

Прозрачный кунцит образуется ниже 500°C , ассоциирует с клевеландитом и лепидолитом. При наличии во вмещающей среде серпентинитов с феррихромитом в сподуменовых гранитных пегматитах появляется зелёный хромсодержащий гидденит.



Сподумен, Нуристан,
Афганистан



Пегматиты

Пегматитовый тип минералообразования чрезвычайно важен в практическом отношении.

Гранитные пегматиты явились первым промышленным типом месторождений Sc, REE, Zr, Hf, Ta, Nb, U, Th и др.

Значительный объём добычи Li, Rb, Cs, Ta, Be в настоящее время осуществляется из пегматитовых месторождений.

С гранитными пегматитами связаны промышленные месторождения слюд и керамического сырья.

Из пегматитовых занорышей добывают драгоценные камни - берилл различной окраски, турмалин, топаз, сподумен, хризоберилл, кварц. Пегматиты служат также источником пьезокварца, оптического флюорита и турмалина.

Пегматиты нефелиновых сиенитов и сиенит-пегматиты являются концентраторами Zr, Hf, U, Th, Nb, Ta, REE, Ti.

Минералогия ВОЗГОНОВ

Минералогия фумарольной (экспляционной) формации очень своеобразна. *Половины известных здесь минералов открыты именно в фумаролах, причем из этого числа большинство эндемично для данной формации.*

В первичных фумаролах источник газов магматический, во вторичных (бескорневых) фумаролах источник тепла и отчасти газов — остывающие лавовые потоки или пирокластический материал, не имеющие прямой связи с очагом (жерлом вулкана).

Для фумарольного минералообразования характерен широкий температурный диапазон (от 30–50°C до 800–1000°C) при давлении, близком к атмосферному. Самые низкотемпературные отложения близки к типичным гипергенным образованиям, то ассоциации, возникающие при $t > 100–150^\circ\text{C}$, уже весьма специфичны. Именно их в большинстве случаев рассматривают как собственно фумарольные.

Возгоны — стык эндогенных и экзогенных процессов!

Минералогия ВОЗГОНОВ

Минералообразование в фумарольных системах:

- путем прямого осаждения из газовой фазы (собственно эксгальационные образования – возгоны, возникающие при постепенном или резком снижении температуры газов или в результате их реакций с атмосферными компонентами);
- при взаимодействии горячих газов и паров с окружающими породами;
- путем кристаллизации из водных растворов при разгрузке газовых струй в воду («лагони»);
- в результате разнообразных процессов вторичных преобразований ранее кристаллизовавшихся фаз (их реакции с атмосферными агентами и метеорными водами: окисление, гидролиз, гидратация, карбонатизация; фазовые переходы и распады при остывании и др.).

Минералогия возгонов

Фумарольные газы:

- источник тепла;
- носитель летучих компонентов, в т.ч. «агрессивных» анионов (Cl^- , F^- , SO_4^{2-} , S^{2-} , BF_4^- , SiF_6^{2-} и др.) и катионов (NH_4^+);
- эффективный переносчик целого ряда металлов и полуметаллов, (халькофильных - Cu, Zn, Pb, Cd, Tl, In, Bi, As, Se, Te; сидерофильных - Fe, V, Mo, Re, Au);
- мощный окислительный агент в одних случаях и, наоборот, восстановительный агент — в других.

В газовой фазе очень эффективно осуществляется разделение многих компонентов, в первую очередь металлов, близких между собой по химическим свойствам.

Благодаря этому в возгонах фумарол возникают собственные минералы (а иногда и их значительные скопления) некоторых редких и/или рассеянных элементов: Re, In, Cd, Tl, Se, Br, I. Такая минерализация известна на вулканах Кудрявом (Курилы), Толбачике, Мутновском (Камчатка), Вулкано (Италия), Усу-зан (Япония).

Минералогия возгонов

Среди относительно высокотемпературных фумарол выделяются два типа, принципиально различающихся по характеру возникающей в них минерализации: **«восстановленные»** и **«окисленные»**.

Восстановительный характер, как правило, имеют первичные фумаролы, окислительный же в первую очередь типичен для вторичных, где главным компонентом горячих газов является попадающий в систему атмосферный воздух.

Наиболее яркий элемент-индикатор этого параметра – **сера**: для «восстановленных» фумарол характерна сульфидная минерализация, для «окисленных» – сульфатная.

«Окисленные» фумаролы Толбачика

Яркий представитель фумарол «окисленного типа» – это фумарольные поля, связанные со **шлаковыми конусами Большого трещинного Толбачинского извержения 1975-76 гг (БТТИ)**.

Здесь по сей день действуют десятки вторичных фумарол с температурой газов на выходе до 480°C ; в составе этих газов 99% атмосферного воздуха (данные *М.Е. Зеленского*).

Установлено около 300 минералов, связанных с фумарольной деятельностью! Открыто около 130 новых мин.видов!



Среди минералов этих фумарол отсутствуют сульфиды, а главную роль играют кислородные соединения (сульфаты, ванадаты, арсенаты, молибдаты, оксиды и др.) и хлориды.

Второй конус Северного прорыва БТТИ

«Окисленные» фумаролы Толбачика



Тенорит CuO – главный минерал меди
экспозиционных медных рудопроявлений
Толбачика Ширина поля 5 мм. Фото: J. Eshche.



Эвхлорин $\text{K}_2\text{Cu}_3\text{O}(\text{SO}_4)_3$. Кристаллы
до 1 мм. Фото: Е. Вонасіна.



Кристаллы федотовита $\text{KNaCu}_3\text{O}(\text{SO}_4)_3$.
Фото Пекова И.В.

«Окисленные» фумаролы Толбачика



Игольчатые кристаллы йохиллерита
 $\text{Na}(\text{Mg,Zn})_3\text{Cu}(\text{AsO}_4)_3$ с сильвином.

*Между галитом и сильвином
образуются твердые растворы!*



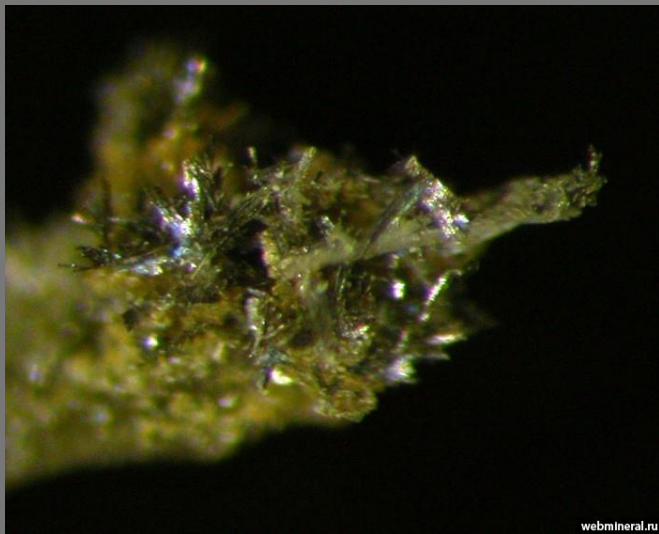
Оранжевый шаферит
 $\text{NaCa}_2\text{Mg}_2(\text{VO}_4)_3$ на ангидрите.



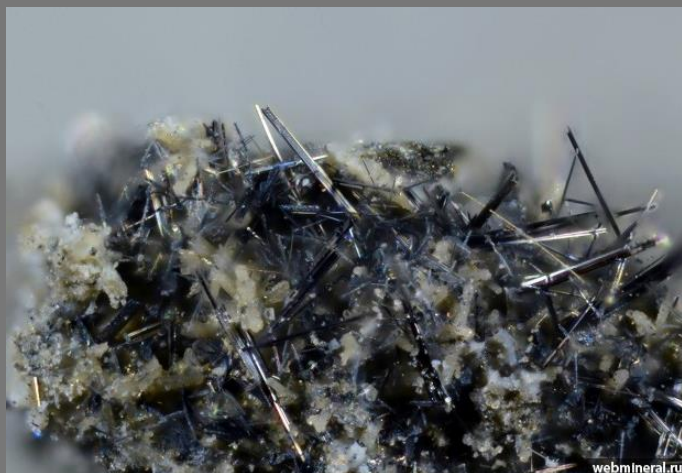
Галит

«Восстановленные» фумаролы

Характерны сульфиды, сульфосоли.



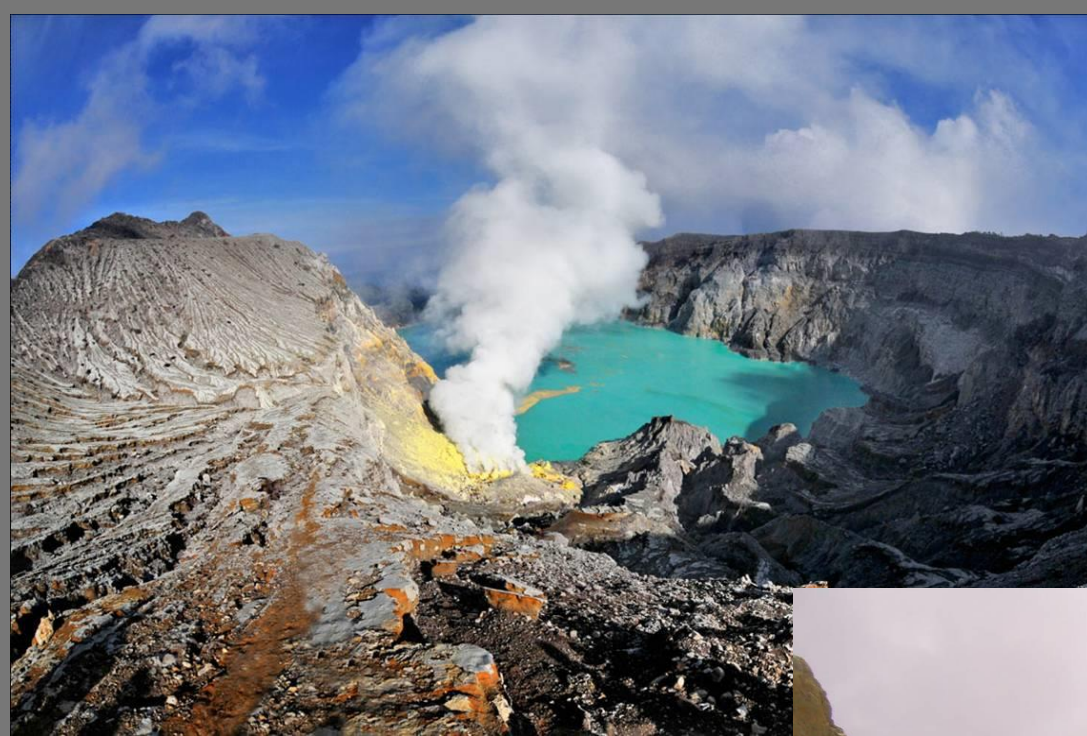
Абрамовит $\text{Pb}_2\text{SnInBiS}_7$



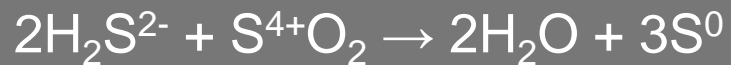
Знаменскиит $\text{Pb}_4\text{In}_2\text{Bi}_4\text{S}_{13}$



Рениит ReS_2 - вулкан Кудрявый, о. Итуруп, Курилы. Кристалл 2 мм. Фото: М. Богомолов.



В практическом отношении наибольшее значение эксгальационное образование имеет для самородной серы, сассолина H_3BO_3 , а также Re! (Курильские о-ва, Сицилия, Индонезия)



Сольфатары вулкана Иджен на острове Ява (Индонезия) породили большое богатое месторождение серы. Фото: Н. Лукиных.



Месторождение серы
в кратере вулкана Иджен
сегодня активно
разрабатывается.
Вручную...



Фото: Н. Лукиных.