

# **Рост кристаллов при разных пересыщениях. Образование скелетных кристаллов.**



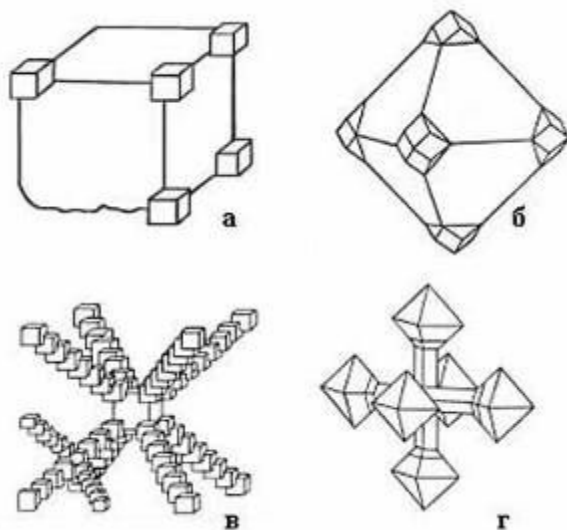
Глава 4.4.1. монографии «Генезис минеральных индивидов и агрегатов» Н.И. Красновой и Т.Г. Петрова, иллюстрирована студенткой IV курса Фоминой В.Ю.

**Санкт-Петербург  
2006 г.**

Под скелетными кристаллами понимаются монокристаллические образования сложной, значительно отличающейся от геометрически идеализированной формы, у которых в результате резкой разницы скоростей роста по различным направлениям минеральное вещество заполняет не всё тело многогранника, а только его часть.

Широко известная классификация геометрических типов скелетных кристаллов приведена в работах И.И. Шафрановского (1961, 1966) и совместных с В.А. Мокиевским (1956). Нам представляется, что изучение и классифицирование главным образом конечных продуктов кристаллизации без привлечения наблюдений за реально идущими процессами роста скелетных кристаллов привело к неточностям в определении конкретных форм.

**Скелеты — это монокристаллы, рост которых осуществляется соответственно в привершинных или в приреберных участках.**



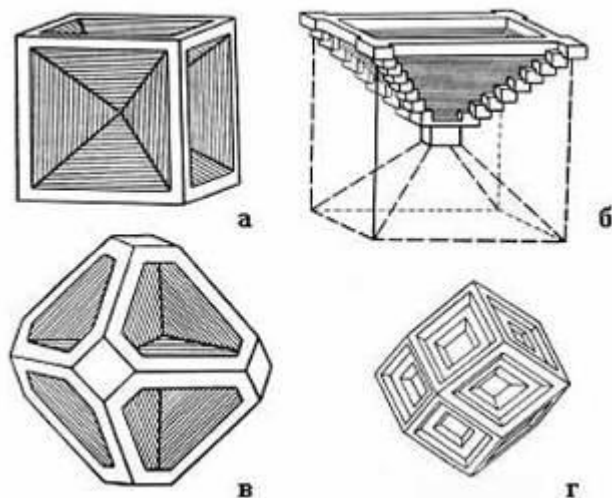
а - кубический вершинник на кристалле искусственного алмаза (Безруков и др., 1966); б - октаэдрический вершинник флюорита, ограниченный ромбододекаэдром (по В. Гольдшмидту); в - кубический вершинник меди, ограниченный кубом, возникший в условиях ритмического изменения скорости роста (по А. Задебеку); г-октаэдрический вершинник магнетита, ограниченный октаэдром (по Дымкину и Пермякову, 1984).

Вершинные  
формы  
Рис. 1.

## Реберные формы скелетных кристаллов

Макроскопические включения, воронкообразные углубления — реберные скелеты — и далее по мере нарастания  $\Delta C$  — вершинные скелеты возникают при преобладании диффузионного лимита процесса роста.

Реберные  
формы  
Рис. 2



а - кубические реберники поваренной соли; б - «лодочка», плавающий кристалл - сочетание реберной и вершинной форм скелетного кристалла; в- ромбододекаэдрический реберный скелетный кристалл нашатыря; г - октаэдрический реберный скелетный кристалл пирита; а, в, г — по Шафрановскому, 1968; б — по А. Кнопу.

В описании скелетных кристаллов целесообразно указывать, во-первых, направление преимущественного роста вершин или ребер и, во-вторых, собственную форму в их огранке. Для краткости описание вершинника или реберника может быть представлено в виде дроби, где в числителе — символ формы, к которой принадлежат данные вершины или ребра, а в знаменателе — символ простой формы в огранке скелета. Могут быть и случаи роста вдоль вершин или ребер, принадлежащих более чем одной простой форме, в этом случае в числителе нужно указать со знаком «+» символы обеих простых форм.

**Контрольное задание:**

**Дайте описание вершинным и реберным формам кристаллов, представленным на рис. 1 и 2.**

## Вершинные формы скелетных кристаллов

В условиях пульсационного изменения скорости роста образуются скелетные кристаллы с ритмическим колебанием размеров отдельных элементов индивида. Часто возникают скелеты, как бы состоящие из срастающихся друг с другом вершинами отдельных субиндивидов, причем расстояние между ними — трансляция — прямо зависит от длительности ритма этой пульсации скорости роста (см. фото 1 и рис. 4).



Фото 1. Обр. 160-2. Октаэдрические вершинные скелетные кристаллы синтетической шпинели. (Дар А.А. Антонова).



Обр. 160-2. Деталь.

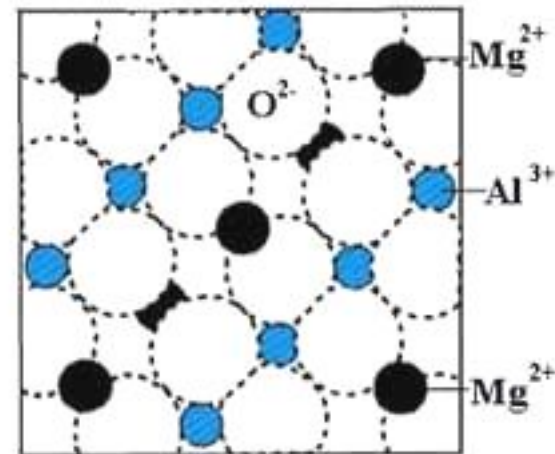


Рис. 3. Схема структура шпинели.

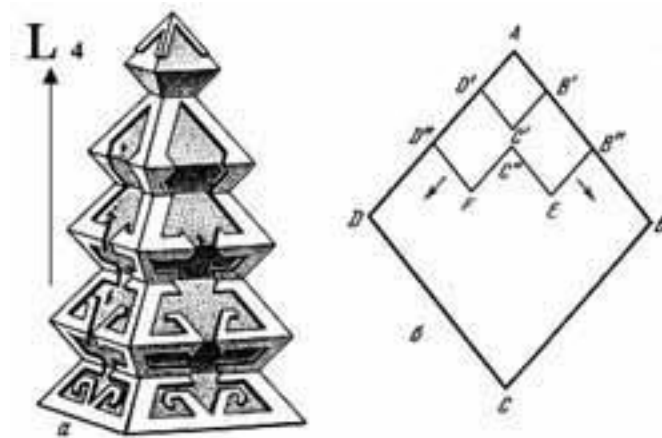
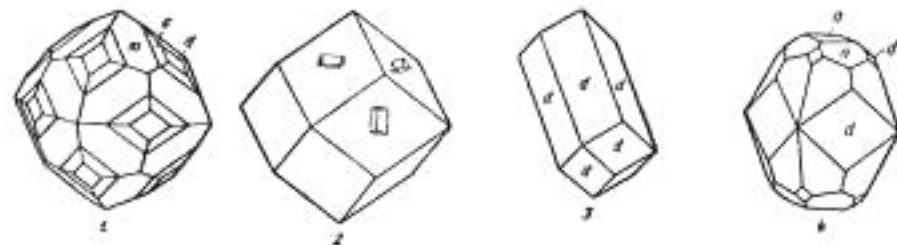


Рис. 4. Схема образования скелетного кристалла шпинели (по Г.Г. Леммлейну, 1973).

При больших пересыщениях рост скелетов идет иррациональными поверхностями, причем в направлении, перпендикулярном к вектору роста ветвей скелета, плоские грани вообще отсутствуют. При этом ветви скелета имеют часто клиновидные, кинжалообразные очертания. При снижении пересыщения появляется ступенчатая поверхность, образованная гранями с рациональными символами.



Обр. 160-1. Вершинные скелетные кристаллы нашатыря, развитые по осям 4-го порядка. Кишлак Рава, Таджикистан.



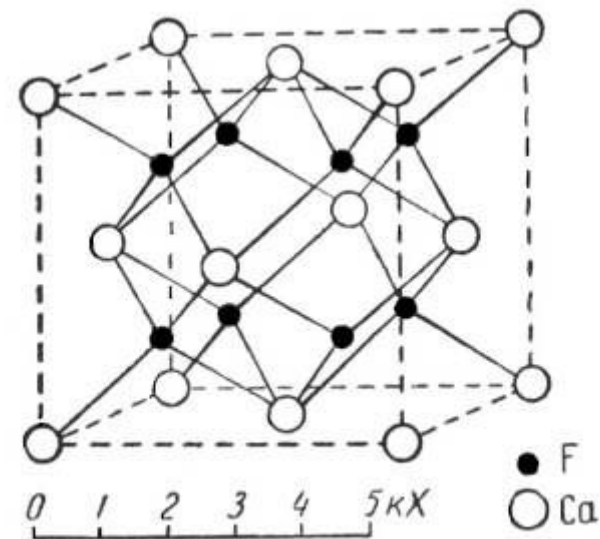
Морфология кристаллов нашатыря.



Обр. 149-1. Скелетный кристалл нашатыря. Кишлак Рава, Таджикистан.



При росте вершинного скелета от первичных ветвей могут отходить ветви второго, а от последних — третьего и так далее порядков. В результате формируется объемная решетчатая постройка. Аналогичные ответвления могут возникать и при росте реберных скелетов



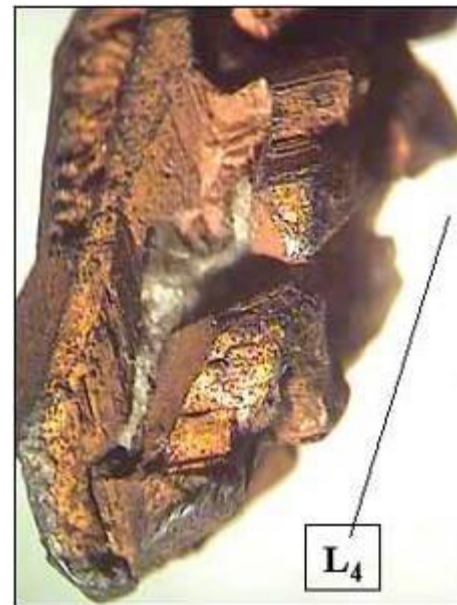
Структура флюорита

Обр. 176. Скелетный монокристалл флюорита в массе зерен апатита. Амба-Донга, Индия. Дар А.Г. Булаха.

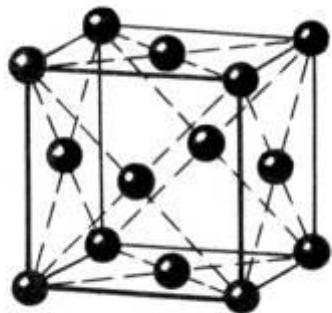
**Многие ветви вершинников или реберников на концах имеют характерные утолщения, свидетельствующие о постепенном замедлении роста индивида.**



Обр. 164. Деталь. Вершины кристаллов меди сложены гранями октаэдра (111)



Обр. 164. Дендрит самородной меди, ветви которого сложены вершинными скелетными кристаллами. Урал.



Структура золота, серебра, меди



Обр. 169. Скелетные кристаллы серебра в халцедоне.

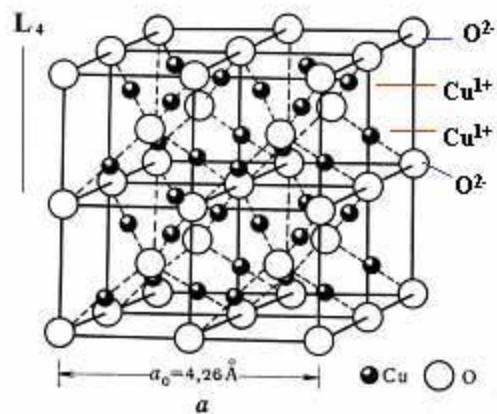




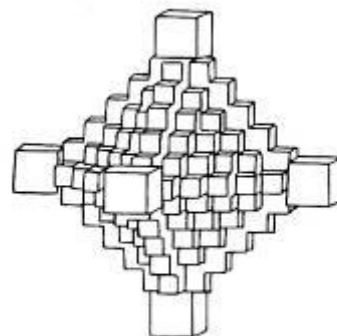
Обр. 166. Скелетные вершинные кристаллы куприта  $\text{Cu}_2\text{O}$  в пустотах красной медной руды. Нижний Тагил.



Обр. 166. Деталь



Структура куприта



Октаэдрический вершинник, ограниченный кубом (Шафрановский, 1968).



**В одних случаях кристалл практически с самого начала растет в виде скелета, в других — скелетный рост может начаться после стадии нормального полногранного роста.**



**Конкретная форма скелетного кристалла зависит от пересыщения раствора: при очень больших пересыщениях скелет имеет вершинную форму, а при малых – реберную (Руанг Хуанг Мо, 1976).**

**Обр. 146. Переход к скелетному росту скипетровидного аметистовидного кварца. Грани призмы «ножки» кристалла покрыты присыпкой м/з минералов.**

## Реберные формы скелетных кристаллов



Обр. 148-1. Реберные скелетные кристаллы кварца в пустотке между кристаллами папиршпата.

Обр. 148-1. Деталь





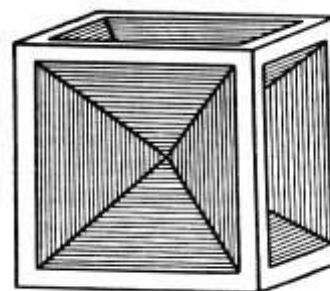
**Обр. 158. Реберные скелетные кристаллы мориона с примазками глинистых минералов из кварцевой жилы. Алдан.**



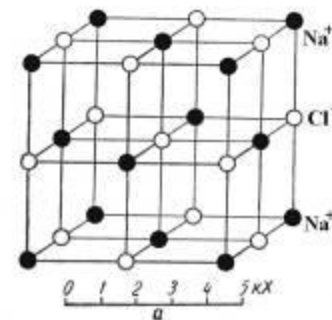
## Реберные формы скелетных кристаллов



Обр. 160. Реберный скелетный кристалл (вероятно, иньюита) в глине. Мест. Индер.



Реберный скелетный кристалл галита.



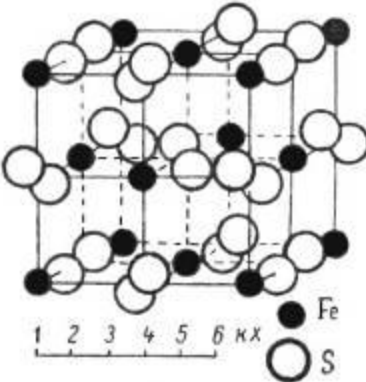
Структура галита.



Обр. 142. Реберные скелетные кристаллы галита

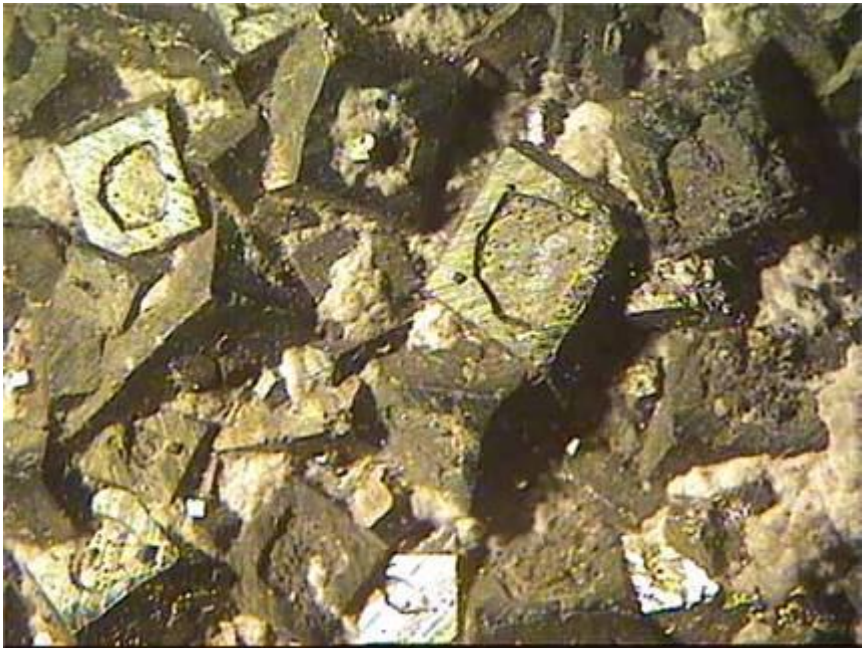


Обр. 145. Стадия реберного роста у кристаллов пирита. Конкреция в органогенном известняке.



Структура пирита.

Обр. 145. Деталь.





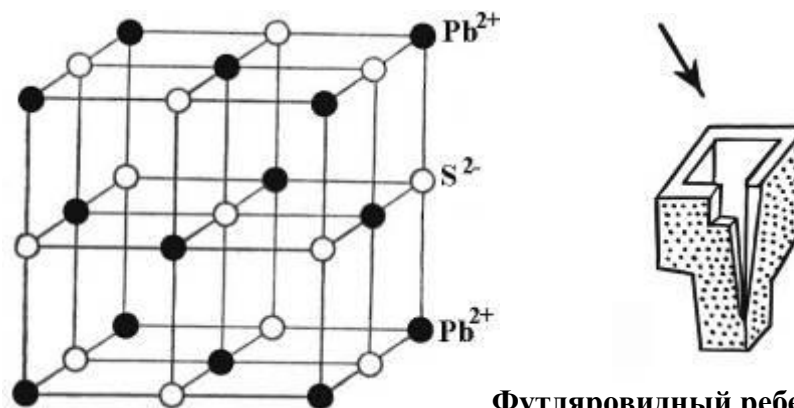
**В условиях направленного движения раствора возникшее включение в средней части грани может долгое время не зарастать, в результате чего формируется воронкообразный, футляровидный или трубчатый кристалл.**



**Обр. 148. Коробчатые реберные скелетные кристаллы галенита с присыпками кальцита. Мадан, Болгария**



**Обр. 151. Коробчатые реберные скелетные кристаллы галенита. Мадан, Болгария**



**Футляровидный реберный скелет галенита, выросшего при одностороннем поступлении питающего раствора.**



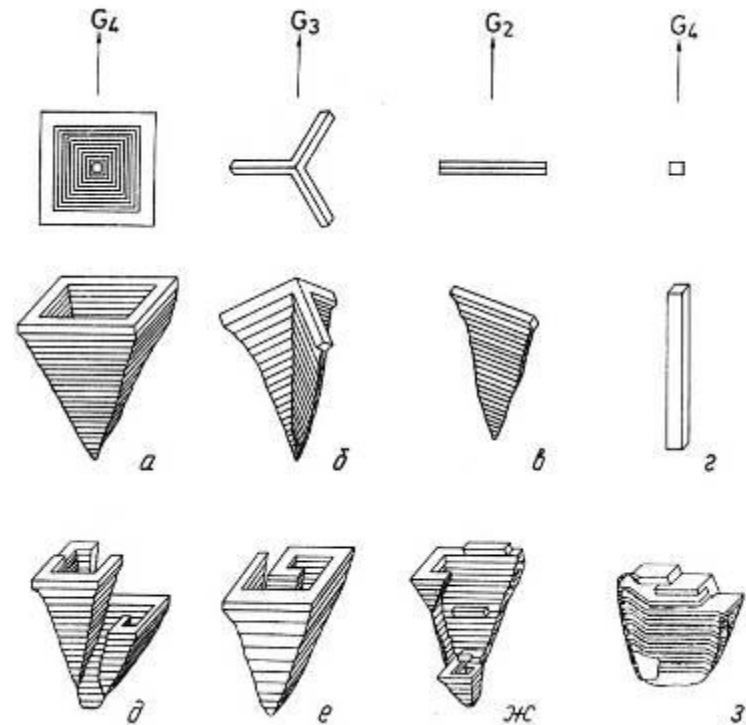
На формирование скелетных кристаллов может оказывать влияние и химический состав среды, т.е. эти процессы идут и при смешанном лимите процесса роста (с преобладанием диффузионного лимита). Так, зависимость формы скелетных кристаллов галенита от концентрации компонента PbS в системе PbS — NaCl была изучена Е.А. Годовиковой (1976). Скелетные кристаллы галенита синтезировались в кварцевых запаянных ампулах из смеси PbS — NaCl. При содержании в смеси 90-50 % PbS получались грубоскелетные футляровидные кристаллы галенита со множеством перегородок, параллельных граням {100}. Эти две разновидности кристаллов морфологически сходны с некоторыми природными скелетными индивидами галенита из месторождений Приморья (Дальнегорское) и Болгарии. При снижении концентрации PbS до 50-40 мол. % в данной системе кристаллизуются кубические футляровидные индивиды галенита, в которых перегородки расположены к граням куба примерно под углом 45°, а ребра имеют округленные ("оплавленные") очертания. Уменьшение концентрации PbS в смеси до 30-1 мол. % приводило к образованию двумерных дендритных форм кристаллов, зарождение которых начиналось на каплях PbS в солевом растворе. Сходные скелетные кристаллы галенита (двумерные вершинники) были обнаружены и в природных условиях — в трещинах доломитизированных известняков. При содержании PbS менее 1 мол. % возникали каплеобразные или тонкие волосовидные выделения галенита. В дальнейшем было бы желательно изучить аналогичную зависимость морфологических особенностей скелетных кристаллов галенита от содержания PbS в системе, более близкой к природным гидротермам: PbS - NaCl – H<sub>2</sub>O.

Фото двумерного скелетного кристалла галенита, выросший вдоль трещины в доломитизированном известняке. Одна из L<sub>4</sub> скелета ⊥ плоскости фотографии.



**Возникновение градиента пересыщения вдоль поверхности грани легче всего достигается путем увеличения вязкости среды, а не простым увеличением пересыщения. В вязкой среде скелетные кристаллы могут появляться при малых значениях пересыщений (переохлаждения порядка  $0.1-0.2^{\circ}\text{C}$ ). Необходимо помнить, что лишь определенное соотношение скоростей роста кристаллов и скоростей диффузии раствора в окружающей инертной среде, например в геле, приводит к возникновению скелетных индивидов.**

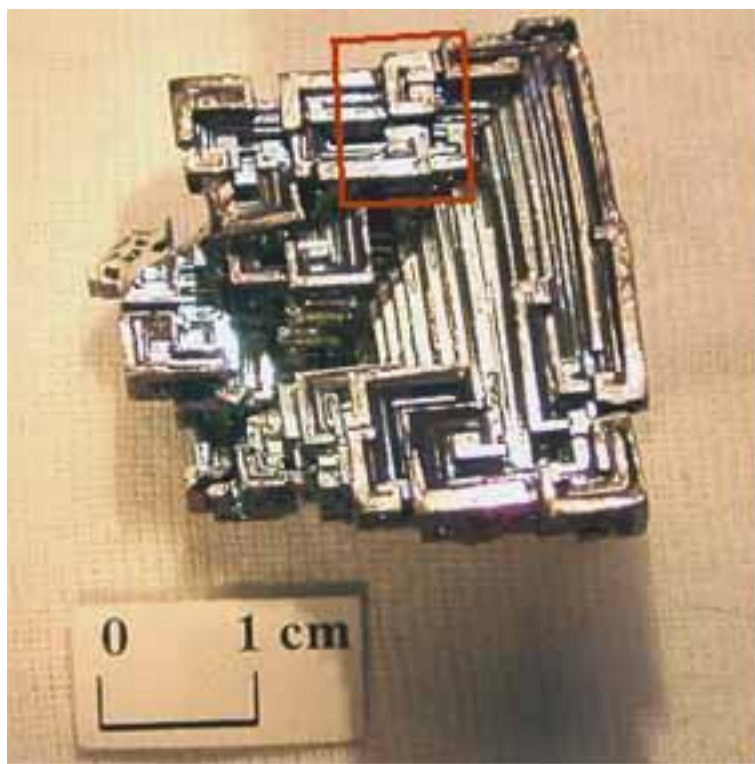
**Чем больше анизотропия скоростей роста граней, встречающих поток и параллельных потоку, тем более вытянут этот реберный скелет и уже воронка. При направлении потока под углом к удлинению образуется воронкообразный индивид с боковой щелью.**



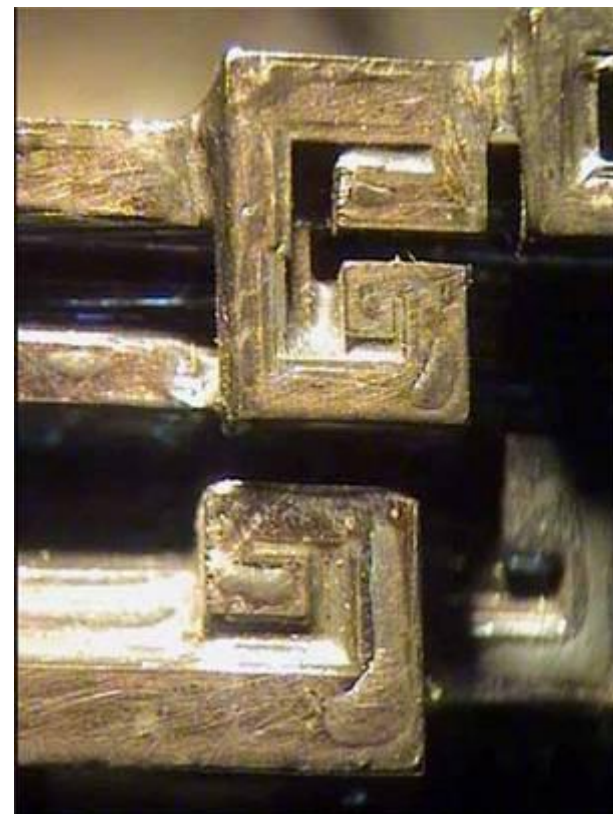
**Морфология и ориентировка скелетных кристаллов галенита из свинцово-цинковых месторождений центральных Родоп Болгарии (Бонев, Горова, 1972).**

Руанг Хуанг Мо (1976) удалось доказать, что при возникновении градиента пересыщения вдоль поверхности грани практически прекращается работа вициналей в средних частях граней, тогда как сильно активизируется деятельность вициналей, расположенных вблизи от ребер кристалла. Было установлено, что во многих случаях механизм роста скелетных кристаллов тоже является дислокационным, хотя при очень больших пересыщениях скелет может расти за счет двумерного зародышеобразования (Amelinckx, 1953).

Обр. 168. Реберный футляровидный скелетный кристалл синтетического висмута.

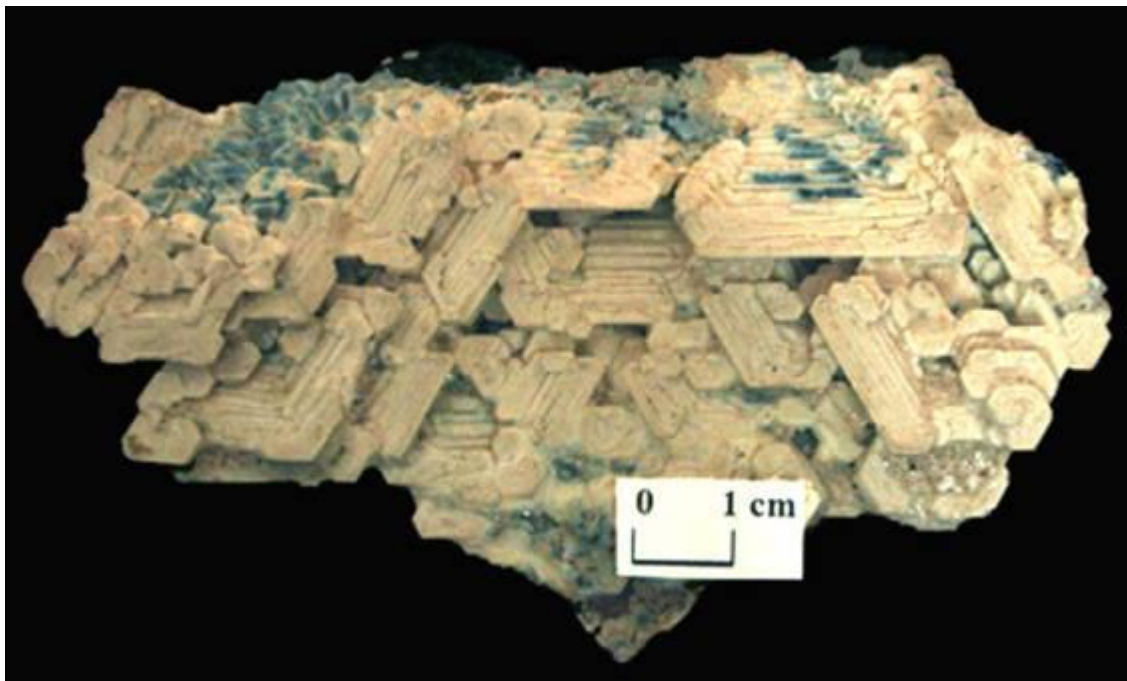


Грани при вершинах реберника - куб (100)



Обр. 168. Деталь. (Vi - псевдокубический). Видны спиралевидные слои роста у вершин.



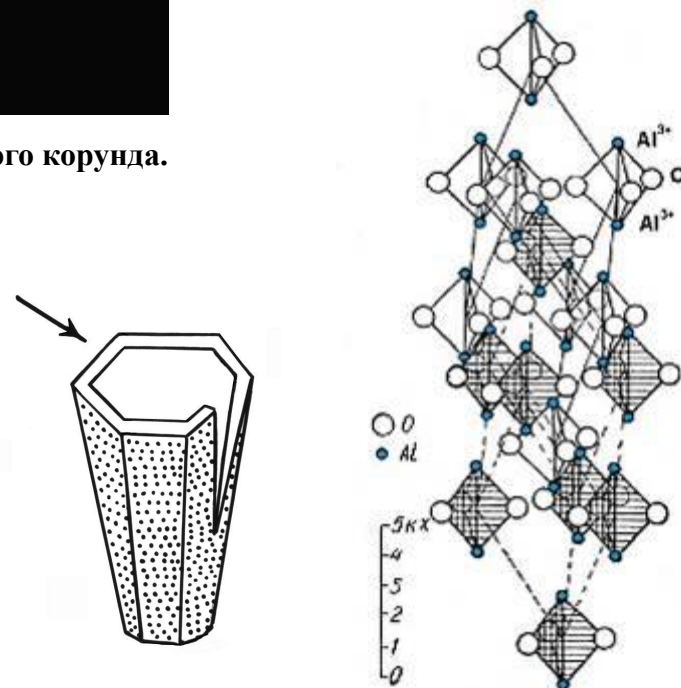


Обр. 480-1. Реберные скелетные кристаллы синтетического корунда.



Обр. 480-1. Деталь.

Структура корунда.



При снижении пересыщения происходит закрытие воронки и образуется пустотелый кристалл. Таким образом, коробчатые и футляровидные скелеты и многокамерные постройки являются полистадийными образованиями.



Обр. 159. Скелетный кристалл кварца с полостью.



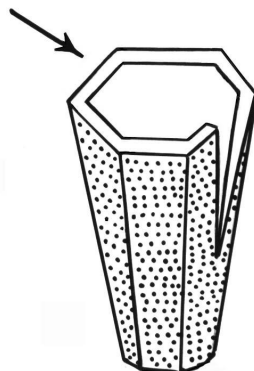
Обр. 178. Футляровидный кристалл кварца с включением зернистой массы полевого шпата.



Обр. 171. Футляровидный кристалл апатита в сростании с полевым шпатом. Чупа. Северная Карелия.



Обр. 174. Футляровидные кристаллы апатита в пегматите. Чупа. Сев. Карелия.



Футляровидный реберный скелетный кристалл минерала, выросший при одностороннем поступлении питающего раствора (направление показано стрелкой).



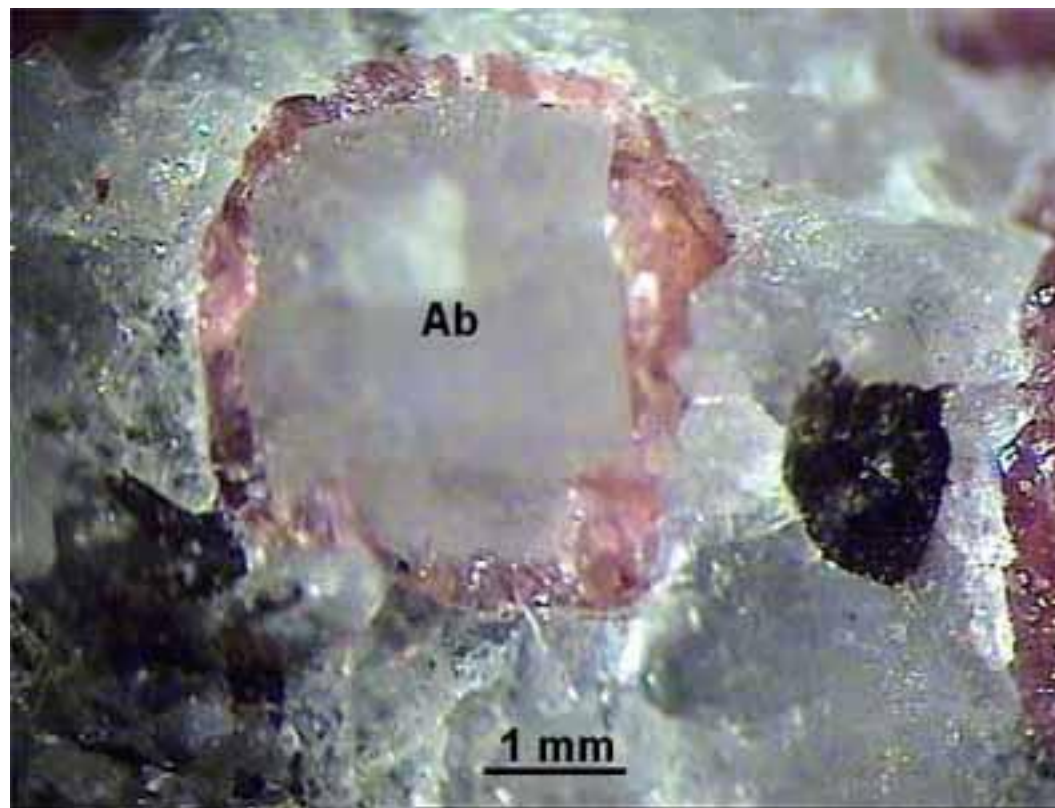
Футляровидные кристаллы очень характерны для берилла и апатита из гранитных пегматитов. Полые индивиды оливина встречаются в некоторых лавах, а экспериментально их рост был воспроизведен в лаборатории Н.Ф. Челищевым (1970). Футляровидные кристаллы гексагонального сульфида цинка были получены при кристаллизации из паровой фазы (Кузнецов, Харин, 1969). Аналогичная форма характерна и для скелетных кристаллов магнезия, синтезированных также из газообразной среды (Кватер, Фришберг, 1977). Таким образом, скелетный рост кристаллов возможен не только в вязких средах, как иногда утверждается, но и в любых других.



Обр. 186. Футляровидный кристалл апатита, рассеченный трещинами. Чупа. Сев. Карелия.



Обр. 173. Футляровидные кристаллы апатита с «начинкой» из граната-альмандин в пегматите. Чупа. Северная Карелия.

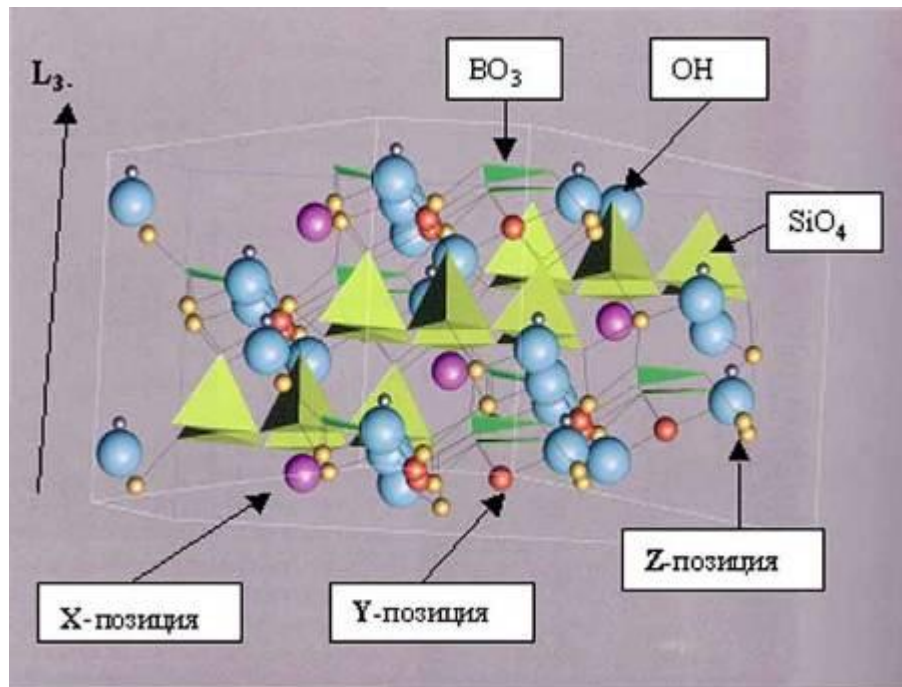


Обр. 172-1. Футляровидный кристалл алмандина с ядром альбита, Хит-остров, Северная Карелия.

Обр. 201. Футляровидный кристалл берилла в пегматите. Питкяранта, Сев. Приладожье.



Обр. 183. Турмалин, футляровидный кристалл. Сев. Карелия



Структура турмалина.



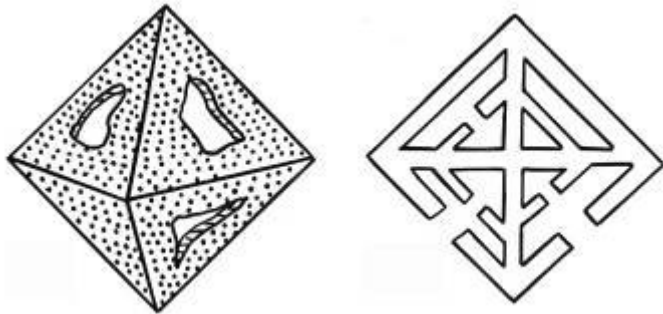
Обр. 175. Паргасит с кальцитом, футляровидный кристалл. Алдан





Обр. 189. Деталь.

Обр. 189. Скелетные кристаллы магнетита в кальцитовом карбонатите. Ковдор.



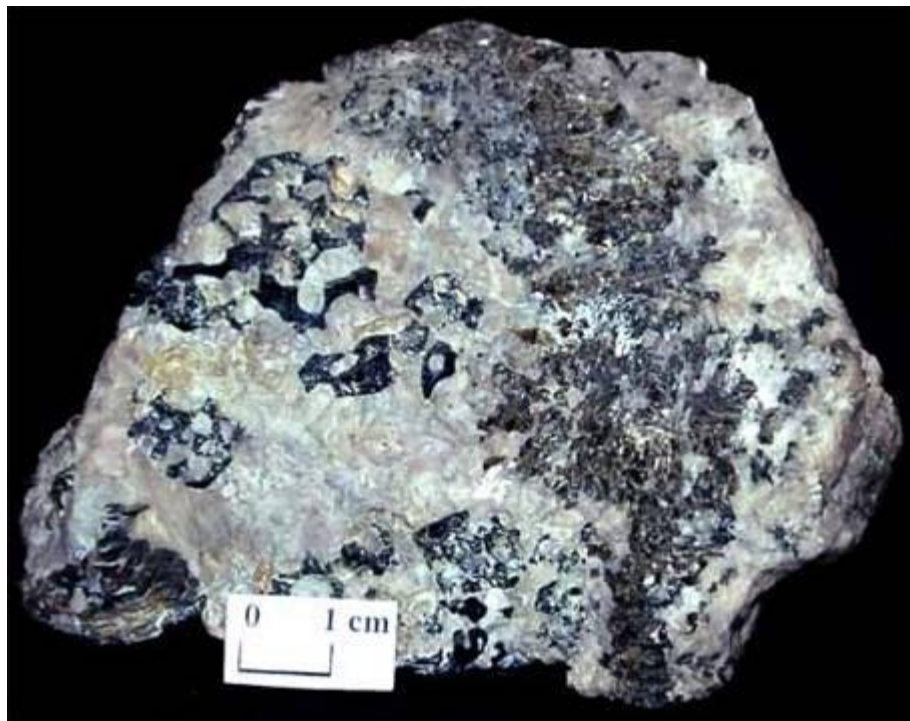
Реберный решетчатый (каркасный) октаэдрический кристалл шпинелида и его сечение





**Обр. 202. Футляровидные кристаллы магнетита с тетраферрифлогопит-кальцитовой «начинкой» в гнезде кальцита. Ковдорское флогопитовое месторождение.**





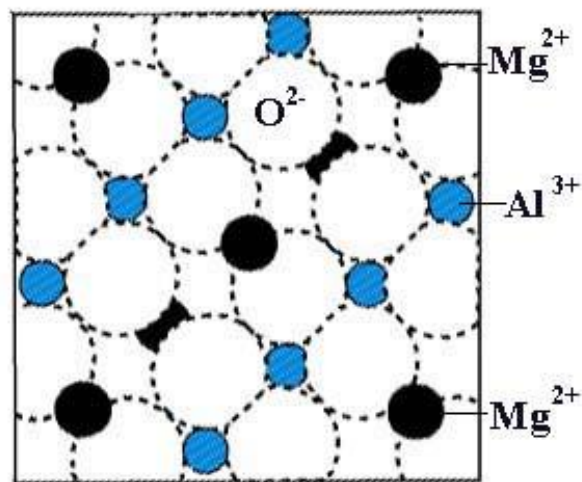
Обр. 181. Скелетные кристаллы шпинели в зернистом кальците. Алдан.



Обр. 190. Кристалл шпинели, протравленный в HCl (фрагмент обр. 181)



Обр. 182. Скелетный кристалл граната андрадита (меланита) в м/з массе апатита. Гули.



Структура шпинели



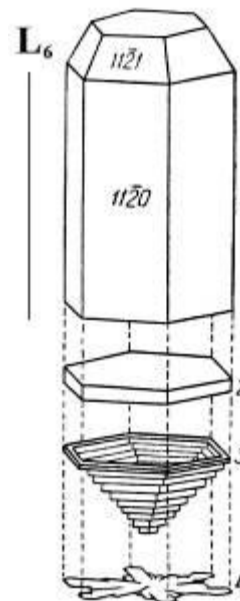
В особых условиях возникают скелетные кристаллы — «лодочки» (типа, как на рис. 2 б). Рост их начинается с образования кристаллического зародыша на поверхности раствора, затем вследствие испарения раствора начинается скелетный рост кристалла, причем наиболее быстро на границе кристалл — раствор — воздух, где возникает локальное высокое пересыщение. В дальнейшем идет реберный и вершинный рост лишь у верхней поверхности кристалла, который постепенно погружается в раствор. Кристалл «лодочка» удерживается некоторое время в плавающем состоянии силой поверхностного натяжения, а затем по достижении определенной массы падает вниз.



Фото Владимира Мальцева. Пещера «Китеж». Ледяные сталактиты и сталагмиты. При конденсации паров воды на кровле образуются снежинки, а сталагмиты растут за счет кристаллизации стекающих с кровли капель воды.

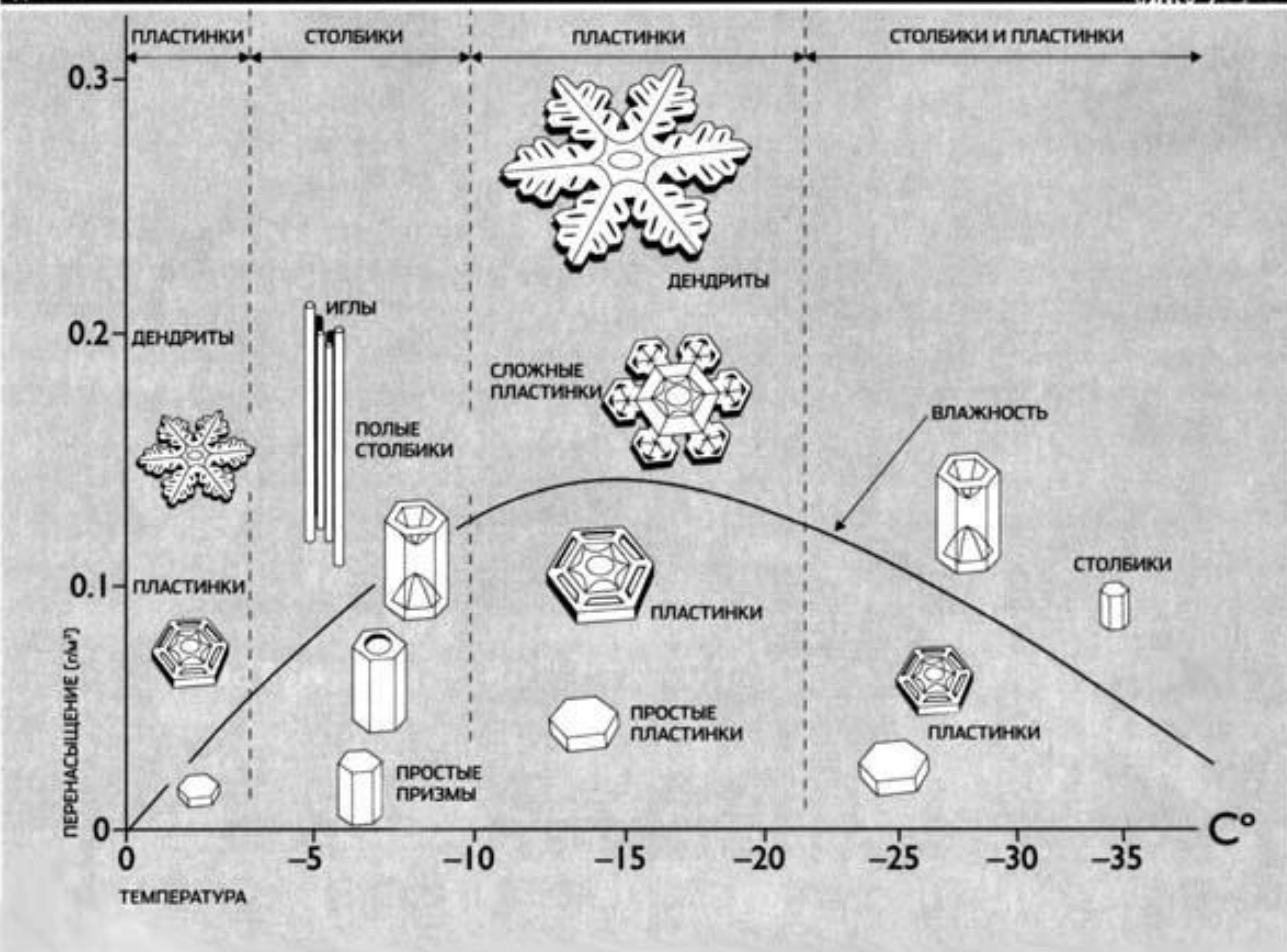
<http://geo.web.ru/maltsev/>

Фото В. Мальцева. Ледяной «бокал» - футляро-видный кристалл. Диаметр 8 см, глубина 5 см.

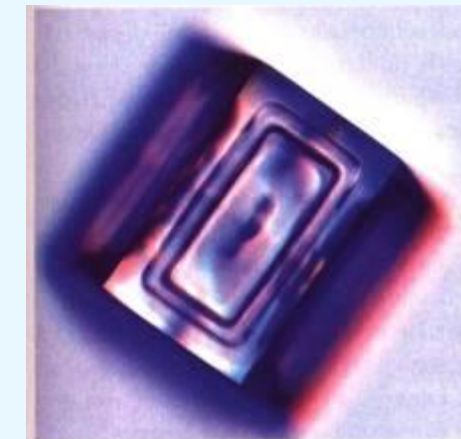


Морфология кристаллов льда (1,2,3) и снежинки (4)

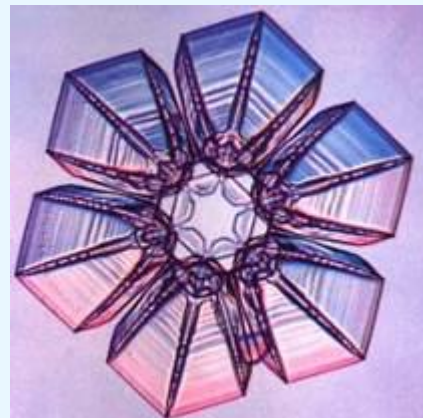




**ДЕНДРИТЫ**  
Дендриты (древоподобные) имеют ярко выраженные тонкие разветвляющиеся лучи. Как правило, это крупные кристаллы, видимые невооруженным глазом, а самые большие дендриты достигают 30 см в диаметре



**ПРИЗМЫ**  
Могут представлять собой как плоские 6-угольные пластинки, так и тонкие столбики с 6-угольным сечением. Несмотря на крошечные размеры призм (они почти не видны невооруженным глазом), их грани, как правило, украшают сложные узоры



**ПЛАСТИНКИ.** Образуются при температуре -2 или же -15 градусов Цельсия.

**Зависимость морфологии снежных кристаллов от пересыщения и температуры установил профессор физики Калифорнийского технологического ин-та Кеннет Либбрехт (Libbrecht Kenneth G., перевод см. Белая магия, 2008). Прекрасные фото снежинок разного облика приведены на его сайте: [SnowCrystals.com](http://SnowCrystals.com)**



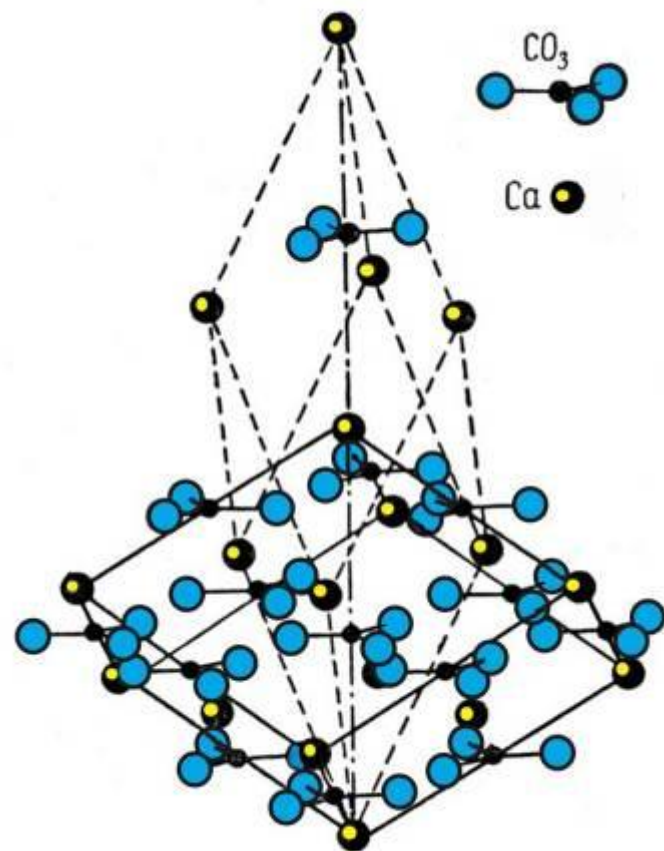


Фото В. Мальцева. Трубочатые сталактиты кальцита («макаронны») и округленные сталагмиты. Пещера Кап-Кутан, ход «Макаронная речка».



Обр. 200-2. Трубочатый монокристалл кальцита (сталактит «макаронина»). Диаметр 5 мм. Алтай, пещера «Вечерний променад».





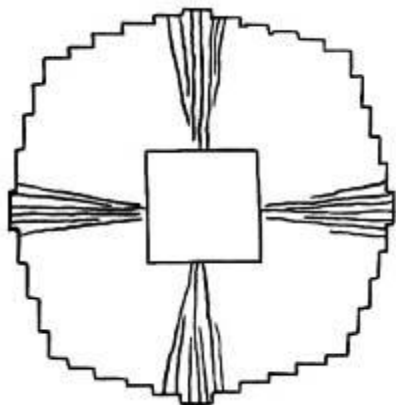
Обр. 163. Реберный скелетный кристалл кальцита. Дашкесан.

Структура кальцита

Наряду со скелетными ранее выделялись и «антискелетные» формы. К ним относились кристаллы с выпуклыми поверхностями на месте обычных граней. Условия их формирования в общем противоположны условиям образования скелетных кристаллов: малые и средние пересыщения, а также наличие сильно адсорбирующих примесей, т.е. условия существенно кинетического лимита роста. Собственно говоря, это кристаллы, у которых резко выражены конуса роста на выходах дислокации. Эти конуса (бугорки) роста генетически не отличаются от пологих вицинальных холмиков, например, на квасцах.



Обр. 150. Расщепленный кристалл флюорита  $\text{CaF}_2$  - «Антискелет». Бурятия.



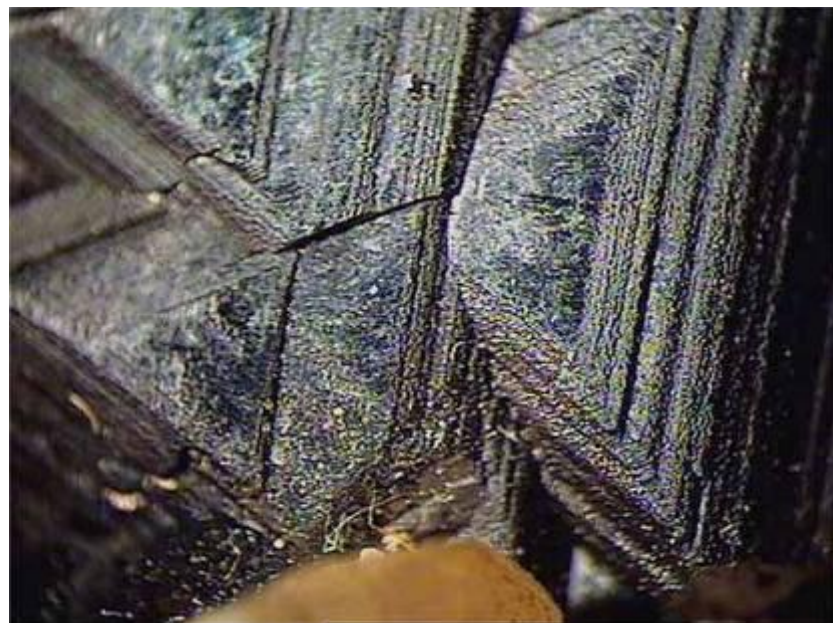
Образование бугорков роста в средних частях граней на выходах дислокаций в т. н. антискелетном кристалле.



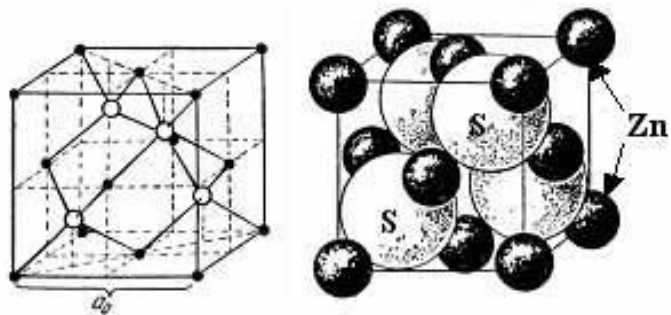
Обр. 149. Расщепленный кристалл флюорита. «Антискелет». Бурятия.



Обр. 165. «Антискелетные» кристаллы сфалерита.



Обр. 165. Деталь.



Структура сфалерита ZnS



## Вопросы по теме

1. Какие кристаллы называют скелетными, и чем они отличаются от полногранных?
2. Какие бывают типы скелетных кристаллов, и как можно дать описание их геометрической морфологии?
3. Каков механизм роста отдельных ветвей скелетного кристалла?
4. Какие условия среды минералообразования приводят к появлению скелетных кристаллов?
5. При каких условиях образуются вершинные и реберные формы скелетных кристаллов?
6. Какой режим кристаллизации наиболее благоприятен для скелетного роста?
7. Как формируются футляровидные, трубчатые, воронкообразные или каркасные кристаллы?
8. Что понимают под «антискелетными» кристаллами, и каковы условия их образования?

## Литература

- Безруков В.А., Безруков Г.Н., Бутузов В.П. и др. Морфология кристаллов алмаза, синтезированного в широком интервале температур и давлений. // Зап. Всесоюз. минерал. о-ва, 1966, ч. 95, в.1, с. 73-9.
- Белая магия. // Популярная механика. 2008. No 1 (63). С. 29-45.
- Бонев И., Горова М. Морфология и генезис на скелетниа галенит от оловно-цинковото находище Звездел-Галенит. // Bull.Geol. Inst. Bulgarian Acad. Sci., series geochem., mineral., petrogr. 1972, кн. (vol.) XXI, р. 63-76.
- Годовикова Е.А. Природные и искусственные скелетные кристаллы галенита. // В кн.: Региональная геология некоторых районов СССР, М., МГУ, 1976, с.78-84.
- Дымкин А.М., Пермяков А.А. Онтогения магнетита. Свердловск, УНЦ АН СССР, 1984. 188 с.
- Кватер Л.И., Фришберг И.В. Сообщество кристаллов и среда. – В кн.: Процессы реального кристаллообразования. М., Наука, 2977, с. 151-187.
- Кузнецов В.И., Харин Г.Г. К вопросу о механизме роста полых кристаллов сульфида цинка. // Минерал. Сб. Львов. ун-та, 1969, No 23, в. 2, с. 188-192.
- Леммлейн Г.Г. Морфология и генезис кристаллов. М., Наука, 1973, 328 с.
- Руанг Хуанг Мо. Особенности возникновения скелетных кристаллов в вязких средах. Автореф. канд. дис. Л., 1976. 21с.
- Челищев Н.Ф. Об эволюции формы оливина в процессе кристаллизации расплава оливинового габбро-норита в экспериментальных условиях. – В кн.: Онтогенические методы изучения минералов. М., Наука, 1970, с. 124-129.
- Шафрановский И.И. Кристаллы минералов. Кривогранные, скелетные и зернистые формы. М., Госгеолтехиздат, 1961 а. 332 с.
- Шафрановский И.И. Лекции по кристалломорфологии. М., изд-во Высшая школа, 1968. 174 с.
- Шафрановский И.И., Мокиевский В.А. Условия роста, геометрия и симметрия скелетных кристаллов. // Зап. Всесоюз. минерал. о-ва, 1956, ч. 85, в. 2, с. 172-186.
- Amelinckx S. A dislocation mechanism for the growth of hopper crystal faces and the growth of salol crystals from solution and from melt. // Phil. Mag., 1953, 44, No 350, p. 337-339.