

**Памятка**  
**для изучающего учебное пособие к разделу курса**  
**«Генетическая минералогия. 1 часть» -**  
**«Онтогения и филогения»**

Учебное пособие содержит:

2. Программу курса
3. Презентацию 001 «Вводная к курсу генетическая минералогия»
4. Презентации 002 - 014 «Онтогения. Рост кристаллов»
5. Презентации 015 - 019 «Онтогения. Растворение кристаллов»
6. Презентации 020 - 024 «Онтогения агрегатов»
7. Презентацию 025 «Филогения минеральных агрегатов»
8. Списки литературы по онтогении и филогении.
9. Вопросы к разделу.

Для сдачи экзамена по курсу «Генетическая минералогия. 1 часть» по разделу достаточно изучить основное содержание презентаций и основную литературу.

Для тех, кто хочет знать более глубоко, и для специалистов, которым будет интересно данное пособие, предназначено всё его содержание.

С уважением

дгмн, профессор кафедры минералогии МГУ  
Э.М. Спиридонов

**Э.М. Спиридонов**

## **ГЕНЕТИЧЕСКАЯ МИНЕРАЛОГИЯ. Часть 1 - ГМ-1.**

### **ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МИНЕРАЛОГЕНЕЗА**

#### **ВВЕДЕНИЕ**

Место минералогии в системе наук о Земле. Предмет науки. Генетическая минералогия - закономерное продолжение описательной. Особенности генетической минералогии. Установление генезиса минерала - бесконечный процесс познания сущности его признаков.

#### **Раздел I. ОНТОГЕНИЯ МИНЕРАЛОВ. ИНДИВИДЫ**

Из чего состоят кристаллы: зоны роста, пирамиды роста, секторы роста. Критические зародыши - кристаллиты. Затравки.

#### **ОСНОВЫ ТЕОРИИ ЗАРОЖДЕНИЯ И РОСТА КРИСТАЛЛОВ**

1. Классификация физико-химических систем. Метастабильные, лабильные и "замороженные" неравновесные системы. Типы физико-химических превращений. Среды кристаллизации. Особенности воды как растворителя.
2. Движущая сила кристаллизации. Зарождение кристаллов. Процессы зарождения кристаллов: самопроизвольное из пересыщенных сред, гетерогенное на готовых зародышах или затравках, при участии живых организмов или в них самих. Понятие об отравленных поверхностях кристаллов. Эпитаксия, факторы, влияющие на эпитаксию. Эпитаксические и автоэпитаксические сростания. Кристаллы - скипетры, - люстры, - шапки, - гантели. Особенности эпитаксических сростаний халцедон - кварц и кварцин - кварц. Присыпки.
3. Анатомия индивида. Реальные поверхности растущих кристаллов: слои роста, вицинали роста, спирали и террасы роста, штриховки роста. Поверхность кристаллов и её взаимодействие с флюидами. Адсорбция частиц из раствора, формула де Бура. Массоперенос при кристаллизации. Кинетика кристаллизации.
4. Механизмы роста кристаллов: нормальный, послойный при двумерном зародышеобразовании, дислокационный (спиральный), за счёт трёхмерных зародышей. Роль подвижности среды кристаллизации (вращения кристаллов) при нормальном механизме роста. Нодулярные и орбикулярные текстуры: (оливин – хромшпинелиды в гипербазитах, оливин – ильменит в кимберлитах, овоиды К-Na полевого шпата в гранитах = рапакиви). Вицинали, слои роста, спирали роста. Рост



трубчатых кристаллов минералов с несоразмерными структурами: хризотил-асбест, цилиндрит. Связь формы кристаллов с их структурой. Отталкивание и захват твёрдых фаз и флюидных включений кристаллами. Формирование сингенетических трубчатых включений в кристаллах.

5. Диффузионный и кинетический режимы кристаллизации. Свободный рост кристаллов при постоянных условиях. Анатомия индивида - источник генетической информации. Закон Бекке. Пирамиды роста, сектора роста. Причины связи морфологии и окраски кристаллов топаза. Эволюция форм кристаллов кальцита, апатита, барита, турмалина, фенакита, виллемита, диаспора.

6. Рост кристаллов при переменных условиях. Зональность и методы её выявления и наблюдения. Реальные скорости роста кристаллов. Штриховки роста на кристаллах – индикаторы изменений условий роста.

7. Кристаллы - двойники роста и причины их образования. Соотношения размеров одновременно выросших монокристаллов и кристаллов - двойников. Причины их различия. Скелетные кристаллы - вершинники и рёберники. Кристаллы - пойкилиты, сложной формы.

8. Нитевидные кристаллы, особенности их поверхности, структуры и свойств. Механизмы их роста. Кристаллизационное давление. Нитевидные геликоидальные кристаллы, в том числе кристаллы - "пружины". Нитевидные кристаллы, возникающие при механической щепке минералов, - эффект М.Н. Малеева. Вклад минералогии в изучение проблем силикоза.

9. Расщеплённые кристаллы. Типы расщепления в зависимости от соотношения линейной скорости роста и угловой скорости расщепления. Сферокристаллы. Кристаллы – «розы», «улитки»... Причины и механизмы расщепления (гетерометрия пирамид роста...) – совместное действие эффектов А.А. Штернберга – Ю.О. Пунина и П.А. Ребиндера. Дендриты = расщеплённые скелетные кристаллы.

10. Норма и патология минеральных индивидов. Потеря возможности самовоспроизводства совершенной огранки кристаллов. Патогенные факторы. Диффузионные эффекты. Адсорбционные эффекты. Абсорбционные эффекты. Явления отравления поверхности растущего кристалла. Перестройки, приводящие к поликристаллическим имитациям. Развитие процессов патогенного роста кристаллов. Фарфоровидные, перламутровые кристаллы. Скрученные, кривогранные, обелисковидные кристаллы.

11. Рост кристаллов в стесненных условиях. Метакристаллы, метасомы, порфиробласты, пойкилобласты. Признаки метакристаллов макроскопические и микроскопические. Особенности порфиробластов синкинематических и посткинематических.

12. Формирование состава кристаллов. Два типа осцилляционной зональности

кристаллов: при росте в замкнутом резервуаре или с подпиткой новыми порциями маточной среды.

## ОСНОВЫ ТЕОРИИ РАСТВОРЕНИЯ И УНИЧТОЖЕНИЯ ИНДИВИДОВ

13. Дефекты в кристаллах. Тепловой беспорядок в кристаллах. Беспорядок в кристаллах, вызванный нарушениями стехиометрии. Беспорядок в кристаллах, обусловленный посторонними примесями. Взаимодействие дефектов в кристаллах. Протяженные дефекты и дислокации. Отожжённые протяженные дефекты в кристаллах флогопита - векторы их роста. Явления переноса в кристаллах с дефектами. Дефекты и кинетика твердофазных реакций.

14. Изменения индивидов. Механические деформации пластические и хрупкие. Хрупкие деформации разрыва. Будинаж кристаллов (турмалин, рутил, изумруд). Механические двойники, их признаки. Отличие двойников роста и двойников механических. Кинкбенды.

15. Явления растворения кристаллов. Фигуры травления.

16. Псевдоморфозы, зооморфозы, фитоморфозы. Псевдоморфозы превращения - параморфозы. Псевдоморфозы замещения, их классификация. Закон В. Линдгрена.

17. Регенерация кристаллов.

## Раздел II. ОНТОГЕНИЯ МИНЕРАЛОВ. АГРЕГАТЫ

18. Минеральные агрегаты. Связи индивид - агрегат. Стадии роста агрегатов кристаллов. Друзы. Ортотропизм роста кристаллов и его причина - геометрический отбор. Когда появляются зоны геометрического отбора, о чём свидетельствует их наличие. Параллельно-шестоватые агрегаты 1 и 2 типа по Д.П. Григорьеву.

19. Агрегаты нитевидных кристаллов. Расщеплённые агрегаты нитевидных кристаллов. Антолиты.

20. Типы поверхностей зёрен в минеральных агрегатах. Первичные поверхности роста: идиоморфная, ксеноморфная, индукционная (совместного одновременного роста). Элементы строения индукционной поверхности. Индукционные поверхности совместного роста кристалл - кристалл, кристалл - сферолит, сферолит – сферолит при непрерывном росте и при росте с остановками.

21. Иные типы поверхностей зёрен в минеральных агрегатах: в агрегатах нитевидных кристаллов; грануломорфные; поверхности растворения, дробления, реоморфные.

22. Границы и форма зёрен в минеральных агрегатах. Движение границ зёрен. Полигонизация. Перекристаллизация и рекристаллизация. Законы рекристаллизации.

23. Структуры минеральных агрегатов равновесные и неравновесные.
24. Гравитационные текстуры минеральных агрегатов. Минералогические уровни и отвесы. Текстуры седиментации, оползания, обрушения и роста; карнизы, отстойники, сталактиты и сталагмиты, кристаллититы.
25. Специфические структуры минеральных агрегатов: эвтектические, глобулярные, нодулярные, фрамбоидальные, стебельчатые.

### **Раздел III. ФИЛОГЕНИЯ МИНЕРАЛОВ**

26. Выявление пространственно-временных взаимоотношений между минералами. Генерации и зарождения.
27. Иерархия процессов минералообразования и их продуктов. Эпохи, этапы, стадии минерализации.
28. Парагенезы минералов. Парагенез – сонахождение, обусловленное сопроисхождением.
29. Сингенез, диагенез, эпигенез минеральных агрегатов и их циклы. Графическое представление схем минералообразования.



**Э.М. Спиридонов**

# **Генетическая минералогия**

**ГМ-1. 001. Вводная**

# Генетическая минералогия. Вводная

Место минералогии в системе наук о Земле.

Предмет науки.

Генетическая минералогия - закономерное продолжение описательной.

Специфика генетической минералогии.

Установление генезиса минерала - бесконечный процесс познания сущности его признаков.

# Генетическая минералогия.

## Вводная

Некоторые замечания о нашем предмете

Замечательный русский поэт XIX века Федор Иванович Тютчев написал:

Не то, что мните Вы -

Природа не слепок, не бездушный лик,

В ней есть душа, в ней есть свобода,

В ней есть любовь, в ней есть язык.

Вот этим языком природы, слова которого суть минералы, мы с Вами и займёмся. Буквы этого языка - химические элементы, слова - минералы, фразы этого языка - агрегаты, ассоциации минералов.

Минералогия – одна из фундаментальных наук. Сейчас формируется всеобщая минералогия, включая минералогия Луны и других планет, метеоритов и астероидов, комет и космической пыли. Пока основной объём информации получен по минералам Земли. Земными делами в основном и будем заниматься, с привлечением материала по минералогии метеоритов и Луны, в небольшой степени Марса...

Рассмотрим структуру наук о Земле.

12 уровней организации вещества

Планеты Солнечной системы	Астрономия, планетология
Земля	Общая геология
Земная кора, мантия	Геотектоника
Геологические структуры	Региональная геология
Геологические формации (ассоциации, парагенезы горных пород)	Учение о геологических формациях
Горные породы, минеральные тела	Петрология. Литология. Учение о полезных ископаемых
Кристаллы, агрегаты кристаллов	Минералогия. Кристаллография
Слабо упорядоченные ионные и молекулярные группировки, аморфные вещества, стекла	Учение о минералоидах
Жидкости	Гидрогеология
Газы (молекулы)	Учение о газах
Атомы	Геохимия
Элементарные частицы и поля	Геофизика



# Генетическая минералогия. Вводная

Рассмотрим неделимые для каждого уровня. Для второго – это наша планета, для третьего – её крупные части и т.д.

Для уровня кристаллов и их агрегатов – это индивиды кристаллов, огранённых или с неровными поверхностями.

Минералогия тесно связана с геологией и петрологией, кристаллохимией, кристаллологией, физико-химией, физикой, металлографией.

## **Реальная физическая размерность кристаллов минералов.**

На Урале когда-то целым карьером отрабатывали один кристалл К-На полевого шпата. Крупнейший точно измеренный кристалл К-На полевого шпата в Devils Hole mine, Колорадо, США – 49x36x14 м, массой 16.000 т. Кристаллы горного хрусталя в гранитных пегматитах Волыни длиной до 9 м, берилла в пегматитах Мадагаскара до 18x3.5x3.5 м, объёмом 143 кубометра и массой 380 т (месторождение Malakialina), сподумена длиной до 16 м. Кристаллы гипса в пещерах Мексики длиной до 11 м. В XVIII веке под Парижем целым карьером отрабатывали один кристалл гипса, судя по спайности минерала. Минимальный размер - это предел, за которым объект теряет свойства минерала (обычно < 0.1 микрона). Микронного размера кристаллы - объекты микроминералогии.

# Гипс

Кристаллы  
до 8 м

**Naica  
mine,  
Мексика**





# Гипс. Кристаллы - гиганты



Naica mine, Мексика



# Гипс

Кристаллы до 11 м

Naica mine, Мексика



# Генетическая минералогия. Вводная

Структура курса «Генетическая минералогия» (ГМ):

7 семестр - 1 часть «**Теоретические основы минералогенеза**»

8 семестр - 2 часть «**Минералогенез при магматических процессах**»

9 семестр – 3 часть «**Минералогенез при гидротермальных процессах**»

10 семестр - 4 часть «**Минералогенез в зоне гипергенеза**»

5 часть «**Минералогенез при процессах метаморфизма**»

Параллельно со 2 - 5 частями курса ГМ идут, вплетены в него курсы «**Минералогия рудоносных метасоматитов**», «**Генетическая минералогия золота**» и «**Генетическая минералогия платиноидов**».

Полагаю, что Вы изучите:

- 1) основные понятия, приёмы и методы онтогенического и филогенического анализа;
- 2) некоторые генетические признаки минералов, сростаний минералов, минеральных ассоциаций;
- 3) ряд процессов минералогенеза от приповерхностных до сверхглубинных - одна из главных задач курса видится в том, чтобы показать реальное разнообразие, многоцветие процессов и событий в минеральном царстве;
- 4) широкий круг минералов (более 500) - макроскопически, под биноклем, в шлифах и аншлифах, путем пересчёта их анализов на кристаллохимические формулы;
- 5) геохимию минералов.

# Генетическая минералогия. Вводная

*Чтобы познать что-либо, следует ответить на четыре вопроса: Есть ли это? Что это? Каково это? Почему это?*

*Абу-Юсуф Якуб*

Для того, чтобы понимать минералогию необходимо знать периодическую таблицу химических элементов Д.И. Менделеева как свои пять пальцев и понимать её. Настоятельно советую посидеть с учебниками по химии, прежде всего неорганической; чаще бывать в Минералогическом музее Академии наук им. А.Е.Ферсмана, в Геологическом музее Академии наук им. В.И.Вернадского, в Музее Землеведения МГУ.

В 1783-1787 г.г. Жорж Луи Леклерк Бюффон опубликовал пятитомный труд «Естественная история минералов», который изменил прежний статический взгляд на природу.

Два века назад в 1798 г. первый русский минералог - академик Василий Михайлович Севергин определил, что "Минералогия есть часть естественной истории, которая научает нас познавать ископаемые тела, т.е. отличать оные от всех других тел по существенным их признакам, знать их свойства, месторождения, пользу, и все отношения как между собою, так и к другим телам". Великолепное определение.

В начале XIX века выдающийся естествоиспытатель Якоб Берцелиус заложил основы систематики минералов, выдвинув идею, что минералы являются природными химическими соединениями.



## Генетическая минералогия. Вводная

Минералогія есть часть естественной  
Исторіи, которая научаетъ насъ познавать  
ископаемыя шѣла, то есть отличать оныя  
отъ всѣхъ другихъ телъ по существеннымъ  
ихъ признакамъ, знать ихъ свойства, мѣсто-  
рожденія, пользу и всѣ отношенія ихъ какъ  
между собою такъ и къ другимъ шѣламъ

Академія

Василій Севергинъ

1798 год.

# Генетическая минералогия. Вводная



Первый русский  
минералог –  
академик  
Василий  
Михайлович  
Севергин.

1765 – 1826 г.г.



# Генетическая минералогия. Вводная

Полтора века назад в 1876 г. знаменитый минералог и кристаллограф - академик Николай Иванович Кокшаров в своих лекциях определил, что "Минералогия есть натуральная история неорганических тел природы, называемых минералами" и «Минералогия составляет одну из важнейших частей естественной или натуральной истории».

В начале XX века выдающийся естествоиспытатель, натурфилософ, минералог и геохимик - академик Владимир Иванович Вернадский определил минералогия как историю природных химических соединений и считал задачей минералогии познание природных химических процессов, создающих и разрушающих минералы. Формулировка В.И. Вернадским нового содержания и задач минералогии определяла её прежде всего как науку химическую, но неразрывно связанную с геологическими процессами Земли во времени и с конкретной геологической обстановкой, как науку, задачей которой является установление причинных связей, управляющих естественным ходом природного минералообразования. Подход по существу генетический.

Наш курс - **минералогия генетическая**. Генетическая минералогия - закономерное продолжение описательной. В чём различие, в чём соль генетического подхода? Посмотрим на примере кварца. В описательной минералогии кварц – минерал кремнезёма  $\text{SiO}_2$

# Генетическая минералогия. Вводная

тригональной сингонии, устойчивый при низком давлении при температуре ниже 573 °С. В генетической минералогии – это вся совокупность индивидуальных кристаллов кварца и агрегатов его кристаллов, каждый со своим внутренним строением, особенностями состава, историей роста, растворения и иных преобразований. Иное мировоззрение, иная философия, большое внимание формам минерального вещества. Подход близкий к биологическому.

Один из основателей генетической минералогии замечательный минералог - профессор Ленинградского (СПб) Горного института Дмитрий Павлович Григорьев определил генетическую минералогию как сочетание онтогении и филогении минералов. **Онтогения** = учение о жизни конкретной особи, о формировании и преобразованиях индивидов минералов. **Филогения** = учение о формировании и преобразованиях минеральных ассоциаций, парагенезов, суперагрегатов = минеральных тел. Полная аналогия царства минералов с царством живых организмов по этим признакам. На основе этих подходов и с учётом накопленных фактических данных по металлографии и синтезу кристаллов разработана система научных критериев роста и растворения кристаллов минералов и их агрегатов, совместного их роста, последовательности кристаллизации, процессов регенерации и перекристаллизации.

# Генетическая минералогия. Вводная

Современная минералогия как наука геологического цикла строится на историко-геологической основе. Кристаллы минералов, их агрегаты, парагенезы минералов – геологические документы, изучение и прочтение которых позволяет установить, смоделировать процессы образования горных пород и руд. Парагенез (или парагенезис) минералов - это сонахождение минералов, обусловленное их сопроисхождением.

**Установление генезиса минерала представляется как бесконечный процесс познания сущности его признаков.** Минерал раскрывается через свои признаки. Это сам факт его существования как конденсированной фазы природных физико-химических систем, его конституция, окраска, форма и внутреннее строение индивида, совместное нахождение индивидов (срастания, агрегаты), совместное нахождение минеральных видов (парагенез минеральных видов = минеральные ассоциации) и т.д.

Ряд признаков минералов не определяется полностью конституцией минерала, а зависит от его геологической предыстории, от условий минералообразования. Это и есть **генетические признаки**. Генетические признаки могут сильно отличаться для различных индивидов одного минерального вида. Таковы форма, размер, особенности огранки, внутреннее строение реальных кристаллов, структуры их агрегатов,

# Генетическая минералогия. Вводная

пространственное расположение минералов, их совместное нахождение и т.п. Познание причин, определивших появление генетических признаков минералов и минеральных ассоциаций, требует специального исследования для каждого конкретного случая.

На основе познанных признаков минералов строятся генетические представления, из которых данные признаки выводятся как следствие. Чем большее число генетических признаков минералов познано, тем более жёсткие и чёткие ограничения получают генетические модели минералообразования. При незначительном количестве познанных признаков построенная модель может быть мало надежной, нередко носит спекулятивный характер. Т, Р, концентрации и их вариации, степень пересыщения, зарождение и рост кристаллов, направление движения минерального вещества не являются признаками минералов, но их знание необходимо для построения моделей минералогенеза. Поэтому приходится решать обратную задачу - выявлять те признаки минералов - индивидов и агрегатов, в которых зафиксированы факторы их образования. Решение как прямой задачи - анализа происхождения определенного признака минерала, так и обратной задачи - отыскания признака, раскрывающего определенный фактор минералообразования, основывается на глубоком понимании сущности генетических признаков

# Генетическая минералогия. Вводная

минералов самих по себе, на раскрытии их происхождения.

Познанные признаки минералов являются теми кирпичами, из которых строится здание генетической минералогии.

## РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

по онтогении и филогении минералов

1. Григорьев Д.П. Онтогения минералов. Львов : изд. Львов. ун-та. 1961. 284 с.
2. Григорьев Д.П., Жабин А.Г. Онтогения минералов. Индивиды. М.: Наука. 1975. 339 с.
3. Краснова Н.И., Петров Т.Г. Генезис минеральных индивидов и агрегатов. СПб.: Невский курьер. 1997. 228 с.
4. Хейман Р.Б. Растворение кристаллов. Л.: Недра. 1979. 272 с.
5. Дымков Ю.М. Парагенезис минералов ураноносных жил. М.: Недра. 1985. 207 с.
6. Бакли Г. Рост кристаллов. М.: ИЛ, 1954. 406 с.
7. Белов Н.В. Очерки структурной минералогии. М.: Недра. 1976. 323 с.
8. Пунин Ю.О., Штукенберг А.Г. Автодеформационные дефекты кристаллов. СПб.: 2008. 318 с.
9. Goldschmidt V.M. Atlas der Kristallformen. Heidelberg: Winter. 1913. B. 1, 248 s. B. 2, Tafeln 251. 1916. B. 3, Tafeln 247. 1923. B. 9, Tafeln 128.

# • РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

## • по онтогении и филогении минералов

10. Бетехтин А.Г., Генкин А.Д., Филимонова А.А., Шадлун Т.Н. Текстуры и структуры руд. М.: Госгеолтехиздат. 1958. 436 с.  
Бетехтин А.Г., Генкин А.Д., Филимонова А.А., Шадлун Т.Н. Структурно – текстурные особенности эндогенных руд. М.: Недра. 1964. 599 с.
11. Болдырев А.К., Бетехтин А.Г., Годлевский М.Н., Григорьев Д.П., Киселёв А.И., Левицкий О.Д., Разумовский Н.К., Смирнов А.А., Соболев В.С., Соловьёв С.П., Успенский Н.М., Черных В.В., Шаталов Е.Т., Шафрановский И.И.  
Курс минералогии. М.-Л.: ОНТИ. 1936. 1056 с.
12. Гегузин Я.Е. Живой кристалл. М.: Наука. 1987. 197 с.
13. Жабин А.Г. Онтогения минералов (агрегаты). М.: Наука. 1979. 275 с.
14. Костов И. Минералогия. М.: Мир. 1971. 585 с.
15. Костов И., Минчева-Стефанова И. Сульфидные минералы. Кристаллохимия, парагенезисы, систематика. М.: Мир. 1984. 290 с.
16. Леммлейн Г.Г. Морфология и генезис кристаллов. М.: Наука. 1973. 328 с.
17. Рамдор П. Рудные минералы и их сростания. М.: ИЛ. 1962. 1132 с.
18. Ребиндер П.А., Щукин Е.Д. Поверхностные явления в твёрдых телах в процессах их деформации и разрушения // Успехи физич. наук. 1972. Т. 108. Вып. 1. с. 3-42.
19. Шафрановский И.И. Кристаллы минералов. Кривогранные, скелетные и зернистые формы. М.: Госгеолтехиздат. 1961. 332 с.
20. Юшкин Н.П. Теория и методы минералогии. Л.: Наука. 1977. 291 с.
21. Рид С.Дж.Б. Электронно-зондовый микроанализ и растровая электронная микроскопия в геологии. М.: Техносфера. 2008. 232 с.

# **РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА**

по превращениям в минералах

**Бернал Дж. Порядок и беспорядок и их отражение в диффракции**

**В кн.: Физика минералов. М.: Мир. 1964. С. 11-30.**

**Патнис А., Мак-Коннел Дж. Основные черты поведения минералов. М.: Мир. 1983. 304 с.**

**Урусов В.С., Таусон В.Л., Акимов В.В. Геохимия твёрдого тела. М.: Геос. 1997. 500 с.**

**Putnis A. Introduction to mineral science. Cambridge U.K., Cambridge University Press: 1992. 427 p.**

**Transformation processes in minerals (S.A.T. Redfern, M.A. Carpenter, eds.). Rev. Mineral. 2000. Vol. 39. 361 p.**

**Nassau K. The origin of color in minerals // Amer. Mineral. 1978. Vol. P. 219-229.**

# Приложения



# НЕКОТОРЫЕ ИЗ ОСНОВ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЯ

## 2.1. Межатомное взаимодействие

Структурными элементами вещества являются атомы, состоящие из ядра и электронной оболочки. Свойства твердых веществ в существенной степени определяются структурой электронных оболочек атомов. В соответствии с боровской моделью, электроны в атоме располагаются на специфических орбиталях (рис. 2.1), конфигурация которых (т. е. число электронов и их пространственное распределение) подчиняется законам квантовой механики. Свойства твердых тел определяются электронами, находящимися на самых внешних орбиталях, поскольку именно эти электроны участвуют во взаимодействии между атомами. Основной принцип, описывающий межатомные взаимодействия, можно сформулировать так: атом стремится к тому, чтобы на его внешней оболочке располагались 8 электронов (т. е. к конфигурации благородного газа). Этот простой принцип лежит в основе образования химических связей.

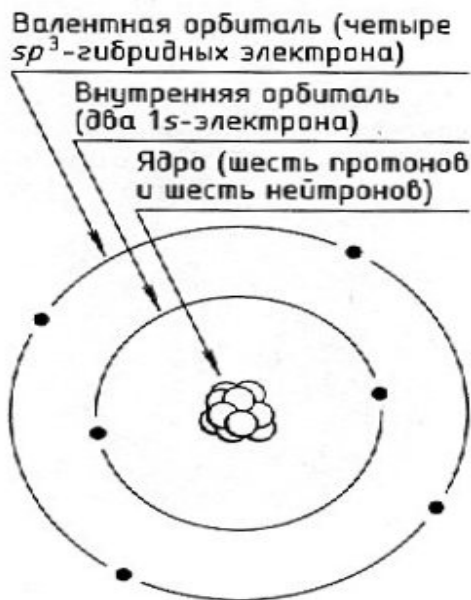


Рис. 2.1. Схематическое представление электронной конфигурации атома  $^{12}\text{C}$  по модели Бора

Если на внешней оболочке атома уже находится 8 электронов (как у благородных газов), его способность к взаимодействию с другими атомами (образованию химической связи и даже кристаллизации) очень невысока. Для получения твердого гелия\*), его необходимо охладить до 0,1 К, чтобы силы межатомного взаимодействия оказались больше тепловых колебаний. Все элементы, электронная конфигурация которых не совпадает с конфигурацией благородного газа, при взаимодействии с другими атомами способны принимать, отдавать или обобществлять электроны, находящиеся на внешнем уровне (эти электроны называются валентными). Исходя из этих принципов можно выделить основные типы химической связи (рис. 2.2).

\*) Гелий (а также водород, литий, бериллий) являются формальными исключениями из «правила 8 электронов»: конфигурация благородного газа в этом случае соответствует двум электронам на внешней оболочке. — Прим. перев.

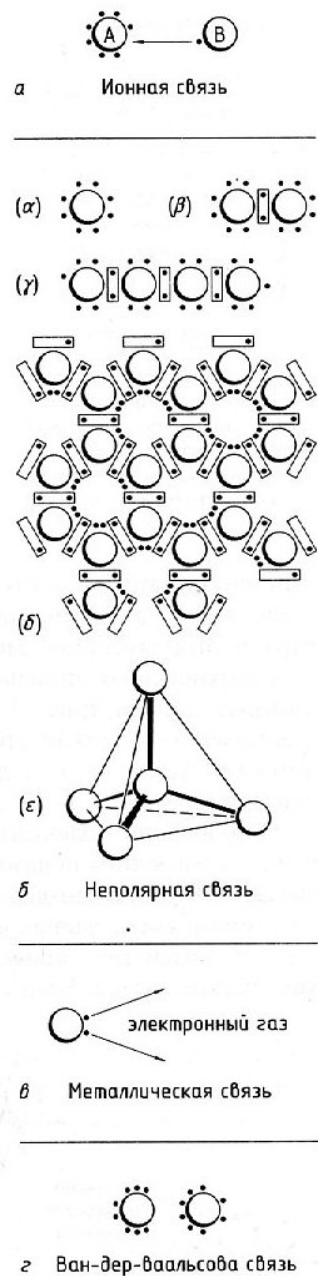
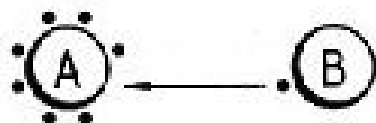


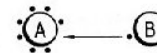
Рис. 2.2. Основные типы химической связи. Когда атомы одного типа образуют ковалентные связи, возникают характерные группировки атомов

# НЕКОТОРЫЕ ИЗ ОСНОВ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЯ

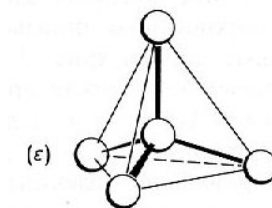
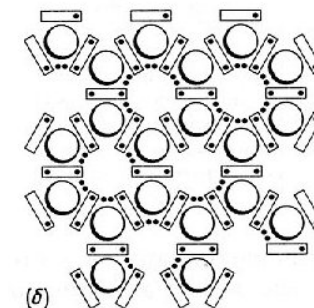
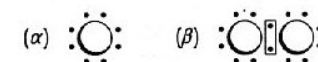
1) Гетерополярная, или ионная связь (а). Число валентных электронов взаимодействующих атомов становится равным 8. Атом, имеющий меньшее число валентных электронов, передает их атому, имеющему большее их число. Оба элемента приобретают конфигурацию благородного газа, но теряют нейтральность. Например, в  $\text{Na}^+\text{Cl}^-$  атом натрия отдает единственный валентный электрон атому хлора, содержащему 7 валентных электронов. Молекула может быть образована и из большего числа атомов, например  $(\text{Ca}^{2+})(\text{F}^-)_2$ , при этом каждый атом приобретает конфигурацию благородного газа.



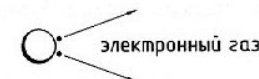
а Ионная связь



а Ионная связь



б Неполярная связь



в Металлическая связь

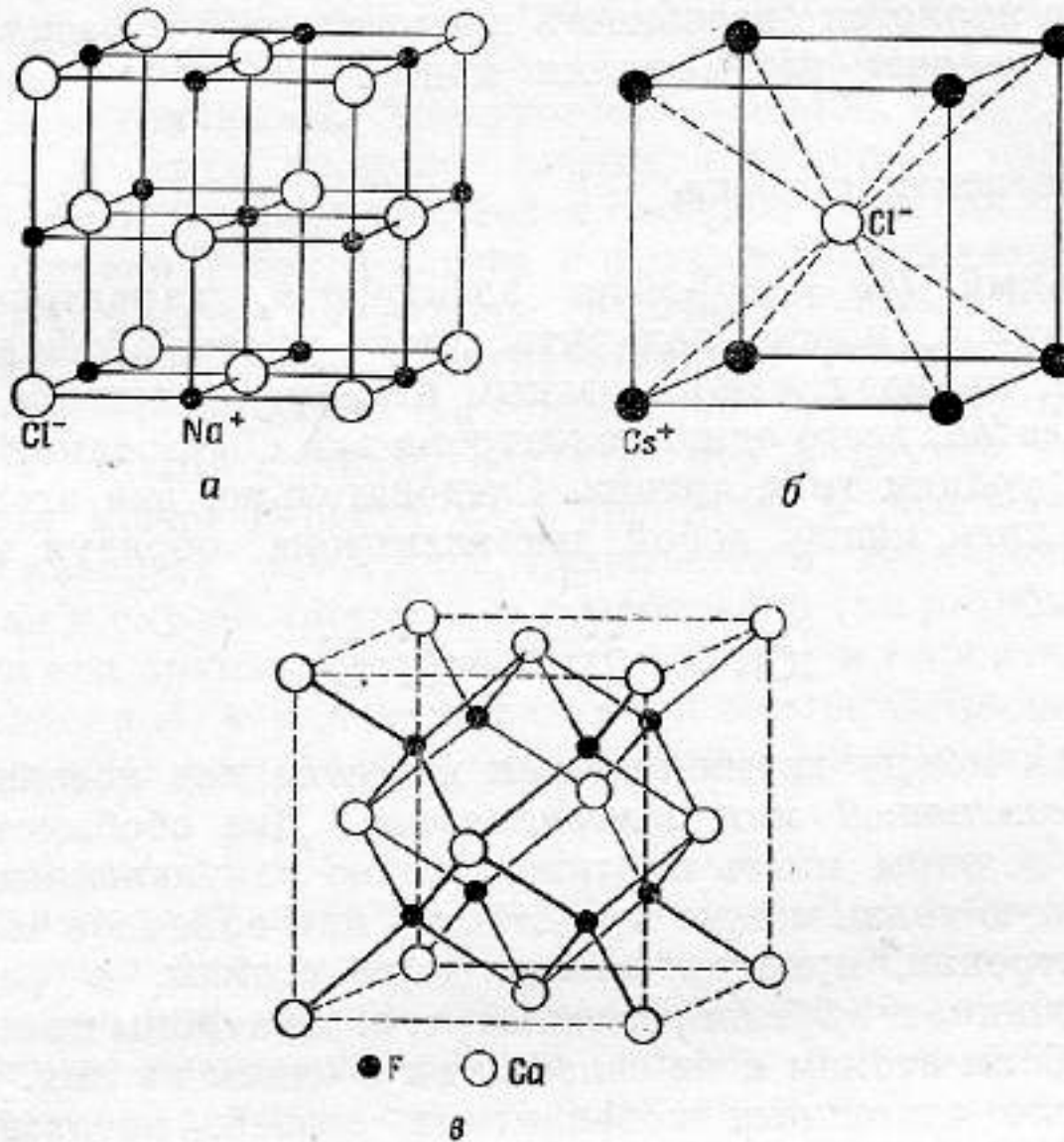


г Ван-дер-Ваальсова связь

Рис. 2.2. Основные типы химической связи. Когда атомы одного типа образуют ковалентные связи, возникают характерные группировки атомов



# НЕКОТОРЫЕ ИЗ ОСНОВ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЯ

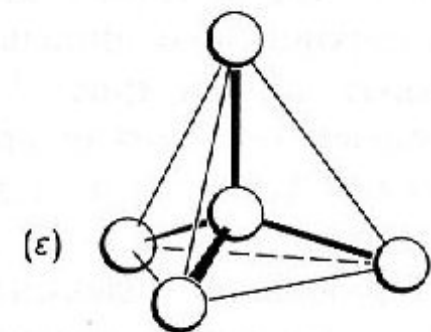
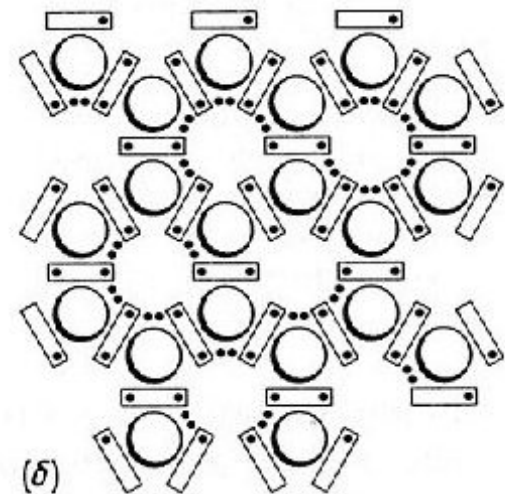
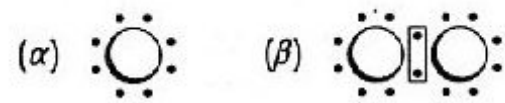


Ф и г. 1. Кристаллические структуры некоторых ионных соединений.

а —  $\text{NaCl}$ ; б —  $\text{CsCl}$ ; в —  $\text{CaF}_2$ .

# НЕКОТОРЫЕ ИЗ ОСНОВ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЯ

2) Ковалентная связь ( $\delta$ ). Если конфигурацию благородного газа нельзя достичь путем обмена электронами, поскольку их сумма не достигает 8, то стабильного сочетания атомов в молекуле можно достичь путем образования электронных пар ( $\alpha$ ). Например, два атома хлора с 7 валентными электронами образуют устойчивую молекулу  $\text{Cl}_2$  образуя электронную пару ( $\beta$ ), принадлежащую одновременно двум атомам хлора, причем оба достигают конфигурации благородного газа. В случае атомов, содержащих 6 валентных электронов, образуются две электронные пары. Это приводит к образованию длинных цепочек из атомов ( $\gamma$ ), как, например, в молекулах серы. При числе валентных электронов, равном пяти, на каждый атом должно приходиться по три электронных пары, что может быть достигнуто только в двумерных структурах ( $\delta$ ), например, мышьяка. Если число валентных электронов равно четырем, необходимо образование четырех электронных пар на атом, что соответствует трехмерным структурам ( $\epsilon$ ). Примерами могут служить полупроводники кремний и германий, а также углерод в структуре алмаза.



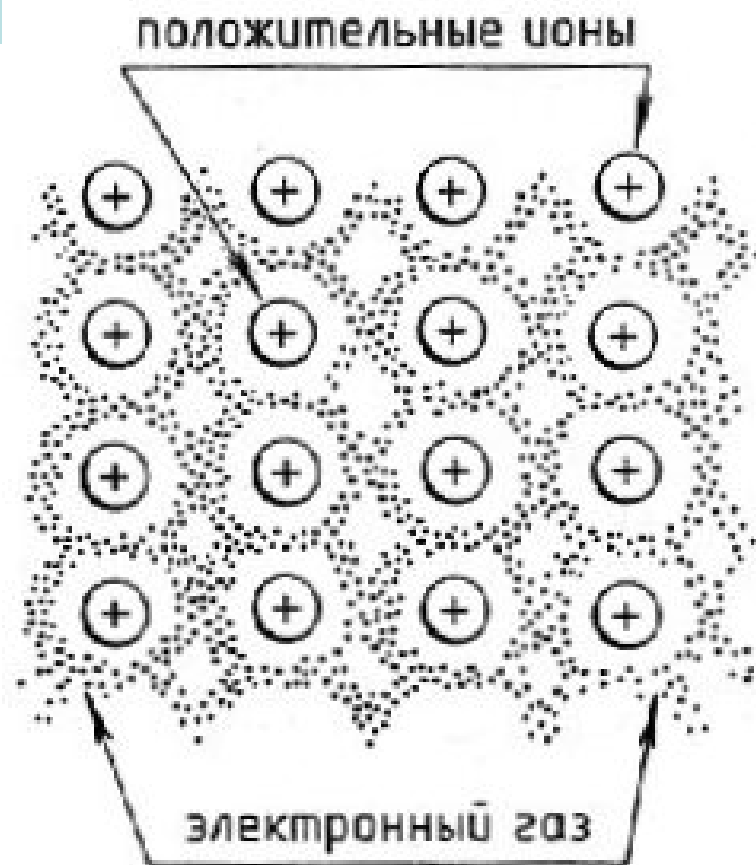
$\delta$  Неполлярная связь

Когда атомы одного типа образуют ковалентные связи, возникают характерные группировки атомов



# НЕКОТОРЫЕ ИЗ ОСНОВ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЯ

3) Металлическая связь (*в*). Если число валентных электронов меньше четырех, то достичь конфигурации благородного газа за счет образования электронных пар, даже в трехмерной структуре, невозможно. В этом случае атомы отдают валентные электроны в общий «электронный газ» (рис. 2.3), так что ионные остовы приобретают 8-электронную конфигурацию, а электроны в составе «электронного газа» не относятся к какому-либо определенному атому. Это наиболее часто встречающийся тип связи, поскольку около 3/4 природных элементов — металлы. При ковалентном взаимодействии валентные электроны локализованы на атомах (с точки зрения квантовой механики, преимущественно расположены около конкретного ядра). А при образовании металлической связи электроны не локализованы и формально принадлежат одновременно всем атомам. Столь слабая «привязка» электронов к атомам объясняет слабость металлической связи по сравнению с другими типами — это приводит к высокой мобильности дефектов кристаллической структуры в металлах и легкости их формовки, что делает металлы самыми используемыми материалами.



**Рис. 2.3.** Принцип образования металлической связи. Ионные остовы окружены электронным газом, образованным валентными электронами

# НЕКОТОРЫЕ ИЗ ОСНОВ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЯ

4) Ван-дер-ваальсова связь ( $\sigma$ ). Еще один тип взаимодействия, который не связан с обменом электронами, а обусловлен дипольными взаимодействиями атомов — это ван-дер-ваальсова связь. Дипольное взаимодействие между атомами возникает, так как центр тяжести положительного ядра и отрицательной электронной оболочки не совпадают. Это приводит к возникновению дипольного момента атома, который притягивает другие атомные диполи (рис. 2.4). Именно эти силы притяжения обеспечивают взаимодействие между атомами благородных газов или атомами, расположенными далеко друг от друга, когда непосредственный обмен электронами невозможен.

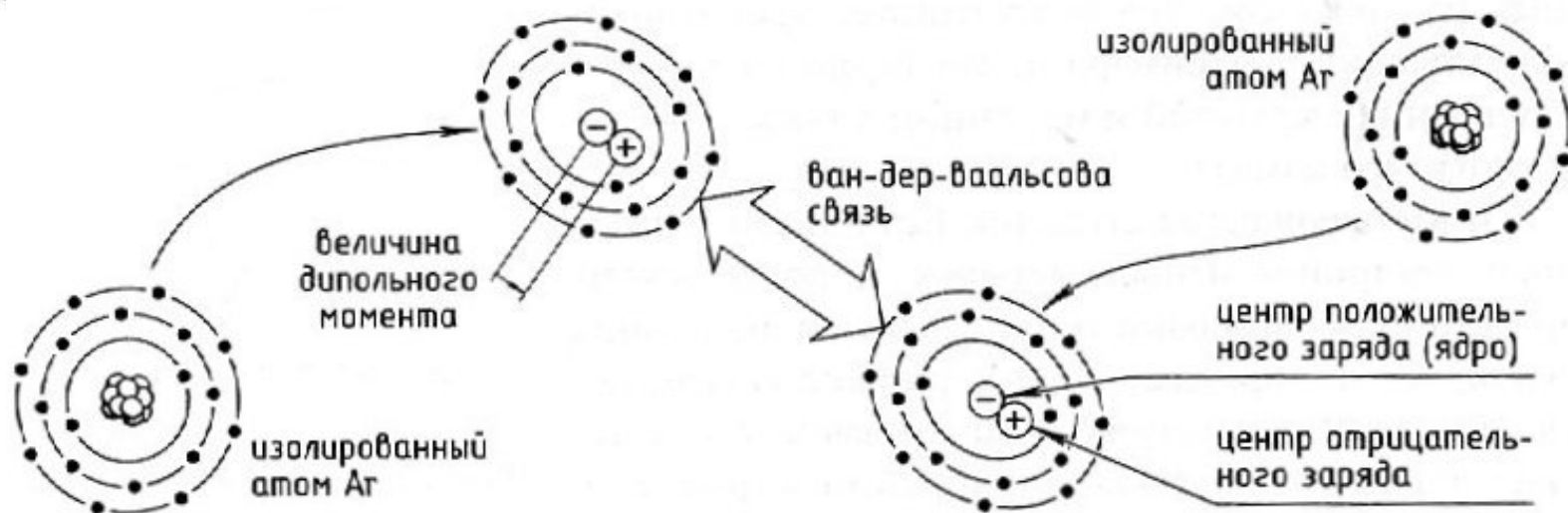
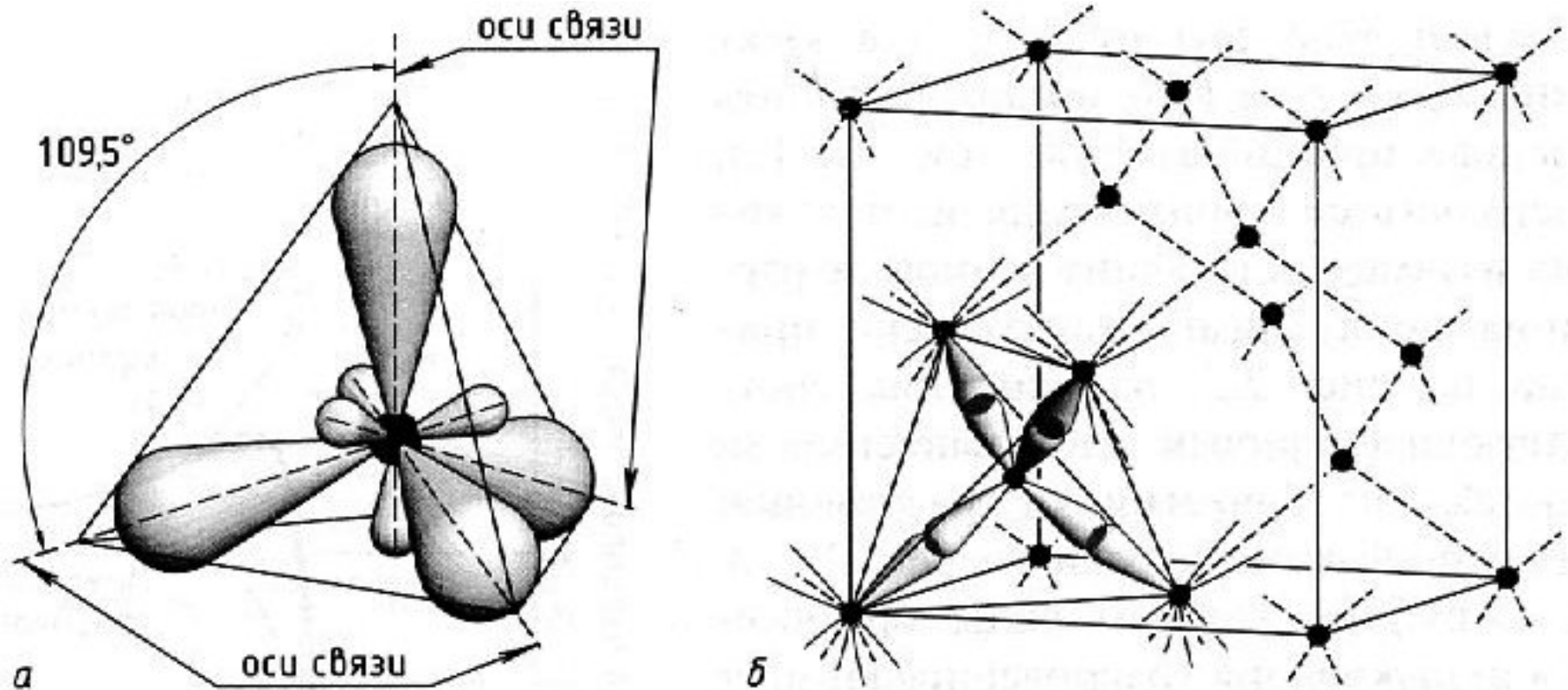


Рис. 2.4. Схема образования ван-дер-ваальсовой связи при взаимодействии индуцированных диполей



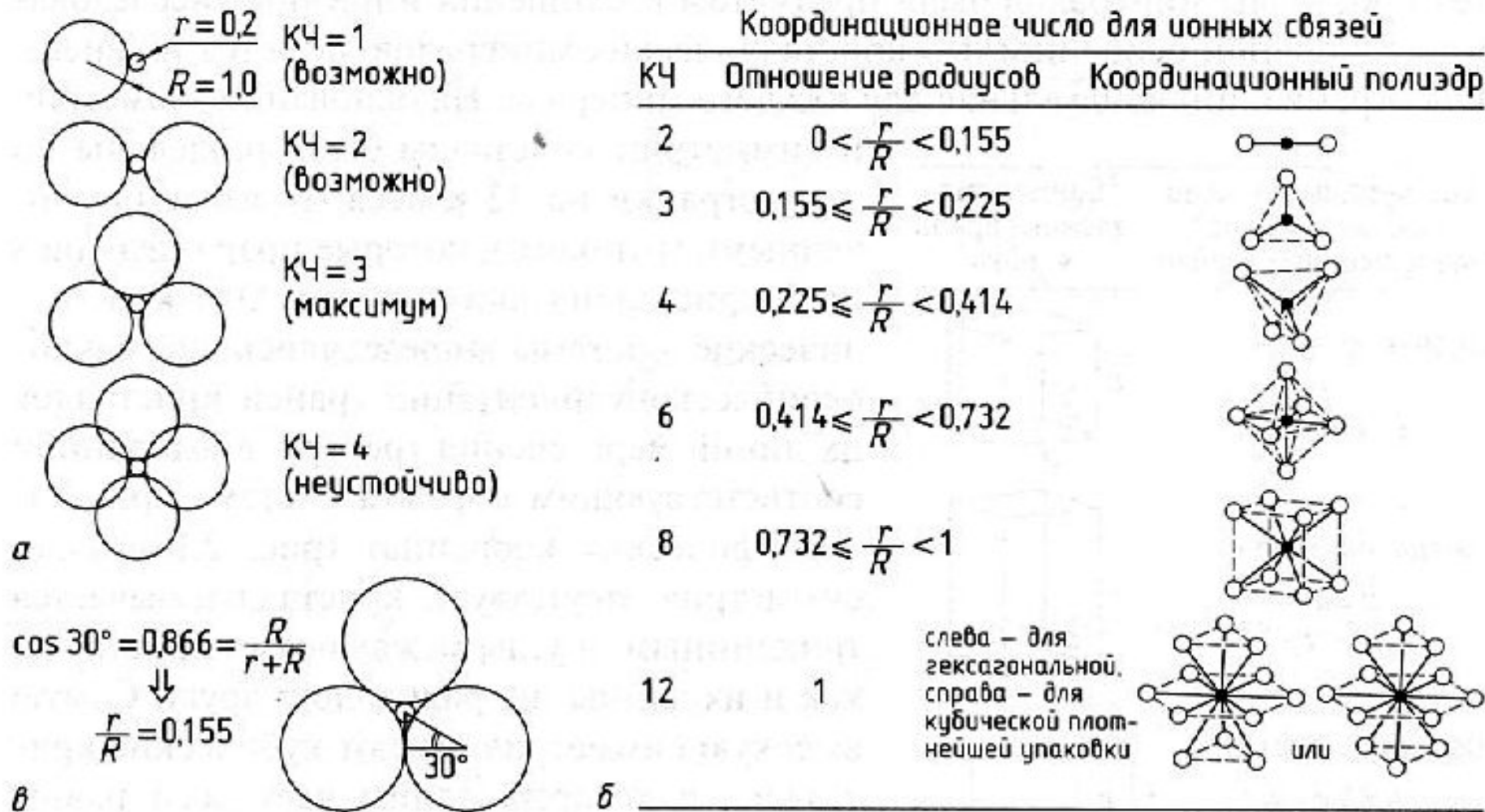




2.6. Тетраэдрическая форма орбиталей валентных электронов атома  $^{12}\text{C}$  приводит к его тетраэдрическому окружению (а) и формированию решетки алмаза (б)

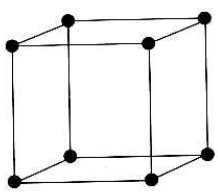


# НЕКОТОРЫЕ ИЗ ОСНОВ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЯ

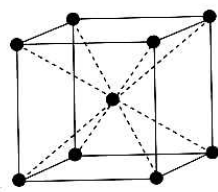


**Рис. 2.8.** Количество ближайших соседей КЧ (координационное число) как функция относительного размера атомов. (а) Для отношения радиусов атомов  $r/R = 0,2$  максимально возможное координационное число равно 3; (б) координационные числа для различных отношений радиусов атомов и соответствующие координационные полиэдры; (в) минимальное отношение радиусов для КЧ = 3 составляет 0,155

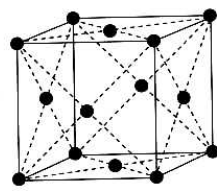
# НЕКОТОРЫЕ ИЗ ОСНОВ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЯ



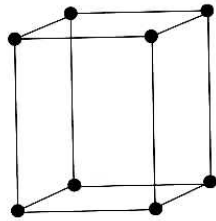
Cubic P



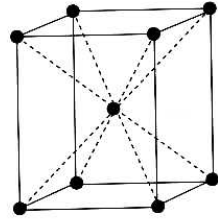
Cubic I



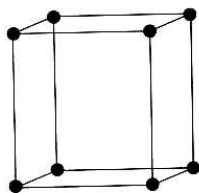
Cubic F



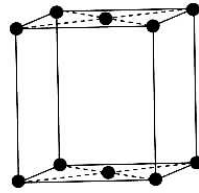
Tetragonal P



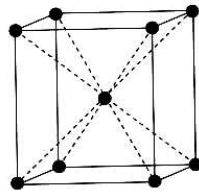
Tetragonal I



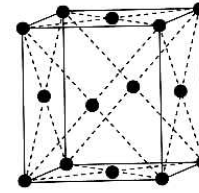
Orthorhombic P



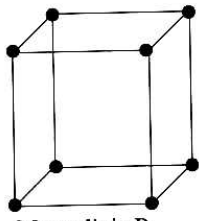
Orthorhombic C



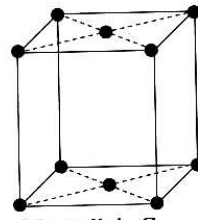
Orthorhombic I



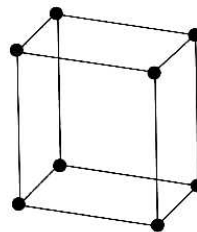
Orthorhombic F



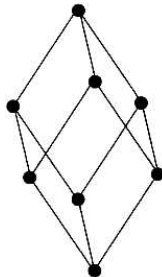
Monoclinic P



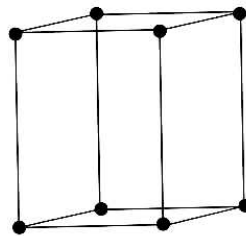
Monoclinic C



Triclinic



Trigonal R



Hexagonal

14 решёток Браве

Table 1.3. *Centrosymmetric, enantiomorphic and polar point groups*

Crystal system	Centro-symmetric	Enantio-morphic	Polar
Triclinic	$\bar{1}$	1	1
Monoclinic	2/m	2	2, m
Orthorhombic	mmm	222	mm2
Tetragonal	4/m, 4/mmm	4, 422	4, 4mm
Trigonal	$\bar{3}$ , $\bar{3}m$	3, 32	3, 3m
Hexagonal	6/m, 6/mmm	6, 622	6, 6mm
Cubic	m3, m3m	23, 432	—



# НЕКОТОРЫЕ ИЗ ОСНОВ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЯ

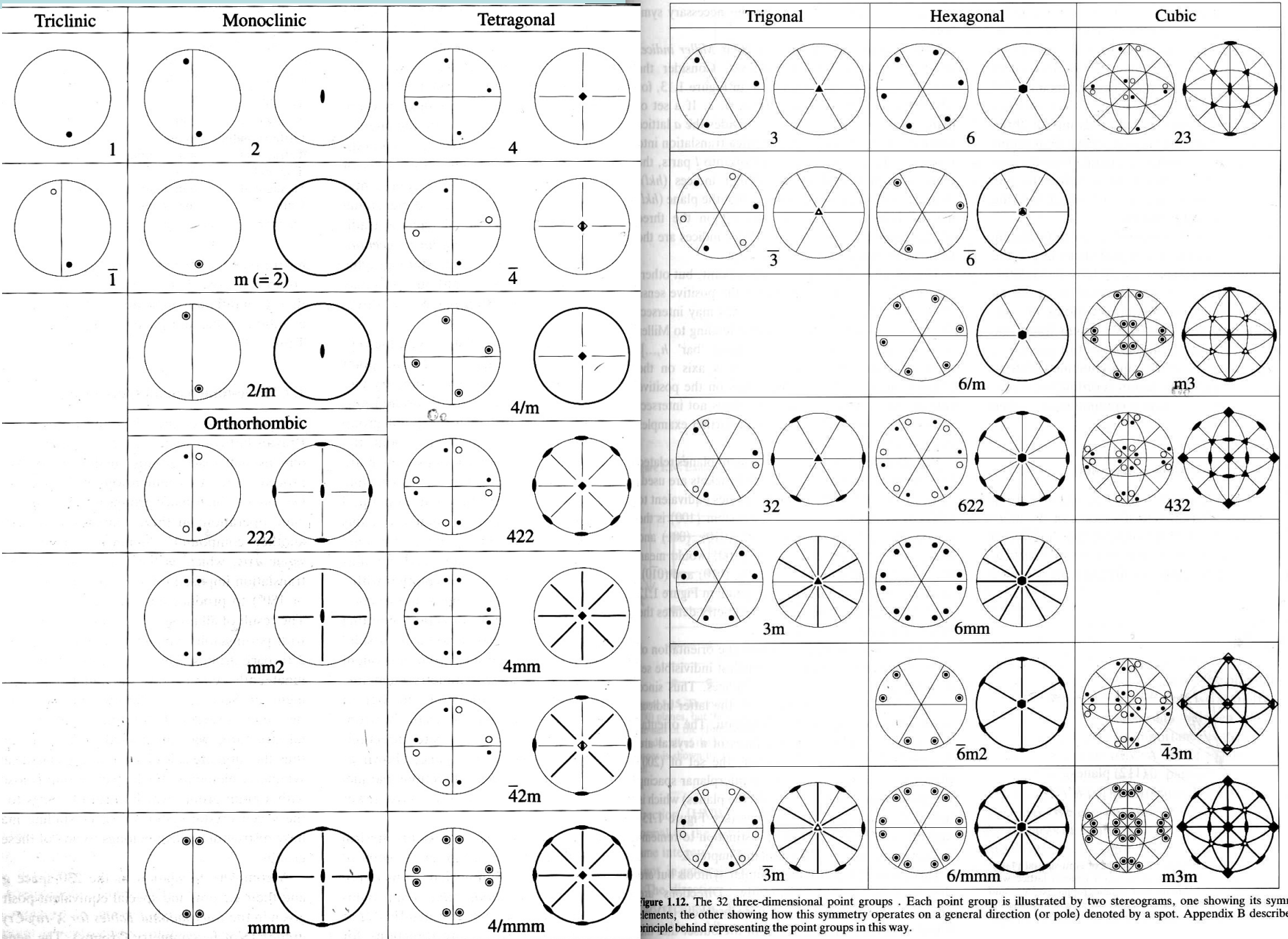
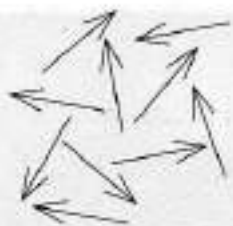


Figure 1.12. The 32 three-dimensional point groups. Each point group is illustrated by two stereograms, one showing its symmetry elements, the other showing how this symmetry operates on a general direction (or pole) denoted by a spot. Appendix B describes the principle behind representing the point groups in this way.

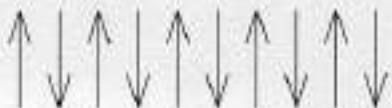
# НЕКОТОРЫЕ ИЗ ОСНОВ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЯ



(a) Paramagnetic Net moment 0



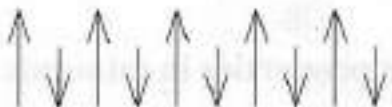
(b) Ferromagnetic Net moment  $\uparrow$



(c) Antiferromagnetic Net moment 0



(d) Canted antiferromagnetic Net moment  $\Rightarrow$



(e) Ferrimagnetic Net moment  $\uparrow$

Figure 12.56. Different types of magnetic ordering in minerals.

Различные типы магнитной упорядоченности в минералах

Таблица 1. Распространенность элементов в горных породах (вес. %) по А.П. Ви-ноградову (1962)

Элемент	Каменные метеориты (хондриты)	Ультраосновные породы (дупиты и др.)	Основные породы (базальты, габбро и др.)	Средние породы (диориты, андезиты)	Кислые породы (граниты, трапидиориты)	Осадочные породы (глины и сланцы)	2 части кислых пород + 1 часть основных пород
1	2	3	4	5	6	7	8
H	—	—	—	—	—	—	—
He	—	—	—	—	—	—	—
Li	3·10 <sup>-4</sup>	5·10 <sup>-5</sup>	1,5·10 <sup>-3</sup>	2·10 <sup>-3</sup>	4·10 <sup>-3</sup>	6·10 <sup>-3</sup>	3,2·10 <sup>-3</sup>
Be	3,6·10 <sup>-4</sup>	2·10 <sup>-5</sup>	4·10 <sup>-5</sup>	1,8·10 <sup>-4</sup>	5,5·10 <sup>-4</sup>	3·10 <sup>-4</sup>	3,8·10 <sup>-4</sup>
B	2·10 <sup>-4</sup>	1·10 <sup>-4</sup>	5·10 <sup>-4</sup>	1,5·10 <sup>-3</sup>	1,5·10 <sup>-3</sup>	1·10 <sup>-2</sup>	1,2·10 <sup>-3</sup>
C	4·10 <sup>-2</sup>	1·10 <sup>-2</sup>	1·10 <sup>-2</sup>	2·10 <sup>-2</sup>	3·10 <sup>-2</sup>	1,0	2,3·10 <sup>-3</sup>
N	1·10 <sup>-4</sup>	6·10 <sup>-4</sup>	1,8·10 <sup>-3</sup>	2,2·10 <sup>-3</sup>	2·10 <sup>-3</sup>	6·10 <sup>-2</sup>	1,9·10 <sup>-3</sup>
O	35,0	42,5	43,5	46,0	48,7	52,8	47,0
F	2,8·10 <sup>-3</sup>	1·10 <sup>-2</sup>	3,7·10 <sup>-2</sup>	5·10 <sup>-2</sup>	8·10 <sup>-2</sup>	5·10 <sup>-2</sup>	6,6·10 <sup>-2</sup>
Ne	—	—	—	—	—	—	—
Na	7·10 <sup>-1</sup>	5,7·10 <sup>-1</sup>	1,97	3,0	2,77	0,66	2,50
Mg	14,0	25,9	4,5	2,18	0,56	1,34	1,87
Al	1,30	0,45	8,76	8,85	7,7	10,45	8,05
Si	18,0	19,0	24,0	26,0	32,3	23,8	29,5
P	5·10 <sup>-2</sup>	1,7·10 <sup>-2</sup>	1,4·10 <sup>-1</sup>	1,6·10 <sup>-1</sup>	7·10 <sup>-2</sup>	7,7·10 <sup>-2</sup>	9,3·10 <sup>-2</sup>
S	2,0	1·10 <sup>-2</sup>	3·10 <sup>-2</sup>	2·10 <sup>-2</sup>	4·10 <sup>-2</sup>	3·10 <sup>-1</sup>	4,7·10 <sup>-2</sup>
Cl	7·10 <sup>-3</sup>	5·10 <sup>-3</sup>	5·10 <sup>-3</sup>	1·10 <sup>-2</sup>	2,4·10 <sup>-2</sup>	1,6·10 <sup>-2</sup>	1,7·10 <sup>-2</sup>
Ar	—	—	—	—	—	—	—
K	8,5·10 <sup>-2</sup>	3·10 <sup>-2</sup>	8,3·10 <sup>-1</sup>	2,3	3,34	2,28	2,50
Ca	1,40	0,7	6,72	4,65	1,58	2,53	2,96
Sc	6·10 <sup>-4</sup>	5·10 <sup>-4</sup>	2,4·10 <sup>-3</sup>	2,5·10 <sup>-4</sup>	3·10 <sup>-4</sup>	1·10 <sup>-3</sup>	1·10 <sup>-3</sup>
Ti	5·10 <sup>-2</sup>	3·10 <sup>-2</sup>	0,9	0,8	0,23	0,45	0,45
V	7·10 <sup>-3</sup>	4·10 <sup>-3</sup>	2·10 <sup>-2</sup>	1·10 <sup>-2</sup>	4·10 <sup>-3</sup>	1,3·10 <sup>-2</sup>	9·10 <sup>-3</sup>
Cr	2,5·10 <sup>-1</sup>	2·10 <sup>-1</sup>	2·10 <sup>-2</sup>	5·10 <sup>-3</sup>	2,5·10 <sup>-3</sup>	1·10 <sup>-2</sup>	8,3·10 <sup>-3</sup>
Mn	2·10 <sup>-1</sup>	1,5·10 <sup>-1</sup>	2·10 <sup>-1</sup>	1,2·10 <sup>-1</sup>	6·10 <sup>-2</sup>	6,7·10 <sup>-2</sup>	1·10 <sup>-1</sup>
Fe	25,0	9,85	8,56	5,85	2,7	3,33	4,65
Co	8·10 <sup>-2</sup>	2·10 <sup>-2</sup>	4,5·10 <sup>-3</sup>	1·10 <sup>-3</sup>	5·10 <sup>-4</sup>	2·10 <sup>-3</sup>	1,8·10 <sup>-3</sup>
Ni	1,35	2·10 <sup>-1</sup>	1,6·10 <sup>-2</sup>	5,5·10 <sup>-3</sup>	8·10 <sup>-4</sup>	9,5·10 <sup>-3</sup>	5,8·10 <sup>-3</sup>
Cu	1·10 <sup>-2</sup>	2·10 <sup>-3</sup>	1·10 <sup>-2</sup>	3,5·10 <sup>-3</sup>	2·10 <sup>-3</sup>	5,7·10 <sup>-3</sup>	4,7·10 <sup>-3</sup>
Zn	5·10 <sup>-3</sup>	3·10 <sup>-3</sup>	1,3·10 <sup>-2</sup>	7,2·10 <sup>-3</sup>	6·10 <sup>-3</sup>	8·10 <sup>-3</sup>	8,3·10 <sup>-3</sup>
Ga	3·10 <sup>-4</sup>	2·10 <sup>-4</sup>	1,8·10 <sup>-3</sup>	2·10 <sup>-3</sup>	2·10 <sup>-3</sup>	3·10 <sup>-3</sup>	1,9·10 <sup>-3</sup>

Продолжение таблицы 1

	1	2	3	4	5	6	7	8
Ge	—	1·10 <sup>-3</sup>	1·10 <sup>-4</sup>	1,5·10 <sup>-4</sup>	1,5·10 <sup>-4</sup>	1,4·10 <sup>-4</sup>	2·10 <sup>-4</sup>	1,4·10 <sup>-4</sup>
As	—	3·10 <sup>-5</sup>	5·10 <sup>-5</sup>	2·10 <sup>-4</sup>	2,4·10 <sup>-4</sup>	1,5·10 <sup>-4</sup>	6,6·10 <sup>-4</sup>	1,7·10 <sup>-4</sup>
Se	—	1·10 <sup>-3</sup>	5·10 <sup>-6</sup>	5·10 <sup>-6</sup>	5·10 <sup>-6</sup>	5·10 <sup>-6</sup>	6·10 <sup>-5</sup>	5·10 <sup>-6</sup>
Br	—	5·10 <sup>-5</sup>	5·10 <sup>-5</sup>	3·10 <sup>-4</sup>	4,5·10 <sup>-4</sup>	1,7·10 <sup>-4</sup>	6·10 <sup>-4</sup>	2,1·10 <sup>-4</sup>
Kr	—	—	—	—	—	—	—	—
Rb	—	5·10 <sup>-4</sup>	2·10 <sup>-4</sup>	4,5·10 <sup>-3</sup>	1·10 <sup>-2</sup>	2,0·10 <sup>-2</sup>	2·10 <sup>-2</sup>	1,5·10 <sup>-2</sup>
Sr	—	1·10 <sup>-3</sup>	1·10 <sup>-3</sup>	4,4·10 <sup>-2</sup>	8·10 <sup>-2</sup>	3·10 <sup>-2</sup>	4,5·10 <sup>-2</sup>	3,4·10 <sup>-2</sup>
Y	—	8·10 <sup>-5</sup>	—	2·10 <sup>-3</sup>	—	3,4·10 <sup>-3</sup>	3·10 <sup>-3</sup>	2,9·10 <sup>-3</sup>
Zr	—	3·10 <sup>-3</sup>	3·10 <sup>-3</sup>	1·10 <sup>-2</sup>	2,6·10 <sup>-2</sup>	2·10 <sup>-2</sup>	2·10 <sup>-2</sup>	1,7·10 <sup>-2</sup>
Nb	—	3·10 <sup>-5</sup>	1·10 <sup>-4</sup>	2·10 <sup>-3</sup>	2·10 <sup>-3</sup>	2·10 <sup>-3</sup>	2·10 <sup>-3</sup>	2·10 <sup>-3</sup>
Mo	—	6·10 <sup>-5</sup>	2·10 <sup>-5</sup>	1,4·10 <sup>-4</sup>	9·10 <sup>-5</sup>	1·10 <sup>-4</sup>	2·10 <sup>-4</sup>	1,1·10 <sup>-4</sup>
Tc	—	—	—	—	—	—	—	—
Ru	—	1·10 <sup>-4</sup>	—	—	—	—	—	—
Rh	—	1,9·10 <sup>-5</sup>	—	—	—	—	—	—
Pd	—	1·10 <sup>-4</sup>	1,2·10 <sup>-5</sup>	1,9·10 <sup>-6</sup>	—	1·10 <sup>-6</sup>	—	1,3·10 <sup>-6</sup>
Ag	—	9,4·10 <sup>-6</sup>	5·10 <sup>-6</sup>	1·10 <sup>-5</sup>	7·10 <sup>-6</sup>	5·10 <sup>-6</sup>	1·10 <sup>-5</sup>	7·10 <sup>-6</sup>
Cd	—	1·10 <sup>-5</sup>	5·10 <sup>-6</sup>	1,9·10 <sup>-5</sup>	—	1·10 <sup>-5</sup>	3·10 <sup>-5</sup>	1,3·10 <sup>-5</sup>
In	—	1·10 <sup>-7</sup>	1,3·10 <sup>-6</sup>	2,2·10 <sup>-5</sup>	—	2,6·10 <sup>-5</sup>	5·10 <sup>-6</sup>	2,5·10 <sup>-5</sup>
Sn	—	1·10 <sup>-4</sup>	5·10 <sup>-5</sup>	1,5·10 <sup>-4</sup>	—	3·10 <sup>-4</sup>	1·10 <sup>-3</sup>	2,5·10 <sup>-4</sup>
Sb	—	1·10 <sup>-5</sup>	1·10 <sup>-5</sup>	1·10 <sup>-4</sup>	2·10 <sup>-5</sup>	2,6·10 <sup>-5</sup>	2·10 <sup>-4</sup>	5·10 <sup>-5</sup>
Te	—	5·10 <sup>-5</sup>	1·10 <sup>-7</sup>	1·10 <sup>-7</sup>	1·10 <sup>-7</sup>	1·10 <sup>-7</sup>	1·10 <sup>-6</sup>	1·10 <sup>-7</sup>
I	—	4·10 <sup>-6</sup>	1·10 <sup>-6</sup>	5·10 <sup>-5</sup>	3·10 <sup>-5</sup>	4·10 <sup>-5</sup>	1·10 <sup>-4</sup>	4·10 <sup>-5</sup>
Xe	—	—	—	—	—	—	—	—
Cs	—	1·10 <sup>-5</sup>	1·10 <sup>-5</sup>	1·10 <sup>-4</sup>	—	5·10 <sup>-4</sup>	1,2·10 <sup>-3</sup>	3,7·10 <sup>-4</sup>
Ba	—	6·10 <sup>-4</sup>	1·10 <sup>-4</sup>	3·10 <sup>-2</sup>	6,5·10 <sup>-2</sup>	8,3·10 <sup>-2</sup>	8·10 <sup>-2</sup>	6,5·10 <sup>-2</sup>
La	—	3·10 <sup>-5</sup>	—	2,7·10 <sup>-3</sup>	—	6·10 <sup>-3</sup>	4·10 <sup>-3</sup>	2,9·10 <sup>-3</sup>
Ce	—	5·10 <sup>-5</sup>	—	4,5·10 <sup>-4</sup>	—	1·10 <sup>-2</sup>	5·10 <sup>-3</sup>	7·10 <sup>-3</sup>
Pr	—	1·10 <sup>-5</sup>	—	4·10 <sup>-4</sup>	—	1,2·10 <sup>-3</sup>	5·10 <sup>-4</sup>	9·10 <sup>-4</sup>
Nd	—	6·10 <sup>-5</sup>	—	2·10 <sup>-3</sup>	—	4,6·10 <sup>-3</sup>	2,3·10 <sup>-3</sup>	3,7·10 <sup>-3</sup>
Pm	—	—	—	—	—	—	—	—
Sm	—	2·10 <sup>-5</sup>	—	5·10 <sup>-4</sup>	—	9·10 <sup>-4</sup>	6,5·10 <sup>-4</sup>	8·10 <sup>-4</sup>
Eu	—	8·10 <sup>-6</sup>	1·10 <sup>-6</sup>	1·10 <sup>-4</sup>	—	1,5·10 <sup>-4</sup>	1·10 <sup>-4</sup>	1,3·10 <sup>-4</sup>
Gd	—	4·10 <sup>-5</sup>	—	5·10 <sup>-4</sup>	—	9·10 <sup>-4</sup>	6,5·10 <sup>-4</sup>	8·10 <sup>-4</sup>
Tb	—	5·10 <sup>-6</sup>	—	8·10 <sup>-5</sup>	—	2,5·10 <sup>-4</sup>	9·10 <sup>-5</sup>	4,3·10 <sup>-4</sup>
Dy	—	3,5·10 <sup>-5</sup>	5·10 <sup>-6</sup>	2·10 <sup>-4</sup>	—	6,7·10 <sup>-4</sup>	4,5·10 <sup>-4</sup>	5·10 <sup>-4</sup>
Ho	—	7·10 <sup>-6</sup>	—	1·10 <sup>-4</sup>	—	2·10 <sup>-4</sup>	1·10 <sup>-4</sup>	1,7·10 <sup>-4</sup>

Окончание таблицы 1

1	2	3	4	5	6	7	8
Er	$2 \cdot 10^{-5}$	—	$2 \cdot 10^{-4}$	—	$4 \cdot 10^{-4}$	$2,5 \cdot 10^{-4}$	$3,3 \cdot 10^{-4}$
Tu	$4 \cdot 10^{-6}$	—	$2 \cdot 10^{-5}$	—	$3 \cdot 10^{-5}$	$2,5 \cdot 10^{-5}$	$2,7 \cdot 10^{-5}$
Yb	$2 \cdot 10^{-5}$	—	$2 \cdot 10^{-4}$	—	$4 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-4}$	$3,3 \cdot 10^{-5}$
Lu	$3,5 \cdot 10^{-6}$	—	$6 \cdot 10^{-5}$	—	$1 \cdot 10^{-4}$	$7 \cdot 10^{-5}$	$8 \cdot 10^{-5}$
Hf	$5 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$6 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-4}$
Ta	$2 \cdot 10^{-6}$	$1,8 \cdot 10^{-6}$	$4,8 \cdot 10^{-5}$	$7 \cdot 10^{-5}$	$3,5 \cdot 10^{-4}$	$3,5 \cdot 10^{-4}$	$2,5 \cdot 10^{-4}$
W	$1,5 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$1,5 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-4}$	$1,3 \cdot 10^{-4}$
Re	$8 \cdot 10^{-8}$	—	$7,1 \cdot 10^{-8}$	—	$6,7 \cdot 10^{-8}$	—	$7 \cdot 10^{-8}$
Os	$5 \cdot 10^{-5}$	—	—	—	—	—	—
Ir	$4,8 \cdot 10^{-5}$	—	—	—	$6,3 \cdot 10^{-7}$	—	—
Pt	$2 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-5}$	—	—	—	—
Au	$1,7 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-7}$	$4 \cdot 10^{-7}$	—	$4,5 \cdot 10^{-7}$	$1 \cdot 10^{-7}$	$4,3 \cdot 10^{-7}$
Hg	$3 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-6}$	$9 \cdot 10^{-6}$	—	$8 \cdot 10^{-6}$	$4 \cdot 10^{-5}$	$8,3 \cdot 10^{-6}$
Tl	$1 \cdot 10^{-7}$	$1 \cdot 10^{-6}$	$2 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-5}$	$1,5 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-4}$
Pb	$2 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$8 \cdot 10^{-4}$	$1,5 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-3}$	$1,6 \cdot 10^{-3}$
Bi	$3 \cdot 10^{-7}$	$1 \cdot 10^{-7}$	$7 \cdot 10^{-7}$	$1 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-6}$	$9 \cdot 10^{-7}$
Po	—	—	—	—	—	—	—
At	—	—	—	—	—	—	—
Rn	—	—	—	—	—	—	—
Fr	—	—	—	—	—	—	—
Ra	—	—	—	—	—	—	—
Ac	—	—	—	—	—	—	—
Th	$4 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-7}$	$3 \cdot 10^{-4}$	$7 \cdot 10^{-4}$	$1,8 \cdot 10^{-3}$	$1,1 \cdot 10^{-3}$	$1,3 \cdot 10^{-3}$
Pa	—	—	—	—	—	—	—
U	$1,5 \cdot 10^{-6}$	$3 \cdot 10^{-7}$	$5 \cdot 10^{-5}$	$1,8 \cdot 10^{-8}$	$3,5 \cdot 10^{-4}$	$3,2 \cdot 10^{-4}$	$2,5 \cdot 10^{-4}$

2- каменные метеориты (хондриты)  
3- ультраосновные породы (дуниты...)  
4- основные породы (базальты, габбро...)  
5- средние породы (диориты, андезиты)  
6- кремнекислые породы (граниты, гранодиориты)  
7- осадочные породы (глины и сланцы)  
8 - 2 части кремнекислых пород + 1 часть основных пород





# INTERNATIONAL STRATIGRAPHIC CHART

International Commission on Stratigraphy

Epoch	Series	Stage	Age (Ma)	GSSP	
Phanerozoic	Cenozoic	Neogene	Holocene	0.0115	
			Upper Pleistocene	0.126	
		Pliocene	Middle	0.781	
			Lower	1.806	
	Paleogene	Pliocene	Gelasian	1.806	
			Placenzian	2.588	
			Zanclean	3.600	
		Miocene	Messinian	5.332	
			Tortonian	7.246	
			Serravalloian	11.806	
			Langhian	13.95	
			Burdigalian	15.97	
			Aquitanian	20.43	
			Chattian	23.03	
	Paleocene	Oligocene	Rupelian	28.4 ± 0.1	
			Prabonian	31.2 ± 0.1	
		Eocene	Bartonian	40.4 ± 0.2	
			Lutetian	48.6 ± 0.2	
			Ypresian	55.8 ± 0.2	
Paleocene		Thanetian	56.2 ± 0.2		
		Selandian	61.7 ± 0.2		
		Danian	65.5 ± 0.3		
		Maastrichtian	70.6 ± 0.6		
		Campanian	83.5 ± 0.7		
Mesozoic	Cretaceous	Upper	85.8 ± 0.7		
		Coniacian	89.3 ± 1.0		
		Turonian	93.5 ± 0.8		
		Cenomanian	99.6 ± 0.9		
		Maastrichtian	112.0 ± 1.0		
		Aptian	125.0 ± 1.0		
		Santonian	130.0 ± 1.5		
		Hauterivian	136.4 ± 2.0		
		Maastrichtian	140.2 ± 3.0		
		Santonian	145.0 ± 4.0		

Epoch	Series	Stage	Age (Ma)	GSSP	
Phanerozoic	Mesozoic	Jurassic	Upper	145.5 ± 4.0	
			Tithonian	150.8 ± 4.0	
			Kimmeridgian	155.7 ± 4.0	
			Oxfordian	161.2 ± 4.0	
			Callovian	164.7 ± 4.0	
			Bathonian	167.7 ± 3.5	
		Middle	Bajocian	171.6 ± 3.0	
			Aalenian	175.6 ± 2.0	
			Toarcian	183.0 ± 1.5	
			Lower	189.6 ± 1.5	
	Paleozoic	Upper	Rhaetian	199.6 ± 0.6	
			Norian	203.6 ± 1.5	
			Carian	216.5 ± 2.0	
			Ladinian	228.0 ± 2.0	
		Middle	Artisan	237.0 ± 2.0	
			Assel	245.0 ± 1.5	
		Lower	Stettin	246.7 ± 0.7	
			Silesian	251.0 ± 0.4	
			Dachstein	253.8 ± 0.7	
			Werraean	260.4 ± 0.7	
Permian	Capitanian	265.6 ± 0.7			
	Wordian	269.0 ± 0.7			
	Roadian	270.6 ± 0.7			
	Artinskian	275.6 ± 0.7			
	Assel	284.4 ± 0.7			
	Sakmarian	294.6 ± 0.8			
Carboniferous	Upper	Gebelean	299.0 ± 0.8		
		Kasimovian	303.9 ± 0.9		
	Middle	Moscovian	306.5 ± 1.0		
		Bashkirian	311.7 ± 1.1		
	Lower	Serpukhovian	318.1 ± 1.3		
		Misissippian	326.4 ± 1.6		
		Assel	345.3 ± 2.1		
		Frasnian	359.2 ± 2.2		

Epoch	Series	Stage	Age (Ma)	GSSP		
Phanerozoic	Devonian	Upper	Famennian	359.2 ± 2.9		
			Frasnian	374.5 ± 2.6		
		Middle	Givetian	385.3 ± 2.6		
			Eifelian	391.8 ± 2.7		
		Lower	Emasian	397.5 ± 2.7		
			Pragian	407.0 ± 2.8		
			Lochkovian	411.2 ± 2.8		
			Priddic	416.0 ± 2.8		
			Ludlow	418.7 ± 2.7		
			Gorstian	421.3 ± 2.6		
	Silurian	Wenlock	Homanian	422.9 ± 2.5		
			Shinarumpian	426.2 ± 2.4		
		Llandovery	Telymanian	428.2 ± 2.3		
			Aeronian	436.3 ± 1.9		
		Upper	Rhuddanian	439.3 ± 1.8		
			Hirnantian	442.7 ± 1.5		
		Cambrian	Upper	Hirnantian	445.0 ± 1.9	
				Sturtian	455.8 ± 1.6	
			Middle	Sturtian	460.9 ± 1.8	
				Sturtian	478.1 ± 1.6	
Lower	Furongian		471.8 ± 1.6			
	Pabian		478.5 ± 1.7			
Middle	Pabian		488.3 ± 1.7			
	Pabian		501.0 ± 2.0			
Lower	Pabian		513.0 ± 2.0			
	Pabian		542.0 ± 1.0			

Epoch	Series	Stage	Age (Ma)	GSSP/GSSA	
Phanerozoic	Proterozoic	Neo-proterozoic	Ectasian	542	
			Cryogenian	630	
			Tonian	850	
		Meso-proterozoic	Stonian	1000	
			Ectasian	1200	
			Calymnian	1400	
			Statherian	1600	
		Paleo-proterozoic	Orosian	1900	
			Rhyacian	2050	
			Solarian	2300	
Archean	Neoproterozoic	2500			
	Neoproterozoic	2800			
Proterozoic	Paleoproterozoic	3200			
	Paleoproterozoic	3800			
Lower limit is not defined					

Subdivisions of the global geologic record are formally defined by their lower boundary. Each unit of the Phanerozoic interval (~542 Ma to Present) and the base of the Ediacaran is defined by a Global Standard Section and Point (GSSP) at its base, whereas the Precambrian interval is formally subdivided by absolute age. Global Standard Stratigraphic Age (GSSA).

This chart gives an overview of the international chronostratigraphic units, their rank, their names and formal status. These units are approved by the International Commission on Stratigraphy (ICS) and ratified by the International Union of Geological Sciences (IUGS).

The Guidelines of the ICS (Renne et al., 1996, Episodes, 19: 77-81) regulate the selection and

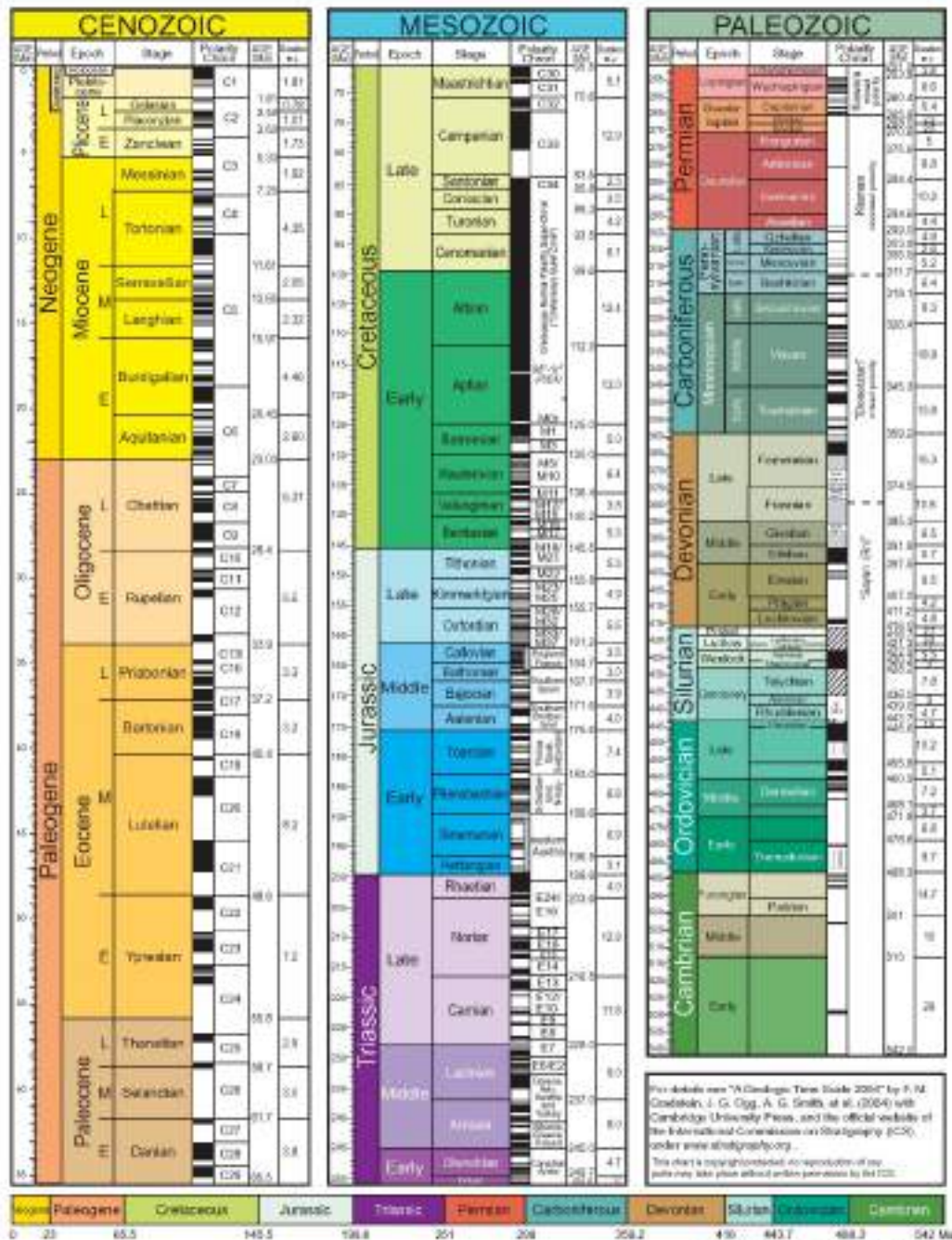
definition of the international units of geologic time. Many GSSP's actually have a 'golden' spike (📌) and Stage and/or System name plaque mounted at the boundary level in the boundary stratotype section, whereas a GSSA is an abstract age without reference to a specific level in a rock section on Earth. Updated descriptions of each GSSP and GSSA are posted on the ICS website ([www.stratigraphy.org](http://www.stratigraphy.org)).

Some stages within the Ordovician and Cambrian will be formally named upon international agreement on their GSSP limits. Most intra-stage boundaries (e.g., Middle and Upper Artisan) are not formally defined. Numerical ages of the unit boundaries in the Phanerozoic are subject to revision. Colors are according to the Commission for the Geological Map of the World ([www.cgmw.org](http://www.cgmw.org)). The listed numerical ages are from 'A Geologic Time Scale 2004', by Gradstein, Ogg, Smith, et al. (2004, Cambridge University Press).

This chart was drafted and printed with funding generously provided for the GTS Project 2004 by ExxonMobil, Statoil Norway, Chevron/Texaco and BP. The chart was produced by Gabri Ogg.



## PHANEROZOIC



This chart is a reproduction of the International Commission on Stratigraphy (ICS) 2004 time scale. It is based on the work of the ICS and the International Commission on Stratigraphy (ICS), and is published by the ICS. The chart is a reproduction of the International Commission on Stratigraphy (ICS) 2004 time scale. It is based on the work of the ICS and the International Commission on Stratigraphy (ICS), and is published by the ICS.

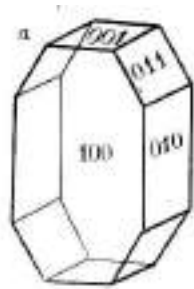
This chart is a reproduction of the International Commission on Stratigraphy (ICS) 2004 time scale. It is based on the work of the ICS and the International Commission on Stratigraphy (ICS), and is published by the ICS.



Улуг-Танзек, Тува



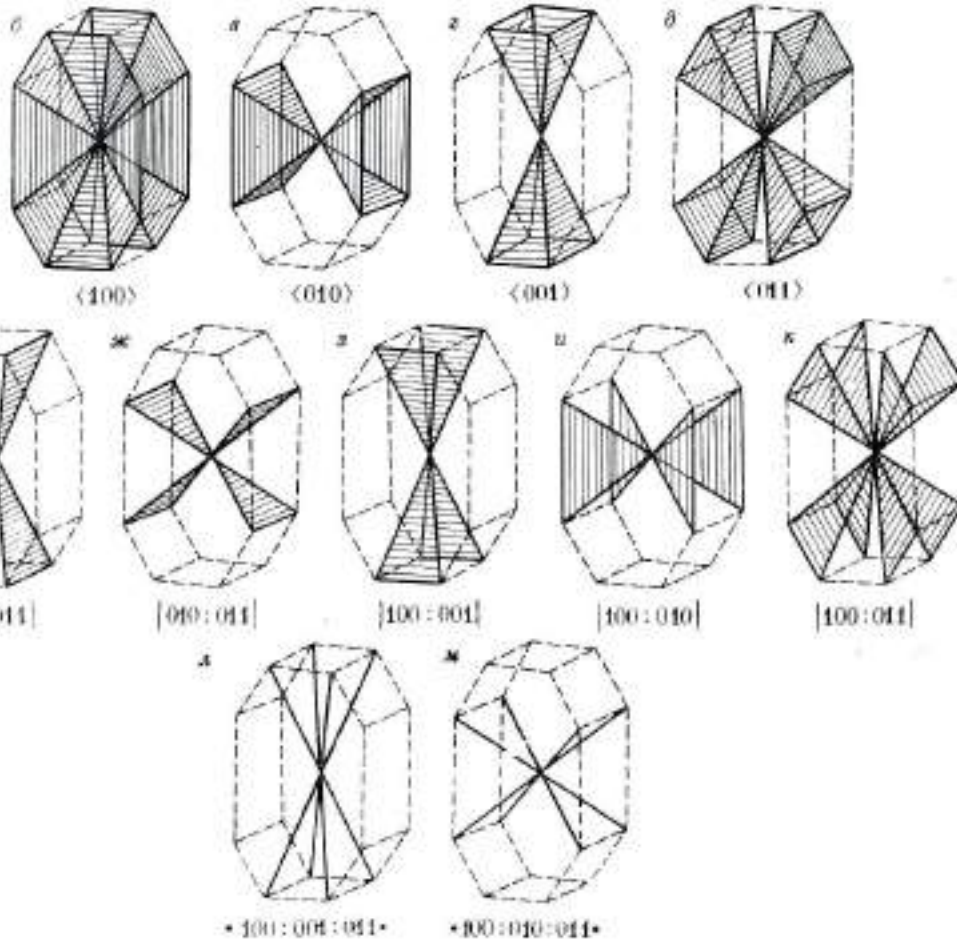
# Элементы строения кристаллов



Кристаллы образуют пирамиды роста граней, плоскости роста рёбер, линии роста вершин.

Часто кристаллы растут из микроскопического размера зародышей, так называемых критических зародышей, обладающих той же кристаллической структурой, что и макрокристаллы.

Макрокристаллы возникают путём разрастания этих зародышей, при воспроизводстве, редупликации кристаллической структуры данного минерала.



**Э.М. Спиридонов**

**Генетическая минералогия.**

**ГМ-1. Онтогения. Индивиды**

**Рост кристаллов**

**002. Зарождение кристаллов - 1.**

# Индивиды. Рост кристаллов. Зарождение

## Основы теории зарождения и роста кристаллов

### Классификация физико-химических систем

По степени обособленности от окружающей среды различают: **изолированные, закрытые и открытые системы**. Изолированные, т.е. без обмена теплом и веществом с окружающей средой, в природе не встречаются. Закрытые системы - те, в которых идет обмен теплом с окружающей средой, но не идет обмен веществом (примеры - многие регионально-метаморфические образования, пегматиты на магматической стадии их формирования). Наиболее распространены открытые системы, обменивающиеся с окружающей средой и теплом и веществом. В условиях открытых или частично открытых систем происходит формирование гидротермалитов, кор выветривания, иных метасоматитов.

По агрегатным состояниям вещества - системы **простые** **одноагрегатные**: паровая или газовая (Г), жидкая (Ж), твёрдая (Т) и **полиагрегатные**. Агрегатные состояния вдали от критических точек чётко различаются и определяются расстоянием между молекулами (атомами) и степенью их подвижности. Вблизи критических точек переходы между Г и Ж постепенные и непрерывные, границы между агрегатными состояниями становятся неопределенными. Точно так же отсутствуют чёткие границы между монокристаллами и поликристаллическими агрегатами (через кристаллы с дислокациями и искажениями); между жидким и

# Индивиды. Рост кристаллов. Зарождение

кристаллическим состояниями (через коллоиды и жидкие кристаллы).

По отношению к изменчивости во времени - **стабильные и нестабильные системы**. Если любые слабые воздействия на систему (тепловые, химические, механические..) не приводят к макроскопическим изменениям в физико-химической системе, ее называют стабильной. Например, расплавы при  $T > T_{пл.}$ ; кристаллы при  $T < T_{пл.}$ ; недосыщенные растворы.... К нестабильным относят расплавы ниже  $T_{пл.}$ ; растворы, содержащие растворённое вещество в концентрации выше равновесной, т.е. растворы пересыщенные. При попадании в такие жидкости единственной пылинки, родственной по структуре растворённому или расплавленному веществу, начинается кристаллизация.

По отношению к состоянию равновесия - **равновесные и неравновесные системы**. В состоянии равновесия температура в разных точках системы одинакова ... В неравновесных системах массы или температура самопроизвольно изменяются в ту или иную сторону и со временем система приходит к равновесию. При этом, чем ближе система находится к этому равновесию, тем медленнее идет процесс.

Обратим внимание на то, что классическая термодинамика - это термодинамика равновесий и неравновесий, но без обсуждения скоростей и путей процессов перехода в равновесное состояние. Термодинамика

# Индивиды. Рост кристаллов. Зарождение

рассматривает движущую силу переходов и их направление, но не дает сведений о том, пойдет ли вообще этот процесс, как и с какой скоростью. Это серьезное ограничение возможностей термодинамики часто не учитывается.

Среди **неравновесных** систем выделяются три разновидности: **метастабильные, лабильные и "замороженные"**. **Метастабильные** - те неравновесные системы, в которых не удастся уловить никаких изменений при сохранении внешних условий и при отсутствии зародышей, равновесных для данных условий фаз. **Метастабильное** состояние реализуется в некоторой зоне, вытянутой вдоль линии равновесия. При дальнейшем уходе от равновесия система обычно переходит в **лабильное** абсолютно неустойчивое состояние, при котором происходит быстрый переход системы к равновесию. Однако, при большой скорости ухода от равновесия удастся пройти не только **метастабильную**, но и **лабильную** область и привести систему в **"замороженное"** состояние - разновидность **стабильной** системы. В таких системах, несмотря на большое отклонение от равновесия и даже при наличии в них равновесных фаз, в которые должны перейти неравновесные, процессы изменения практически не идут или идут чрезвычайно медленно. В **замороженном** состоянии находятся многие минералы (алмаз, пироп, санидин, авгит, керсутит...), возникшие в

# Индивиды. Рост кристаллов. Зарождение

глубинных и сверхглубинных условиях и почти мгновенно выброшенные - транспортированные вспененными расплавами кимберлитов, лампроитов, щелочных базальтов на поверхность, где эти глубинные минералы неопределенно долго сохраняются. Известны алмазы с возрастом 3,8 млрд. лет и микроалмазы в метеоритном веществе досолнечного возраста. Взгляните на авгиты из глубинных геосфер - это стеклоподобные, "вароподобные" образования, без спайности.

Авгит из щелочных базальтов диатремы Шаварым-Царан, Монголия



65x29 мм



23x22 мм



# Индивиды. Рост кристаллов. Зарождение

Классификация физико-химических систем по фазовому (агрегатному) состоянию и числу компонентов.

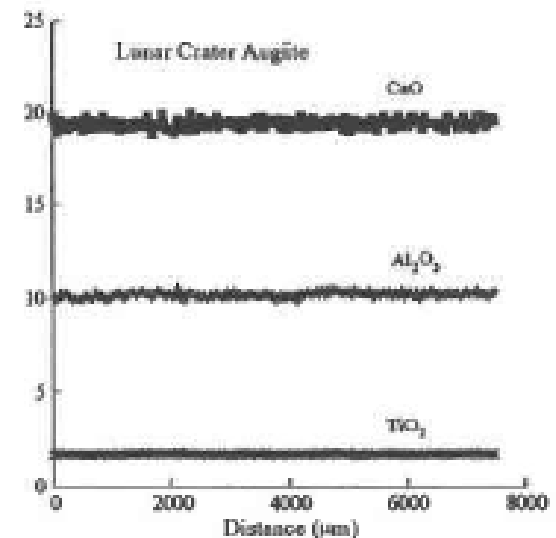
Агрегатное фазовое состояние	Однокомпонентные системы	Многокомпонентные системы - растворы
Газообразное	пары чистых веществ	Вулканические газы, атмосфера, горючие газы
Жидкое	расплавы чистых веществ, вода, ртуть	грунтовые воды, рассолы озер, гидротермальные растворы
Твёрдое	минералы постоянного состава	минералы переменного состава (твёрдые растворы)

# Индивиды. Рост кристаллов. Зарождение

По характеру поведения во времени основных параметров кристаллизации :  $T$ ,  $P$ , состава и степени пересыщения - выделяются **стационарные и нестационарные состояния системы**. При стационарном состоянии все перечисленные параметры - на постоянном уровне, соответственно состав и форма кристаллов ~ постоянны. Понятно, что такое постоянство может реализовываться обычно лишь на каких-то отрезках времени. О стационарности – не стационарности системы можно судить по характеру распределения примесей в кристаллах по направлению нарастания (по зонам роста), поскольку изменение любого параметра сказывается на вхождении примесей в кристалл. Яркий пример стационарного состояния – средняя - верхняя мантия под кратонами, где образуются идеально гомогенные незональные кристаллы граната, клинопироксена, амфибола.

Абсолютно гомогенный 8 мм кристалл авгита  
из мантийного ксенолита  
в щелочных базальтах

Lunar Crater Volcanic Field на западе США  
(Richter K. & Carmichael I.S.E., 1993.  
Amer. Mineral. Vol. 78. P. 1230-1245)



# Индивиды. Рост кристаллов. Зарождение

## Типы физико-химических превращений

Кристаллизация может происходить из сред любого агрегатного состояния из одно- и многокомпонентных систем. Кристаллизация - частный случай физико-химических превращений. Рассмотрение частных случаев всегда лучше проводить на широком фоне. Поэтому рассмотрим общую схему превращений вещества, происходящих при изменении температуры, давления и при смешении двух веществ.

	Последующие состояния						
	Газообразное		Жидкое		Кристаллическое		
	А	Б	В	Г	Д	Е	
Газ	А	1	2	3	4	5	6
	Б	7	8	9	10	11	12
Жидкость	В	13	14	15	16	17	18
	Г	19	20	21	22	23	24
Кристалл	Д	25	26	27	28	29	30
	Е	31	32		33	34	35

# Индивиды. Рост кристаллов. Зарождение

А - газ чистый (стехиометрический состав). Б - смесь газов (нестехиометрический состав). В - расплав (стехиометрический состав). Г - раствор (нестехиометрический состав). Д - кристаллическое вещество чистое (стехиометрический состав). Е - твёрдый раствор (нестехиометрический состав).

1 - диссоциация - ассоциация молекул в газе. 2 - смешение двух и более газов. 3 - конденсация из чистого газа. 4 - растворение газа в жидкости. 5 - сублимация. 6 - растворение газа в кристалле. 7 - разделение смеси газов. 8 - смешение газа с газовым раствором, химические реакции в газе при изменении  $T$ ,  $P$ . 9 – конденсация. 10 - растворение смеси газов в жидкости (поликонденсация). 11 - сублимация. 12 - сублимация (полисублимация). 13 - испарение. 14 - испарение из расплава в газ. 15 - полиморфные превращения в расплавах и жидких кристаллах. 16 – смешение двух расплавов, растворение газа или кристалла в жидкости. 17 – кристаллизация. 18 - диффузное внедрение компонентов жидкости в кристалл. 19 – испарение. 20 - испарение. 21 - ликвация. 22 - полиморфные превращения в растворах, смешение жидких растворов, смешение (растворение) газ + жидкость, кристалл + раствор. 23 - кристаллизация. 24 - кристаллизация. 25 - возгонка. 26 - возгонка. 27 - плавление. 28 - растворение и "взаимное плавление". 29 - полиморфные превращения в кристаллах, химические твердофазные реакции. 30 - гомогенизация срастаний кристаллов стехиометрических соединений (химические твердофазные реакции). 31 - дегазация твёрдых растворов. 32 - дегазация. Возгонка. 33 - ожижение твёрдого раствора. 34 - распад твёрдого раствора. 35 - полиморфные превращения, химические твердофазные реакции.



# Индивиды. Рост кристаллов. Зарождение

Замечания : среди рассмотренных отсутствует стеклообразное (аморфное) состояние, появились бы термины - "дегазация из стекол", "вспенивание", обычные для лав..

Примеры в клетках: 1. кислород  $\rightarrow$  озон, 5. Hg газ - кристалл, 11. образование минералов в вулканических возгонах:  $\text{NH}_3$  (газ) +  $\text{HCl}$  (газ)  $\rightarrow$   $\text{NH}_4\text{Cl}$  нашатырь, 21. ликвация базитового расплава на силикатный + сульфидный расплавы, 30. гомогенизация пертитового K-Na полевого шпата.

## Среды кристаллизации

Среда кристаллизации - то, из чего и за счёт чего формируется кристалл. Средами кристаллизации могут быть газообразные, жидкие, аморфные и кристаллические вещества. В кристаллических структурах частицы соприкасаются и расположены по законам пространственной решётки, т.е. наблюдается и ближний, и дальний порядок в их расположении. В жидкостях наблюдается ближний порядок расположения частиц, но отсутствует дальний порядок; иначе говоря, жидкости являются частично структурированными системами. Структурная упорядоченность особо характерна для жидкостей с молекулами, имеющими направленный характер связей -  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{SiO}_2$  ...

В природе кристаллизация нередко идет из паровой фазы, т.е. из микрокапельно-жидкого состояния. В этом случае объёмная жидкость

# Индивиды. Рост кристаллов. Зарождение

## Среды кристаллизации

отсутствует, на поверхности кристалла находится тонкая плёнка жидкости. Вообще перенос вещества в паро-газовом состоянии идет не только для хорошо летучих, но и для их смесей с плохо летучими для данной температуры веществами. Так, по запаху можно отличить горячую чистую воду от солевого раствора. Это прямо свидетельствует, что при испарении солёной воды, когда давление паров солей совершенно ничтожно, из жидкости уходит не чистая  $H_2O$ , а её ассоциаты с солью.

Жидкие среды - наиболее распространенные в природе, в частности, водные растворы. Рассмотрим некоторые особенности воды. По многим физическим и химическим свойствам вода - уникальное вещество среди массы иных жидкостей. Вода обладает аномально высокой теплоёмкостью, максимальной скрытой теплотой парообразования и плавления, что вместе обеспечивает терморегуляцию климата Земли. Вода имеет большое поверхностное натяжение, очень большую диэлектрическую постоянную. Её молекулы образуют относительно прочные водородные связи. Это обуславливает исключительную способность воды к растворению других веществ и высокую способность к смачиванию. По трещинам и капиллярам в горных породах вода поднимается на  $n10$  м. В молекуле воды ядра  $H^+$  полностью

# Индивиды. Рост кристаллов. Зарождение

## Среды кристаллизации

погружены в электронное облако атома  $O^{2-}$  («детёныши кенгуру в сумке у мамы»). Так возникает дипольный момент, который по величине в 7 раз больше, чем у  $CO_2$ , в 2 раза больше, чем у  $H_2S$ . Угол связей Н-О-Н в паре  $104^\circ$ , в жидкости  $110^\circ$ , во льду  $120^\circ$ . Вода образует различные ассоциаты с водородным типом связи  $(H_2O)_{2-6}$ . Энергия водородных связей 6-12 ккал/моль значительно меньше энергии ковалентных связей  $> 50$  ккал/моль и сильнее вандерваальсовской  $\sim 1$  ккал/м. Направленный характер водородной связи придает ей сходство с ковалентным типом связи. Кристаллы с водородным характером связи часто имеют рыхлые структуры. Таков лёд. Кристаллы льда гексагональной структуры с пустотами большими, чем молекулы воды. При таянии льда молекулы воды как бы проваливаются в эти пустоты, - вот почему плотность воды больше плотности льда. Венд = криогений.

Слабое постоянное магнитное поле влияет на свойства воды. Сложные колебания скоростей ряда химических реакций в водных растворах связаны с изменениями солнечной активности и объясняют отчасти связи событий на Солнце и в биосфере Земли.

# Индивиды. Рост кристаллов. Зарождение

## Среды кристаллизации

При разных  $T$  происходят перестройки структуры воды, так называемые полиморфные переходы : особые точки, температура - группировки воды

0-4° - тип льда - тридимита

4° - тип льда - тридимита + тип кварца

40° - смесь ассоциатов (типа льда - тридимита и типа кварца)

85° - ассоциаты типа кварца + тетрамеры воды

165° - смесь ассоциатов типа кварца = тетрамеры + тримеры воды

225° - смесь тетрамеры воды = тримеры + димеры воды

270° - смесь тримеры воды = смесь димеры + мономеры воды

340° - смесь димеры воды = мономеры воды

400° - мономеры воды.

В связи с перестройкой структуры воды сильно изменяются все свойства водных растворов, следствием чего является существенное изменение растворимости некоторых веществ. Это приводит к выпадению из раствора больших порций кристаллического вещества именно при температуре примерно равной температуре особых точек воды. Для кварца и пирита это показал А.М. Масалович.

**Растворы:** однофазные многокомпонентные системы, состоящие из статистически равномерно распределённых в объёме молекул двух или более видов. Природные растворы имеют высокую



# Индивиды. Рост кристаллов. Зарождение

## Среды кристаллизации

химическую сложность - это фундаментальный факт, что заставляет с осторожностью относиться к результатам сопоставления природных и более простых искусственных систем. Растворы - это частично структурированные системы, в которых в большей или меньшей степени сохраняется структура чистого жидкого растворителя.

Процесс растворения - химический, сводится к внедрению в структуру растворителя чужих ионов. Растворение всегда сопровождается тепловыми, объёмными, электролитическими и иными явлениями. При этом возникают сольватные (в частности гидратные) комплексы типа  $K-(M)_n$  или  $A-(M)_n$ ,  $K$ - катион,  $A$  - анион,  $M$  - молекулы растворителя. Ионы в растворе обычно находятся в "шубе" молекул растворителя. Раствор вблизи от ионов приобретает определенную структуру - возникает так наз. ближняя сольватация. На расстоянии 3-5 нм от центра иона в растворе наблюдается ближний порядок, наподобие структур кристаллических тел. Это установлено по увеличению плотности раствора и иными методами. С ростом концентрации катионов в растворе растёт упорядоченность его структуры и одновременно растёт его микрогетерогенность; в таких случаях раствор приобретает сиботаксическое строение. Заметим, что структура растворов с участием одного химического соединения -

# Индивиды. Рост кристаллов. Зарождение

## Среды кристаллизации

например, соли, имеющей несколько полиморфных модификаций, - различна; это доказано различиями спектров поглощения этих растворов, различными скоростями зарождения и роста в них кристаллов.

Существует одна разновидность растворов, которой одно время придавалась большая роль в процессах минералообразования. Это коллоидные растворы, для которых характерна высокая степень ассоциированности частиц, покрытых заряженными слоями растворителя. По этой причине у коллоидных растворов повышенное светорассеяние, аномальная электропроводность, вязкость и др. Частицы дисперсной фазы в коллоидных растворах имеют размеры  $10^{-5}$ - $10^{-3}$  мм. Коллоидные растворы содержат растворённое вещество в концентрациях существенно более высоких, чем истинные растворы, а потому являются метастабильными. При введении некоторых дополнительных электролитов или просто со временем они коагулируют с образованием студенистых осадков = гелей, в которых частицы дисперсной фазы образуют пространственную структуру (сетку). При потере жидкой дисперсной среды, т.е. при "старении" гелей, получаются хрупкие, высокопористые твёрдые тела аморфные или микрокристаллические. Хорошо растворимые соединения дают коллоидные растворы с трудом, трудно растворимые соединения обычно легко. Основным способом получения коллоидных растворов является быстрое химическое взаимодействие между хорошо растворимыми соединениями в жидкой среде с образованием плохо растворимых.

# Индивиды. Рост кристаллов. Зарождение

## Среды кристаллизации

Природные растворы по составу сложные. При повышенных температуре и давлении и в постоянно существующих контактах раствора с горными породами, через которые они мигрируют, состав растворов постоянно эволюционирует. Они откладывают одни минералы и растворяют другие. Состав растворов в той или иной степени уравнивается с составом каждой последующей из пород, через которые они протекают. Картина усложняется изменением во времени температуры в каждой точке пространства миграции. Кроме того, зафиксирована дифференциальная подвижность компонентов в растворах: главным образом из-за фильтрационного эффекта (ситовой эффект) - гидратированные ионы 5-, 4- и 3-х валентных металлов более крупные и потому имеют минимальные скорости диффузии, менее крупные гидратированные ионы двухвалентных щелочноземельных металлов более подвижны, а самые малые по размерам гидратированные ионы одновалентных щелочных металлов наиболее подвижны. Интересно, что из щелочных наименее подвижны гидратированные ионы Li (самые крупные), наиболее подвижны – ионы Rb. В дифференциальной подвижности компонентов в растворах определённую роль играют и электрокинетические явления, т.е. образование на стенках пор двойного электрического слоя, обуславливающего задержку ионов одного заряда и более быструю

# Индивиды. Рост кристаллов. Зарождение

## Среды кристаллизации

фильтрацию ионов другого заряда. Оказалось, что все силикатные и алюмосиликатные породы имеют отрицательно заряженную поверхность, поэтому при просачивании растворов через них происходит более быстрая миграция кислотных компонентов - формируется известная "опережающая волна кислотных компонентов" академика Д.С. Коржинского.

Всё это в целом и определяет изменчивость форм, состава и дефектности кристаллов минералов.

## Движущая сила кристаллизации

Динамический характер равновесия между кристаллом и средой означает, что частота отрыва частиц от поверхности кристалла равна частоте их посадки на кристалл. Из макроскопических характеристик этому соответствует соотношение между температурой, определяющей частоту разрушения связей, и концентрацией частиц в объёме раствора, определяющей частоту столкновения частиц с поверхностью кристалла, и образованием связей между частицами и кристаллом. В растворе может быть высокая концентрация и высокая температура, может быть и низкая температура, но если вещества недостаточно - раствор недосыщен, то в общем случае кристаллизации не будет.



# Индивиды. Рост кристаллов. Зарождение

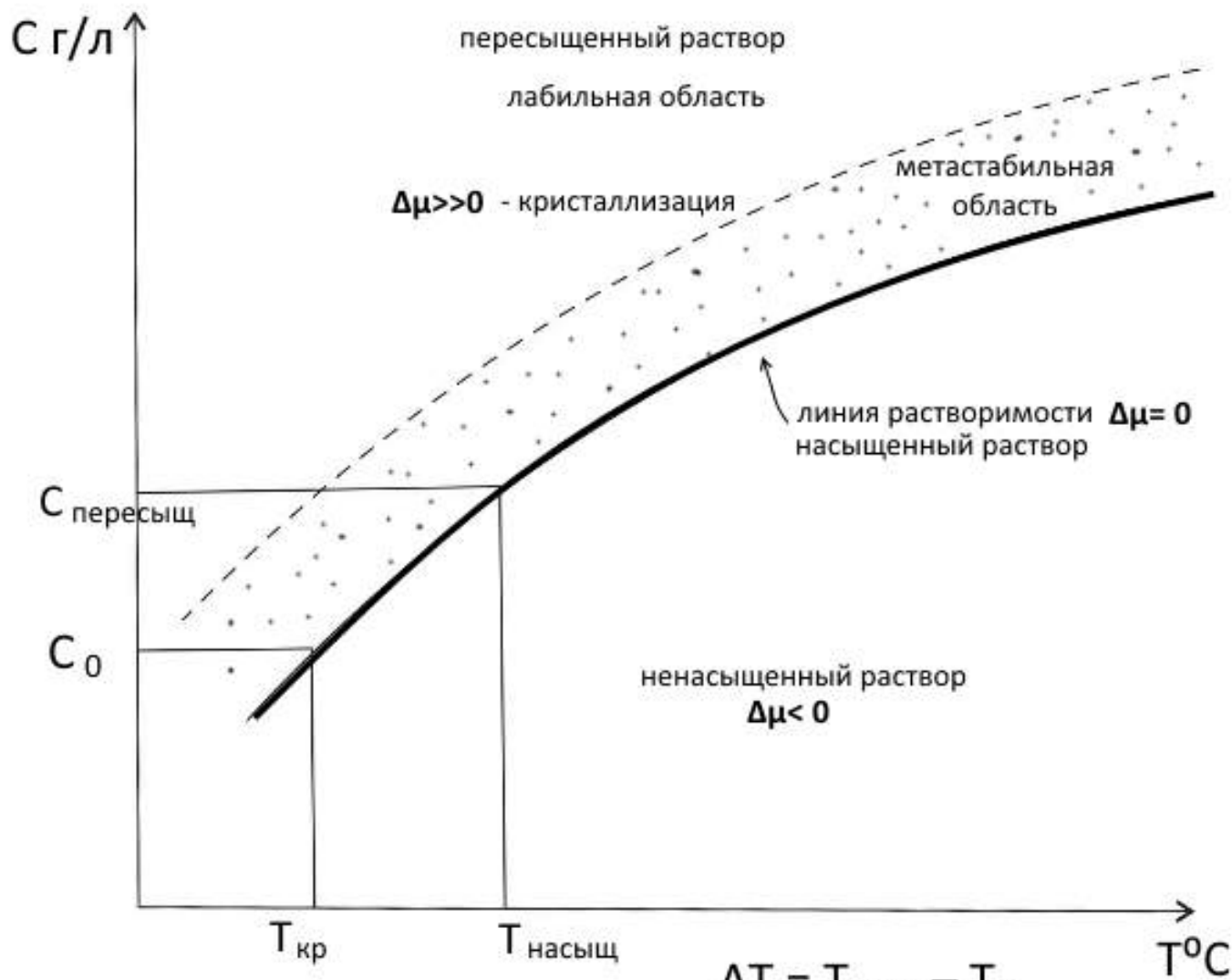
## Движущая сила кристаллизации

Движущая сила процессов кристаллизации - степень неравновесности системы. Для закрытых однокомпонентных систем достаточно двух параметров равновесия - температуры и давления. Для открытых поликомпонентных систем необходим ещё учёт изменений соотношения компонентов - химических потенциалов компонентов  $m_i$ . Химический потенциал - это та работа, чтобы вырвать 1 атом, ион, молекулу из данной фазы - кристалла, жидкости, газа.

Если одно и то же вещество находится в двух фазах, химические потенциалы в которых не равны, то будет происходить перенос вещества от фазы с большим  $m$  к фазе с меньшим  $m$ , точно так же, как происходит перенос заряда в электрическом поле и частиц в гравитационном поле.

Процесс кристаллизации вещества сопровождается образованием химических связей и потому идет с уменьшением свободной энергии системы. Если свободная энергия (химический потенциал) какого-либо вещества различна в двух состояниях (фазах), то эта разница и будет являться движущей силой процесса выравнивания этой энергетической характеристики. Движущей силой процесса кристаллизации является разность химического потенциала вещества ( $\mu$ ) в растворе и в кристалле :  
 $\Delta \mu = \mu_{\text{раствор}} - \mu_{\text{кристалл}}$ .

# Индивиды. Рост кристаллов. Зарождение



**Движущая  
сила  
кристаллизации**

$$\Delta T = T_{\text{насыщ}} - T_{\text{кр}}$$
$$\Delta C = C_{\text{пересыщ}} - C_0$$

# Индивиды. Рост кристаллов. Зарождение

## Движущая сила кристаллизации

Рисунок

Идём от точки А. Температура понижается пока не достигнет  $T_n$  (насыщения). При  $T_n$  в точке В раствор теряет способность растворять данное вещество. При дальнейшем охлаждении переходим в область пересыщения. Степень пересыщения определяется разностью концентраций  $c_n - c_o$ , либо их соотношением  $c_n/c_o$ . Иногда достаточно оценить разность между  $T_n$  и  $T_{кр}$  - степень переохлаждения.

Вблизи от кривой растворимости эти растворы способны долго существовать без выделения кристаллической фазы, если они не соприкасаются с частичками кристаллической фазы. Такие слабо пересыщенные метастабильные растворы являются самыми обычными при росте кристаллов в природе и в лаборатории.

При значительном удалении от кривой растворимости в область  $\Delta \mu \gg 0$  растворы оказываются абсолютно неустойчивыми, лабильными, способными выделять кристаллы и при отсутствии зародышей родственной кристаллической фазы.

**Фактор уменьшения температуры**, с чем связано уменьшение растворимости, является ведущим при кристаллизации магматических пород, гидротермальных жил, соляных отложений, т.к. растворимость в

# Индивиды. Рост кристаллов. Зарождение

## Движущая сила кристаллизации

большинстве случаев прямо связана с температурой. В минералогии и петрологии в течение длительного времени существовала надежда найти такой параметр у кристаллов минералов, значение которого определяли бы порядок выделения минералов при магматических и гидротермальных процессах (эки и вэки минералов А.Е. Ферсмана, изотермо - изобарические потенциалы минералов Ф.А. Летникова). Такого параметра не может быть, так как порядок кристаллизации определяется диаграммами состояния и составом конкретных растворов, а не индивидуальными характеристиками минералов.

**Обычной причиной** возникновения разности химических потенциалов (пересыщения) в некотором участке системы является перепад температур во всей системе в целом. Перепады температур в земной коре совершенно обычны. При наличии существенно неоднородного температурного поля, например, вблизи интрузивов в относительно закрытых полостях в участках с повышенной температурой происходит растворение вещества, его перенос и последующее отложение в более холодной зоне. В результате полость в кристаллическом материале или включение в минерале перемещается в направлении повышения температуры.



# Индивиды. Рост кристаллов. Зарождение

## Движущая сила кристаллизации

**Изменение давления**, с чем связано изменение растворимости, может приводить к кристаллизации, но этот фактор сопряжен с температурой. Снижение давления приводит и к адиабатическому снижению температуры. При любых сбросах давления и снижения температуры в данной порции раствора его объём обычно не переходит целиком в твёрдое состояние. Снижение давления, часто резкое, приводит лишь к выпадению массы мелких кристаллов минералов во время выброса на поверхность струй пара и раствора гейзерами, сольфатарами и фумаролами.

**Испарение летучего растворителя** - явление, широко распространённое в природе. Так идёт кристаллизация различных солей в приповерхностных условиях. Отложение галоидов, сульфатов, карбонатов и иных соединений интенсивно происходит в жаркие летние месяцы в озерах, лагунах... с повышенной солёностью. Как и при изменении температуры, отложение различных солей происходит в последовательности, определяемой физико-химической диаграммой данной водно-солевой системы.

**Кристаллизация** при химических реакциях в природе идёт очень часто между хорошо растворимыми и/или трудно растворимыми соединениями с

# Индивиды. Рост кристаллов. Зарождение

## Движущая сила кристаллизации

образованием ещё более трудно растворимых:  $\text{CaCO}_3$  (кальцит) +  $(\text{CuSO}_4)$  р-р +  $4 \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$  (гипс) +  $\text{Cu}_3(\text{CO}_3)(\text{OH})_4$  (малахит) +  $\text{CO}_2$ .

Процессы взаимодействия растворов с твёрдыми веществами - это большая группа метасоматических процессов.

**Кристаллизация при смешении растворов** с различными главными растворителями, например, водно-солевых и нефтяных. Это сопровождается изменением pH и растворимости ряда веществ, приводит к пересыщению...

**Одностороннее стрессовое давление** специфически действует на кристаллы, ориентированные различным способом по отношению к направлению сжатия. Различная растворимость зёрен в разных направлениях связана с их различной деформированностью. В результате идёт перекристаллизация с образованием ~ одинаково ориентированных зёрен минералов, при участии плёночных растворов - перенос растворённого в одном месте вещества и его отложение в другом с образованием гнейсовидных агрегатов.

**Полиморфные структурные изменения** минералов (изохимические) под действием температуры и давления довольно обычны. Образуются параморфозы. Иногда изменения температуры и давления ведут к не

# Индивиды. Рост кристаллов. Зарождение

## Движущая сила кристаллизации

изохимическим превращениям в минералах – их диссоциации, дегидратации, распаду твёрдых растворов и ряду иных процессов.

**При участии ЭДС** происходят окислительно-восстановительные реакции, например, между сульфидами в корках выветривания. Видимо, серьёзную, но пока не ясную роль в минералообразовании, накоплении вещества в определённых участках играют земные электрические токи, иногда мощные. В эндогенных условиях под действием электрического (электродного) потенциала происходит осаждение золота из гидротерм на одном из сульфидов, контактирующих с другими (гальванопары: пирит - халькопирит, пирит - галенит...).

Реальные процессы, приводящие к образованию кристаллов, обычно связаны не с каким-либо одним механизмом возникновения движущей силы кристаллизации. Например, при фумарольном выбросе кристаллизация идет за счёт: сброса давления, благодаря испарению растворителя, благодаря изменению состава растворителя при растворении воздуха, с участием химических реакций раствора с веществами, выщелоченными из стенок подводящих каналов, иных механизмов.

Отметим, что наличие движущей силы кристаллизации само по

# Индивиды. Рост кристаллов. Зарождение Движущая сила кристаллизации

себе не обеспечивает начала кристаллизации. Физико-химическая система может неопределенно долго находиться в метастабильном замороженном состоянии, если в ней отсутствуют зародыши стабильной фазы.

**Пофилософствуем.** Отношение к проблеме движущих сил (причин) возникновения объектов науки, довольно чётко характеризует тот уровень развития, на котором находится данная отрасль знания. Научившись определять и классифицировать, легко ответить на вопрос - что? Труднее находить упорядоченность в пространстве и во времени и отвечать на вопрос - как? Самое трудное - уметь разобраться во внутренних, скрытых силах, источниках всего видимого и отвечать на вопрос - почему? В работе геолога обычно 90% времени занимают два первых вида научной деятельности, выяснению причин исследуемых процессов посвящена лишь малая доля работ. Для выявления способов возникновения в природе движущих сил кристаллизации рецептов нет. Если процесс не идёт в настоящее время и движущие силы не очевидны, выяснение этого вопроса нередко происходит на поздних стадиях исследования объекта или после осмысления изученного материала.



# Индивиды. Рост кристаллов. Зарождение

При решении данного вопроса, как и во многих иных случаях, можно применить метод "множественных рабочих гипотез", предложенный в начале XX века известным американским геологом Чемберленом. Формулируется максимально возможное число гипотез о способах прохождения процесса. Каждая из гипотез обсуждается, выявляются все возможные следствия из каждой гипотезы, перечисляются условия, необходимые для прохождения данного гипотетического процесса. Эти следствия сопоставляются с фактическим материалом. При этом нередко возникает потребность в проведении дополнительных целенаправленных исследований (минералов, слагаемых ими тел и их окружения). Если хотя бы одно из следствий некоей гипотезы противоречит фактическому материалу, данная гипотеза отвергается или видоизменяется. В пределе число гипотез сокращается до одной, которая принимается, но не потому, что она доказана, а потому, что пока нет оснований для ее опровержения. Если остались не отвергнутыми две или более гипотезы, то изыскиваются новые следствия из них, которые позволят их проверить. В конце концов, могут быть отвергнуты все предложенные гипотезы, тогда необходим поиск новых. Главный выигрыш от такой тактики исследований в том, что она ориентирует на получение сведений для решения конкретных вопросов, активизирует поиск причинно-следственных связей: от главенства мнений к главенству знаний

# Индивиды. Рост кристаллов. Зарождение

## Зарождение кристаллов минералов

Термин "зарождение" в минералогической литературе имеет два смысла. Первый - это процесс. Второй - это результат, т.е. совокупность кристаллов, зародившихся примерно одновременно.

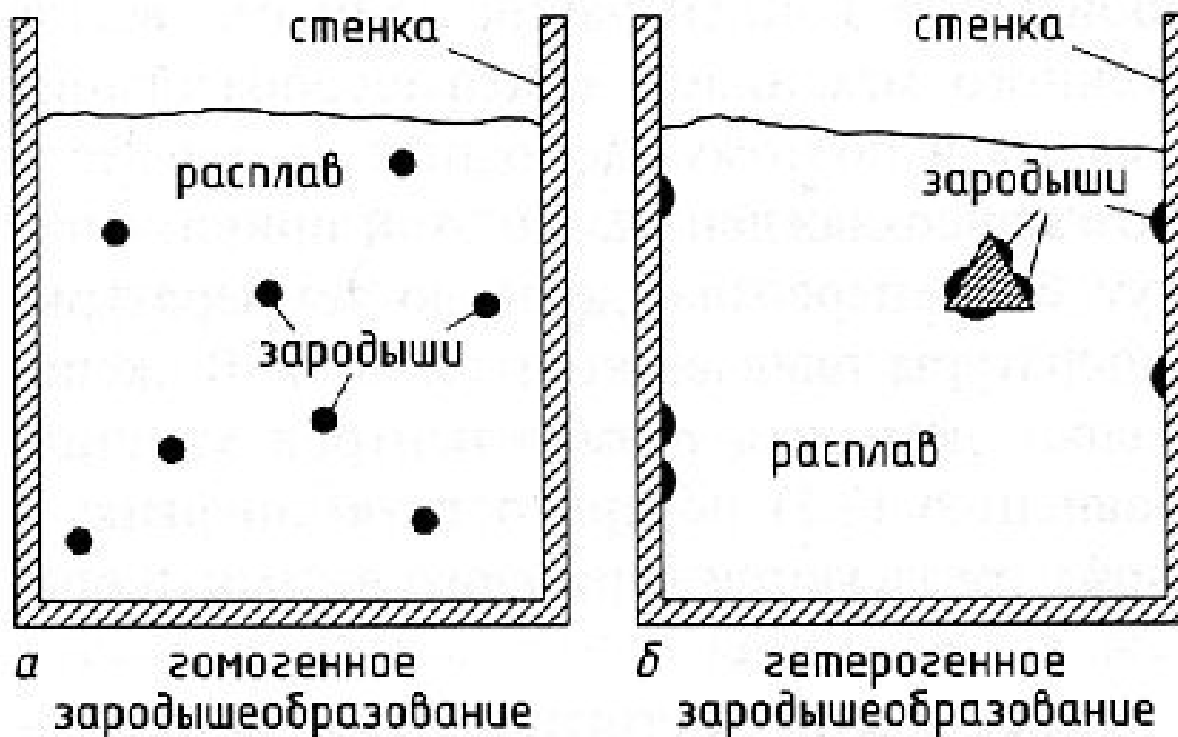


Рис. 8.8. Схема а) гомогенного и б) гетерогенного зародышеобразования в расплаве

# Индивиды. Рост кристаллов. Зарождение

## Особенности процессов зарождения

Тщательно очищенный и не слишком пересыщенный газовый или жидкий раствор может храниться неопределённо долго и не порождает центров кристаллизации. Если же в этой системе находится зародыш достаточного размера, он будет увеличиваться - расти. Размер кристалла - на грани между ещё не способного к росту и уже способным, - называется критическим. Сам такой кристаллик - **критический зародыш ("hidden phase")**.

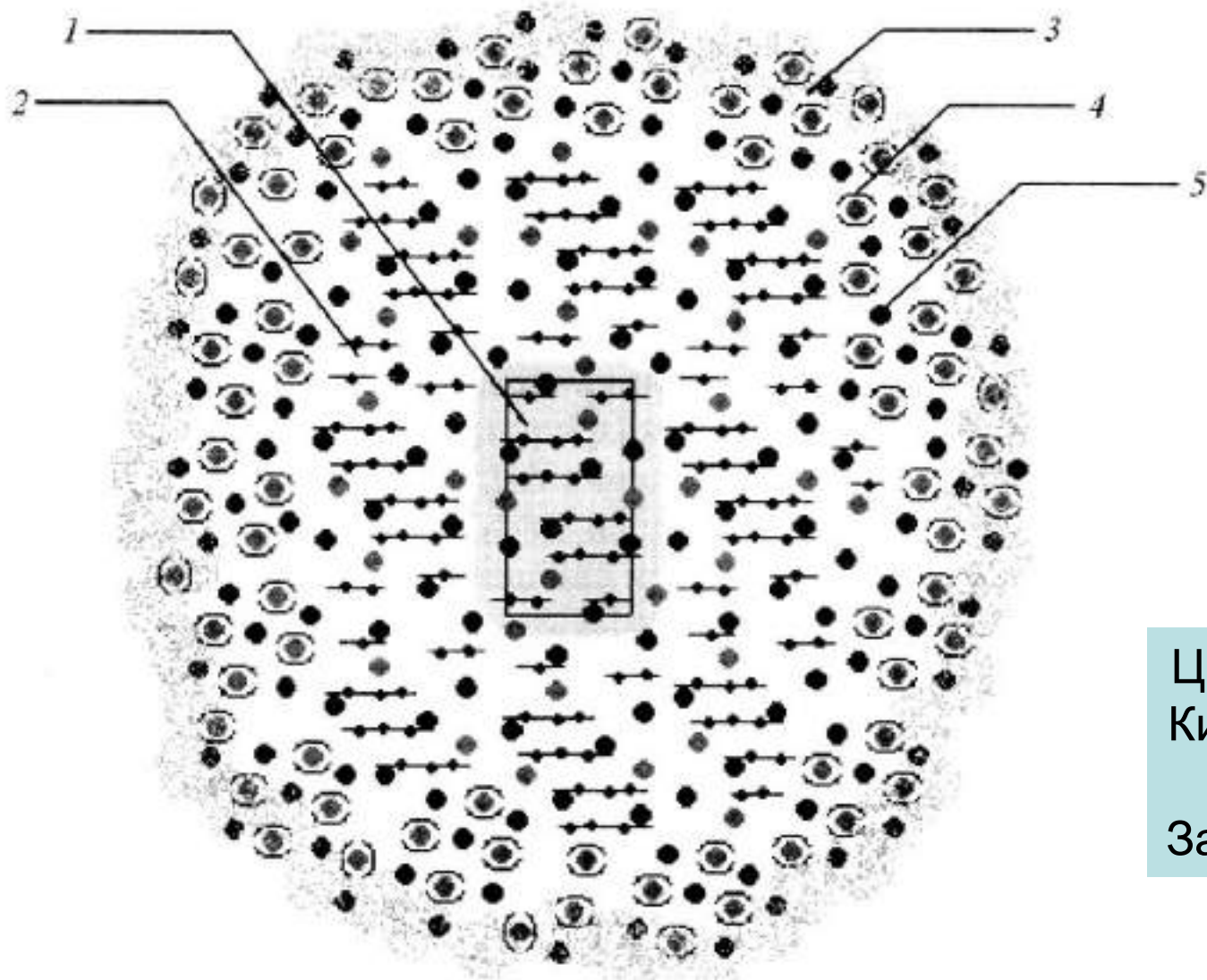
## Флуктуационное образование кристаллических зародышей

Структура кристаллов имеет полный дальний порядок атомов, молекул, ионов. Структура жидкостей (растворов) – динамический хаос ближнего порядка. Многие учёные предполагают, что перед началом собственно кристаллизации – возникновения критического зародыша и его разрастания, возникают дозародыши – жидкокристаллические образования с дальним двумерным порядком и хаосом в третьем измерении (Цветков, Кидяров, 2007). Они возникают после достижения некоторого первого критического размера и преодоления первого подбарьера работы образования критического зародыша. Преодоление второго подбарьера нуклеации происходит по достижении подзародышем второго критического размера и заключается в превращении жидкокристаллического зародыша в устойчивый кристаллический зародыш

# Индивиды. Рост кристаллов. Зарождение

За последние годы экспериментально выяснено, что во всех случаях – в газовой или жидкой фазе, или на поверхности твёрдого тела первоначально образуются первичные зародышевые кластеры всего из нескольких микрочастиц (атомов...) - плотный сгусток микрочастиц, который имеет минимальную совокупную потенциальную энергию ансамбля микрочастиц. В дальнейшем происходит как рост зародышевых кластеров до размера в сотни микрочастиц, так и распад зародышевых кластеров при их столкновениях с микрочастицами, кинетическая энергия которых превышает энергии связи микрочастиц в кластере. Далее может произойти укрупнение кластеров до многих сотен микрочастиц с образованием многослойных структур.

# Индивиды. Рост кристаллов. Зарождение



Цветков,  
Кидяров,  
2007.  
Зап. ВМО

Рис. 2. 2-D схема устройства кластера-дозародыша кристаллической фазы.

1 — кристаллическое ядро; 2 — полуупорядоченная внутренняя смектическая оболочка; 3 — внешняя фрактальная жидкокристаллическая оболочка; 4 — ассоциативные катион-анионные комплексы (АК); 5 — «свободные» структуроформирующие катионы (СКК).



# Индивиды. Рост кристаллов. Зарождение

## Образование кристаллических зародышей

На этой стадии кластеры, как правило, имеют структуру икосаэдра с мягкой связью микрочастиц. Икосаэдр – кластеры из атомов типа благородных газов с пространственной структурой, имеющей ось симметрии пятого порядка. Наконец, большие, многослойные кластеры – икосаэдры могут перестроиться в кластеры с кристаллической структурой с упорядоченным расположением микрочастиц, - возникают зародыши кристаллического вещества. Кончается стадия образования кристаллических зародышей и начинается стадия роста кристалла.

Конкретный пример - экспериментальное исследование процесса кристаллизации аргона. Установлено, что кластеры с числом атомов аргона менее 800 имеют многослойную структуру икосаэдра; кластеры с числом атомов аргона более 800 имеют гранецентрированную кубическую структуру с параметрами, как у монокристалла аргона.

Размер критического зародыша зависит от пересыщения (снижается с ростом пересыщения) и от температуры (увеличивается с её ростом).

# Индивиды. Рост кристаллов. Зарождение

Отсутствие зарождения в пересыщенной среде происходит и по причине существования потенциального барьера, который нужно преодолеть, чтобы процесс роста макрокристалла начался. Величина барьера = энергия активации зародыша обусловлена необходимостью возникновения границы раздела в первично гомогенной среде. Эта граница (поверхность) раздела всегда обладает некоторой энергией, избыточной сверх объёмной и именуемой поверхностной.

После образования критического зародыша дальнейшее присоединение к нему атомов, ионов, молекул происходит уже при снижении энергии системы. Возникший кристаллический зародыш получает возможность самопроизвольно расти из метастабильного раствора.

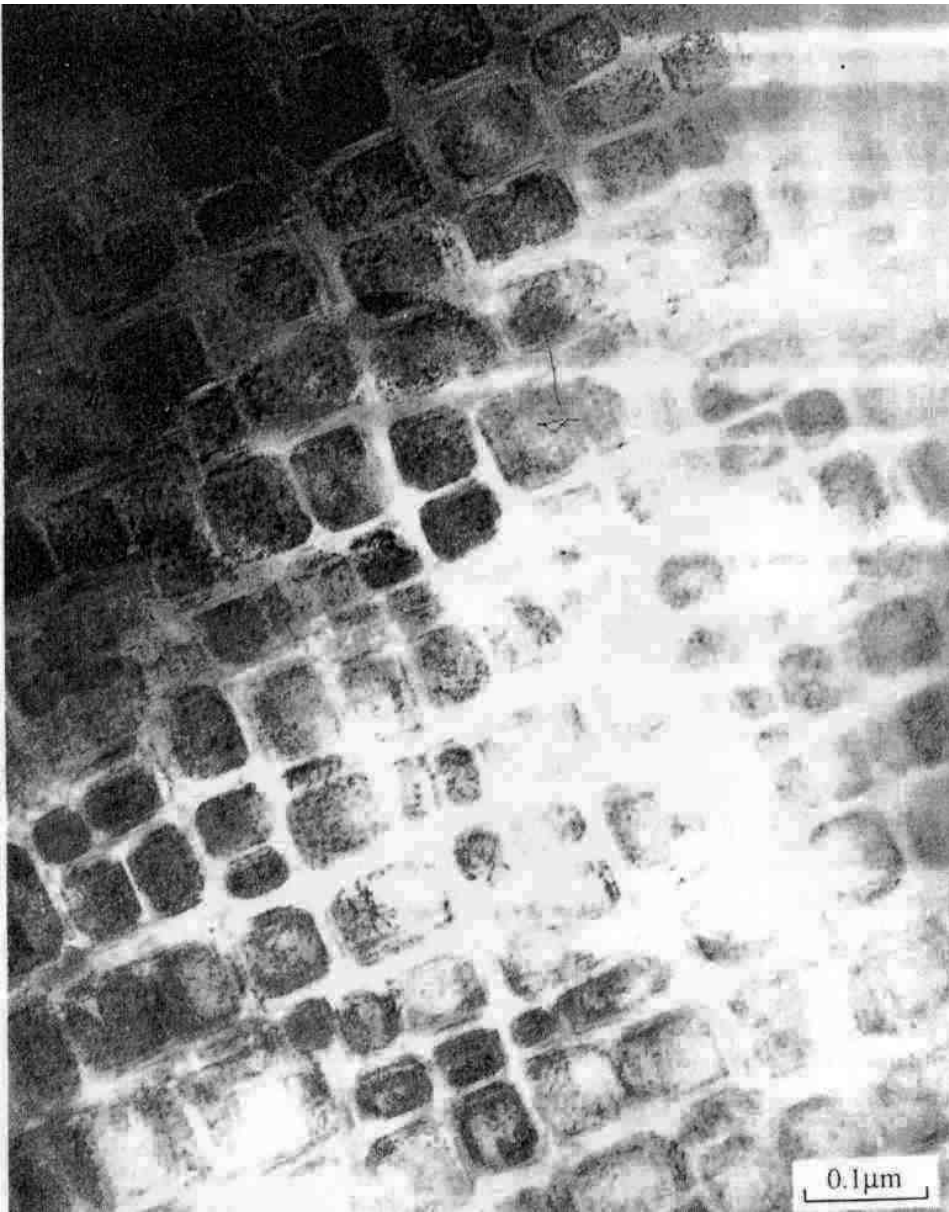
Поверхностная энергия границ, разделяющая две фазы, например, граней кварца с водой и раствором  $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2$  различны, как различны поверхностные энергии граней призмы и ромбоэдра кварца в любой гомогенной жидкости.

Близки к этому представления о смачиваемости и несмачиваемости поверхностей.

Поверхностная энергия понижается тем интенсивнее, чем больше энергия взаимодействия частиц различных фаз.

# Индивиды. Рост кристаллов. Зарождение

## Гомогенное зарождение



До сих пор обсуждался специфический и мало распространенный в природе процесс гомогенного зародышеобразования, т.е. в гомогенной без поверхностей раздела среде.

Пожалуй, один из ярких примеров гомогенного зарождения – распад титаномагнетита на ульвошпинель + магнетит.

# Индивиды. Рост кристаллов. Зарождение

## Гетерогенное зарождение

Гораздо шире проявлено появление новых центров кристаллизации на готовых затравках - пылинках или кристаллах собственного вещества и на чужеродных поверхностях, т.е. гетерогенное зарождение. Гетерогенное зарождение настолько распространено, что утверждение о существовании гомогенного зарождения всегда требует специальных доказательств. Для гомогенного зарождения максимальное значение пересыщения экспериментально воспроизводится хорошо, для гетерогенного - эти значения всегда меньше первого и сильно варьируют от условий, плохо воспроизводимы.

Некоторые эмпирические закономерности: 1. 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 не скомпенсированные заряды. Соответственно, нарастание вещества на собственные или родственные кристаллы наиболее интенсивно идёт на его вершину, далее на ребра, наименее интенсивно на грани кристалла; 2. кристаллизация вещества идет при меньших пересыщениях на частицах, структура которых ближе к этому веществу; 3. перегрев жидкости перед переохлаждением расширяет метастабильную

# Индивиды. Рост кристаллов. Зарождение

## Гетерогенное зарождение

область. Жидкости, особенно хорошо структурированные (водные, высоко кремнезёмистые...) обладают выраженной "памятью" на воздействия: магнитные, тепловые... Перегрев ведет к разрушению структуры раствора (расплава); 4. при росте кристаллов зародыши возникают при самопроизвольном растрескивании кристаллов. Для зарождения новых кристаллов бывает достаточно лёгкого прикосновения к поверхности растущего индивида.

### Зарождение на чужой подложке



Кристаллы галита, выросшие на ветку.  
Озеро Саки, Крым



Кубы галита до 20 мм на кристаллах  
гипса. Иновроцлав, Польша



# Индивиды. Рост кристаллов. Зарождение

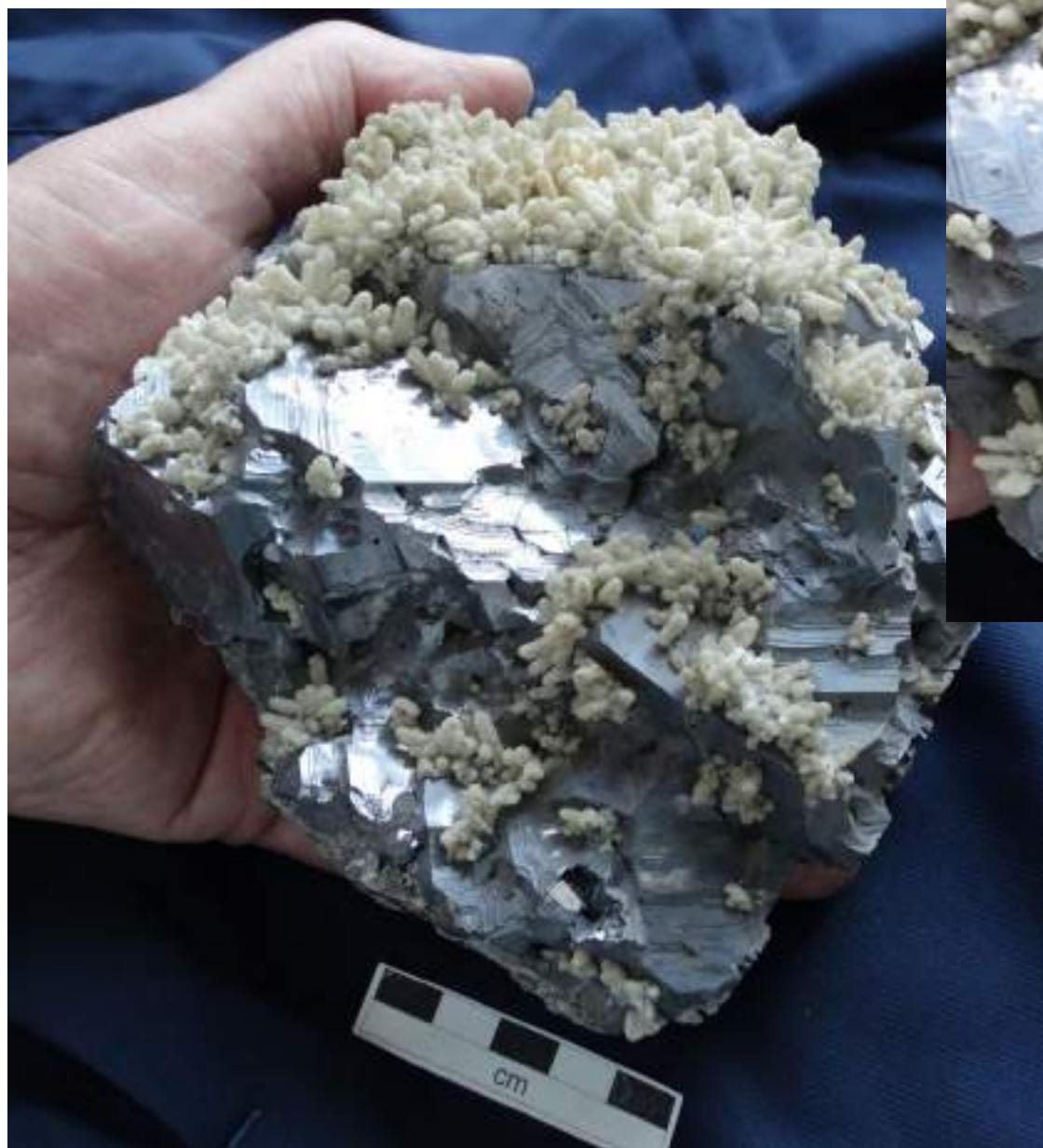
## Гетерогенное зарождение на чужой подложке



Плоский кристалл льда, выросший из водяного пара на травинках

# Индивиды. Рост кристаллов. Зарождение

Гетерогенное зарождение на чужой подложке



Кристаллы кварца, выросшие на поверхности галенита. Мадан, Родопы, Болгария. Колл. музея «Земля и люди», София. Фото Э.М. Спиридонова и Н.Н. Жукова



# Индивиды. Рост кристаллов. Зарождение

Гетерогенное зарождение на чужой подложке



Гипс на корке сферолитов  
хризоколлы. 30 мм.  
Copper Mountain

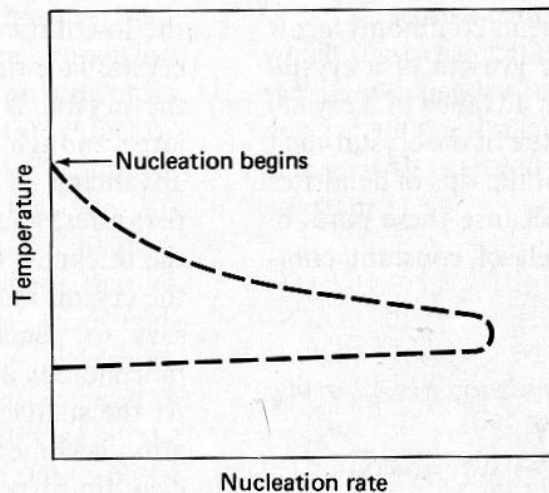
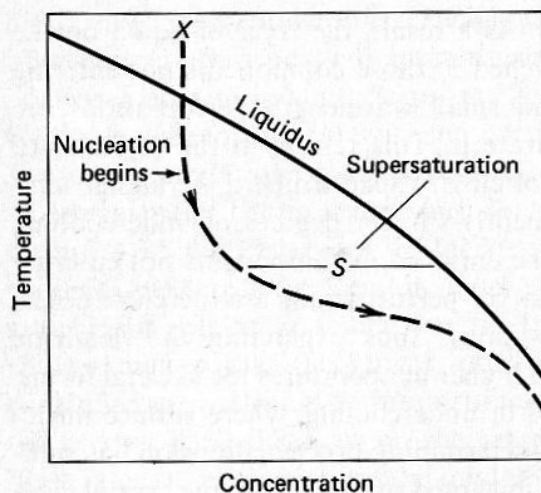
Гипс на корке халькантита на гётите. Tyrone mine, New Mexico, США

# Индивиды. Рост кристаллов. Зарождение

## Процессы зарождения кристаллов минералов

### 1. Самопроизвольное зарождение из пересыщенных сред - жидкой, газовой, твёрдой.

**1А. При кристаллизации расплавов.** Ход кристаллизации контролируют степень пересыщения и степень переохлаждения, что обуславливает число зародышей = число центров кристаллизации (в единице объёма за единицу времени) и скорость роста кристаллов. От степени пересыщения зависит и форма зародышей и кристаллов - из слабо пересыщенных сред вырастают правильные квазиизометричные кристаллы, из сильно пересыщенных часто вырастают расщеплённые кристаллы, метельчатые, сферокристаллы. Аналогичной формы кристаллы растут и в твёрдых средах - переохлажденных расплавах - вулканических стёклах.



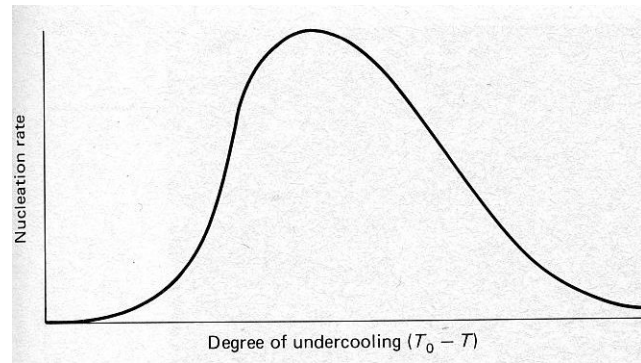
**FIGURE 12-9** Temperature-composition diagram showing the path followed by a magma of initial composition X that cools below the liquidus of a mineral and becomes progressively more supersaturated (s) until nucleation occurs. Also shown is the rate of nucleation as a function of undercooling.

# Индивиды. Рост кристаллов. Зарождение

## 1А. При кристаллизации расплавов

Кристаллизация начинается несколько ниже ликвидуса. При снижении температуры вначале число центров кристаллизации, как и скорость роста кристаллов, увеличиваются по экспоненте, т.к. возрастают и степень пересыщения, и степень переохлаждения.

Наращение числа центров кристаллизации и скорости роста кристаллов идёт, пока эту тенденцию не преодолает снижение скорости диффузии из-за снижения температуры. Далее тренд обратный.



Экспериментальные скорости роста из расплавов

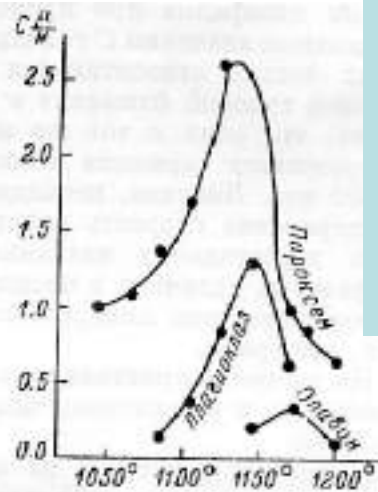
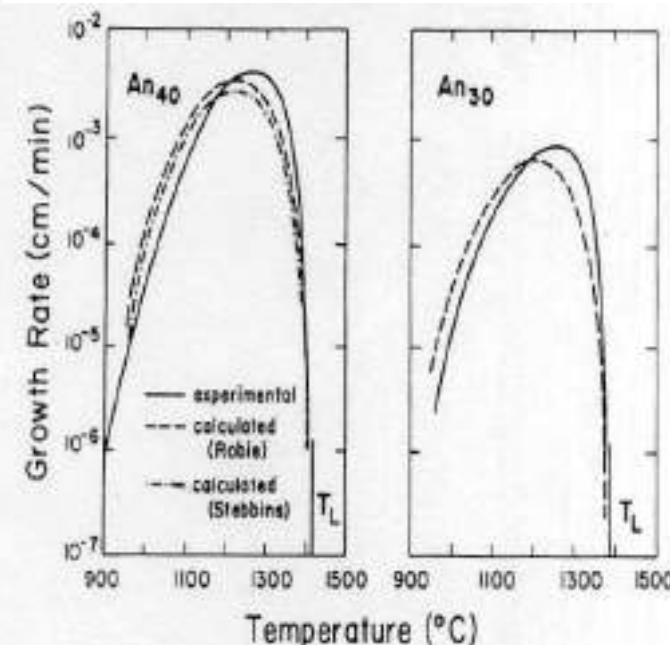
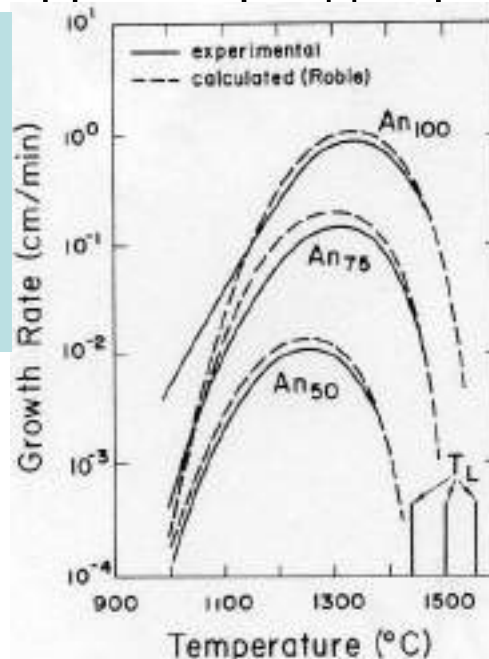


Рис. 9. Температурная зависимость линейной скорости кристаллизации нефелина, анортита и оливины в расплаве базальта. Камчатка.



# Индивиды. Рост кристаллов. Зарождение

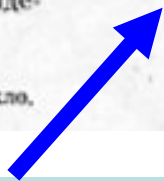
## 1А. При кристаллизации расплавов

Форма кристаллов оливина, полученных при кристаллизации расплава базальтового состава при различных условиях

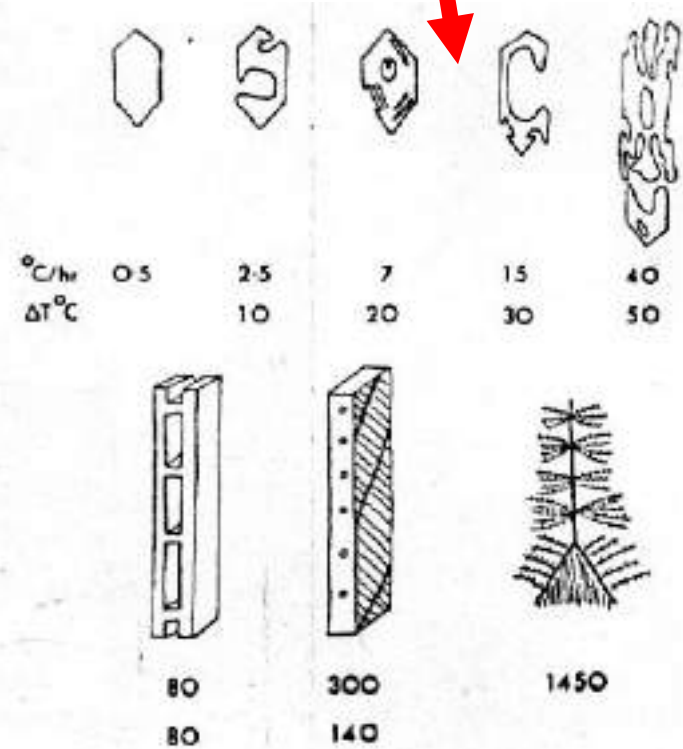
Изменение формы и состава оливина в зависимости от температуры закалки расплава оливинового габбро-норита

Температура, °C	Фазовый состав агрегата	Состав оливина		Форма выделения оливина
		2V	Содержание Fe <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub> , %	
1250	Ст	—	—	
1225	Ол+Ст	+87	8	Сильные изометричные кристаллы
1200	Ол+Ст	±90	12	
1170	Ол+Мп+Ст	—	—	Слабо удлинённые кристаллы, иногда с небольшими полостями
1150	Ол+Мп+Ст	-88	19	Толстостенные короткопризматические футлярообразные кристаллы
1130	Ол+Мп+Ст	—	—	
1100	Ол+Мп+Ст	-84	31	Тонкостенные, часто незамкнутые футлярообразные кристаллы длиннопризматического облика
1050	Ол+Мп+Ст	-79	40	Лейстовидные выделения

Сокращения: Ол — оливин, Мп — монаклинный пироксен, Ст — стекло.



Зависимость от скорости остывания, °C / час



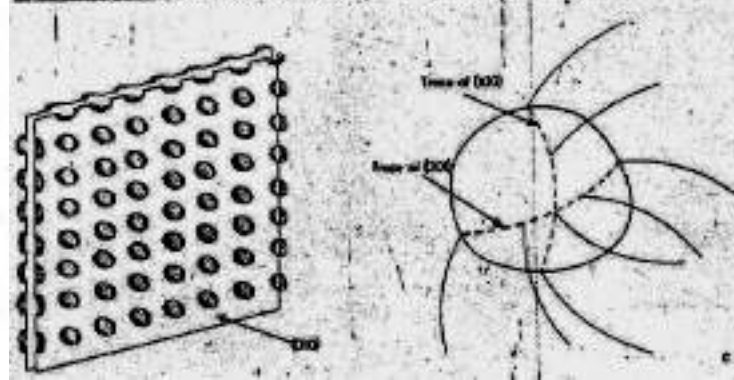
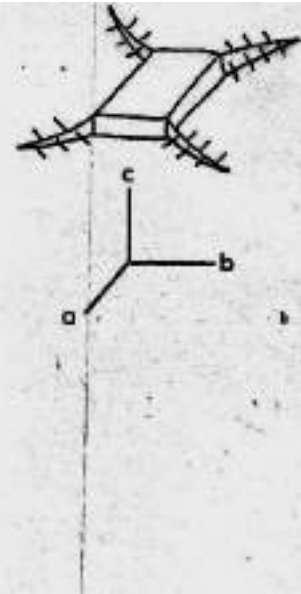
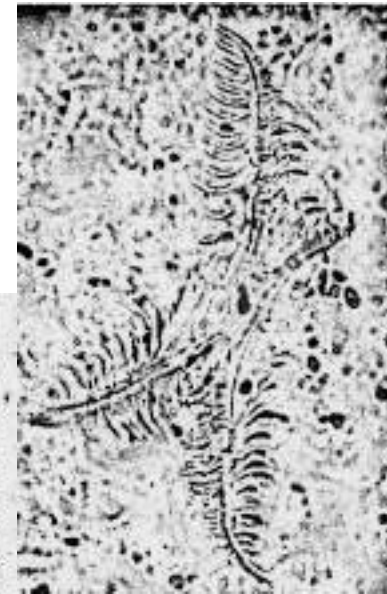
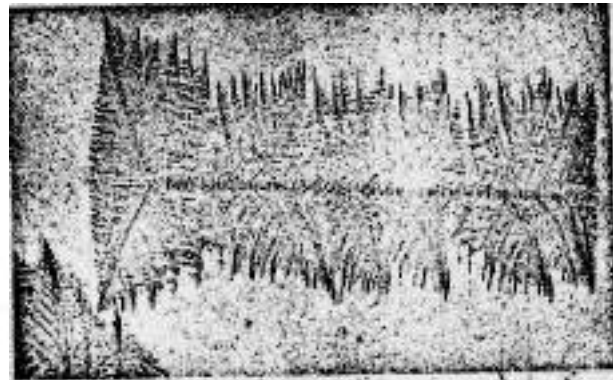
Зависимость от температуры закалки

# Индивиды. Рост кристаллов. Зарождение

## 1А. При кристаллизации расплавов

Форма кристаллов оливина, полученных при кристаллизации расплава базальтов при различных условиях

При  
очень  
быстром  
остывании



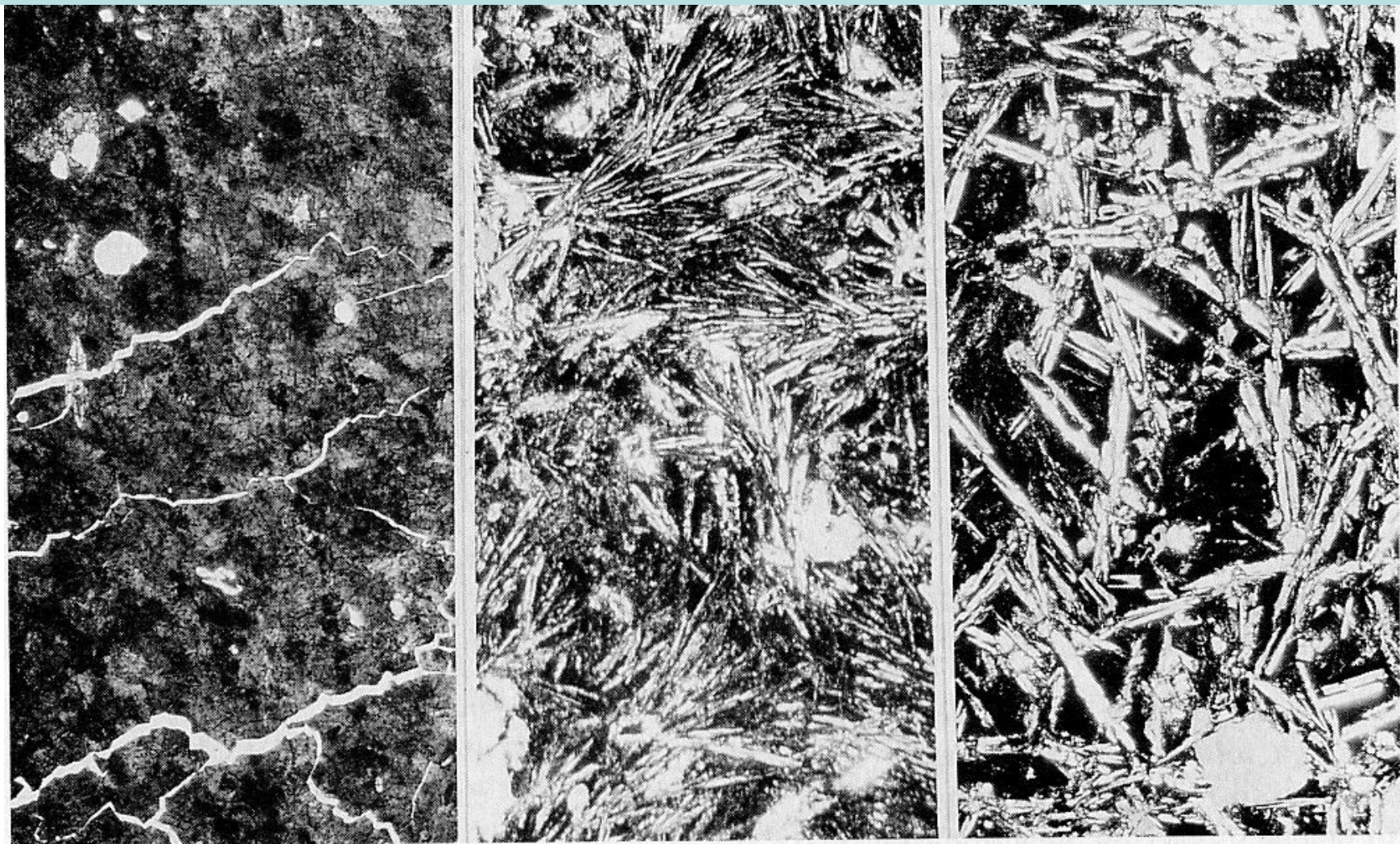
При крайне  
быстром  
остывании



# Индивиды. Рост кристаллов. Зарождение

## 1А. При кристаллизации расплавов

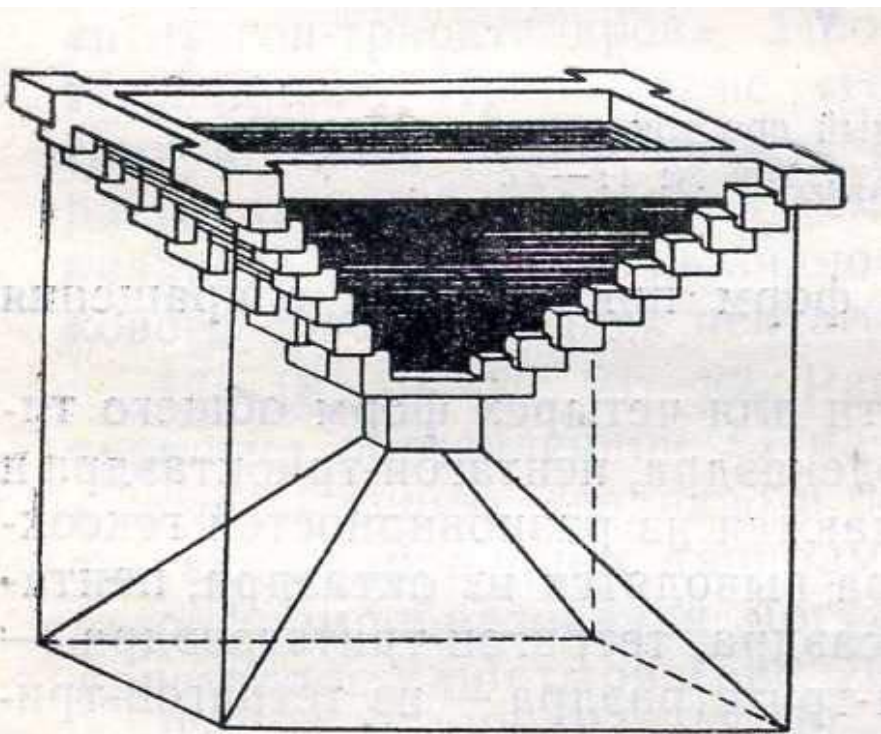
Размеры и форма кристаллов плагиоклаза в шаровых лавах базальтов Срединно-Атлантического хребта. Слева – стекловатая корка, справа – базальты в центре шара. Шлифы при 1 николе. Ширина поля 1 мм





# Индивиды. Рост кристаллов. Зарождение

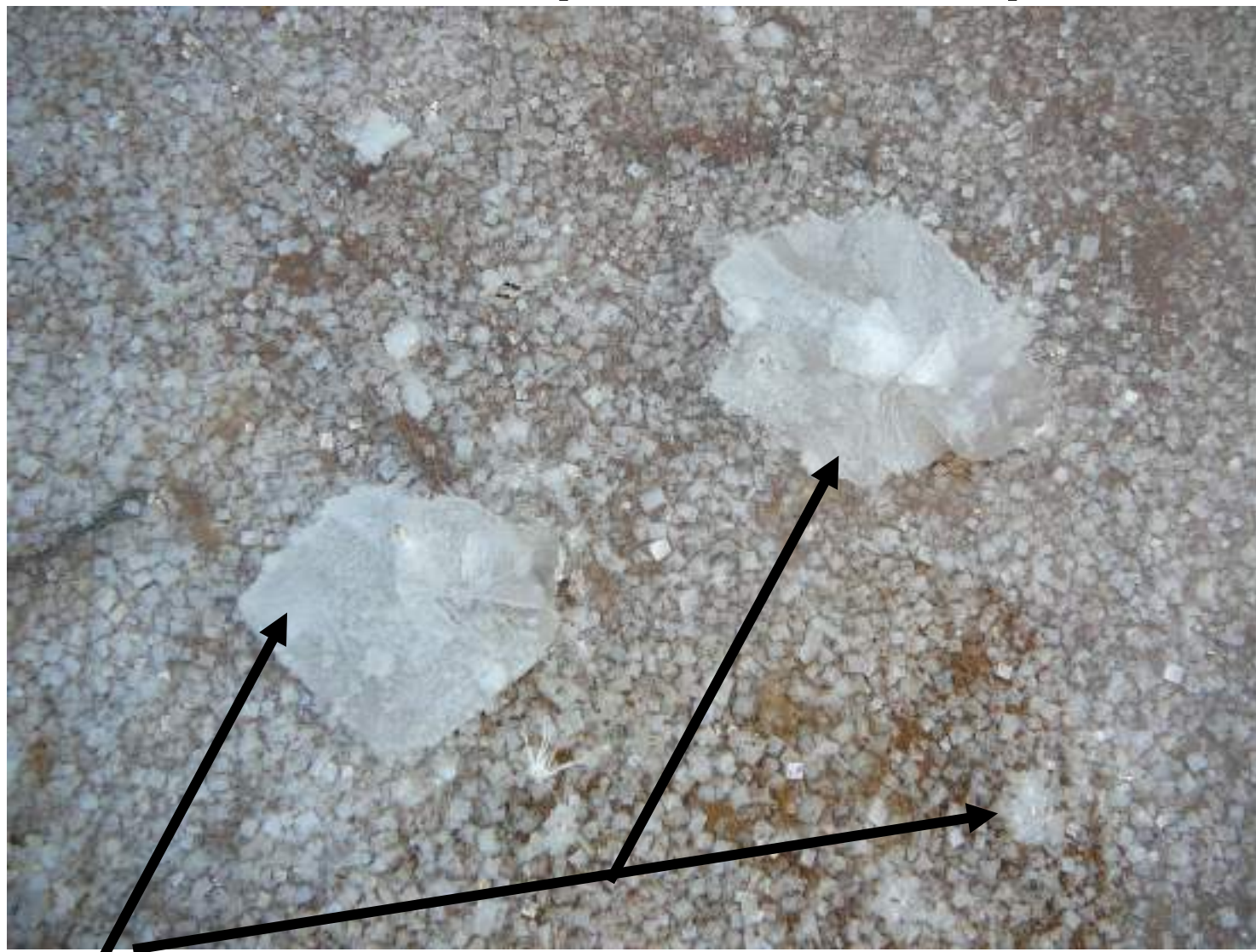
**1Б.** На границе раздела фаз, обычно газ - жидкость. Необходимое пересыщение достигается за счёт испарения растворителя. Так обычно идёт кристаллизация галита. Кристаллы галита плавают на поверхности и интенсивно растут. Плавающие агрегаты кубиков галита достигают в поперечнике 40 см. Примерно аналогично возникают тонкие плёнки, а также зародыши сталактитов и сталагмитов гипса и кальцита в пещерах: вытекающий из трещин раствор при испарении становится пересыщенным; для кальцита играет роль и потеря из раствора  $\text{CO}_2$ .



Строение лодочек галита, плавающих на поверхности рассола.

Затем они могут опуститься на дно

# Индивиды. Рост кристаллов. Зарождение



Лодочки галита, плавающие на поверхности рассола. На дне – приросшие кристаллы галита. Около отвалов Березняковского месторождения. Пермский край, Западный Урал. Фото И.И. Чайковского



# Индивиды. Рост кристаллов. Зарождение



Лодочки галита, плавающие на поверхности рассола. На дне – приросшие кристаллы галита. Около отвалов Березняковского месторождения. Пермский край, Западный Урал. Фото И.И. Чайковского

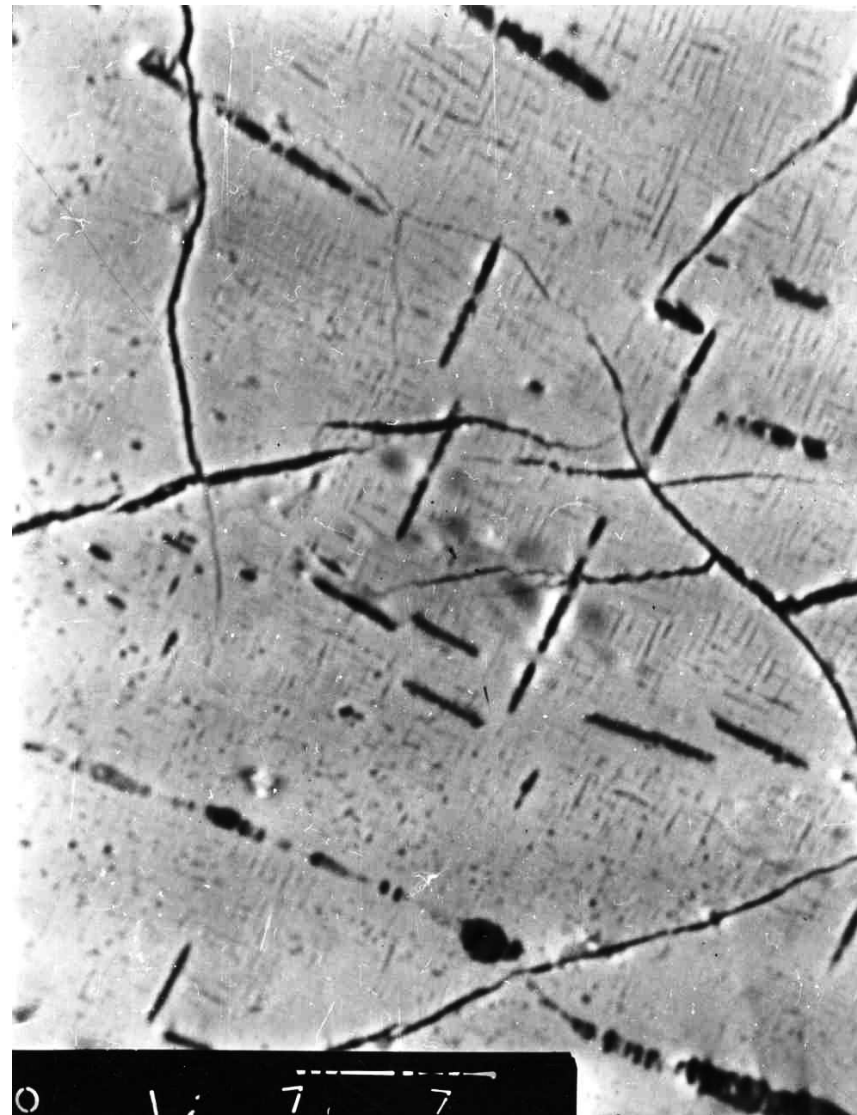
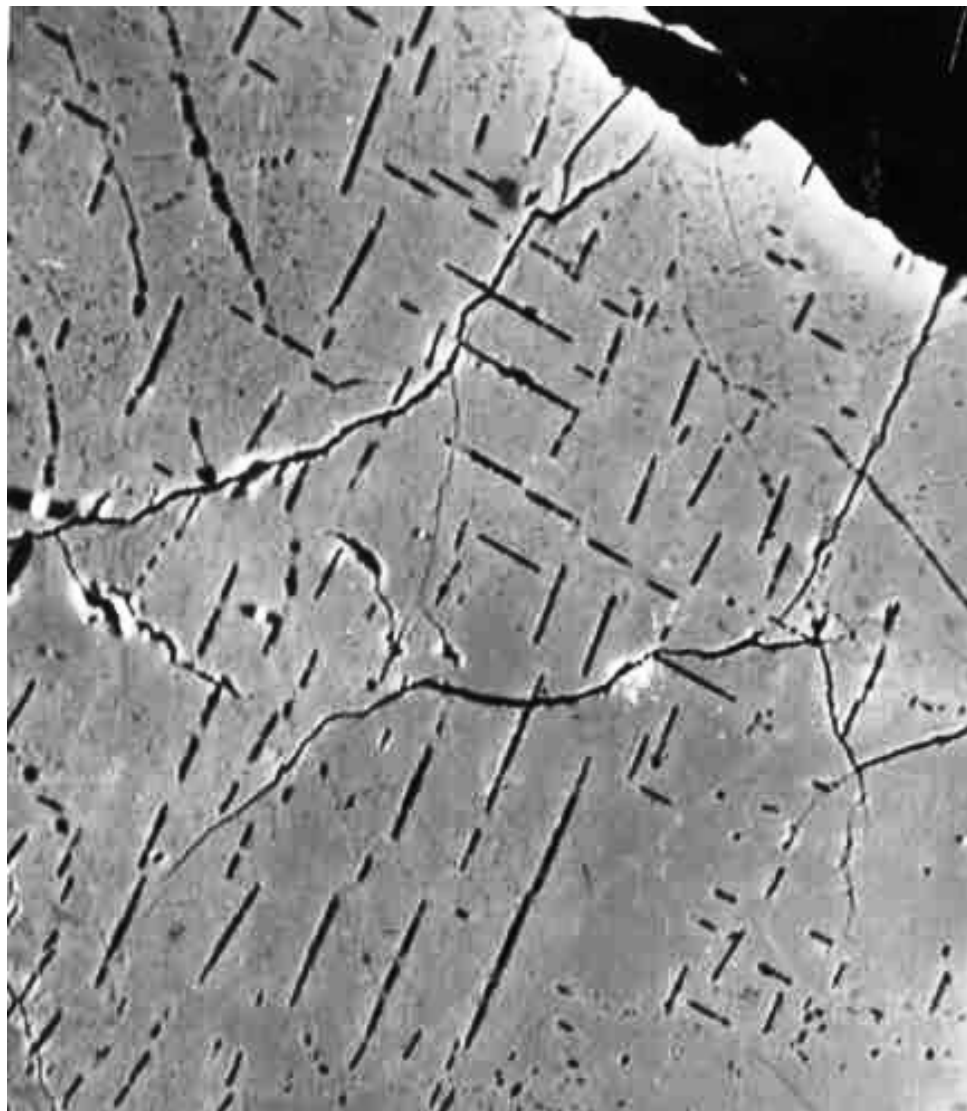
# Индивиды. Рост кристаллов. Зарождение

**1В.** Более специфические случаи - самопроизвольное зарождение в твёрдых фазах = высокотемпературных твёрдых растворах. При их охлаждении возникает явление пересыщения и при благоприятных условиях происходит самопроизвольное зарождение новых фаз - продуктов распада твёрдого раствора. Зарождению новых фаз - ламеллей распада весьма способствует деформация твёрдых тел, хотя бы слабая. Причины: 1) дополнительный импульс энергии, который помогает микрочастицам преодолеть энергетический барьер и превратиться в зародыши; 2) появление ослабленных направлений в твёрдой фазе - отдельности, спайности, вдоль которых легче расти зародышам кристаллов. Рассмотрим высокотемпературные твёрдые растворы титаномагнетита  $\text{FeFe}_2\text{O}_4$  -  $\text{Fe}_2\text{TiO}_4$  -  $\text{MgAl}_2\text{O}_4$  - характерные рудные и акцессорные минералы оливиновых габброидов, габбро-перидотитов, карбонатитов, камафоритов. Плутон Отайды - Карасу в Сев. Казахстане - в матрице магнетита тонкие ламелли ульвошпинели и пластины - ламелли шпинели; более крупномасштабные фото показывают, что пластины - скопления мельчайших полных октаэдров шпинели (относительно глубинные условия - переохлаждение, пересыщение умеренное).

# Индивиды. Рост кристаллов. Зарождение

1В. Более специфические случаи - самопроизвольное зарождение в твёрдых фазах = высокотемпературных твёрдых растворах.

Титаномагнетит косьвитов. Отайды-Карасу, Северный Казахстан

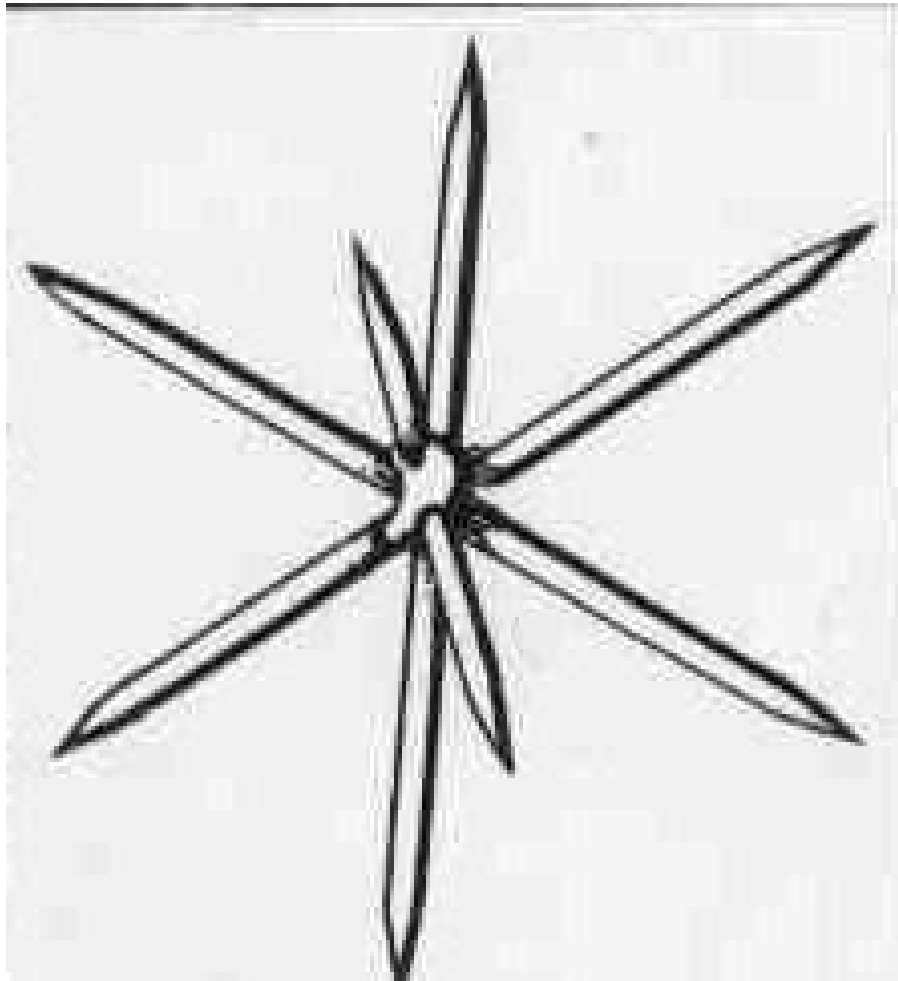




# Индивиды. Рост кристаллов. Зарождение

1В. Более специфические случаи - самопроизвольное зарождение в твёрдых фазах = высокотемпературных твёрдых растворах.

Камафориты и карбонатиты Ковдора - аналогичные образования содержат скелетные выделения шпинели (данные О.М. Римской-Корсаковой) (относительно малоглубинные условия - пересыщение значительное).



Скелетные кристаллы  
шпинели.

Форма структур распада  
высокоТ твёрдого раствора  
титанистого магнетита  
в камафоритах  
Ковдорского плутона,  
Кольский полуостров

# Индивиды. Рост кристаллов. Зарождение

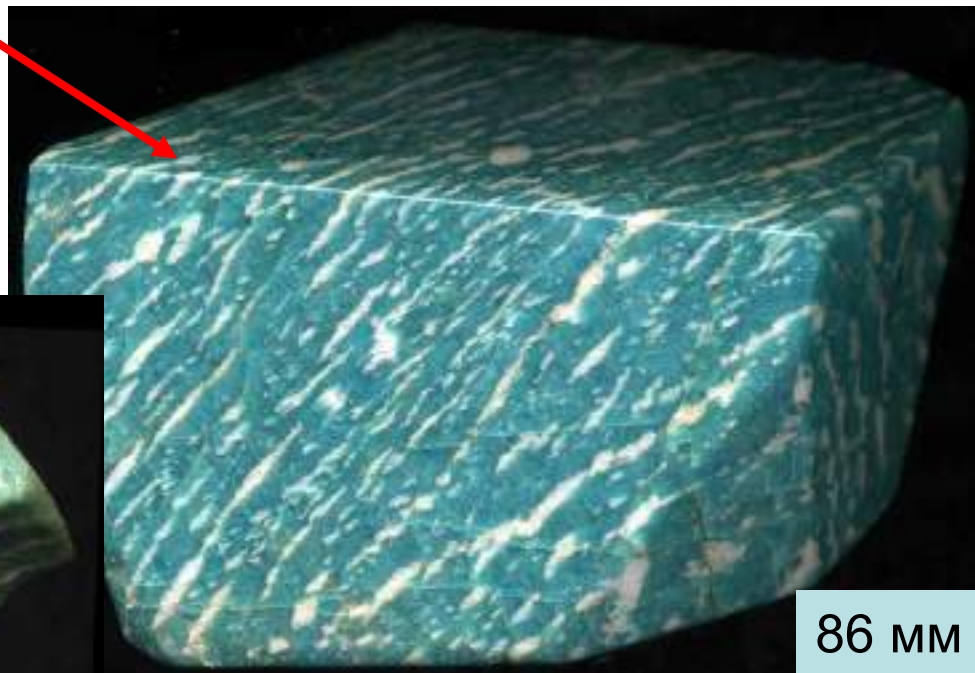
1В. Более специфические случаи - самопроизвольное зарождение в твёрдых фазах = высокотемпературных твёрдых растворах.

Сравним структуры распада – величину пластин альбита в амазонитовом К-На полево шпате гранитных пегматитов Ильмен и Кольского полуострова: Ильменские формировались на глубинах 3-5 км, Кольские на глубине более 10 км.

Амазонитовый микроклин-пертит пегматитов Ильменских гор



67 мм



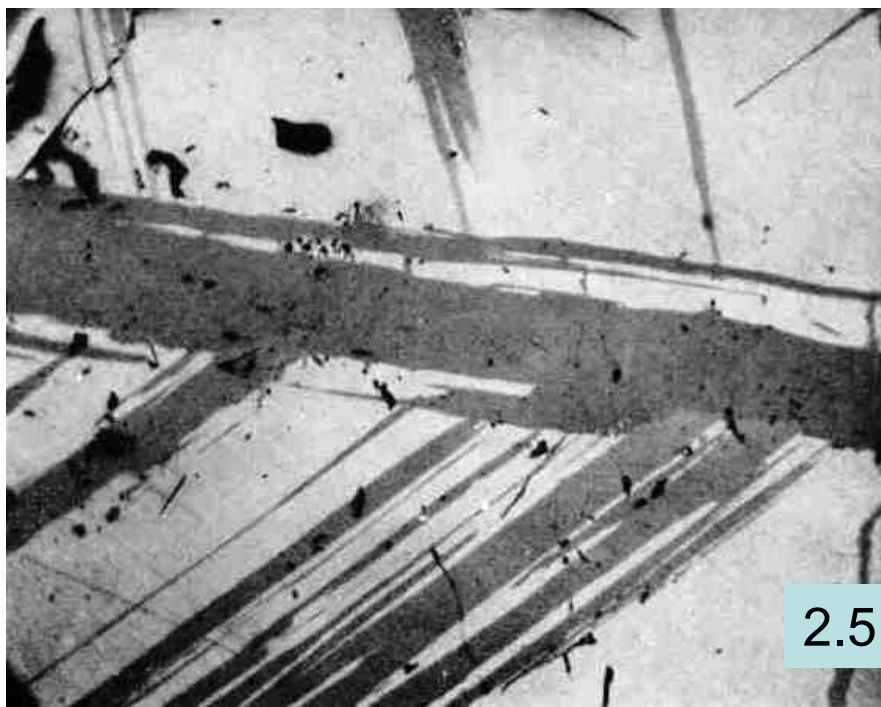
86 мм



# Индивиды. Рост кристаллов. Зарождение

**1В.** Более специфические случаи - самопроизвольное зарождение в твёрдых фазах = высокотемпературных твёрдых растворах.

Сравним структуры распада моносльфидного Fe-Cu твёрдого раствора (кубанит + халькопирит): в маломощных сульфидных залежах Садбери масштаб структур распада микроскопический; в мощных сульфидных залежах Норильска - Талнаха масштаб структур распада кубанита и халькопирита макроскопический до гигантского - длина пластин распада достигает 25 см.



2.5 мм



300 мм

В отраж. свете. Николи х. Фруд, Садбери

# Индивиды. Рост кристаллов. Зарождение

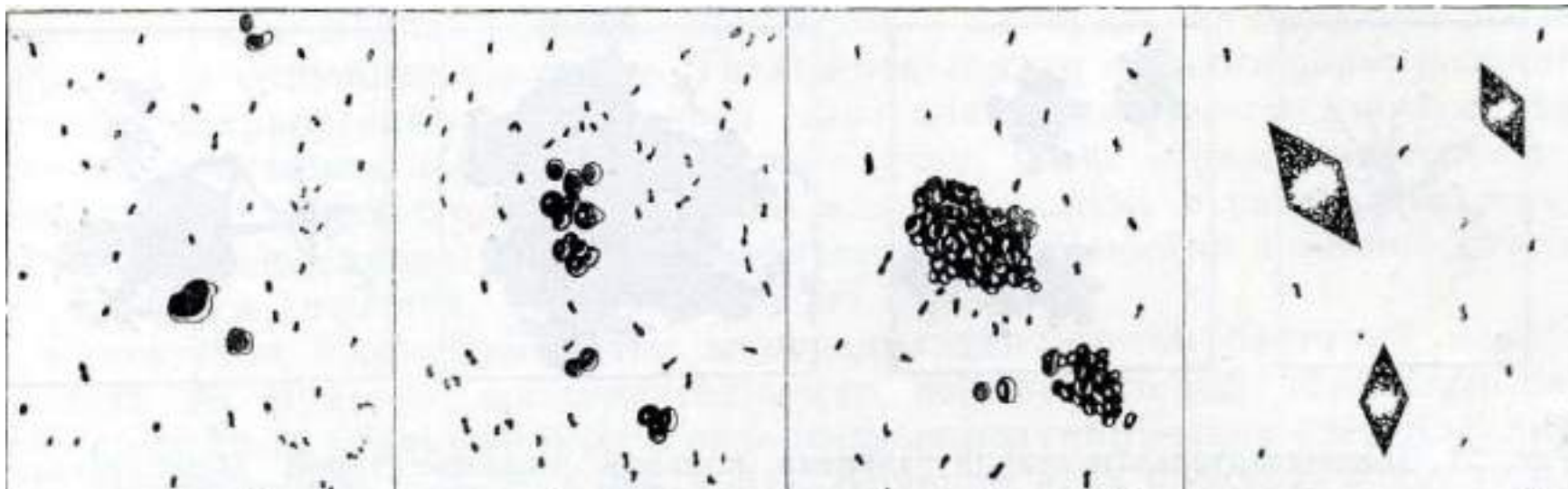
## 2. Зарождение при участии живых организмов и в них самих

К гетерогенному зарождению можно отнести зарождение кристаллических фаз при участии живых организмов и в них самих, т.е. биохимическое образование минералов. Зарождение микрокристаллов некоторых минералов происходит внутри клеток особых видов бактерий, которые в результате своей жизнедеятельности либо выделяют эти кристаллики в окружающую среду, либо полностью замещаются ими. Тионовые бактерии выделяют кристаллики  $S_8$ : среда их обитания подземные воды с  $H_2S$  и углеводородами нефтяного происхождения.

Электронно-микроскопические исследования показали, что бактерии *Aquaspirillum magnetotacticum* в морской воде в анаэробных условиях генерируют внутри клетки цепочки примерно из 10 кристалликов магнетита, удлиненные по [111]. Мельчайшие кристаллики магнетита и их цепочки генерируются и в головном мозгу птиц; именно поэтому сезонная миграция птиц обычно проходит вдоль магнитных силовых линий Земли. Есть подобные образования и в мозгу человека. Но человек (мы с Вами в том числе) утратил способность ориентироваться по магнитным силовым линиям Земли.

# Индивиды. Рост кристаллов. Зарождение

## 2. Зарождение при участии живых организмов и в них самих



Стадии развития кристалликов серы на палочковых тиобактериях

Микрокристаллы серы - продукты деятельности серобактерий в природе (обычно в сероводородных водах или у берегов солёных – сульфатных озёр, заросших растительностью)

Фото Н.П. Юшкина



# Индивиды. Рост кристаллов. Зарождение

## 2. Зарождение при участии живых организмов и в них самих

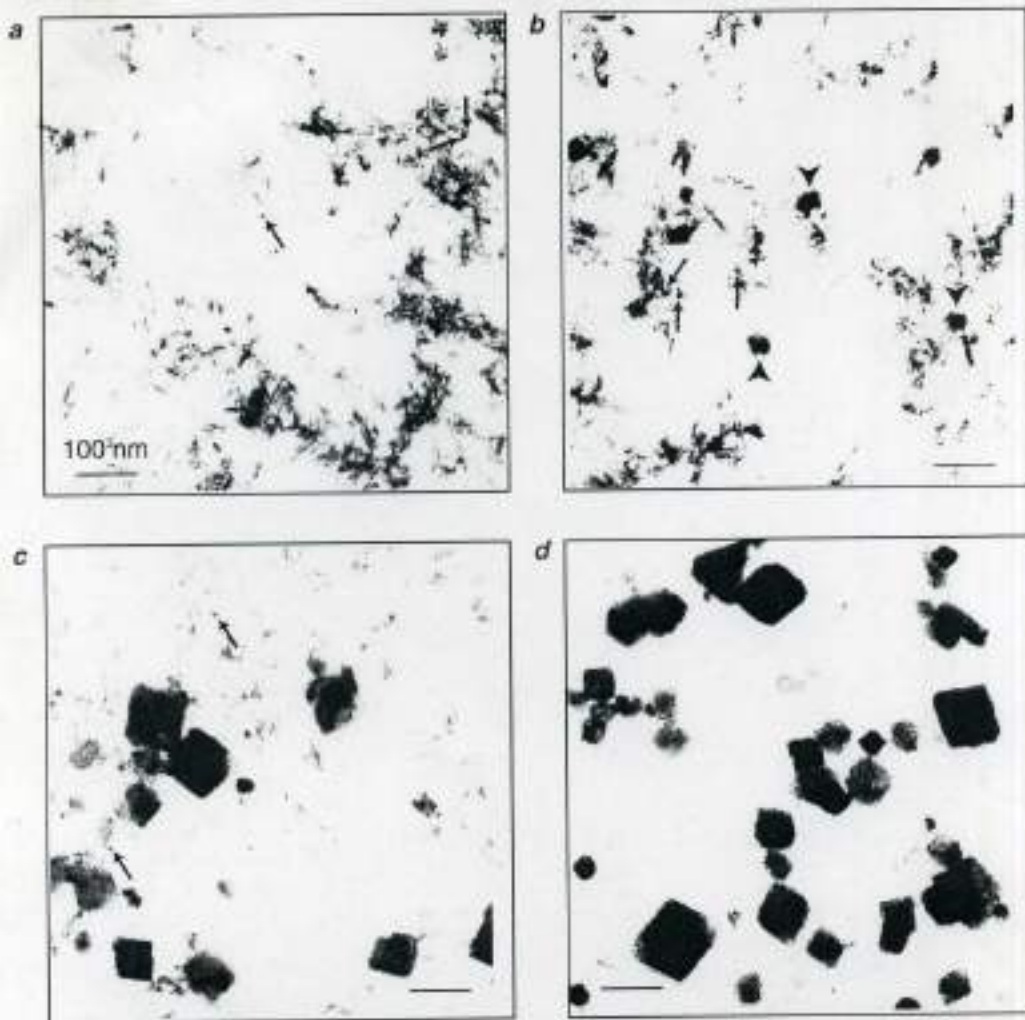


FIGURE 4. TEM images of magnetite formation in TOR-39 cultures at different times of incubation at 65 °C. (a) 10.35 h, (b) 11.5 h, (c) 24 h, (d) 22 d (1528 h). Thin arrows in a, b, and c point to magnetic nuclei, large arrow heads in b point to growing magnetite crystals. Scale is 100 nm for all images. Note changes in individual particle size, the range of sizes, and the decrease of Fe<sup>2+</sup> oxyhydroxide with time.

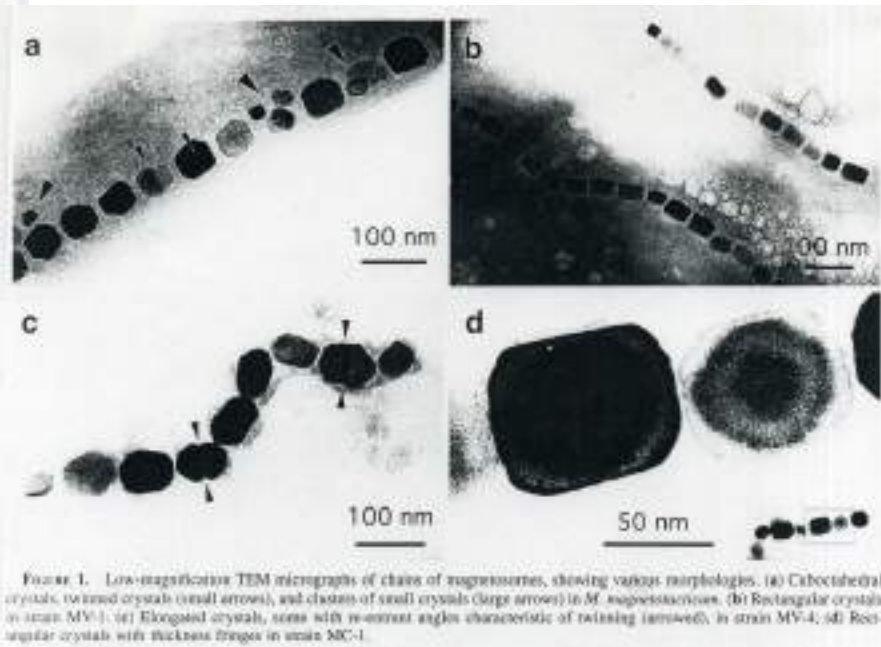


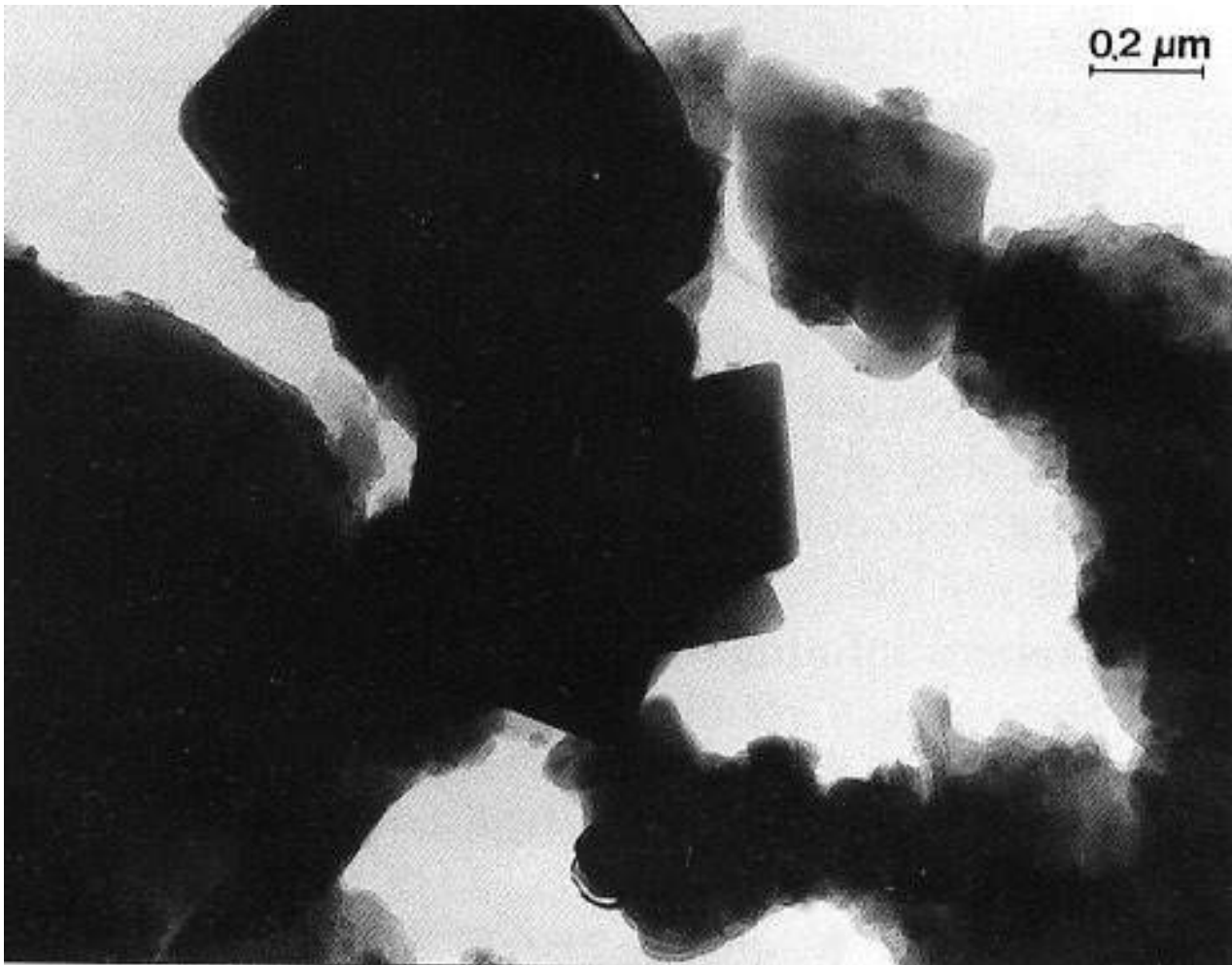
FIGURE 5. Low-magnification TEM micrographs of chains of magnetosomes, showing various morphologies. (a) Cuboctahedral crystals, twinned crystals (small arrows), and chains of small crystals (large arrows) in *M. magnetotacticus*. (b) Rectangular crystals in strain MV-1. (c) Elongated crystals, some with re-entrant angles characteristic of twinning (arrowed), in strain MV-4. (d) Rectangular crystals with thickness fringes in strain MC-1.

Нанокристаллы магнетита  
в теле магнетотактных  
бактерий



# Индивиды. Рост кристаллов. Зарождение

## 2. Зарождение при участии живых организмов и в них самих



Микрористаллы  
магнетита  
в мозгу  
человека

Судя по их наличию,  
люди, как и птицы,  
могли бы  
ориентироваться  
по магнитным  
силовым линиям  
Земли.  
Возможно, в  
древности  
так и было

**002. Зарождение кристаллов - 2.**

Эпитаксия. Присыпки.

Отравленные поверхности кристаллов

# **Индивиды. Рост кристаллов. Зарождение**

## **Процессы зарождения кристаллов минералов**

### **3. Гетерогенное зарождение на готовых зародышах или**

**затравках - на более ранних по времени образования**

**кристаллах того же минерала или другого с определённой ориентировкой или без нее.**

Энергетически выгоднее зарождение на готовых зародышах, чем самопроизвольное. Известные вам случаи зарождения на готовых затравках – оолиты, жемчужины. Во многих случаях кристаллизация минералов начиналась в трещинах, на стенках которых обнажаются зерна минералов того же вида. Так, в хрусталеносных жилах среди метаморфических пород и гранитоидов в шлифах из контакта видно, что зёрна породообразующего кварца служат непосредственными основаниями для кристаллов кварца в жиле. Аналогично зарождаются минералы и на кристаллах того же вида, которые возникли ранее; это явление широко распространено в природе. Однако факт такого зарождения должен быть обоснован установлением некоторого перерыва в процессе минералообразования и отравления поверхности, т.е. наличия на поверхности какого-либо постороннего вещества. При этом, энергетически наиболее выгодные позиции – вершины кристаллов, затем ребра, грани уступают тем и другим. Вновь зарождающиеся

# Индивиды. Рост кристаллов. Зарождение

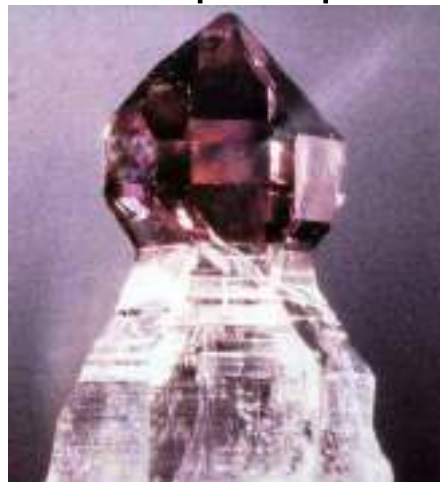
## 3А. Гетерогенное зарождение на готовых зародышах или затравках

Кристаллы нарастают на ранее возникшие ориентированно, поскольку структура тех и других одна. Возникают автоэпитаксические срастания.

**Эпитаксия - закономерное кристаллохимически обусловленное нарастание минералов друг на друга.** Нередки кристаллы - скипетры и люстры - аметистовые или кварцевые головы на кварце, горном хрустале; сера на сере; лёд на льде (снежинки); кальцит на кальците; серебро на серебре... Автоэпитаксическое зарождение происходит и на рёбрах - для кварца зачастую это отрицательные рёбра призмы кристалла - затравки.

Эпитаксические нарастания позволяют понять структуру подложки – это монокристалл или срастания двух или более кристаллов.

Рассмотрим разнообразные примеры автоэпитаксии. Начнём с кварца и его разновидностей.



Скипетр аметиста 10 мм  
на кристалле  
горного хрустала.  
Brandberg,  
Намибия



# Индивиды. Рост кристаллов. Зарождение

3 А. Гетерогенное зарождение на готовых зародышах или затравках. Автоэпитаксия - кварц

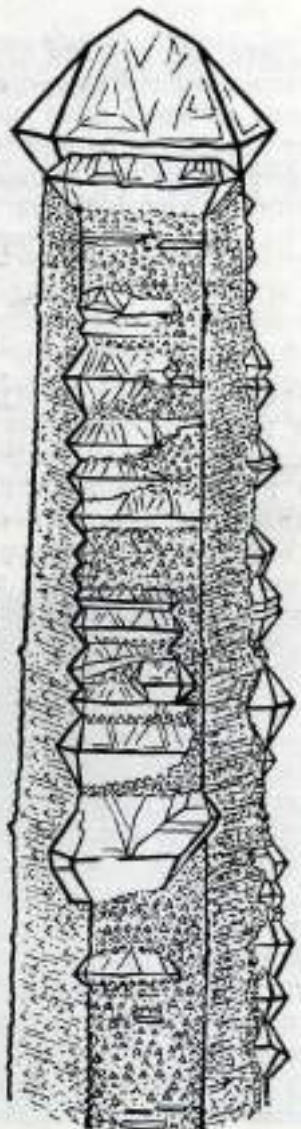


Скипетр аметиста  
на кристалле  
молочного кварца.  
100 мм.

Мадагаскар

# Индивиды. Рост кристаллов. Зарождение

## 3 А. Гетерогенное зарождение на готовых зародышах или затравках. Автоэпитаксия - кварц



54x14 мм. Lilians mine, Мексика



Скипетр аметиста на кварце. Намибия

Скипетр –  
срастание  
аметиста  
и кварца  
53 мм.  
Holmestrand





# Индивиды. Рост кристаллов. Зарождение

3 А. Гетерогенное зарождение на готовых зародышах или затравках. Автоэпитаксия - кварц



Скипетры горного хрусталя на кварце с массой включений битумоидов. Benchmar

# Индивиды. Рост кристаллов. Зарождение

## 3 А. Гетерогенное зарождение на готовых зародышах или затравках. Автоэпитаксия - кварц

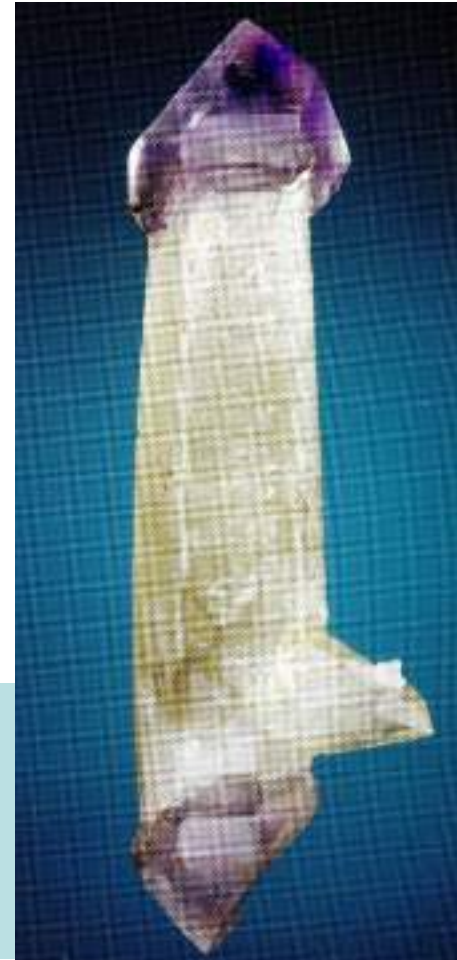
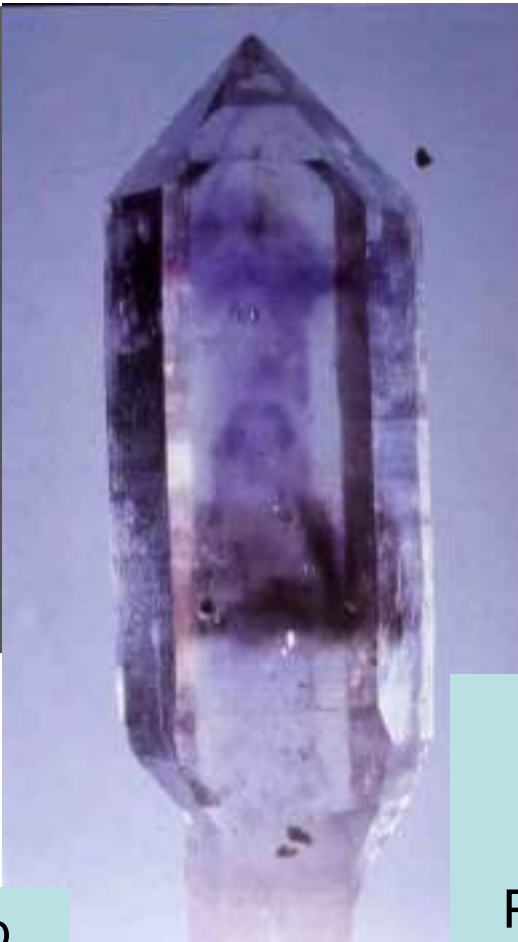


Скипетр аметиста на кварце.  
Seedorf,  
Швейцария

Скипетр аметиста  
на кварце 70 мм.  
Адуй, Средний Урал

# Индивиды. Рост кристаллов. Зарождение

## 3 А. Гетерогенное зарождение на готовых зародышах или затравках. Автоэпитаксия - кварц



Скипетр –  
аметист  
на молочном  
кварце

Сложный скипетр  
аметиста  
35x25 мм.

Brandberg, Намибия

44x22 мм.  
Santana da  
Manguera,  
Paraiba, Бразилия

Скипетры аметиста на кварце 83 мм.  
Fat Jack mine, Yavapai county,  
Аризона, США



# Индивиды. Рост кристаллов. Зарождение

3 А. Гетерогенное зарождение на готовых зародышах или затравках. Автоэпитаксия - кварц



**Amethyst-Zepter**  
Fieschergletscher VS

**Странной формы  
скипетр аметиста на  
кварце.**

Seedorf,  
Швейцария

Причина в том, что  
большая часть  
поверхности  
кристалла - подложки  
отравлена

# Индивиды. Рост кристаллов. Зарождение

## 3 А. Гетерогенное зарождение на готовых зародышах или затравках. Автоэпитаксия - кварц



**Странной формы  
скипетр аметиста на  
дымчатом кварце.**

Приполярный  
Урал.

Причина в том,  
что большая часть  
поверхности  
кристалла - подложки  
отравлена

# Индивиды. Рост кристаллов. Зарождение

3 А. Гетерогенное зарождение на готовых зародышах или затравках. Автоэпитаксия - кварц



Странной формы скипетры кварца на кварце.

Shangbao, Leiyang, Hunan, Китай.

Причина – большая часть поверхностей кристаллов – подложки отравлена



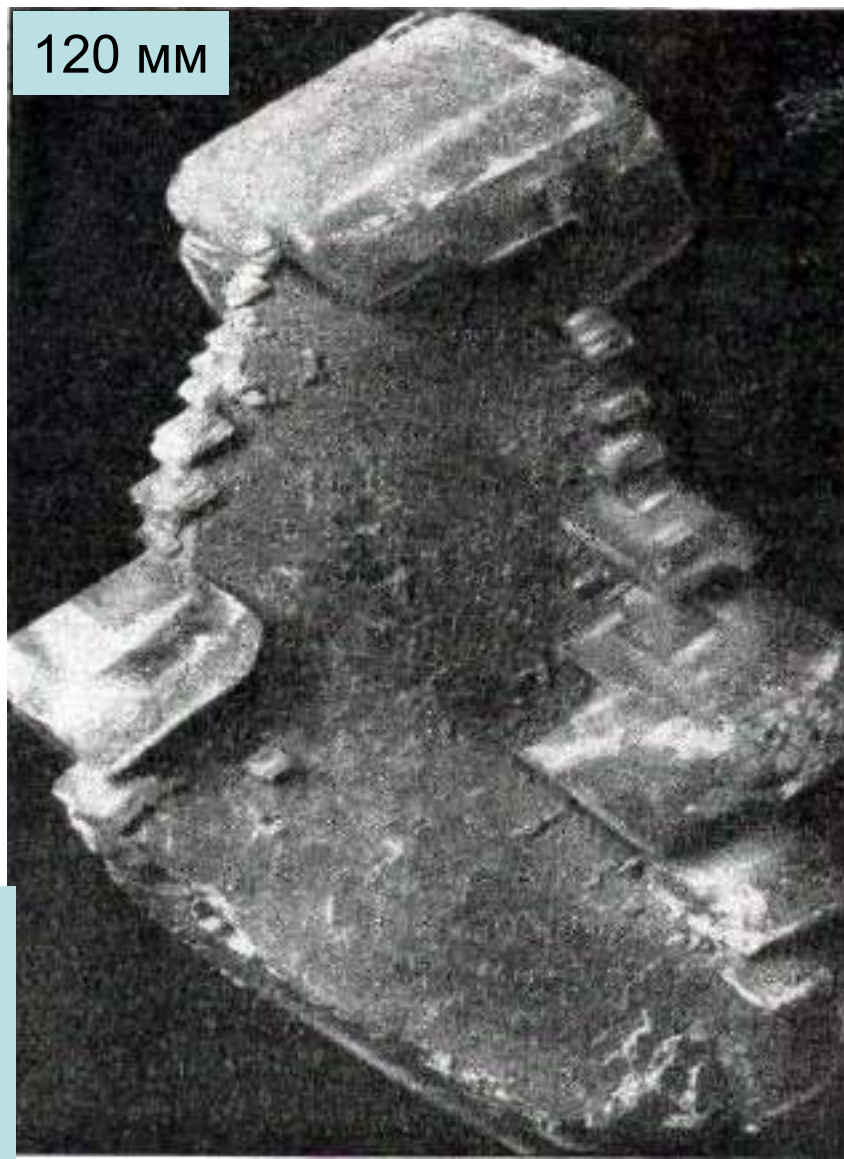
# Индивиды. Рост кристаллов. Зарождение

## 3 А. Гетерогенное зарождение на готовых зародышах или затравках. Автоэпитаксия - кальцит



Скипетр 32 мм

Ромбоэдры на  
вершине и на  
рёбрах  
скаленоэдра



120 мм



Скипетр  
40 мм.  
Тетюхе,  
Дальний  
Восток



# Индивиды. Рост кристаллов. Зарождение

3 А. Гетерогенное зарождение на готовых зародышах или затравках. Автоэпитаксия - кальцит



Скаленоэдры и сложной формы кристаллы. 45 мм.  
Дашкесан, Азербайджан

# Индивиды. Рост кристаллов. Зарождение

3 А. Гетерогенное зарождение на готовых зародышах или затравках. Автоэпитаксия - кальцит

Fig. 1169.

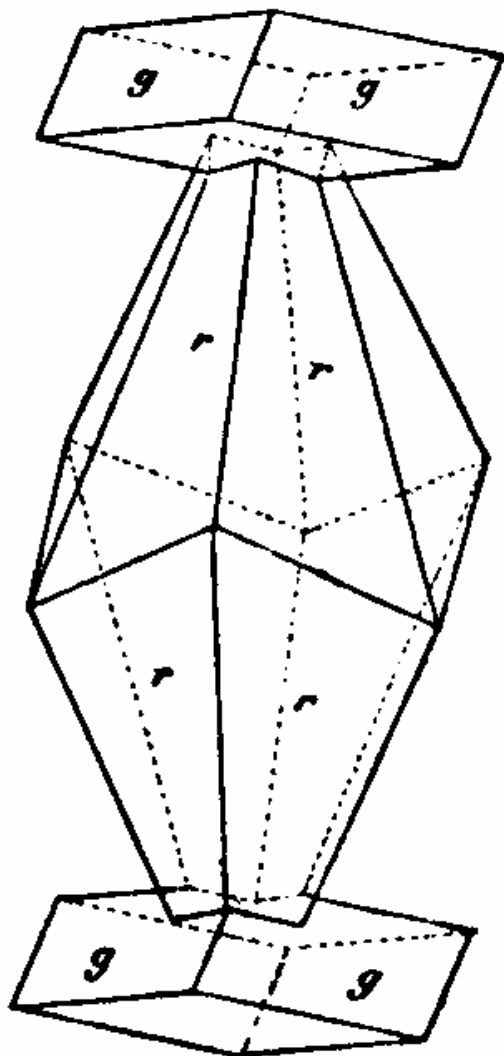


Fig. 1160.

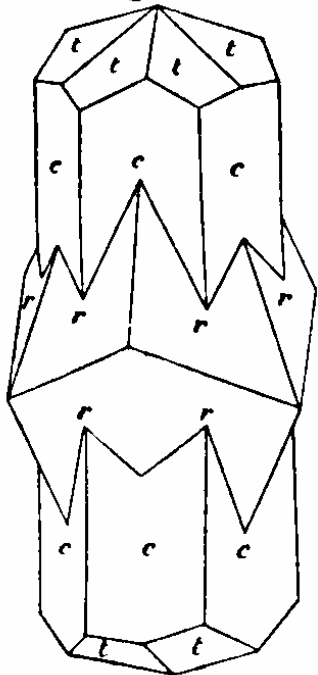


Fig. 1186.

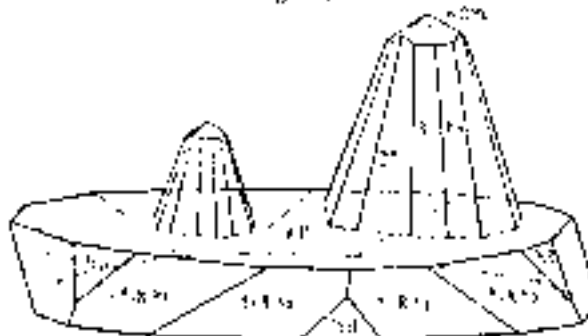


Fig. 1197.

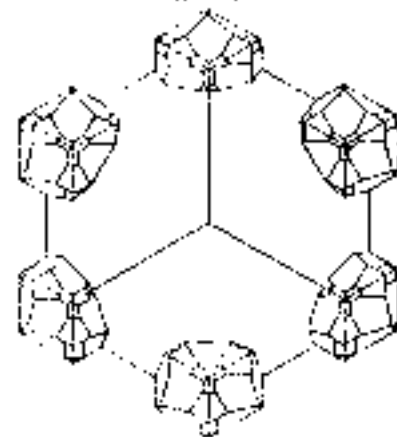


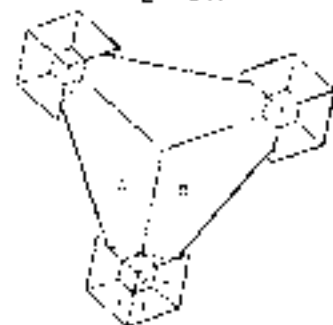
Fig. 1686.



Fig. 1587.



Fig. 2317.



Рисунки в книге  
V.M. Goldschmidt,  
1918 - 1923

# Индивиды. Рост кристаллов. Зарождение

## 3 А. Гетерогенное зарождение на готовых зародышах или затравках. Автоэпитаксия - кальцит



Плоские ромбоэдры на скаленоэдре 14 мм.  
Идар-Оберштайн,  
ЮЗ Германия



На ладони

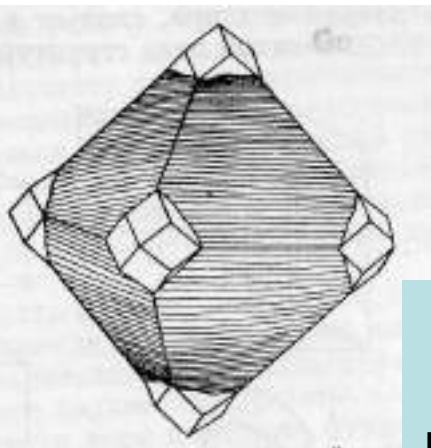
Игла кальцита выросла на сложный скаленоэдр кальцита

Тетюхе, Дальний Восток



# Индивиды. Рост кристаллов. Зарождение

## 3 А. Гетерогенное зарождение на готовых зародышах или затравках. Автоэпитаксия - флюорит



3  
мм

Скипетр.  
Эйфель,  
Германия

Ромбододекаэдры  
наросли на  
октаэдр



Denton mine,  
Иллинойс,  
США





# Индивиды. Рост кристаллов. Зарождение

3 А. Гетерогенное  
зарождение  
на готовых  
зародышах или  
затравках.  
Автоэпитаксия -  
флюорит

Кубы флюорита,  
наросшие на  
шар флюорита  
в тех местах, где его  
поверхность  
не была отравленной.  
Красно, Чехия



# Индивиды. Рост кристаллов. Зарождение

## 3 А. Гетерогенное зарождение на готовых зародышах или затравках.

### Автоэпитаксия - флюорит

2 мм



На палочку флюорита вырос  
кристалл флюорита.

Какова форма этого кристалла ?

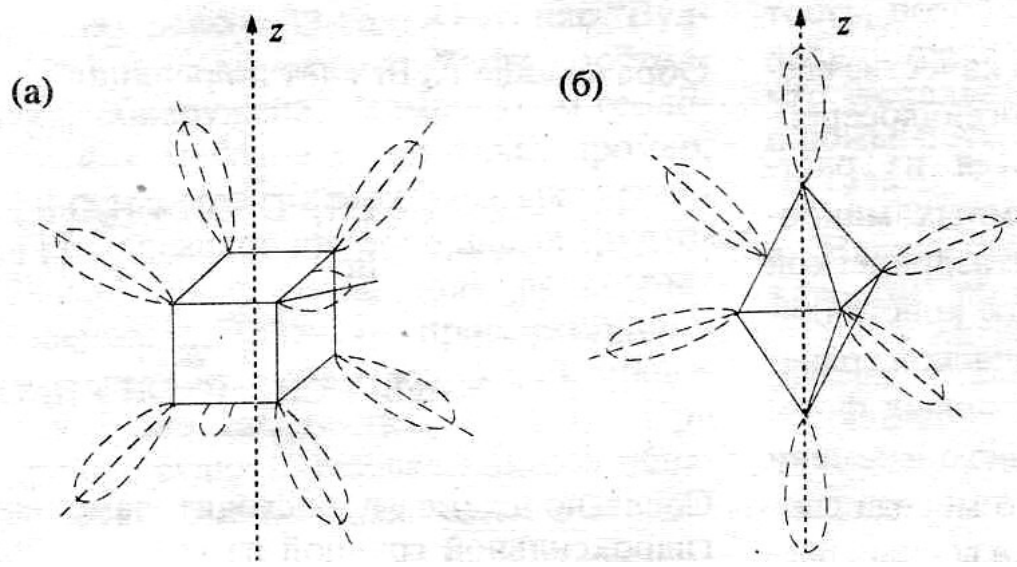
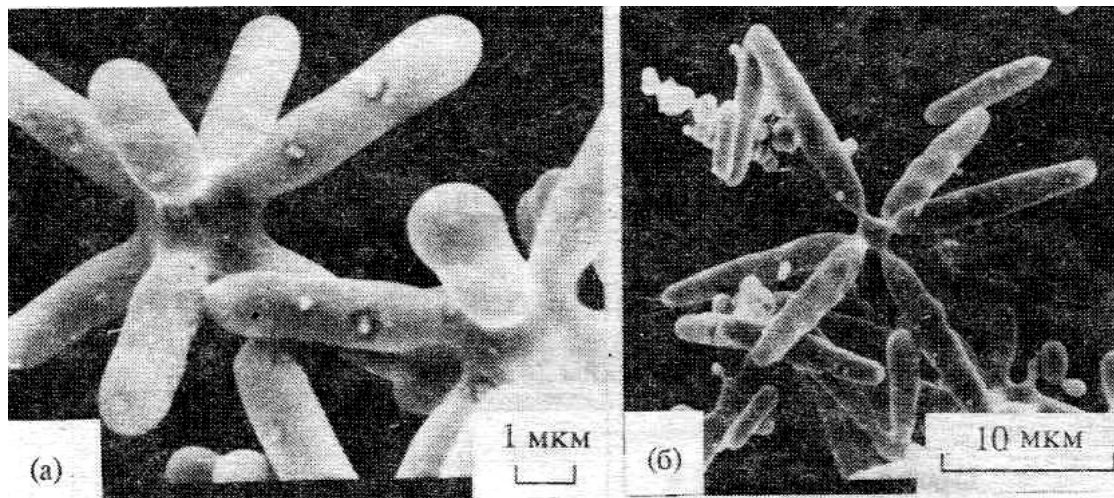
Ответ дают эпитаксически  
наросшие на вершины  
этого кристалла  
кристаллы флюорита  
сложной формы.

Сколько их – вот и ответ



# Индивиды. Рост кристаллов. Зарождение

3 А. Гетерогенное зарождение на готовых зародышах или затравках. Автоэпитаксия – бромаргирит  $\text{AgBr}$



Поздние кристаллы  
наросли на  
вершины  
кристаллов - подложек

# Индивиды. Рост кристаллов. Зарождение

3 А. Гетерогенное зарождение на готовых зародышах или затравках. Автоэпитаксия - галенит



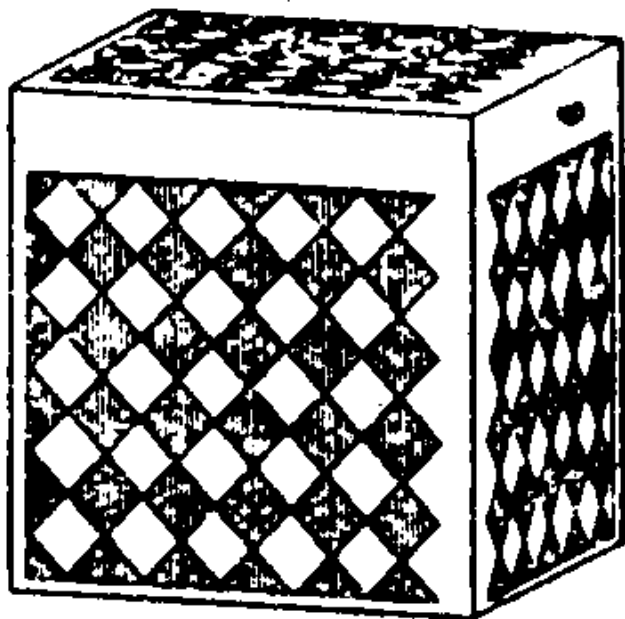
Октаэдры выросли на кубический кристалл. Ottawa, Oklahoma, США



# Индивиды. Рост кристаллов. Зарождение

3 А. Гетерогенное зарождение на готовых зародышах или затравках. Автоэпитаксия - галенит

Fig. 73.



lanz

Fig. 80.

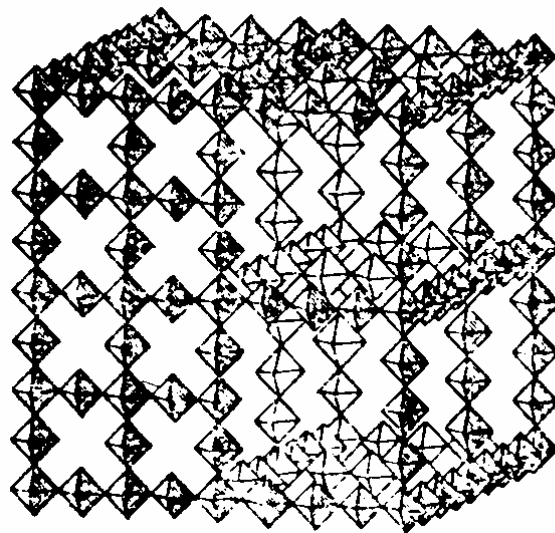
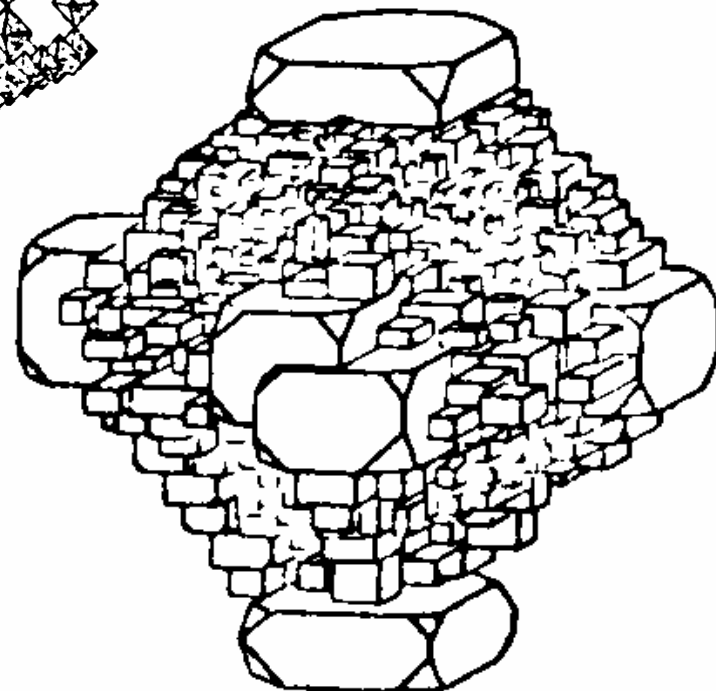


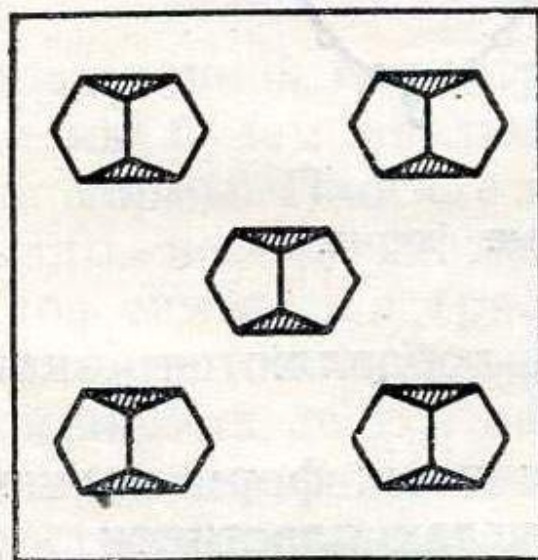
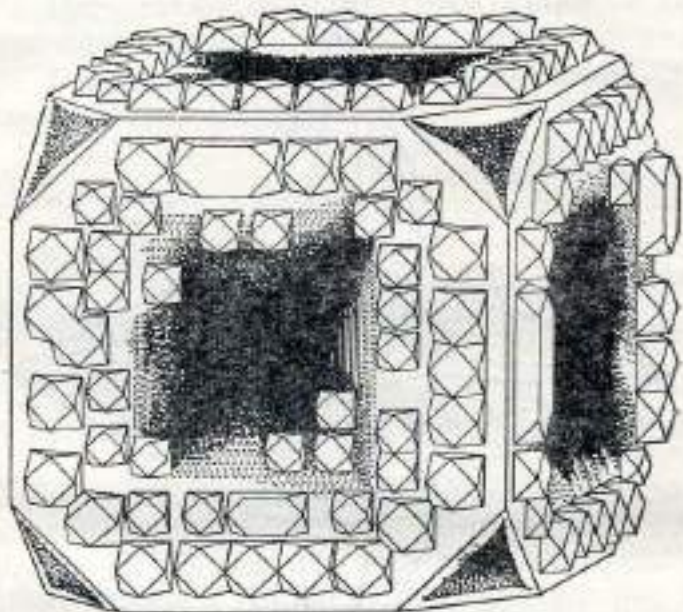
Fig. 93.



Рисунки в книге  
V.M. Goldschmidt, 1918 - 1923

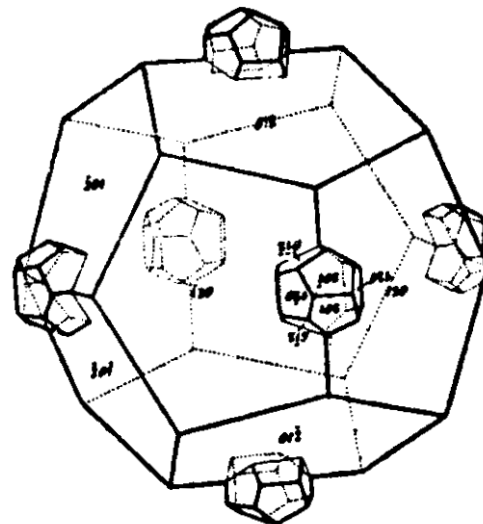
# Индивиды. Рост кристаллов. Зарождение

## 3 А. Гетерогенное зарождение на готовых зародышах или затравках. Автоэпитаксия - пирит



Пиритоэдры  
(пентагондодекаэдры)  
наросли на  
грани  
куба  
монокристалла  
пирита

Fig. 97.



Пиритоэдры  
наросли  
на рёбра  
монокристалла  
- пиритоэдра

Масса кубоктаэдров пирита  
наросли на грани  
куба  
монокристалла –  
кубоктаэдра

# Индивиды. Рост кристаллов. Зарождение

3 А. Гетерогенное  
зарождение на готовых  
зародышах или  
затравках.

Автоэпитаксия - пирит

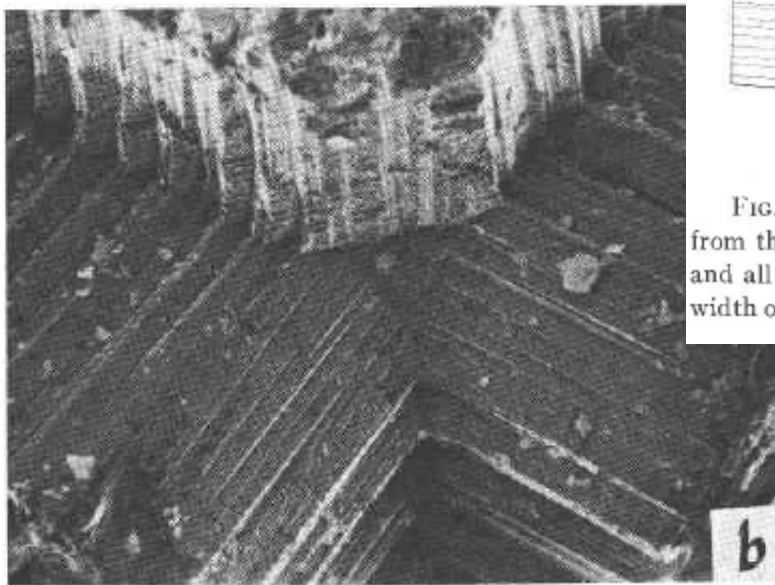
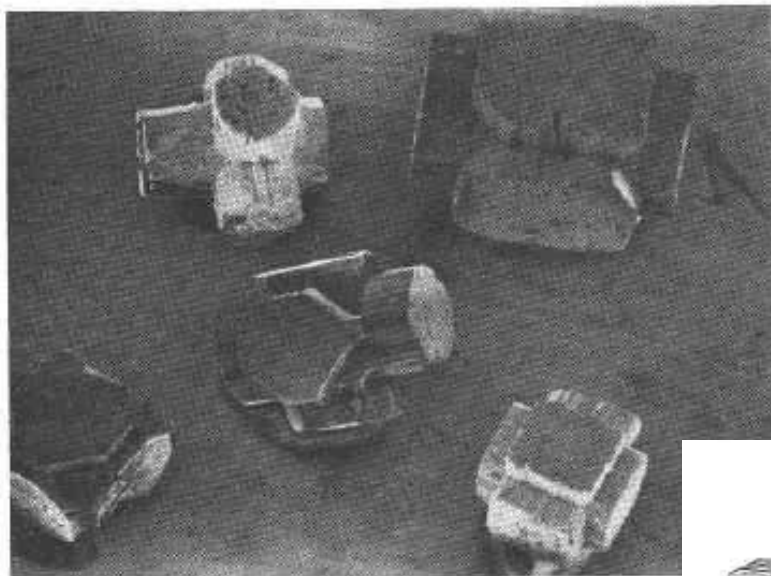


FIG. 3. Idealized drawings to emphasize certain variants of habit of pyrite crystals from the Westvaco mine, Wyoming. Each is based on observations on particular crystals and all are drawn to the same scale. The drawing at right represents a crystal with total width of about 0.4 mm. The striations in all cases are schematic only.

FIG. 2. a. (above) Scanning electron microscope photograph of five measured pyrite crystals from the Westvaco mine, Wyoming. Magnification 46X. b. (below) Scanning electron microscope photograph of corner of lower right crystal in upper picture. Magnification 640X.

Микрористаллы  
пирита из  
формации Грин Ривер,  
Вайоминг, США.

Pabst A. Amer. Mineral.  
1971. Vol. 56. P. 133-145



# Индивиды. Рост кристаллов. Зарождение

## 3 А. Гетерогенное зарождение на готовых зародышах или затравках. Автоэпитаксия

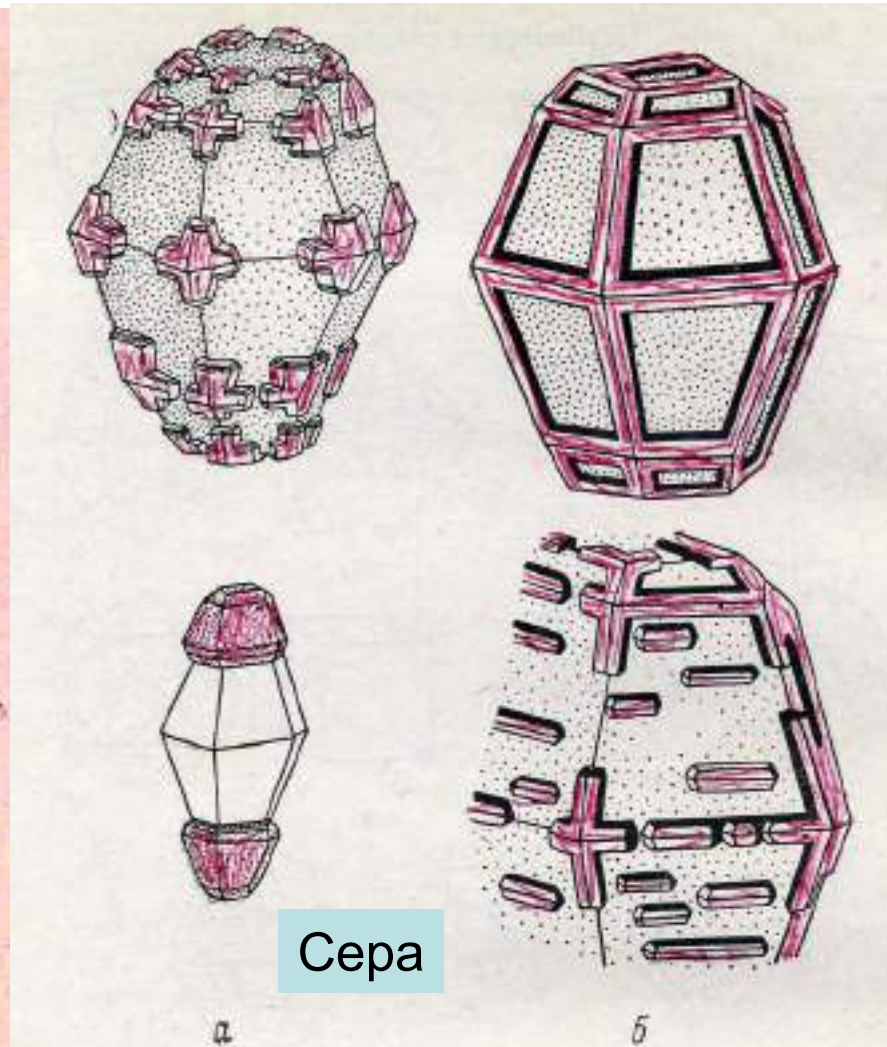
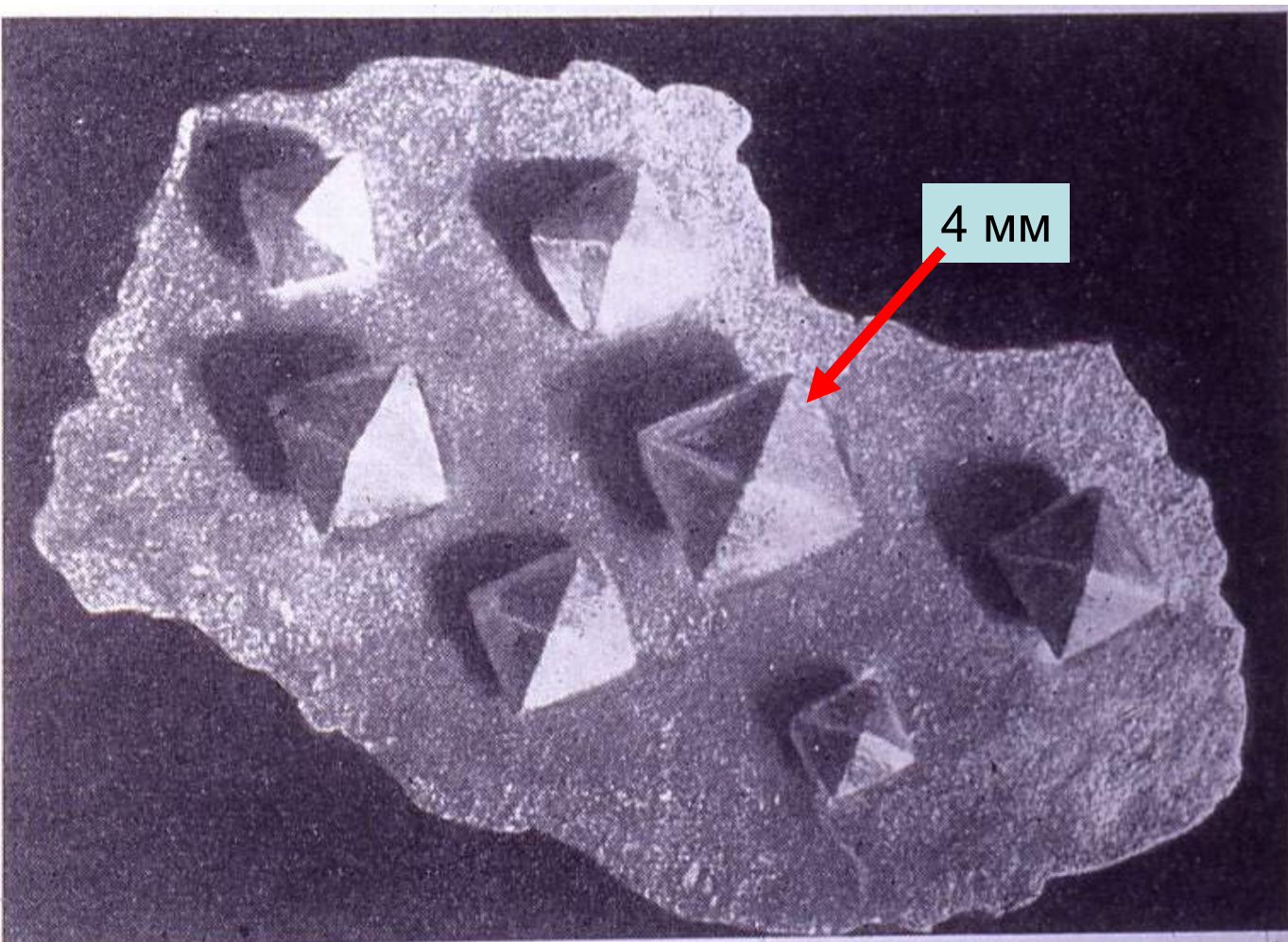


Рис. 14. Вершинные (а) и реберные (б) формы на кристаллах самородной серы. Шорсу, Узбекистан.



# Индивиды. Рост кристаллов. Зарождение

## 3 А. Гетерогенное зарождение на готовых зародышах или затравках. Автоэпитаксия - золото



**Кристаллы -  
октаэдры  
золота  
на  
пластине -  
монокристалле  
золота.**

**Южный  
Урал**

# Индивиды. Рост кристаллов. Зарождение

## 3 А. Гетерогенное зарождение на готовых зародышах или затравках. Автоэпитаксия - лёд

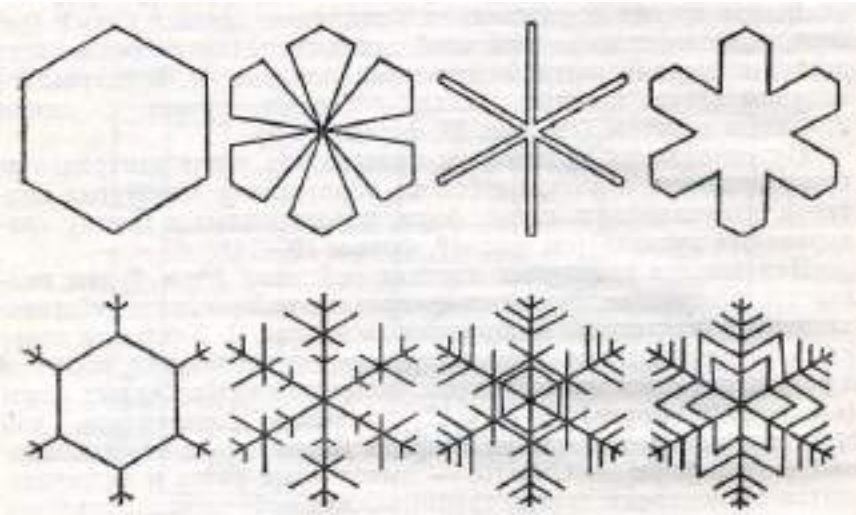


Рис. 20. Основные типы снежинок.  
По У. Накафа

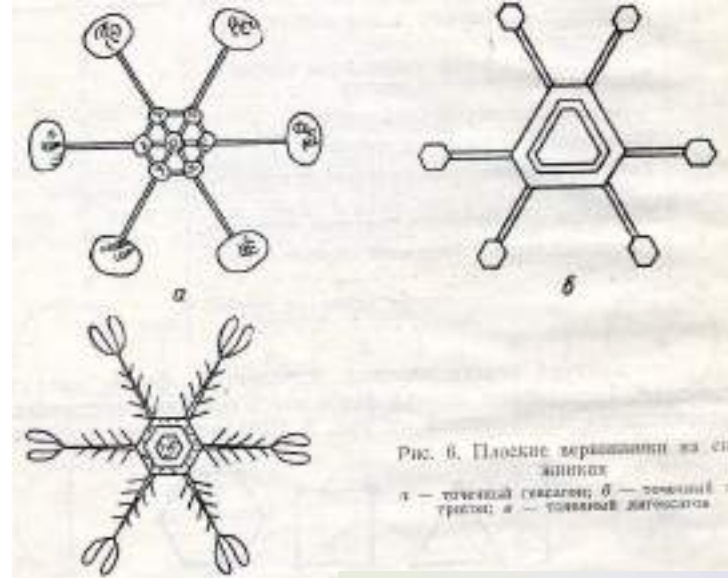


Рис. 6. Плоские кристаллы из снежинок  
а — точечный кристалл; б — точечный кристалл с  
узлами; в — точечный кристалл с узлами





# Индивиды. Рост кристаллов. Зарождение

## 3 А. Гетерогенное зарождение на готовых зародышах или затравках. Автоэпитаксия - алмаз

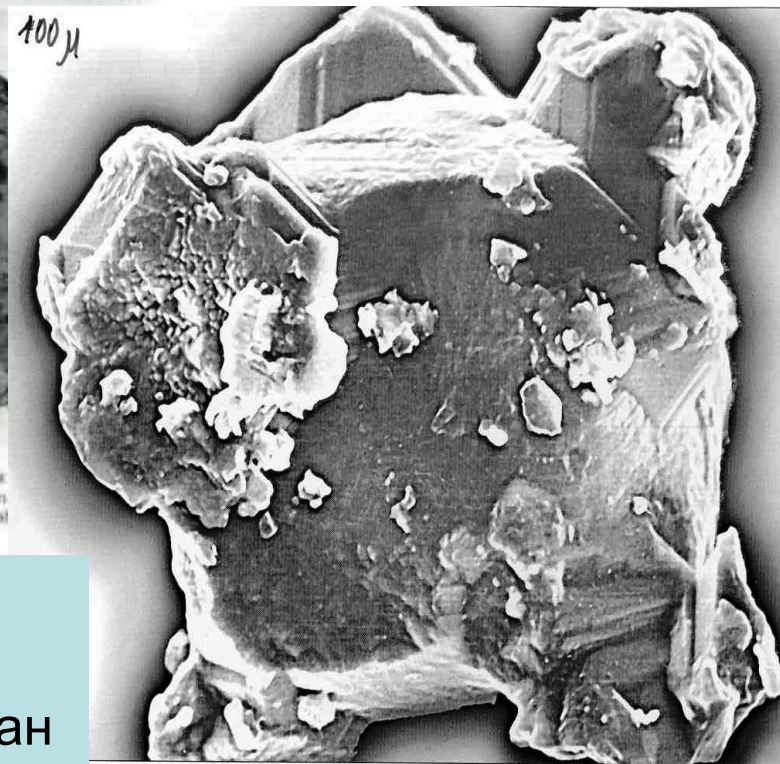
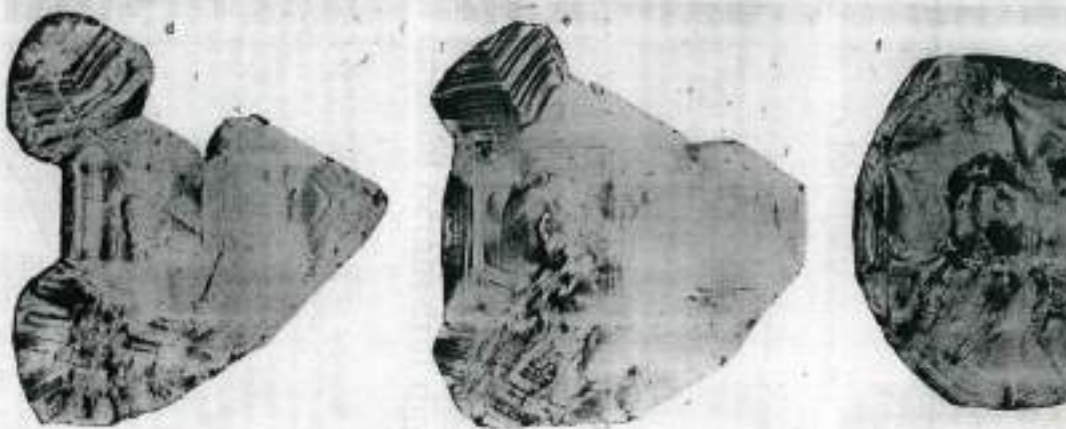


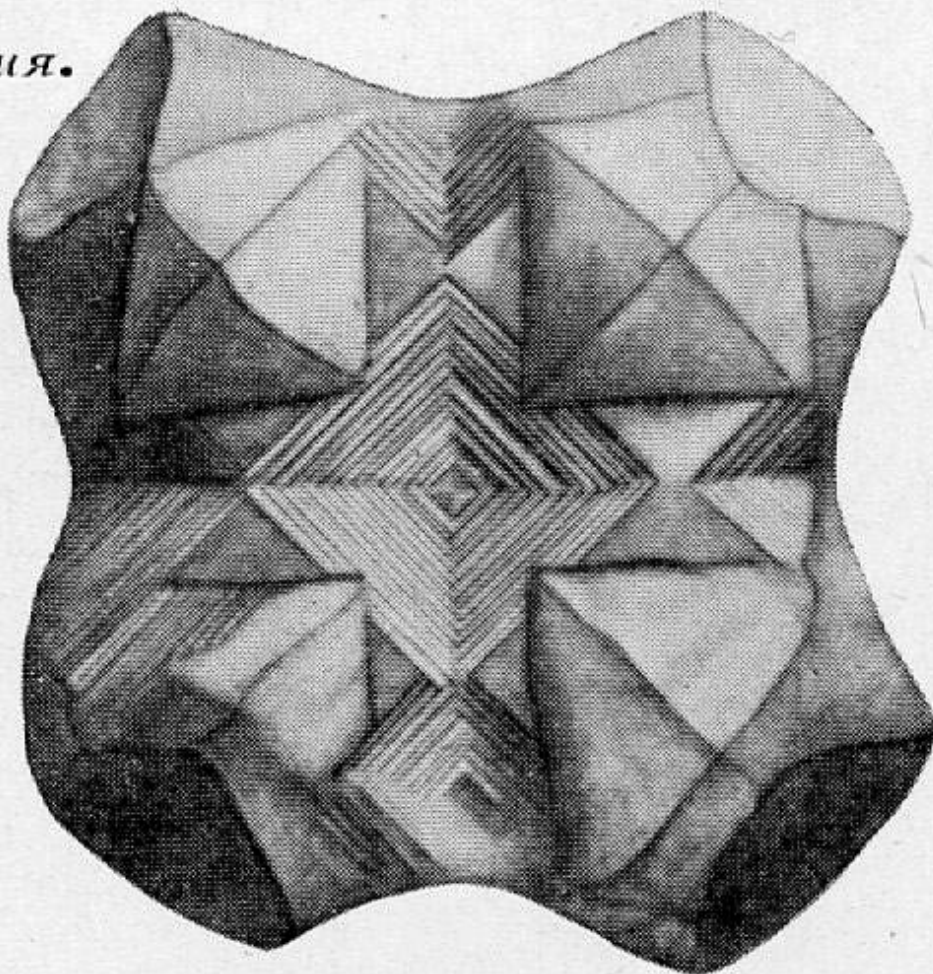
Fig. 1. (a) Scanning electron micrograph: general view of specimen. Image width = 3.5 mm. (b) A mirror octahedron that has become a dodecahedron by dissolution. Scale mark 1 mm. (c) SEM showing high-index facets and bevels on the body of the specimen. Scale mark 1 mm topograph, 1 mm from the centre. Image width 3 mm (projection of diffraction vector pointing horizontally to the left). (e) X-ray section topograph.

Кристалл 0.1 мм из  
метаморфитов.  
Кумдыколь, Северный Казахстан

# Индивиды. Рост кристаллов. Зарождение

## 3 А. Гетерогенное зарождение на готовых зародышах или затравках. Автоэпитаксия - алмаз

*Бразилия.*



Фиг. 166.

Крист. 73.

Рисунок  
А.Е. Ферсмана.

Кристалл из  
россыпей  
Бразилии.

А.Е.Ферсман  
Кристаллография  
алмаза.

М.: изд.АН СССР.  
1955. 450 с.



# Индивиды. Рост кристаллов. Зарождение

## 3 А. Гетерогенное зарождение на готовых зародышах или затравках. Автоэпитаксия

Fig. 48.

Роговая обманка

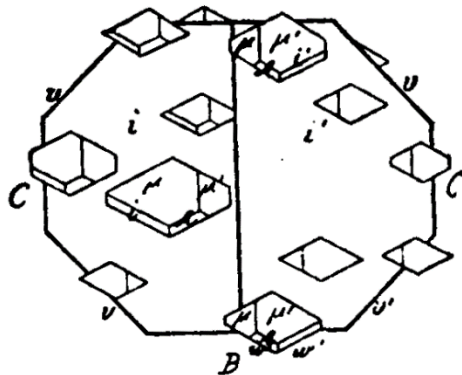
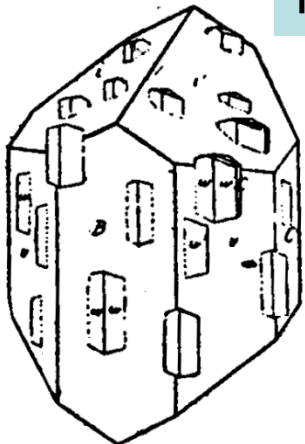
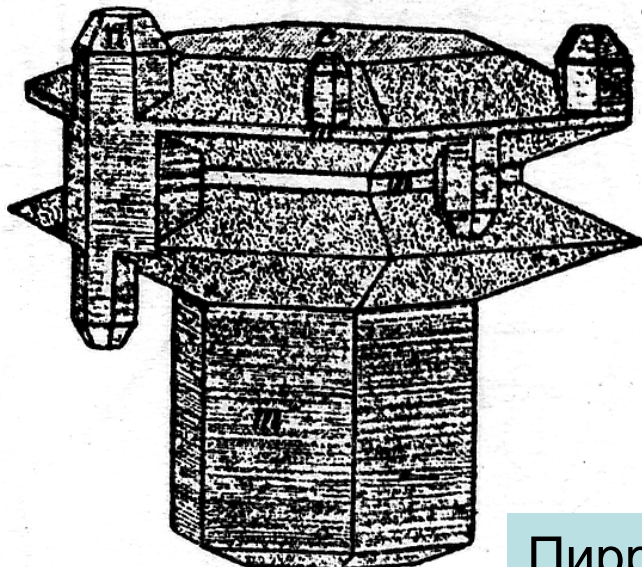
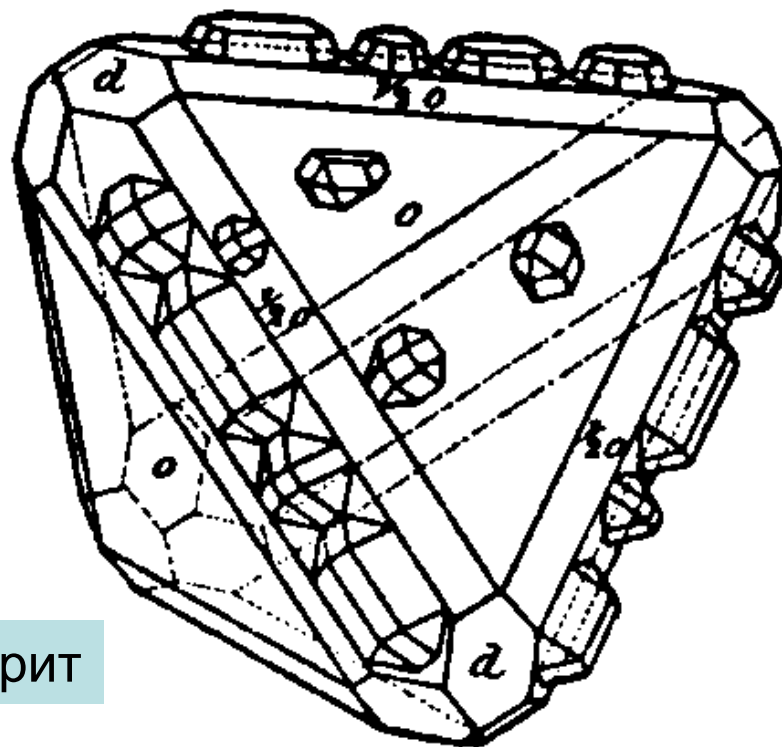


Fig. 31.



Пирротин

Тетраэдрит



Рисунки в книге  
V.M. Goldschmidt, 1918 - 1923

# Индивиды. Рост кристаллов. Зарождение

## 3 А. Гетерогенное зарождение на готовых зародышах или затравках. Автоэпитаксия - берилл



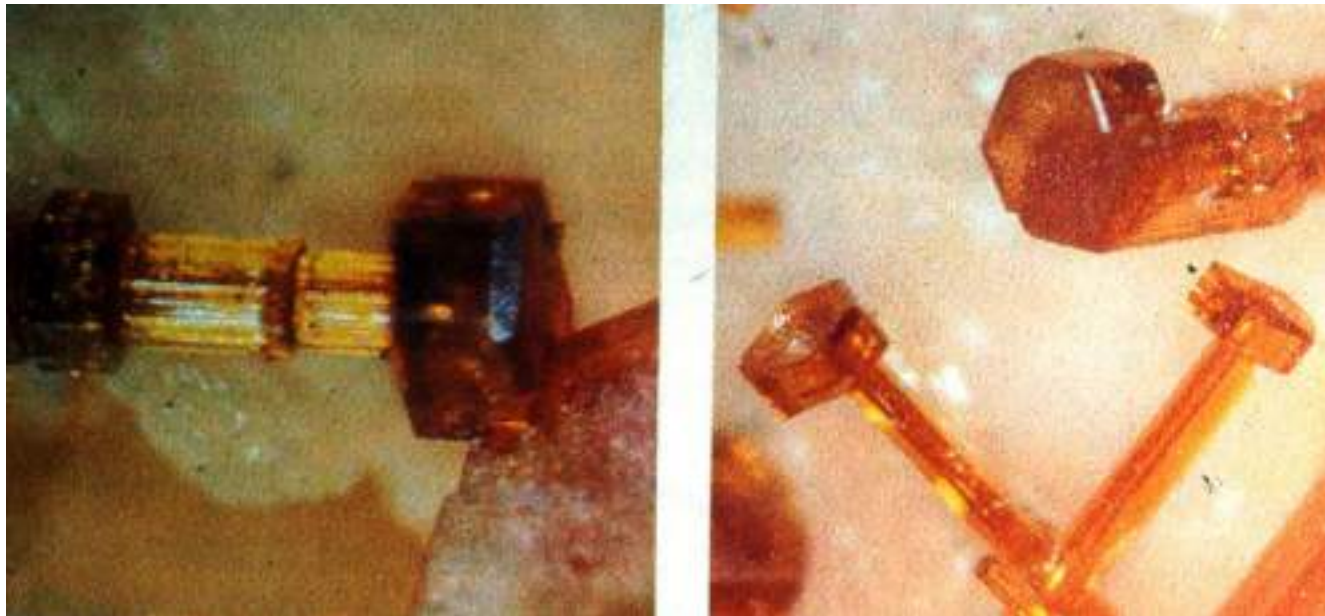
Скипетр –  
шапка.  
Забайкалье



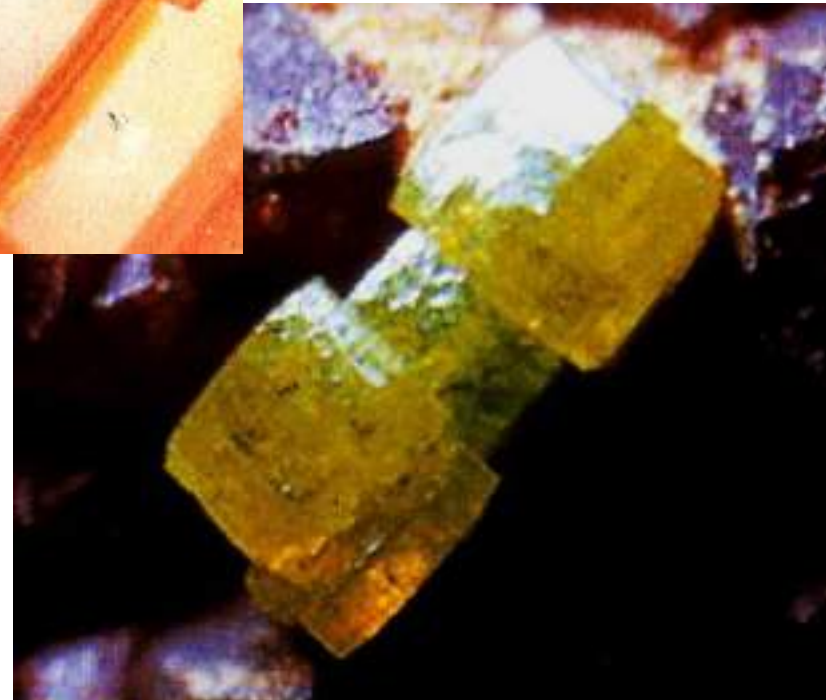
Скипетр. Shengus,  
Scardu, Пакистан

# Индивиды. Рост кристаллов. Зарождение

3 А. Гетерогенное зарождение на готовых зародышах или затравках. Автоэпитаксия – кристаллы-гантели



Ванадинит. Mibladen, Марокко



Миметизит 2 мм. Brandy Gill mine

# Индивиды. Рост кристаллов. Зарождение

## 3 Б. Гетерогенное зарождение на готовых зародышах или затравках

**Эпитаксия** - закономерное кристаллохимически обусловленное нарастание минералов друг на друга. Зарождение на кристаллах другого минерала с закономерной ориентировкой возможно в случае сходства их структур. Явления эпитаксии: нарастания одних тригональных карбонатов на другие, одних щелочных полевых шпатов на другие; одних полиморфов на другие - пирит на марказит, кальцит на арагонит; ставролит на кианит; пентландит на пирротин... При закономерном срастании осуществляется геометрическое подобие срастающихся плоских сеток. Признаки топохимического соответствия двух структур : а) наличие одно-, двух- или трехмерного подобия и сходства структурных мотивов; б) соизмеримость или кратность параметров элементарной ячейки; в) сходство элементов симметрии совмещающихся плоскостей; г) совмещение сил связи или полярности ионов. Часто для образования совершенных эпитаксиальных срастаний вполне достаточно двумерного подобия структур; не влияет даже сильное различие параметров решетки в направлении  $\perp$  плоскости эпитаксиального срастания. На эпитаксию и формы ее проявления влияют: 1) ведущий фактор - степень геометрического подобия структур. Допустимо расхождение во взаимном расположении отдельных узлов кристаллической решетки не  $\geq 10-15\%$ .



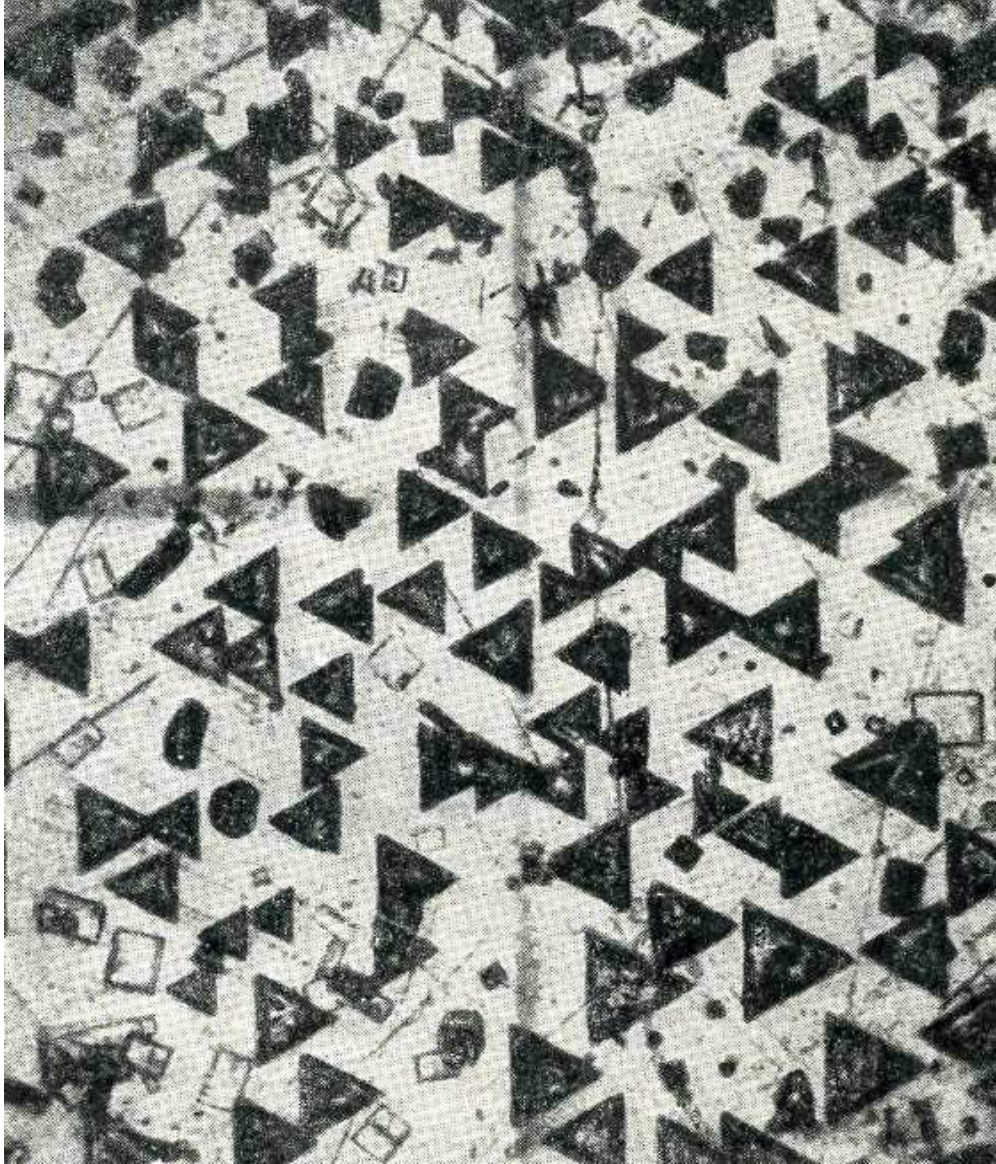
# Индивиды. Рост кристаллов. Зарождение

## 3 Б. Гетерогенное зарождение на готовых зародышах или затравках. Эпитаксия

Для закономерных срастаний силикатов более важной причиной, чем простое подобие в размерах элементарных ячеек, обычно является совмещение цепочек или даже слоев  $\text{SiO}_4$  тетраэдров или рядов плотных кислородных укладок в двух структурах, например, в кварце и олигоклазе. Это согласуется с представлениями Н.В.Белова о том, что плоскостями срастания разных кристаллов являются слои плотнейшей упаковки атомов; 2) повышение температуры расширяет возможности проявления эпитаксии у разнородных веществ; 3) для возникновения эпитаксиальных срастаний важна сила связи между узлами кристаллических решеток двух минералов. Характер (тип) связи в одном и в другом кристалле почти не имеют значения; 4) большое влияние на характер эпитаксии оказывает среда кристаллизации, диэлектрическая постоянная растворителя. Чем меньше эта константа, тем легче осуществляется эпитаксия. Этим объясняется расширение пределов эпитаксии при кристаллизации в спиртовых растворах по сравнению с водными; 5) эпитаксиальное нарастание обычно происходит в условиях невысокого пересыщения и в узком интервале его значений. Существует понятие - критическое пересыщение эпитаксиальной кристаллизации - выше него эпитаксии

# Индивиды. Рост кристаллов. Зарождение

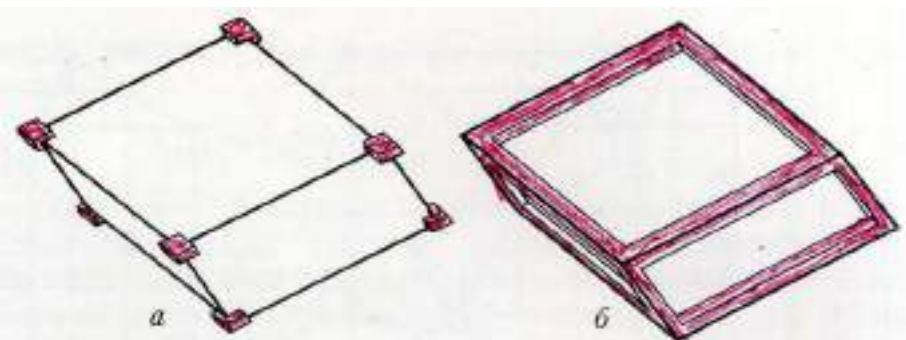
3 Б. Гетерогенное зарождение на готовых зародышах или затравках. Эпитаксия: йодистый аммоний на мусковите



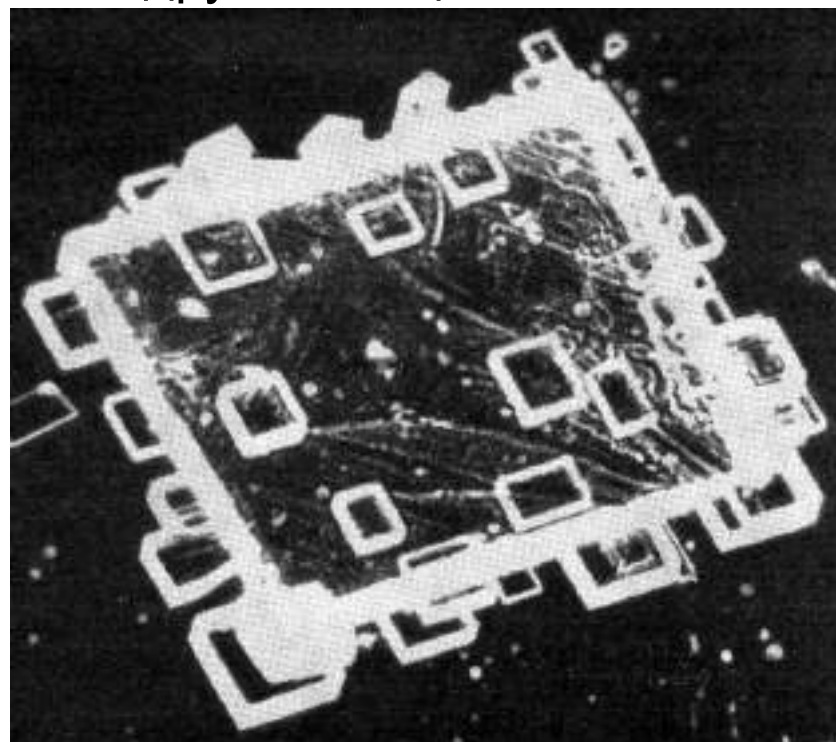
# Индивиды. Рост кристаллов. Зарождение

## 3 Б. Гетерогенное зарождение на готовых зародышах или затравках. Эпитаксия

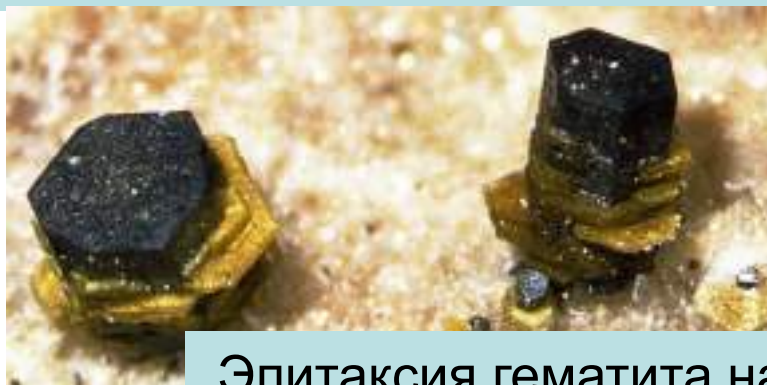
не наблюдается; б) на характер эпитаксических срастаний сильно влияет степень загрязнения (отравления) поверхности субстрата. Чем чище поверхность, тем легче происходит нарастание другого вещества.



Эпитаксия родохрозита на доломите



Эпитаксия  
натровой селитры  $\text{NaNO}_3$   
на кальците  $\text{CaCO}_3$

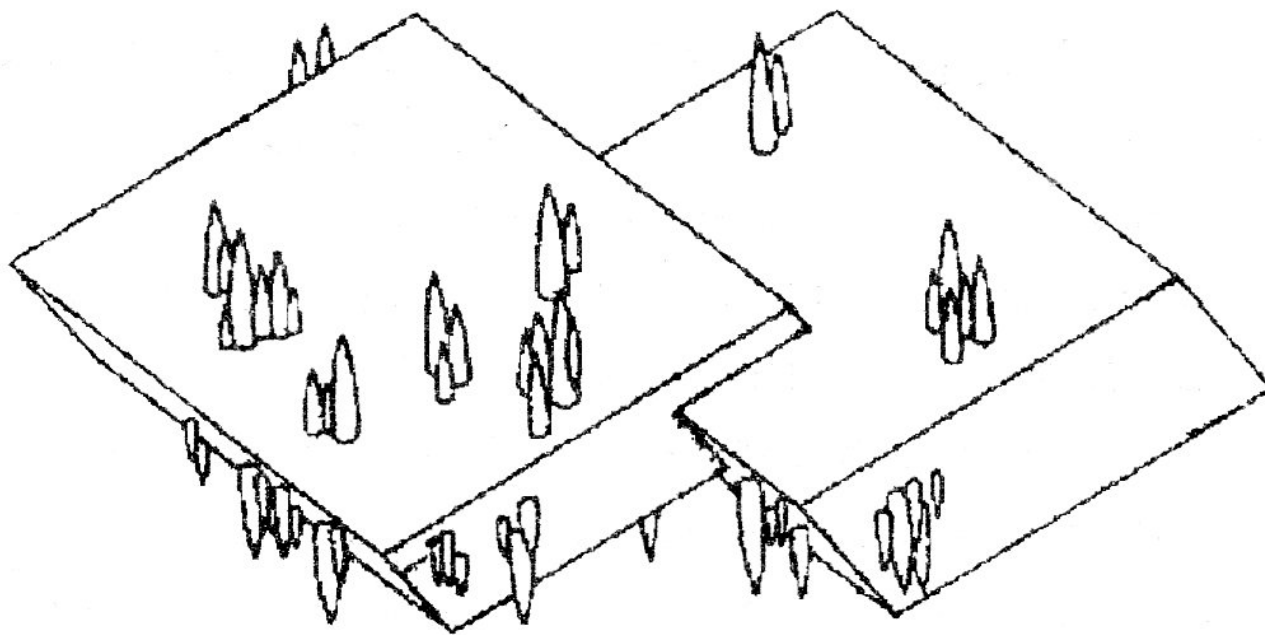


Эпитаксия гематита на корунде.  
3 мм. Emmelberg, Эйфель



# Индивиды. Рост кристаллов. Зарождение

## 3 Б. Гетерогенное зарождение на готовых зародышах или затравках. Эпитаксия кальцит - доломит

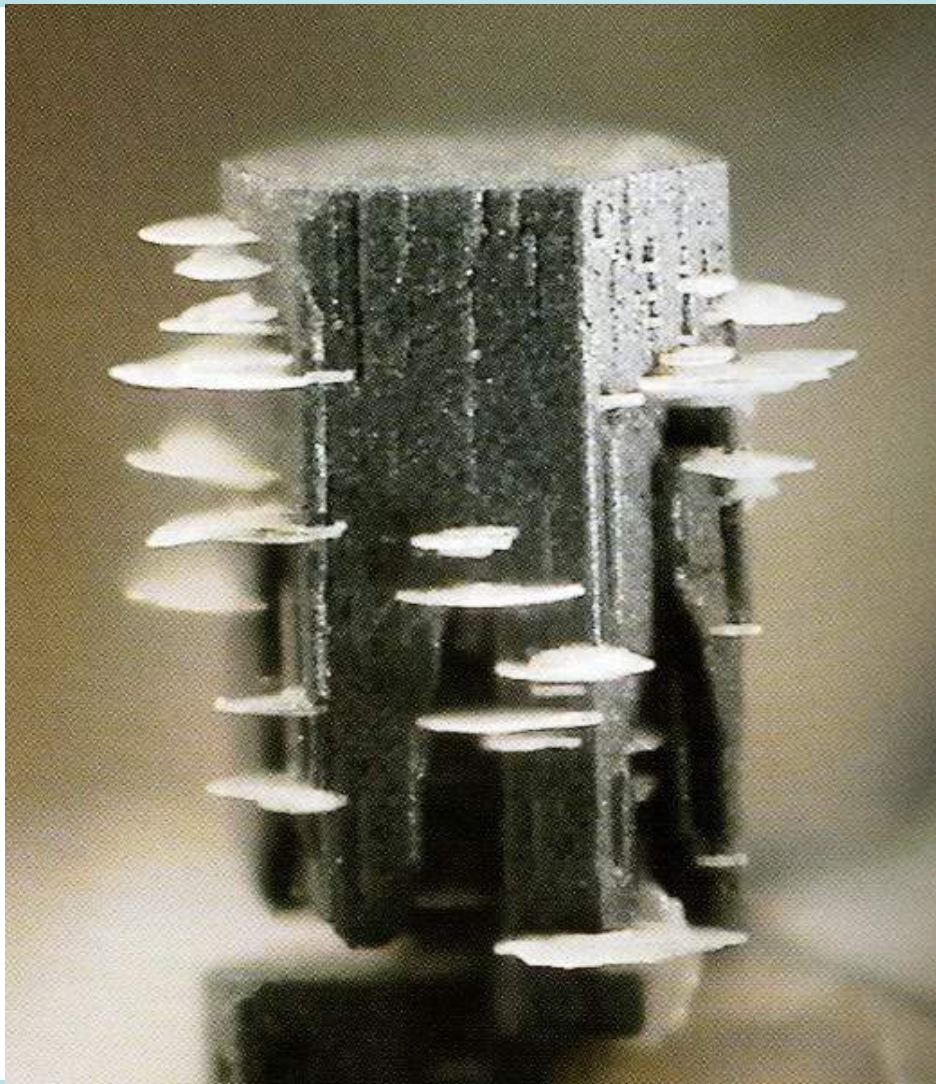


Скаленоэдры (столбушки) кальцита выросли на ромбоэдри доломита.  
30 мм. Альпийские жилы Южного Урала



# Индивиды. Рост кристаллов. Зарождение

3 Б. Гетерогенное зарождение на готовых зародышах или затравках. Эпитаксия - корунд на гематите

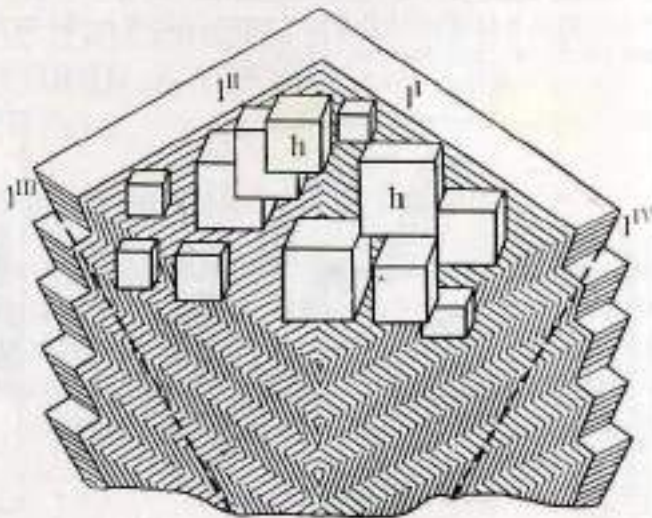


Продушины  
современных  
щелочных  
вулканитов.  
Рост из  
газовой  
фазы

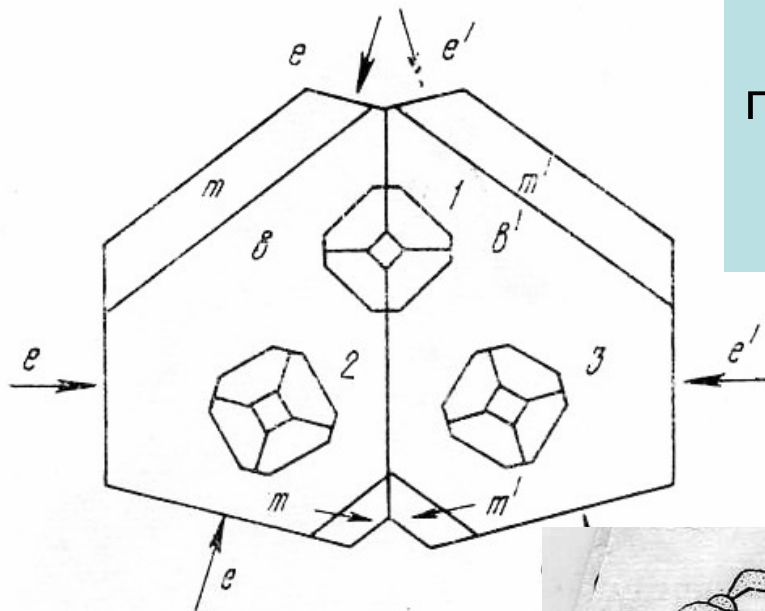
Пластинки корунда выросли на кристалл гематита. Эйфель, Германия

# Индивиды. Рост кристаллов. Зарождение

## 3 Б. Гетерогенное зарождение на готовых зародышах или затравках. Эпитаксия пирит - марказит

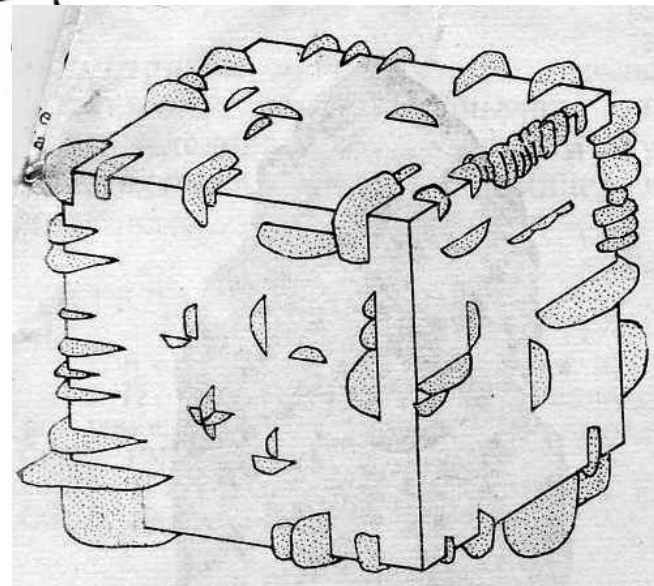


Кубы пирита выросли на Монокристалл марказита



Кубооктаэдры пирита выросли на двойник марказита

Пластины марказита выросли на кубический кристалл пирита





# Индивиды. Рост кристаллов. Зарождение

## 3 Б. Гетерогенное зарождение на готовых зародышах или затравках. Эпитаксия пирит - марказит

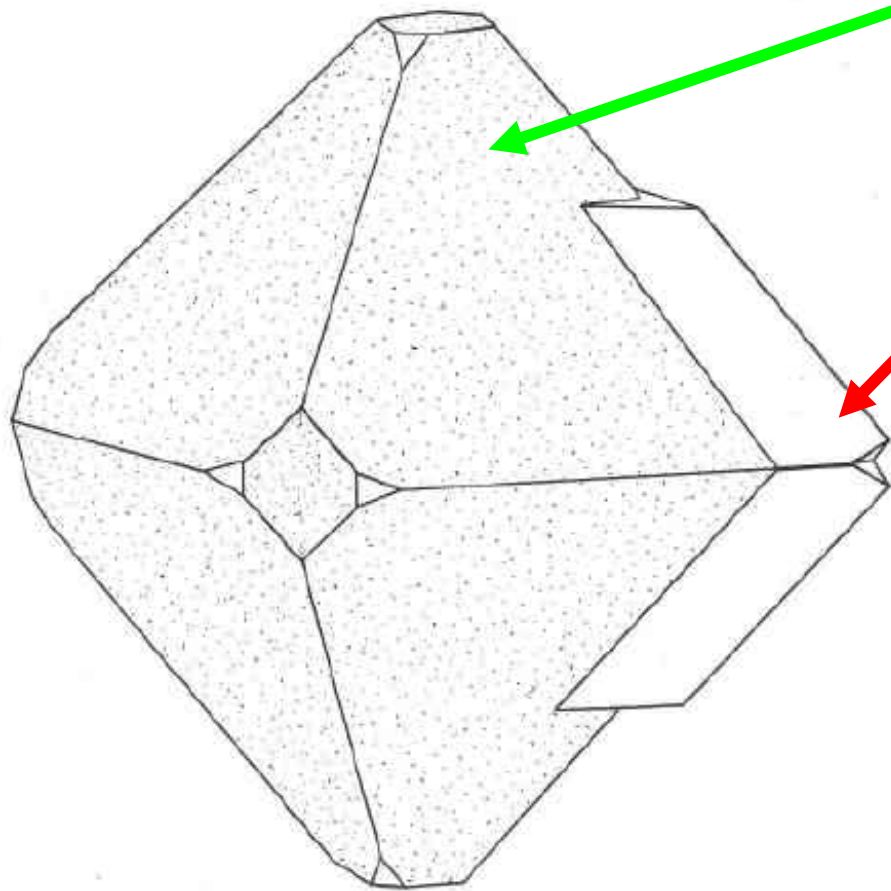
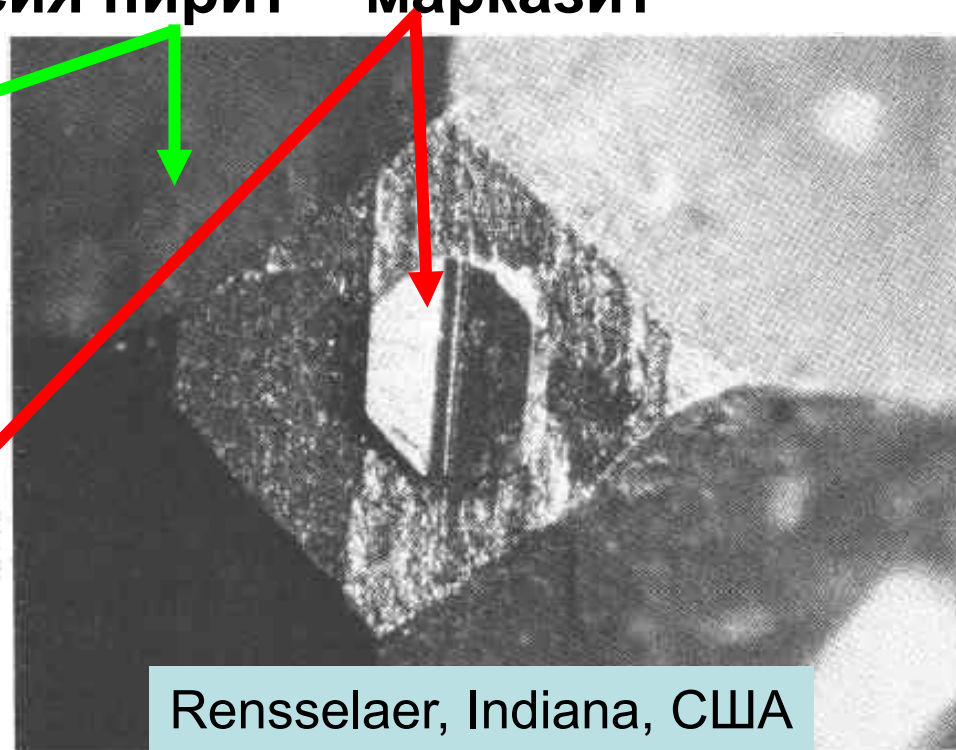


Fig. 1. Idealized mature marcasite overgrowth on octahedral pyrite (octahedra are typically about 2 cm across). The marcasite is twinned on  $\{101\}$  and the dominant form is  $\{110\}$ . Marcasite  $b$  is parallel to pyrite  $a_1$  and to striations (obscured in the drawing) on the underlying  $(010)$  face.



Rensselaer, Indiana, США

Fig. 2. Embryonic epitaxial marcasite overgrowth attached to a pyrite  $\{100\}$  face (overgrowth is approximately 0.3 mm in diameter). Composition plane of the twinned marcasite crystal is parallel to faint striations on underlying cube face. Note orientations of triangular-shaped pyritohedron faces.

Brook K.J. & Slater L.D., 1978.  
Amer. Mineral. Vol. 63. P. 210-212.

Индивиды. Рост кристаллов. Зарождение

3 Б. Гетерогенное зарождение на готовых зародышах или затравках. Эпитаксия альбита (кристаллы удлинены параллельно «с») на ортоклазе, на грани [110]



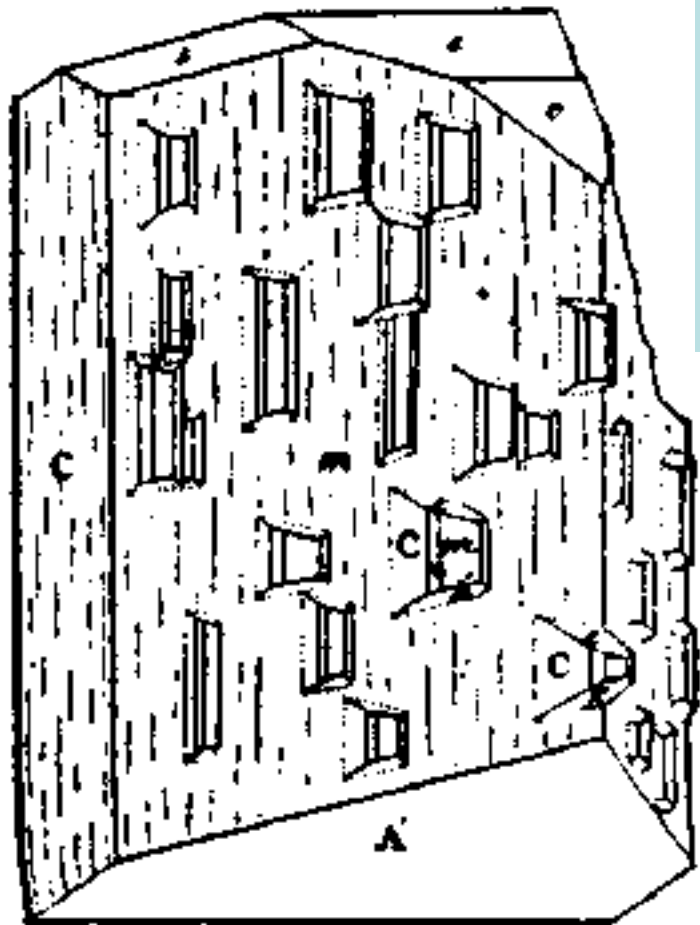
Гранитные пегматиты El Crillo, Pampean Range, Аргентина.  
Černý P. et al., 2003. *Canad. Mineral.* Vol. 41. P. 1013-1026.



# Индивиды. Рост кристаллов. Зарождение

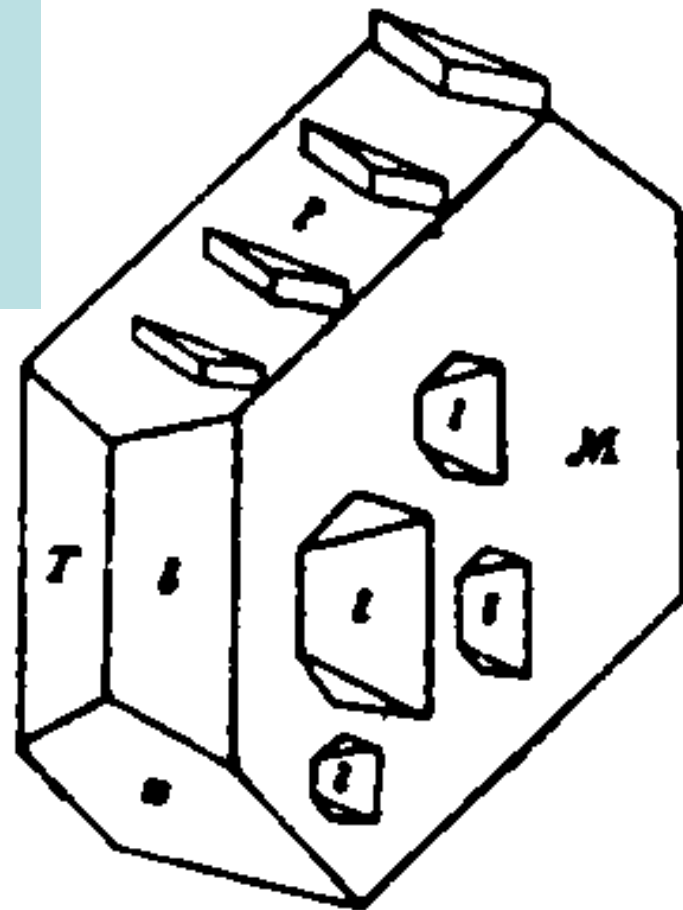
## 3 Б. Гетерогенное зарождение на готовых зародышах или затравках. Эпитаксия

Fig. 73.



Рисунки  
в книге  
V.M.  
Goldschmidt,  
1918 - 1923

Fig. 251.



Эпитаксия кристаллов альбита на монокристаллах ортоклаза

**Индивиды. Рост кристаллов. Зарождение**

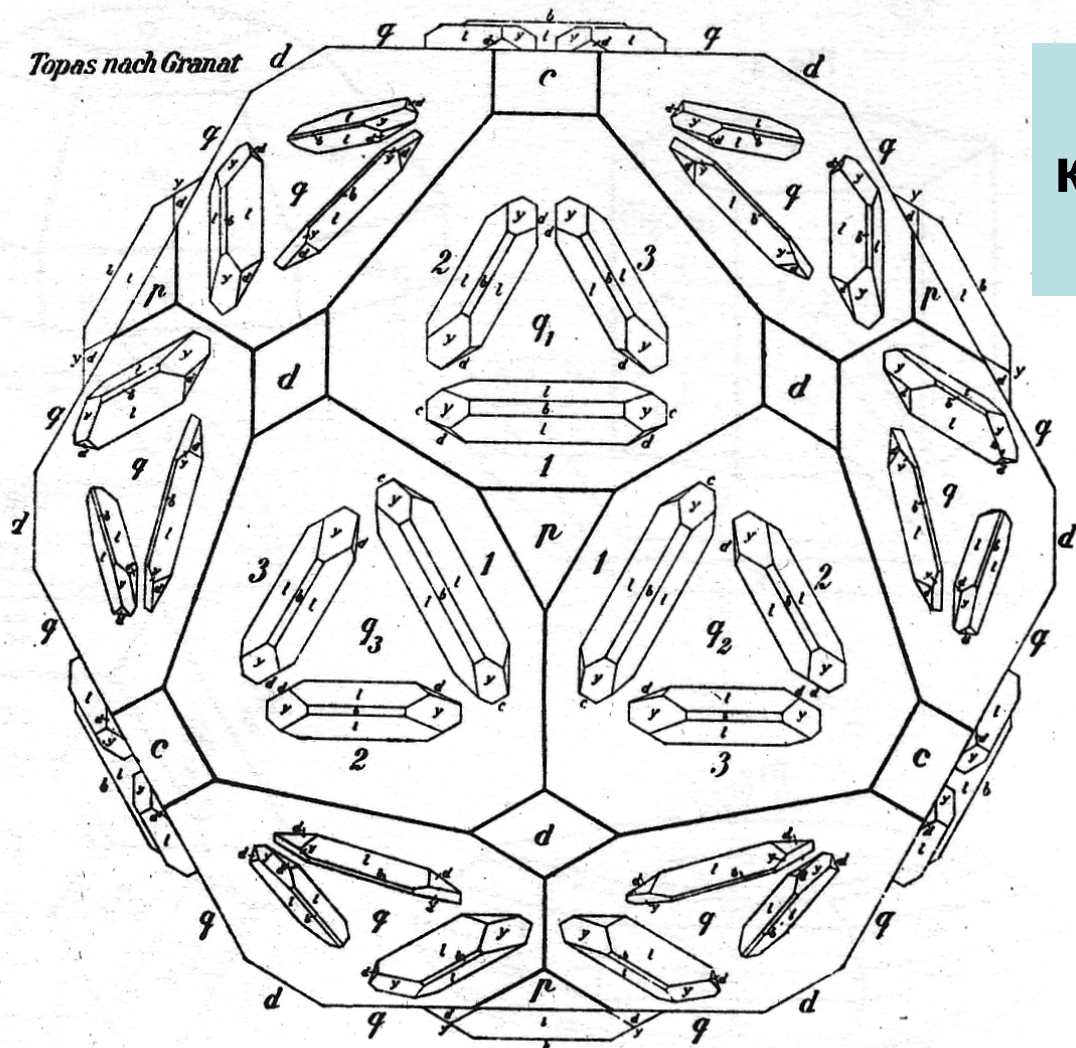
**3 Б. Гетерогенное зарождение на готовых зародышах или затравках. Эпитаксия кварца на К-На полевоом шпате**



# Индивиды. Рост кристаллов. Зарождение

## 3 Б. Гетерогенное зарождение на готовых зародышах или затравках. Эпитаксия

Fig. 94.



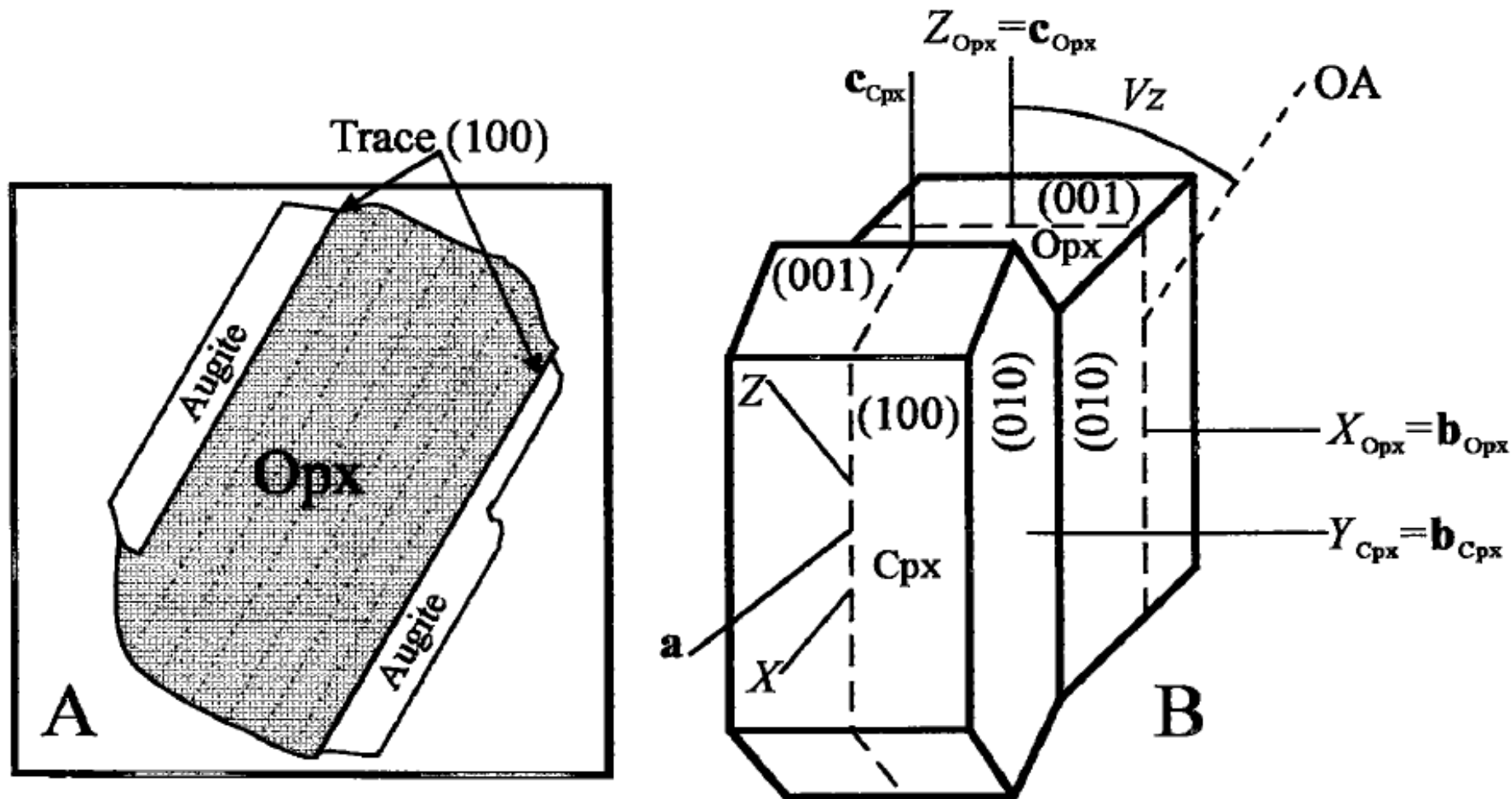
Эпитаксия  
кристаллов топаза на  
кристалле граната

Рисунок  
в книге  
V.M.  
Goldschmidt,  
1918 - 1923



# Индивиды. Рост кристаллов. Зарождение

3 Б. Гетерогенное зарождение на готовых зародышах или затравках. Эпитаксия авгита на ромбопироксене

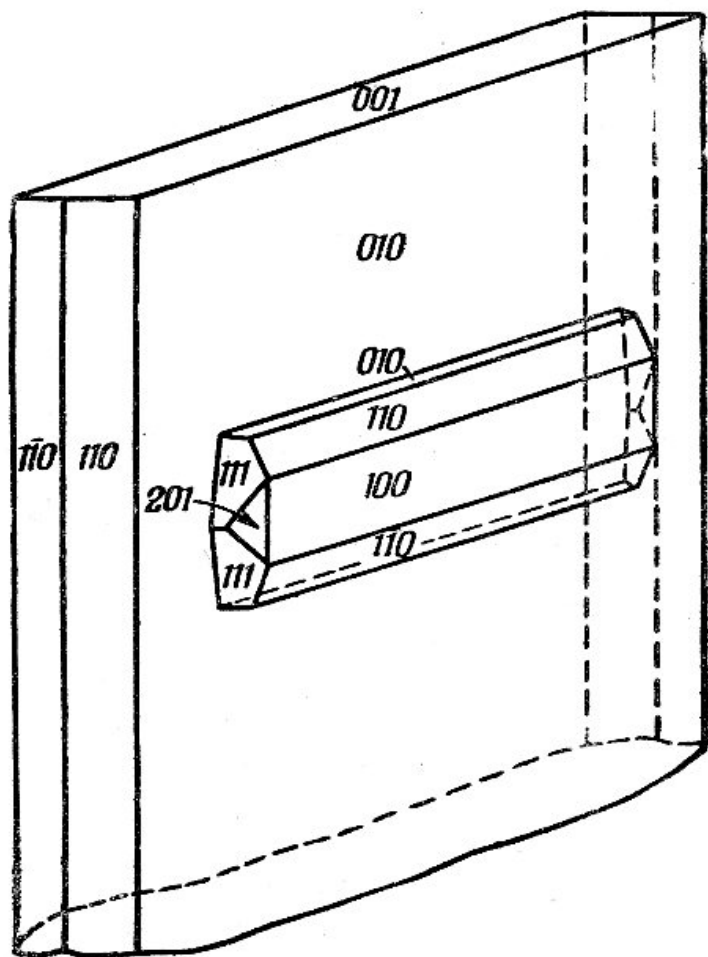


Оливиновые базальты вулкана Мауна Лоа, Гавайи. Лава 1881 года.  
Nicholls L. & Stout M.Z., 1997. Canad. Mineral. Vol. 35. P. 907-922.

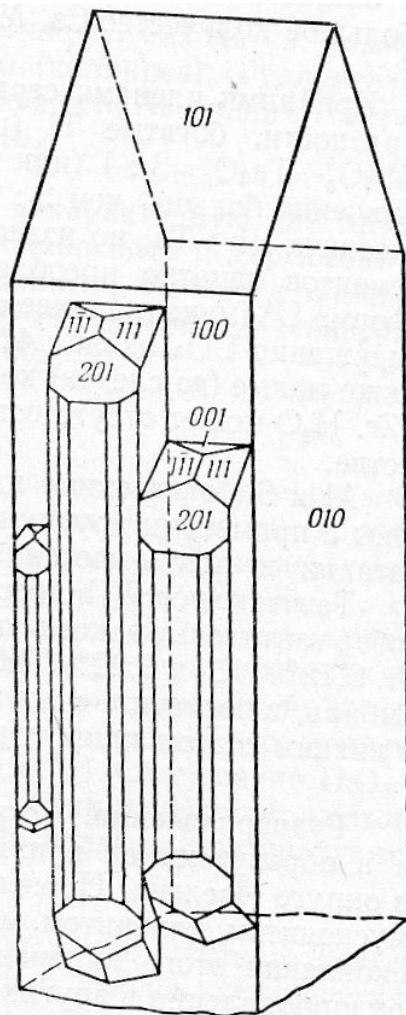


# Индивиды. Рост кристаллов. Зарождение

## 3 Б. Гетерогенное зарождение на готовых зародышах или затравках. Эпитаксия



Ф и г. 20. Ориентированный нарост поликроста на эшиците, из Хиттеро, Норвегия, по Брёггеру (Brögger, 1906).



Ф и г. 17. Ориентированный нарост колумбита на самарските, Мосс, Аннерод, Норвегия, по Брёггеру (Brögger, 1906).

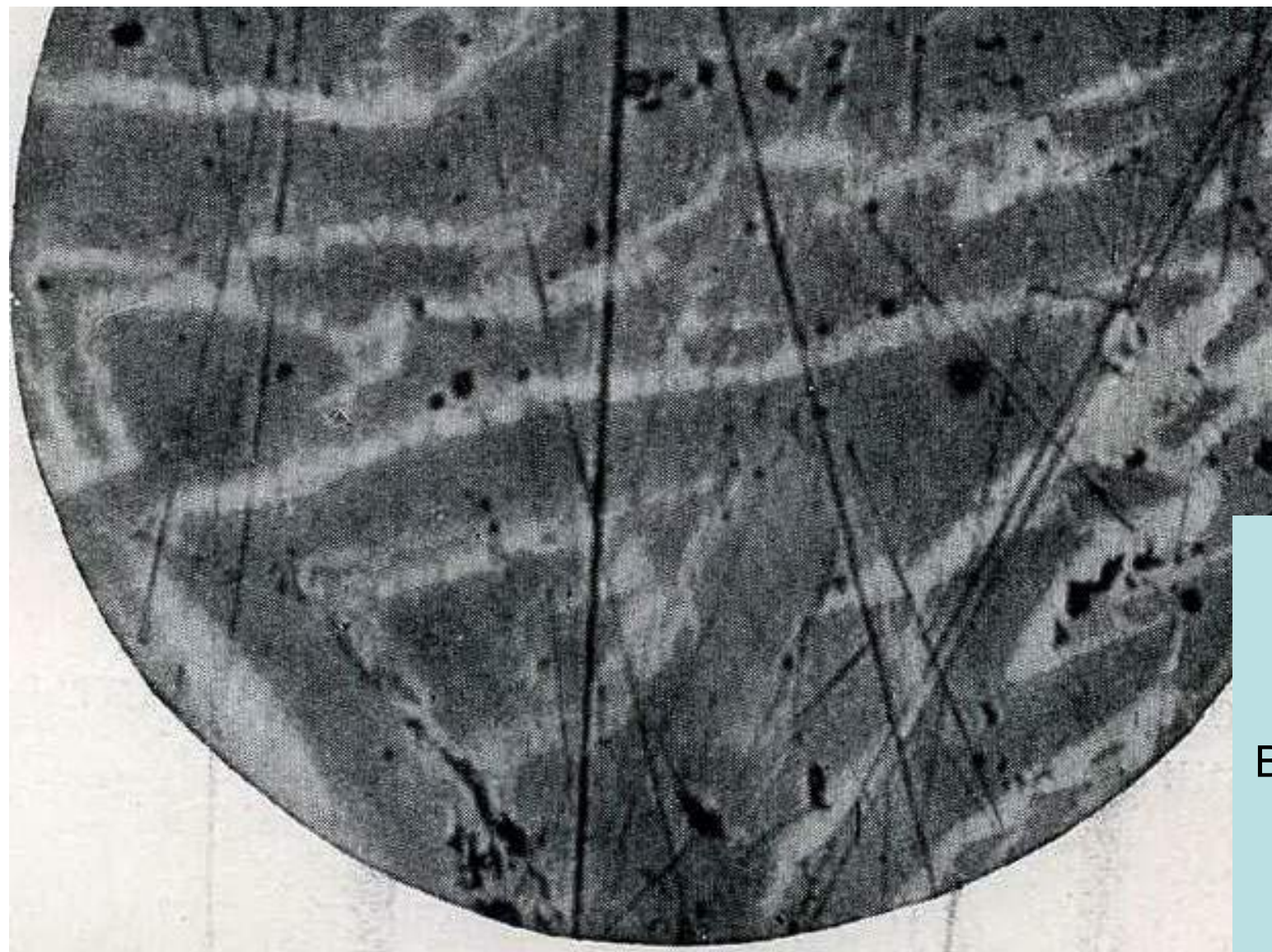


Прозрачный  
клиноцоизит вырос  
на бурый алланит  
(ортит).

Альпийские жилы.  
Швейцарские Альпы

# Индивиды. Рост кристаллов. Зарождение

## 3 Б. Гетерогенное зарождение на готовых зародышах или затравках. Эпитаксия



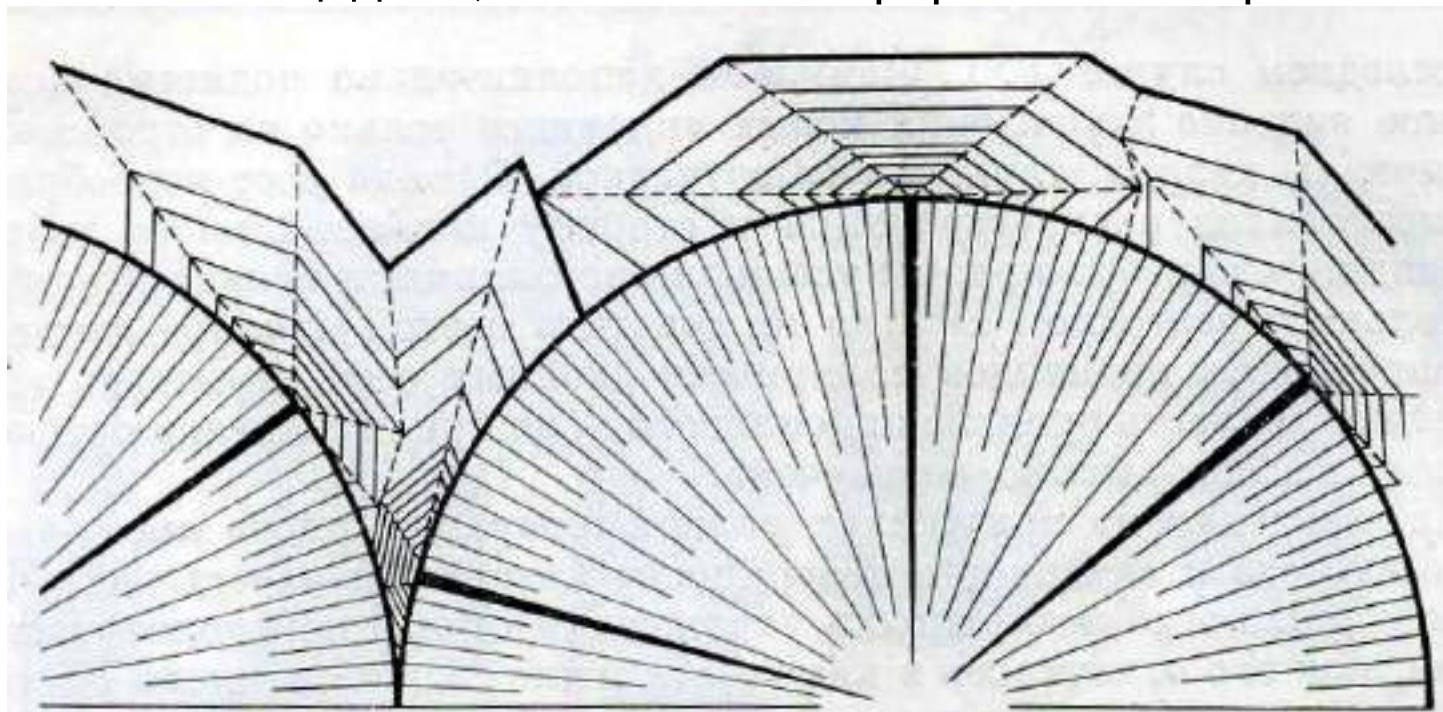
Тетраэдрит  
(серый) и  
халькопирит  
(светлый).  
В отражённом  
свете при 1  
никеле.  
Т.А. Кошкина



# Индивиды. Рост кристаллов. Зарождение

## 3 Б. Гетерогенное зарождение на готовых зародышах или затравках. Эпитаксия

О зарождении = эпитаксическом нарастании кварца на халцедон - классический пример, описанный во всех учебниках. Халцедон = тончайше волокнистый кварц образует обычно почковидные сферолиты с гладкой поверхностью. Волокна халцедона вытянуты вдоль оси 2 порядка. В структуре  $\alpha$ -кварца оси 2 порядка расположены поперек удлинения. По этой причине кристаллы кварца нарастают на халцедон  $\perp$  к удлинению волокон халцедона, т.е. лежат на сферолитах и корках халцедона.



Кварц  
«лежит»  
на  
халцедоне

# Индивиды. Рост кристаллов. Зарождение

## 3 Б. Гетерогенное зарождение на готовых зародышах или затравках. Эпитаксия

О зарождении = эпитаксиальном нарастании кварца на кварцин. Кварцин - это широко употребляемое название разновидности люссатита ( $\alpha$ -кристобалит), форма выделения которого аналогична халцедону. Кварцин довольно широко развит совместно с халцедоном в низкотемпературных агрегатах кремнезёма, в агатах. Тончайшие волокна кварцина вытянуты по [001], что совпадает с удлинением кристаллов  $\alpha$ -кварца.

Поэтому эпитаксиальные нарастания кварца расположены параллельно удлинению волокон кварцина, т.е. «стоят» на сферолитах и сферолитовых корках кварцина

Голубоватые прослои – кварцин.  
В центре – кварц. 180 мм.  
Агат Голутвина, южное  
Подмосковье





# Индивиды. Рост кристаллов. Зарождение

## 3 В. Гетерогенное зарождение на готовых затравках – на чужой подложке

Зарождение минералов на кристаллах другого минерала без определённой ориентировки с образованием незакономерных срастаний в природе распространено наиболее широко. Но даже в случае отсутствия ориентирующего воздействия кристаллической структуры субстрата на зарождающиеся индивиды, эти последние могут самоориентироваться на поверхности. Такое полярное взаимодействие с любым, даже полиминеральным субстратом характерно для гемиморфных кристаллов, т.е. тех у которых имеются полярные оси. Так, каламин = гемиморфит прирастает к субстрату отрицательным концом оси  $[001]$ , кристаллы полевых шпатов обычно прикрепляются к основанию друз положительным концом оси  $[100]$ , кристаллы турмалина как правило ориентированы вверх отрицательным концом оси  $L_3$ , т.е. аналогичным полюсом (это тот конец кристалла, который при нагреве заряжается +, антилогичный заряжается -; при охлаждении заряды на полюсах меняются). Кристаллы флюорита, галенита, галита, сильвина в большинстве случаев прикрепляются к поверхностям гранью октаэдра  $[111]$ .

Нередко зарождение происходит вдоль дислокаций кристалла-подложки, в том числе вдоль изломов и расколов кристаллов.

Весьма распространено зарождение на присыпках – кристаллах, а нередко обломках кристаллов, упавших сверху и лежащих на верхних поверхностях растущих кристаллов. Естественно присыпки характерны для условий роста в полостях. Иногда течение раствора может «прибить» небольшие кристаллы к боковым и к нижним граням больших кристаллов.

# Индивиды. Рост кристаллов. Зарождение

## 3 В. Гетерогенное зарождение на готовых затравках – на чужой подложке

Зарождение минералов на кристаллах другого минерала без определённой ориентировки с образованием незакономерных срастаний распространено в природе наиболее широко.



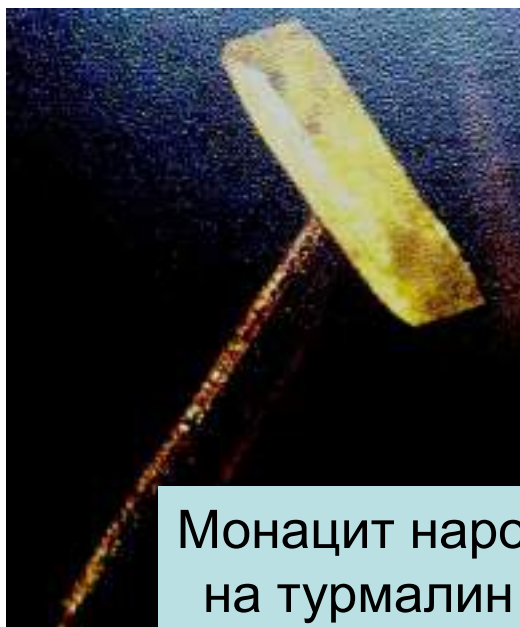
Ромбоэдры  
родохрозита  
наросли  
на агрегат  
серебра.  
38 мм.  
Учус-  
Часуа,  
Перу



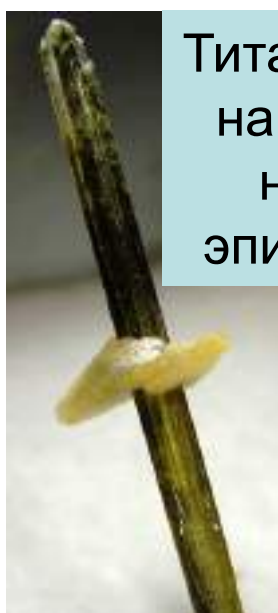
Октаэдры флюорита наросли на раухварц.  
14 мм. Valsler Tal, Швейцария

# Индивиды. Рост кристаллов. Зарождение

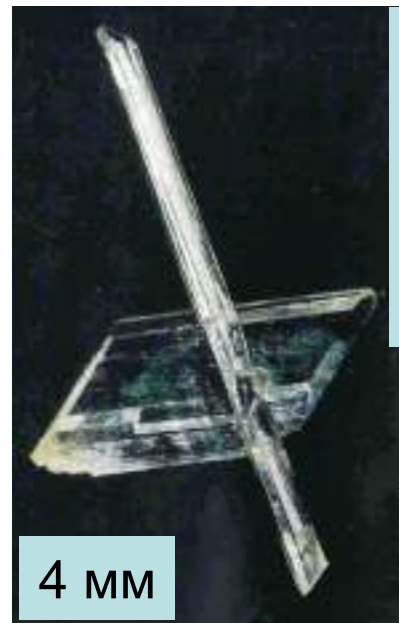
## 3 В. Гетерогенное зарождение на чужой подложке



Моначит вырос на турмалин



Титанит вырос на эпидот



4 мм

Пластинчатый кристалл гипса вырос на иглу гипса. Колорадо



40 мм

Таблитчатый кристалл барита вырос на проволочное серебро. Дзезказган, Казахстан

63 мм



Кристалл кальцита вырос на агрегат доломита. Shangbao, пров. Хунань, Китай



# Индивиды. Рост кристаллов. Зарождение

## 3 В. Гетерогенное зарождение на чужой подложке

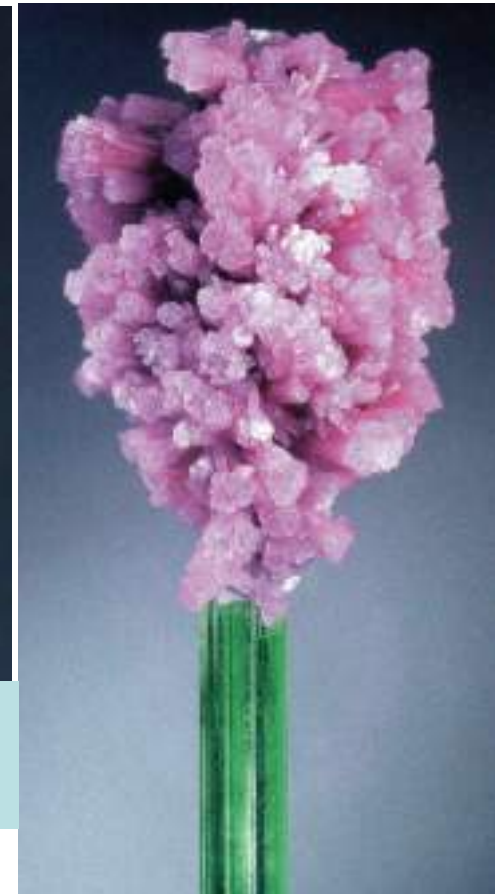


Пластины гематита  
наросли на корку  
кристаллов кварца

Wilkes County,  
Джорджия, США

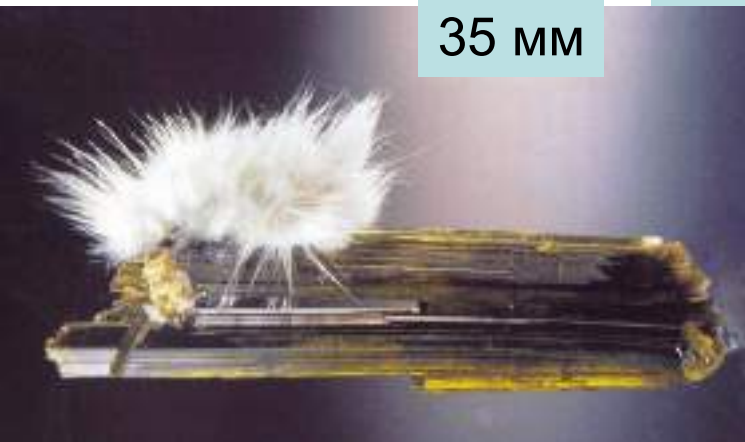


Кристаллы аметиста наросли  
на агрегат кварца



Агрегат кристаллов  
лепидолита  
нарос  
на кристалл  
зелёного эльбаита

35 мм



Игольчатые  
кристаллы  
тремолита  
наросли на эпидот.  
Монблан,  
Швейцария



# Индивиды. Рост кристаллов. Зарождение

## 3 В. Гетерогенное зарождение на чужой подложке



Кристаллы сфалерита и кальцита выросли на кристалл галенита.  
Мадан, Болгария. Фото Н.Н. Жукова

# Индивиды. Рост кристаллов. Зарождение 3 В. Гетерогенное зарождение на чужой подложке



Тонкопластинчатые кристаллы  
барита  
наросли на призму авгита. 1 мм



Кристаллы филлипсита и красного  
сметита наросли на иглы авгита. 4 мм

**Graulai, Эйфель, Германия**



**Индивиды. Рост кристаллов. Зарождение  
3 Г. Гетерогенное зарождение на чужой подложке.  
Присыпки кальцита на кристаллах кварца.  
Мадан, Родопы, Болгария**

Колл. музея  
«Земля и люди», София



Фото  
Н.Н. Жукова



# Индивиды. Рост кристаллов. Зарождение

## 3 Г. Гетерогенное зарождение на чужой подложке.

### Присыпки



Присыпки кварца на кварце



Присыпки  
халькопирита  
на кварце



# Индивиды. Рост кристаллов. Зарождение

## 3 Г. Гетерогенное зарождение на чужой подложке.

### Присыпки

Присыпки флюорита на кристаллах кварца.  
Piaotang, Китай



Присыпки анатаза на горном хрустале. 24 мм. Val Bedretto, Тессин

# Индивиды. Рост кристаллов. Зарождение 3 Г. Гетерогенное зарождение на чужой подложке. Присыпки

155  
мм

Колл.  
Т.Ф. Фаттыхова.  
Фото ЭМС



Присыпки – шапочки кальцита  
на хромистом амезите.  
Сарановское, Западный Урал



# Индивиды. Рост кристаллов. Зарождение

3 Г. Гетерогенное зарождение на чужой подложке.  
Друза кварца с двух сторон. Мадан, Родопы, Болгария

Присыпки кварца на кварце



Колл. музея «Земля и люди», София. Фото Н.Н. Жукова

# Индивиды. Рост кристаллов. Зарождение З Г. Гетерогенное зарождение на чужой подложке. Присыпки

Присыпки куприта  
на куприте



50  
мм

Рубцовское,  
Алтай



Присыпки  
клинохлора на  
титаните.  
Альпийские жилы



# Индивиды. Рост кристаллов. Зарождение

## 3 Г. Гетерогенное зарождение на чужой подложке.

### Присыпки



Присыпки клинохлора  
на сиреновом ангидрите.  
Альпийская жила.  
Тоннель под  
перевалом  
Сен-Готтард.  
Швейцария

Иногда количество присыпок  
так велико, что они полностью  
отравляют отдельные участки  
граней или целые грани  
кристаллов. Дальнейший рост  
таких участков кристалла  
прекращается. В результате,  
кристалл может приобрести  
весьма своеобразные формы

**Индивиды. Рост кристаллов. Зарождение  
3 Д. Гетерогенное зарождение на чужой подложке  
- на пузырьках газа - водяного пара и метана в  
растворе**



Самородок теллура длиной 40 мм. Trinity County, California





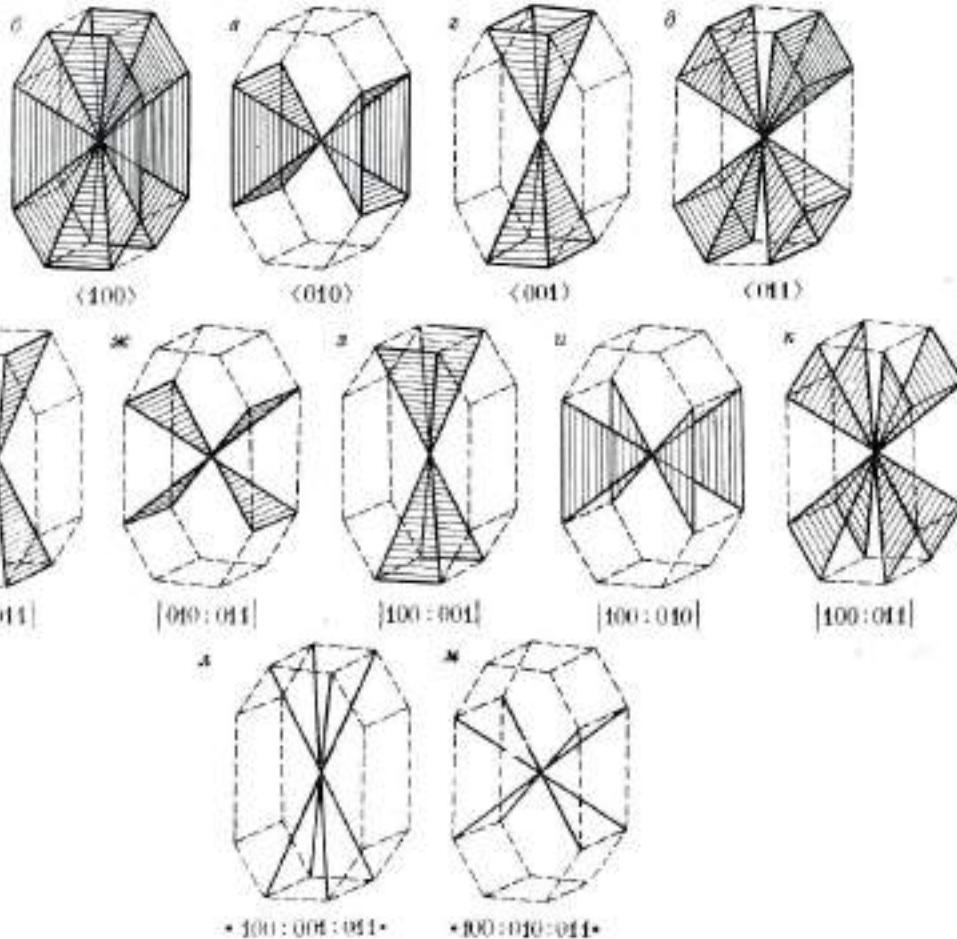
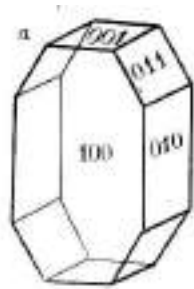




Жарки. Улуг-Танзек, Тува



# Элементы строения кристаллов



Кристаллы образуют пирамиды роста граней, плоскости роста рёбер, линии роста вершин.

Часто кристаллы растут из микроскопического размера зародышей, так называемых критических зародышей, обладающих той же кристаллической структурой, что и макрокристаллы.

Макрокристаллы возникают путём разрастания этих зародышей, при воспроизводстве, редупликации кристаллической структуры данного минерала.

**Э.М. Спиридонов**

**Генетическая минералогия.**

**ГМ-1. Онтогения. Индивиды**

**Рост кристаллов**

**003. Анатомия индивида.**

Реальные поверхности  
растущих кристаллов.

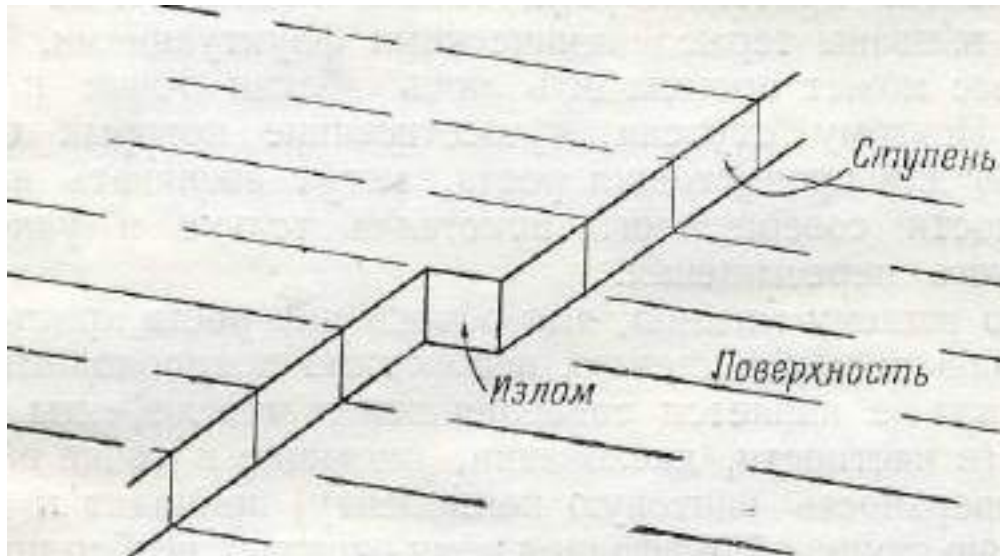
Слои, вицинали, спирали,  
штриховки роста

# Анатомия индивида.

## Реальные поверхности растущих кристаллов

Весь объём кристалла был когда-то на его поверхности. Поэтому изучение анатомии кристалла - источник информации о его генезисе.

Начнём с поверхности растущих кристаллов. При толщине нарастающего слоя = размеру атомов или молекул грань должна выглядеть идеально гладкой, ступени на ней - субмикроскопические. На самом деле, на гранях часто развит грубый рельеф – слои роста, весьма часто развиты бугорки роста – вицинали, спиралевидные скульптуры, разнообразные штриховки.



Ступени и изломы  
на поверхности  
кристалла



# Анатомия индивида.

## Реальные поверхности растущих кристаллов

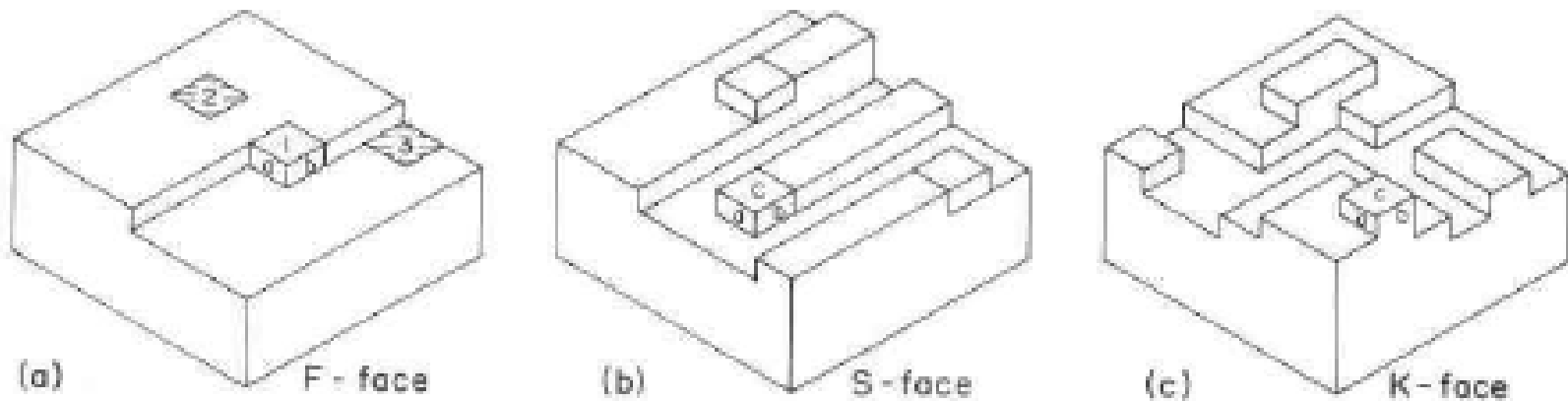
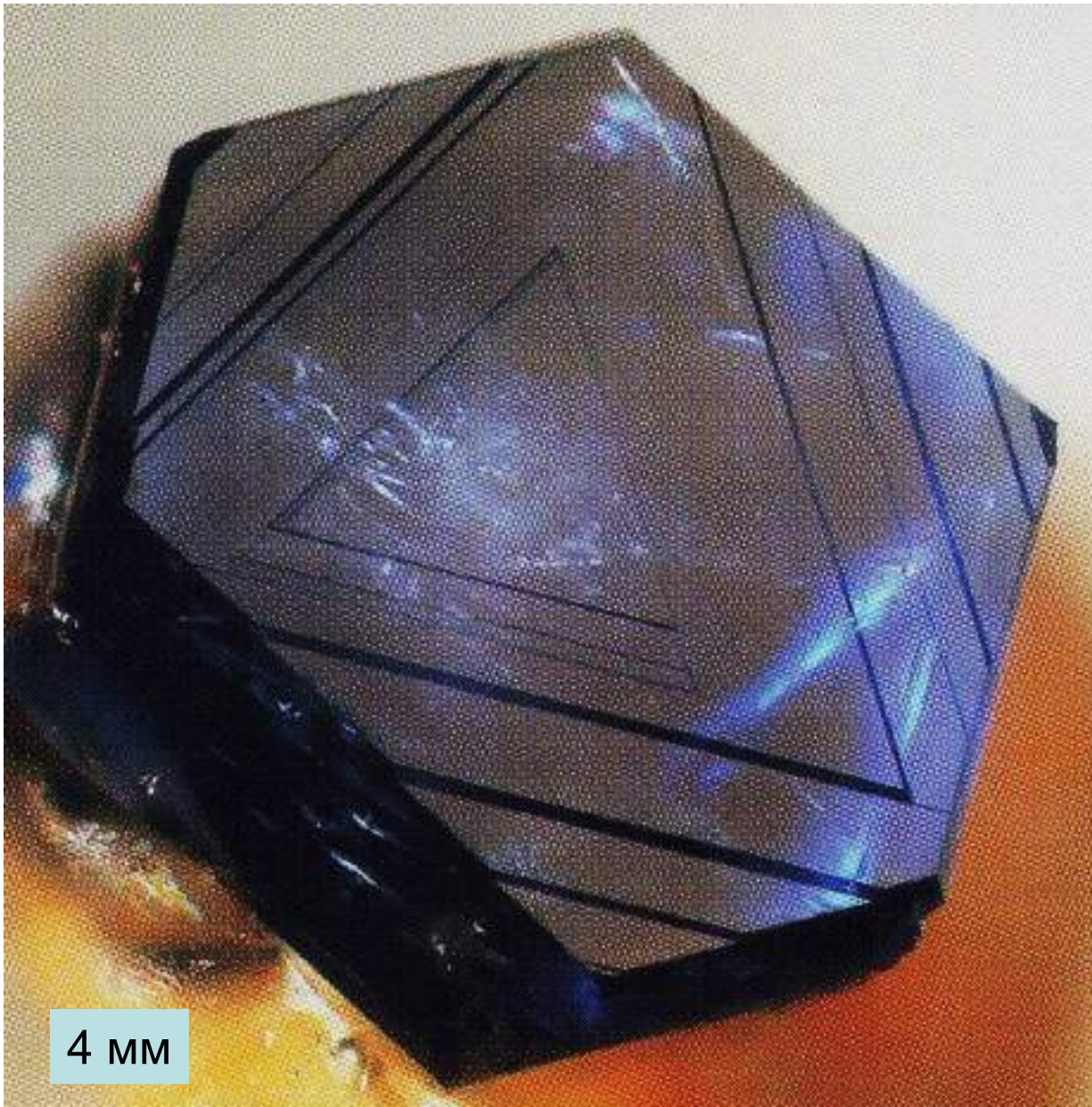


FIG. 1. Growth on different types of faces (schematic). (a) On the flat face, the template fraction for the main face is much smaller than that for the secondary faces *a* and *b*. The side face *a* has larger template fraction than *b*, yielding rows approximately perpendicular to *a*. (b) On the stepped face, the template fraction of the main face *c* is in between that of *a* and *b*, leading to the starting of new rows before layers are completed. (c) On the kinked face, the template fraction of the main face is larger than either *a* or *b*.

Ступени на различных типах граней кристалла  
Dowth E., 1976. Amer. Mineral. Vol. 61. P. 445-459

# Анатомия индивида. Реальные поверхности растущих кристаллов



4 мм

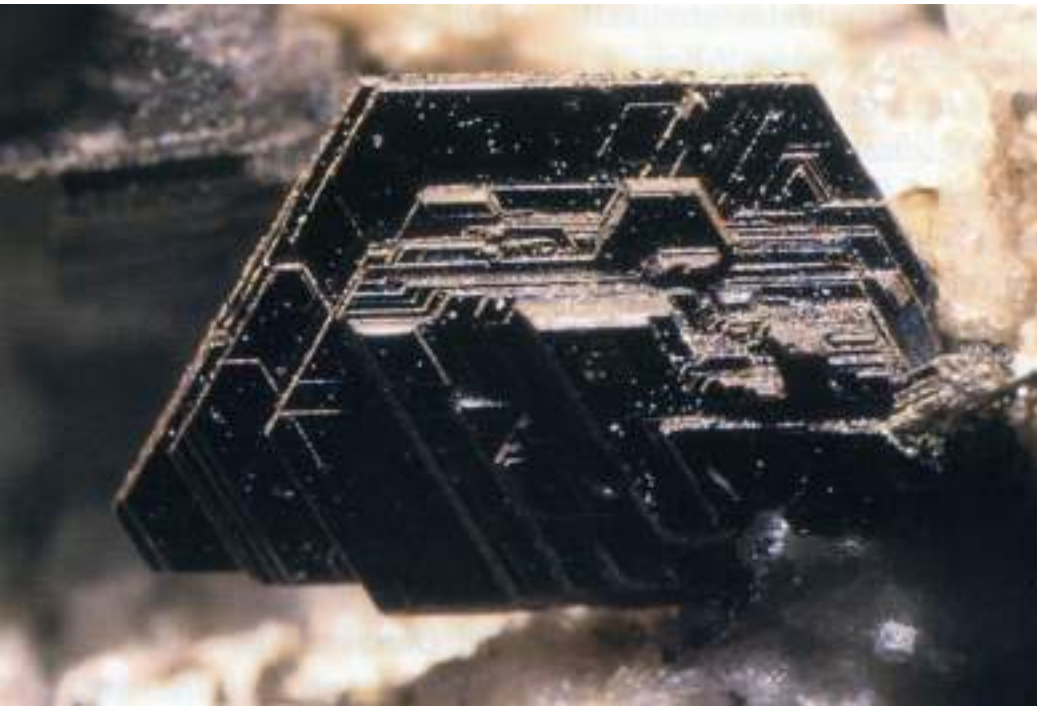
Слои роста на  
кристаллах  
свободного роста

Кристалл  
сапфира.  
Эйфель,  
Германия

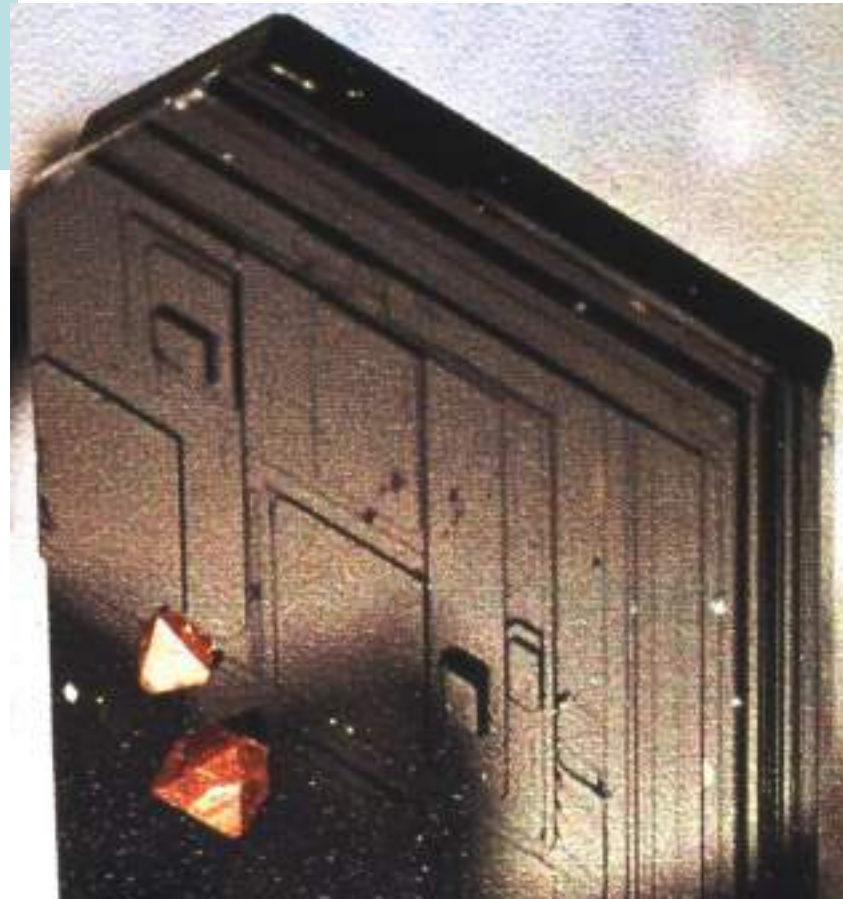
# Анатомия индивида.

## Реальные поверхности растущих кристаллов

Слои роста на кристаллах  
свободного роста



Биотит. 4.2 мм.  
Эйфель



Слои роста на кристалле  
биотита. Присыпки  
- октаэдры пирохлора.  
Лаахер, Эйфель,  
Германия



# Анатомия индивида.

## Реальные поверхности растущих кристаллов

Слои роста на кристаллах  
свободного роста

Слои роста на кристалле  
псевдобрукита.

2 мм.

Emmelberg, Эйфель,  
Германия



# Анатомия индивида. Реальные поверхности растущих кристаллов

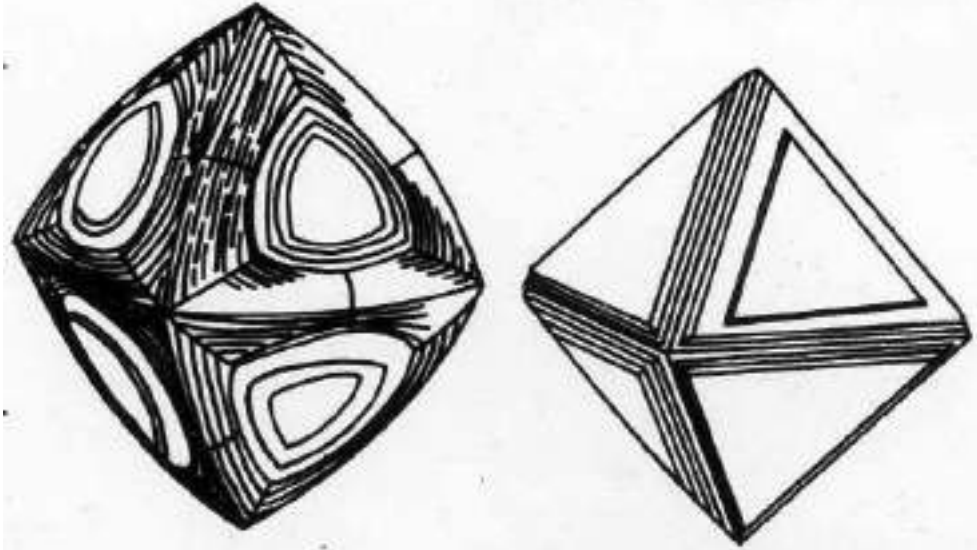
Слои роста на  
кристаллах  
галенита.  
Мадан, Болгария

Колл. музея «Земля и люди»,  
София. Фото ЭМС и Н.Н.  
Жукова



## Реальные поверхности растущих кристаллов

Слои роста  
на кристаллах алмаза



Алмаз 0.1 мм. Архангельск

Не полные слои роста на грани кристалла синтетического алмаза 1 мм. РЭМ фото



# Анатомия индивида.

## Реальные поверхности растущих кристаллов

Слои роста на кристаллах алмаза.

Рисунки А.Е. Ферсмана

Fig. 96.

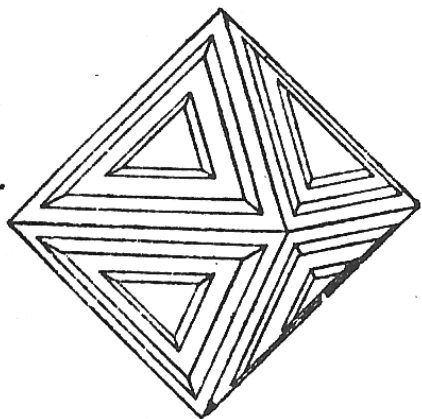
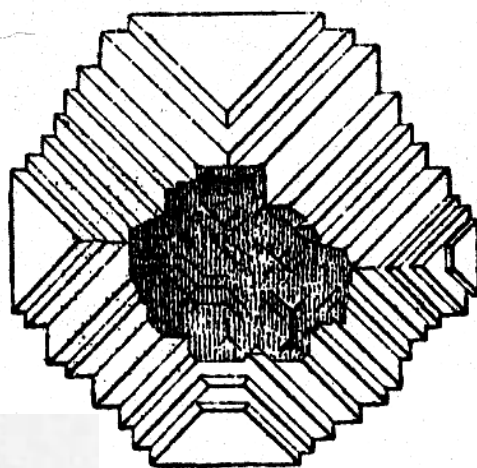


Fig. 197.



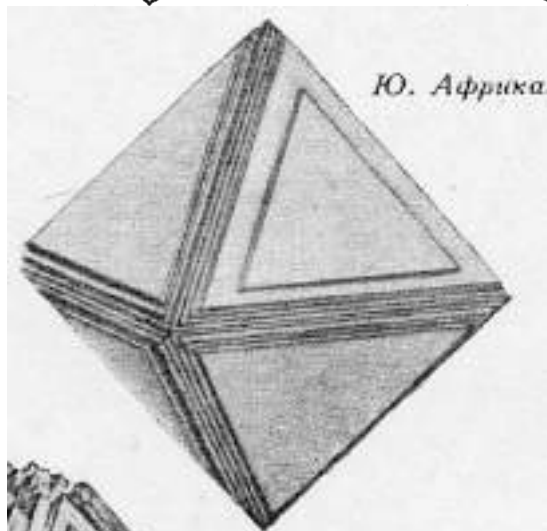
Fersmann A. & Goldsmidt V.

Der Diamant. Atlas.

Carl Winter: Heidelberg.

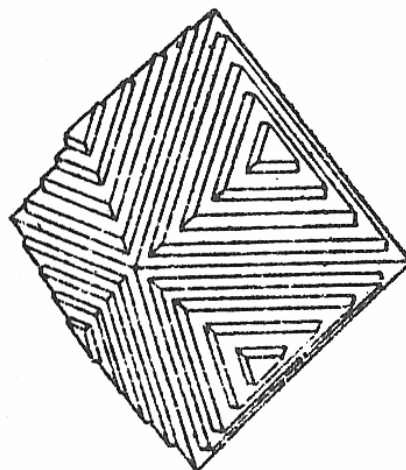
1911. 274 s.

Ю. Африка.

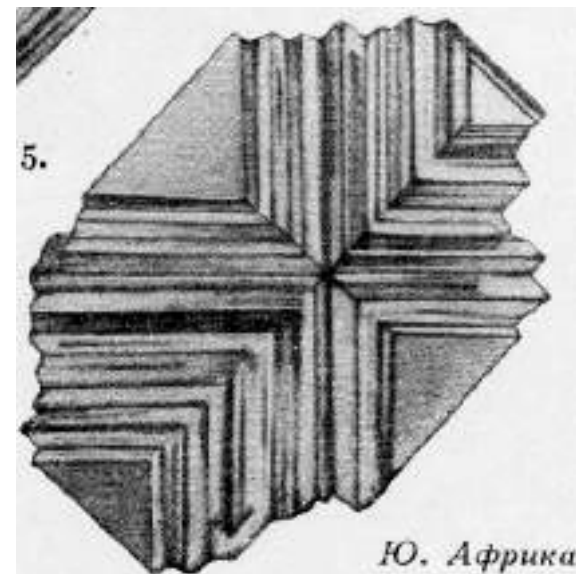


Фиг. 36. Крист. 5.

31.



5.



Фиг. 39. Крист. 10.

# Анатомия индивида.

## Реальные поверхности растущих кристаллов

Слои роста на кристаллах флюорита



Rogerley mine, Англия

2 мм



Piaotang,  
южный Китай



# Анатомия индивида.

## Реальные поверхности растущих кристаллов

Слои роста

50x35

мм



Гематит. Mina Casa de Pedra,  
Congonhas do Campo, Минас Жераис

Fig. 689.

Пирит

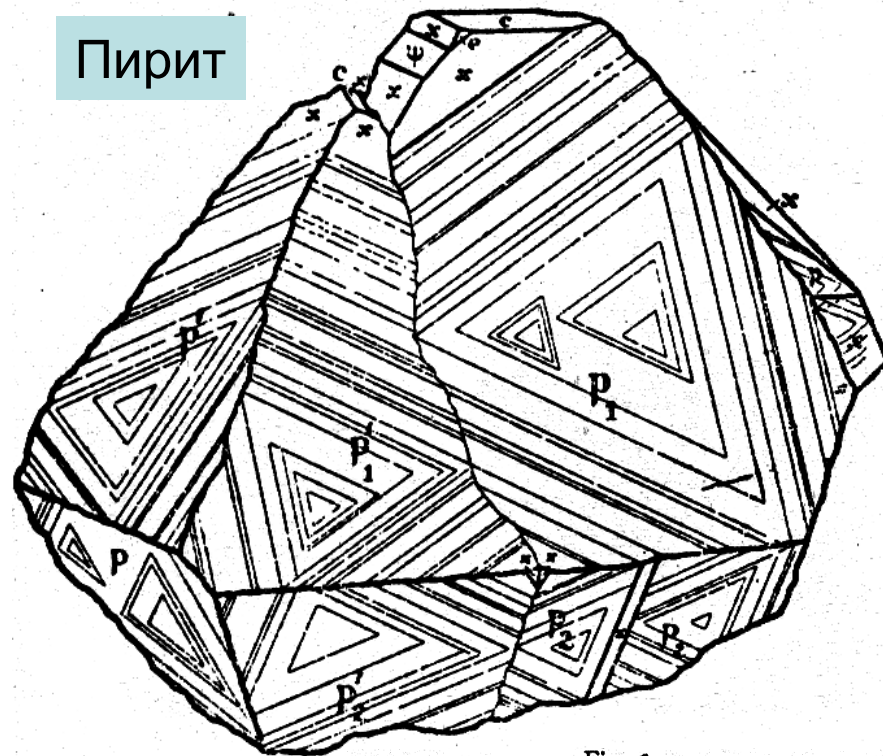
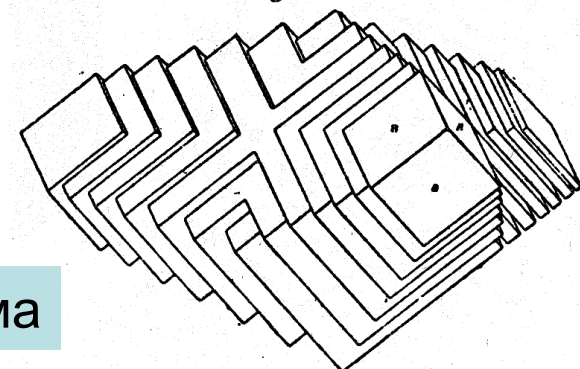


Fig. 6.



Сурьма

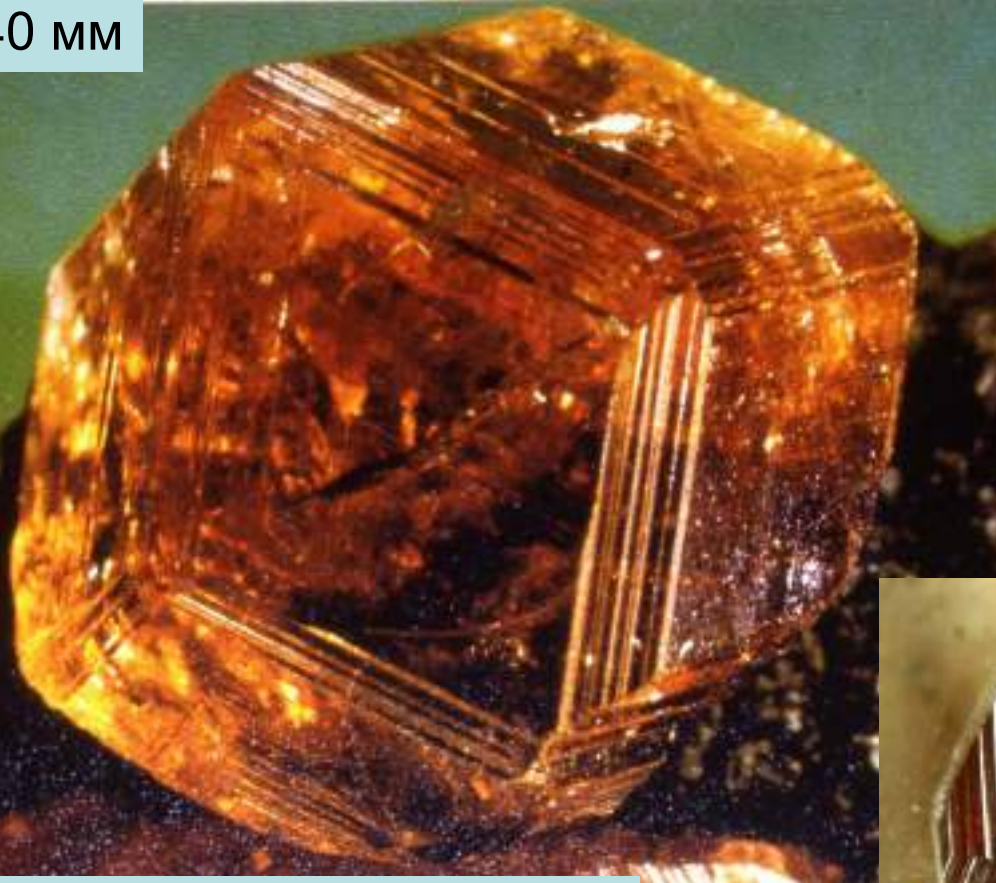


# Анатомия индивида.

## Реальные поверхности растущих кристаллов

### Слои роста

40 мм



Гроссуляр в родингитах.  
Asbestos, Ontario, Канада

21 мм



Апатит.  
Piccolo  
Monte Bia



Спессартин в гранит. пегматитах

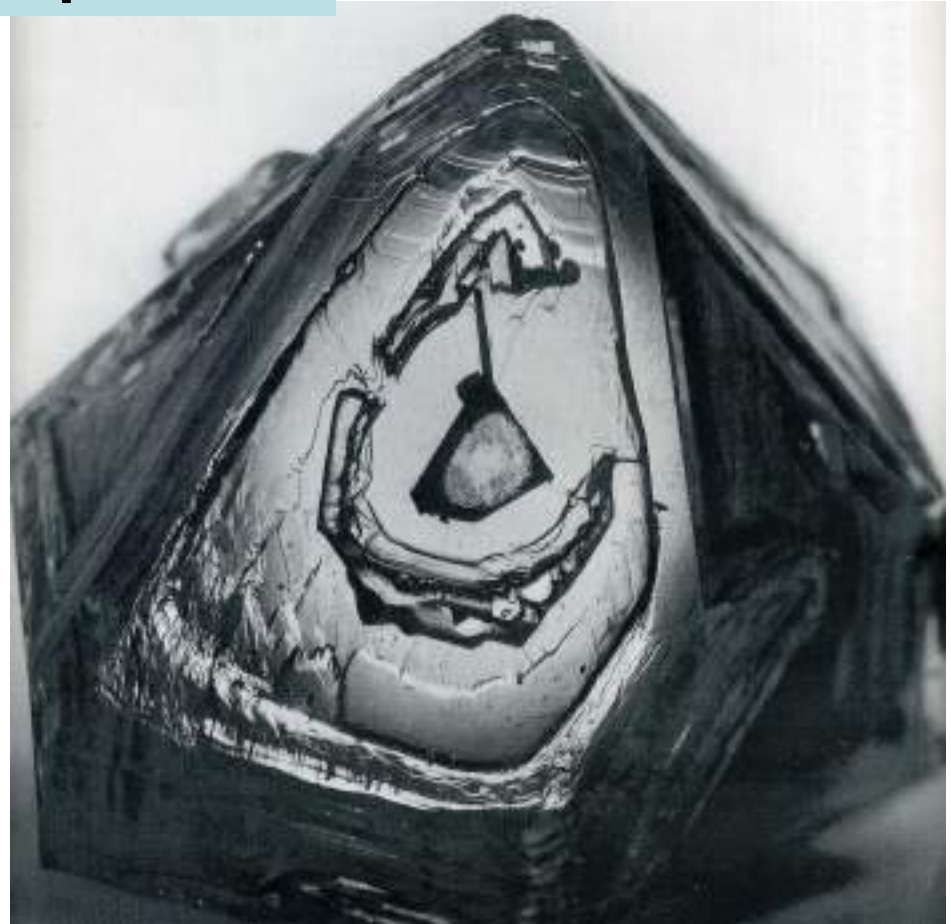


Криолит

# Анатомия индивида.

## Реальные поверхности растущих кристаллов

Слои роста



Неполные слои роста на грани ромбоэдра кристаллов кварца - аметиста

# **Анатомия индивида.**

## **Реальные поверхности растущих кристаллов**

### **Вицинали роста на гранях кристаллов.**

Вицинали роста – это наросты (выросты) на гранях кристаллов. Форма вициналей разнообразна и зависит прежде всего от того, на какой грани выросли эти вицинали, от структуры минерала и безусловно, от условий роста кристалла.

Вершины вициналей удлинённой формы обычно ориентированы на вершину данного кристалла. Форма вициналей может заметно изменяться в процессе их роста.

Размеры вициналей варьируют от микроскопических до весьма крупных. На метровых кристаллах кварца из альпийских жил размер отдельных вициналей треугольной формы на гранях ромбоэдра достигает 150 мм в длину.

Нередко на гранях кристаллов развиты вицинали нескольких зарождений.

От вициналей наблюдаются постепенные переходы к спиральям и к террасам роста на гранях кристаллов.

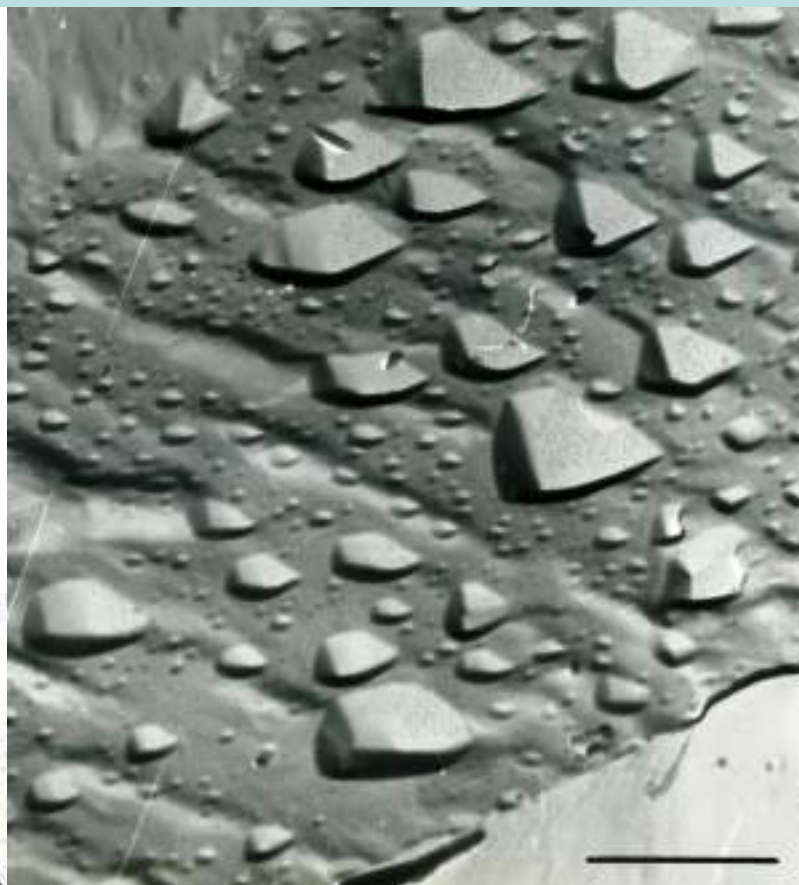


# Анатомия индивида.

## Реальные поверхности растущих кристаллов

### Вицинали роста на поверхности кристаллов

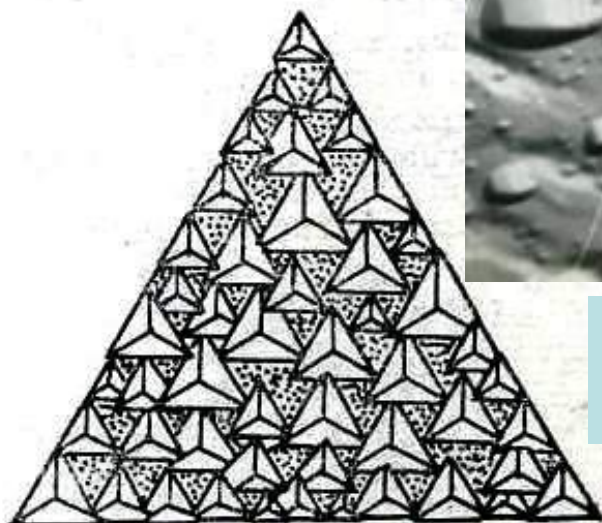
на грани  
пинакоида  
кальцита



арсенопирита.  
Длина линейки 1 микрон



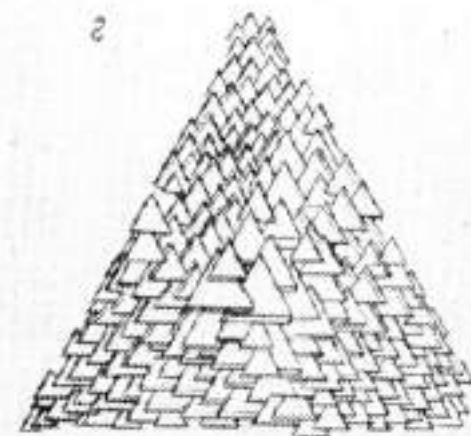
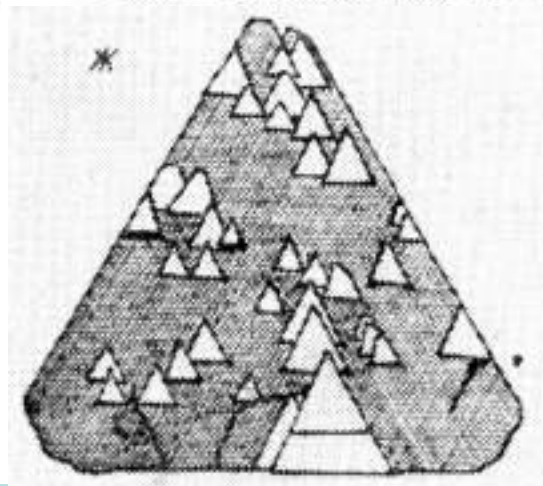
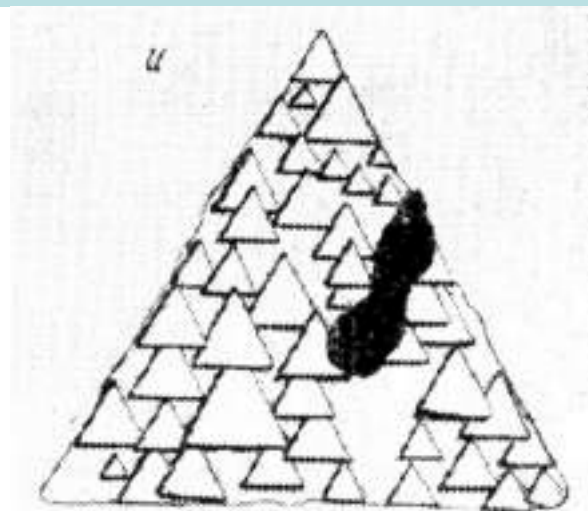
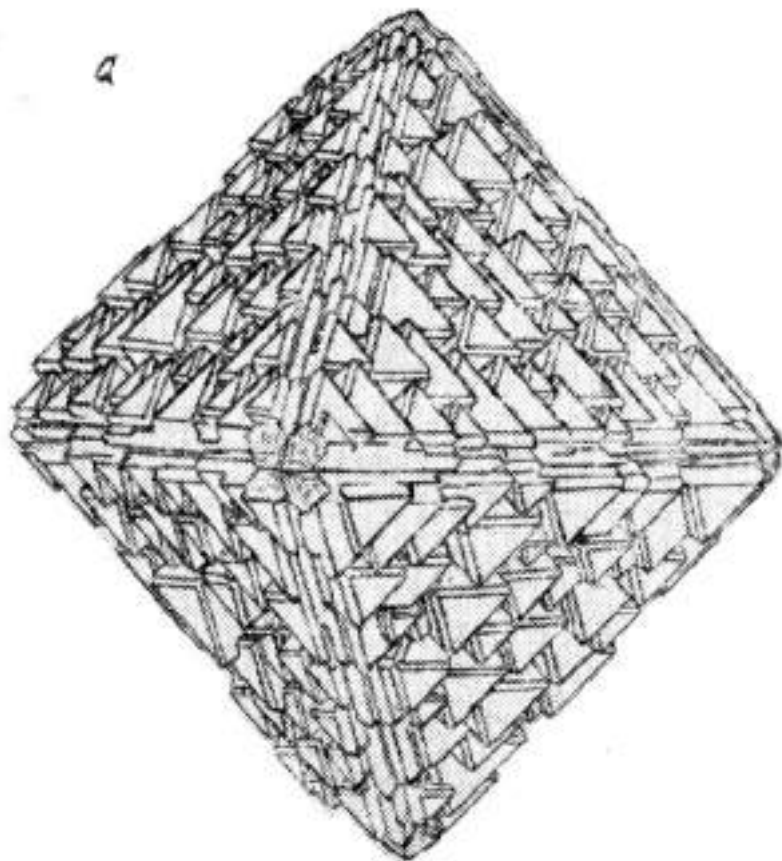
сподумена



# Анатомия индивида.

## Реальные поверхности растущих кристаллов

### Вицинали роста на поверхности кристаллов



на гранях  
октаэдра  
магнетита

Коршуновское скарновое месторождение.

. Дымкин, А.А. Пермяков «Онтогения магнетита». 1984



# Анатомия индивида.

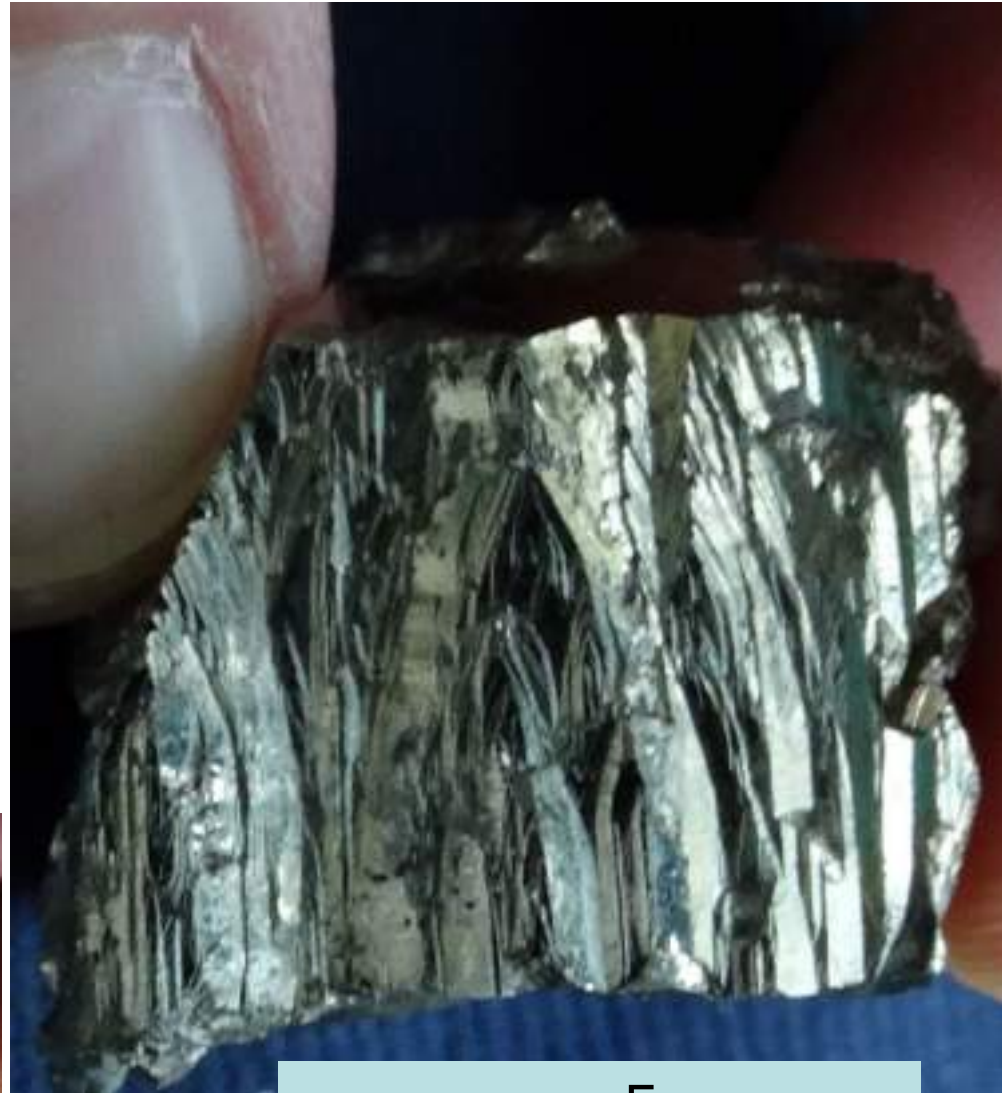
## Реальные поверхности растущих кристаллов

### Вицинали роста на поверхности кристаллов пирита

21 мм



из аргиллизитов Испании



из скарнов Болгарии



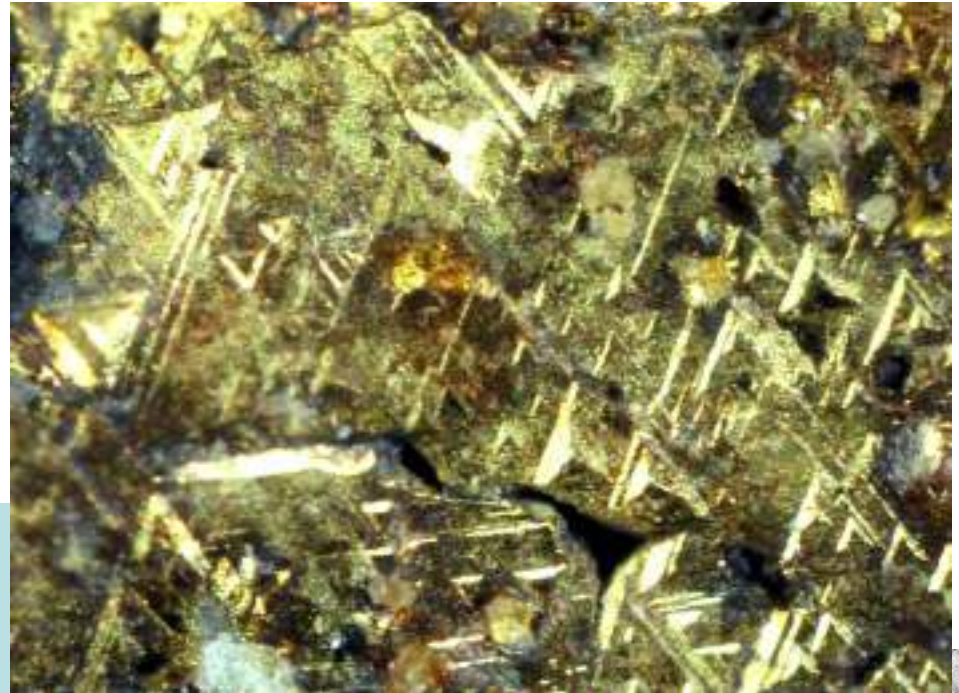
# Анатомия индивида.

## Реальные поверхности растущих кристаллов

### Вицинали роста на поверхности кристаллов



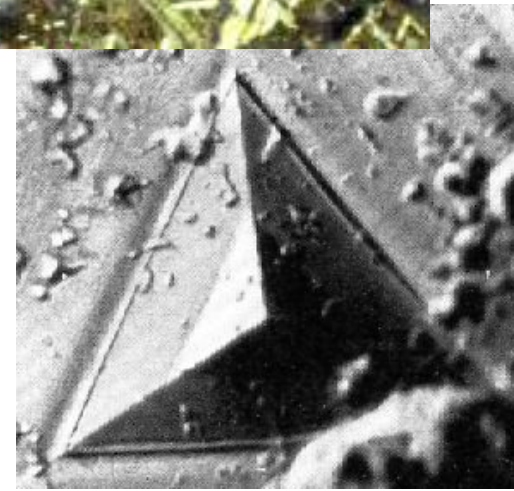
берилла.  
Грань  
призмы



электрума.  
3 мм.  
Балей,  
Забайкалье



берилла. Грань  
дипирамиды.  
Линейка 0.2 мм



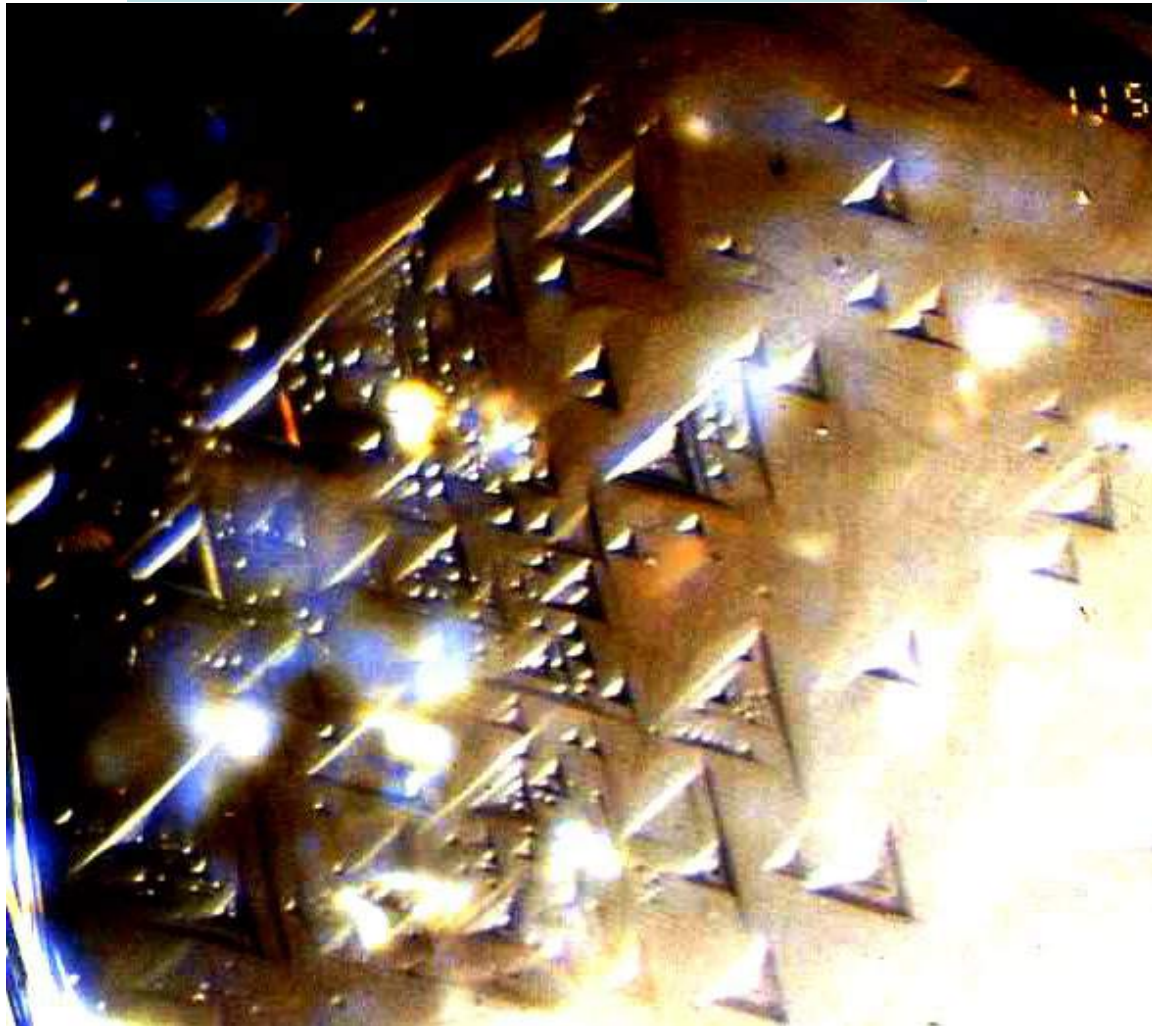
сурьмы  
0.1 мм

# Анатомия индивида.

## Реальные поверхности растущих кристаллов

### Вицинали роста на поверхности кристаллов алмаза

Грань октаэдра



Грань куба



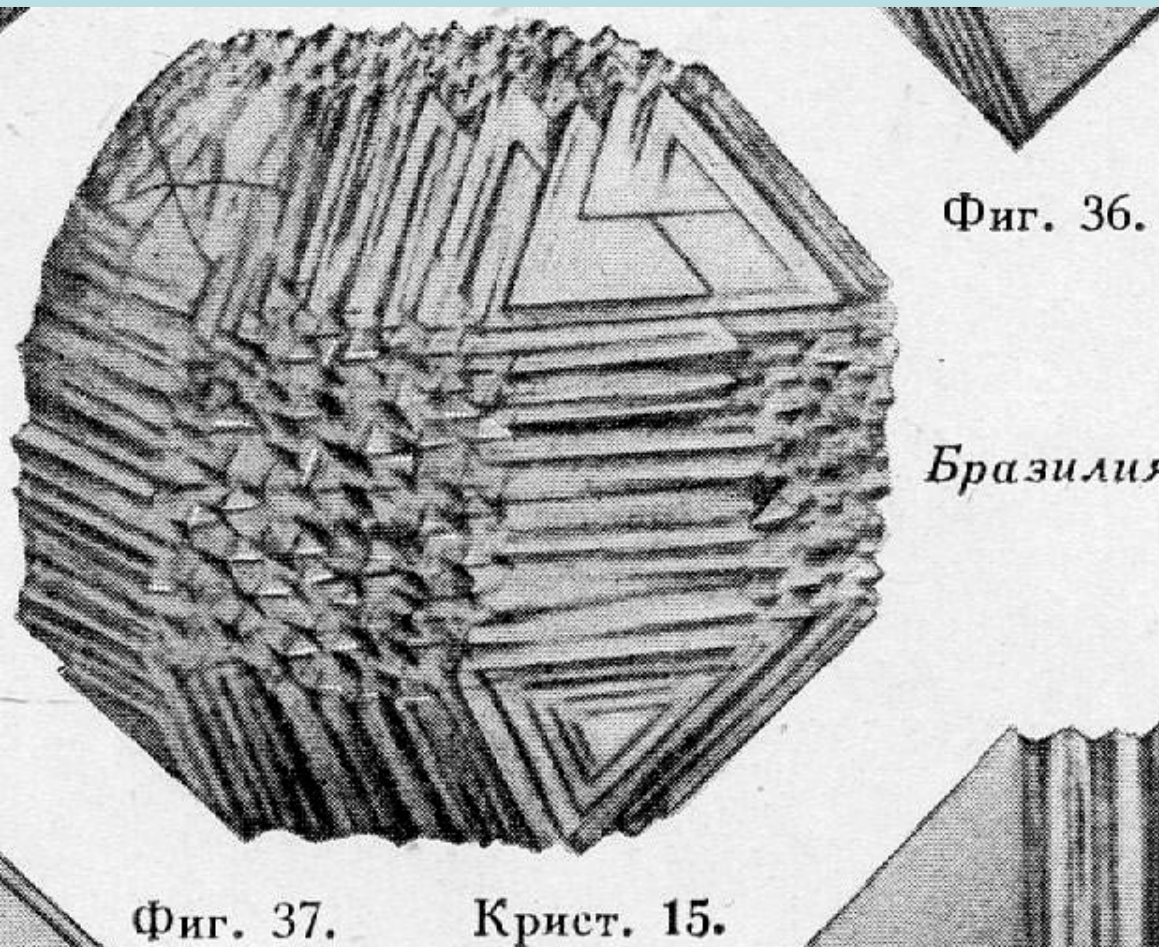
Синтетический алмаз.  
0.5 мм.  
РЭМ-фото



# Анатомия индивида.

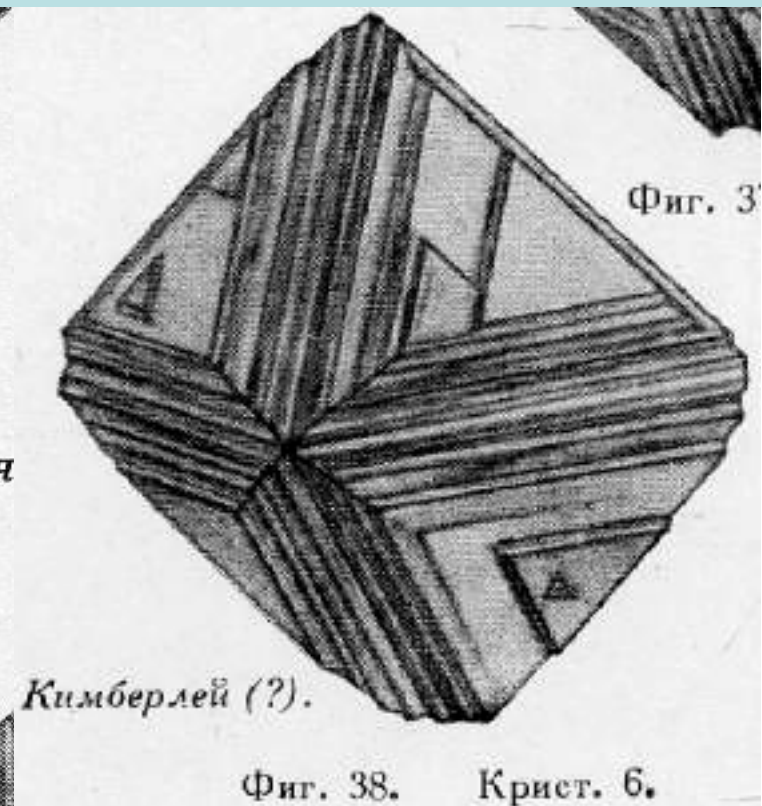
## Реальные поверхности растущих кристаллов

### Вицинали роста на поверхности кристаллов алмаза



Фиг. 36.

*Бразилия*



*Кимберлей (?)*

Рисунки А.Е. Ферсмана.



# Анатомия индивида.

## Реальные поверхности растущих кристаллов

### Вицинали роста на грани ромбоэдра кристаллов кварца

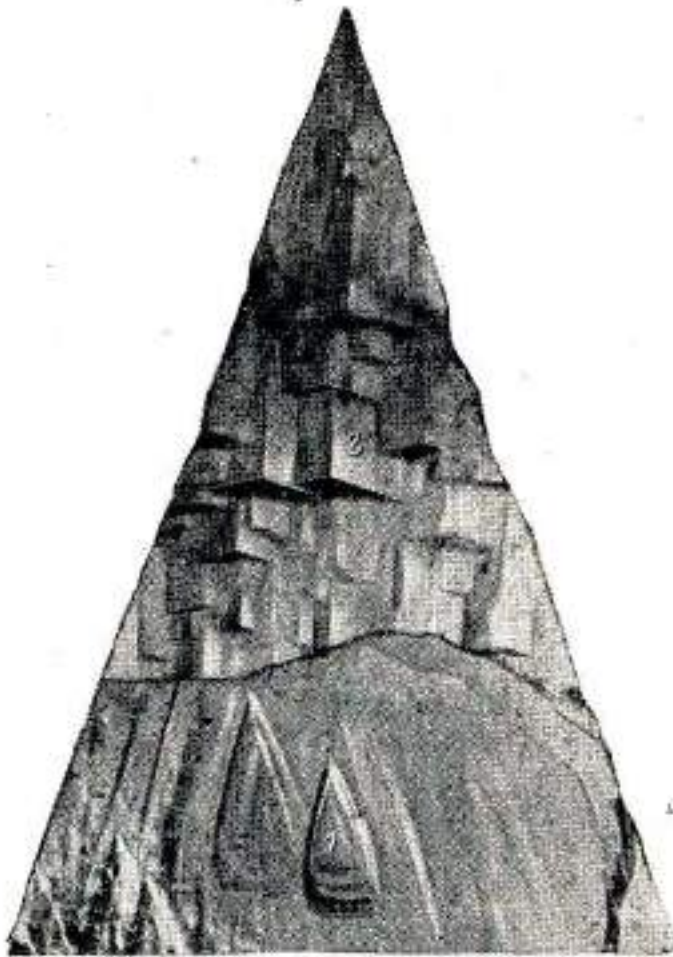


Рис. 85. Зарастание вициналей первого типа (1) вициналами второго типа (2) на гранях отрицательного ромбоэдра кристаллов кварца.  
Увел. 3. Приполярный Урал.

# Анатомия индивида.

## Реальные поверхности растущих кристаллов

### Вицинали роста на грани ромбоэдра кристаллов кварца

Кристаллы из  
кристаллоносных  
гранитных  
пегматитов  
Бразилии.  
Музей  
«Земля и люди».  
София.  
Фото ЭМС и  
Н.Н. Жукова





# Анатомия индивида.

## Реальные поверхности растущих кристаллов

### Вицинали роста на грани ромбоэдра кристаллов кварца



Кристалл кварца из кристаллоносных  
гранитных пегматитов Бразилии.  
Музей «Земля и люди». София.  
Фото ЭМС и Н.Н. Жукова



# Анатомия индивида.

## Реальные поверхности растущих кристаллов

### Вицинали роста на грани ромбоэдра кристаллов кварца



Кристалл кварца из  
кристаллоносных  
гранитных  
пегматитов  
Бразилии.  
Музей  
«Земля и люди».  
София.  
Фото ЭМС и  
Н.Н. Жукова

# Анатомия индивида.

## Реальные поверхности растущих кристаллов

### Вицинали роста на ромбоэдре кальцита

Кристалл кальцита 60 мм с наросшими сферолитами окенита и хлорита.  
Рудник Октябрьский, Талнах





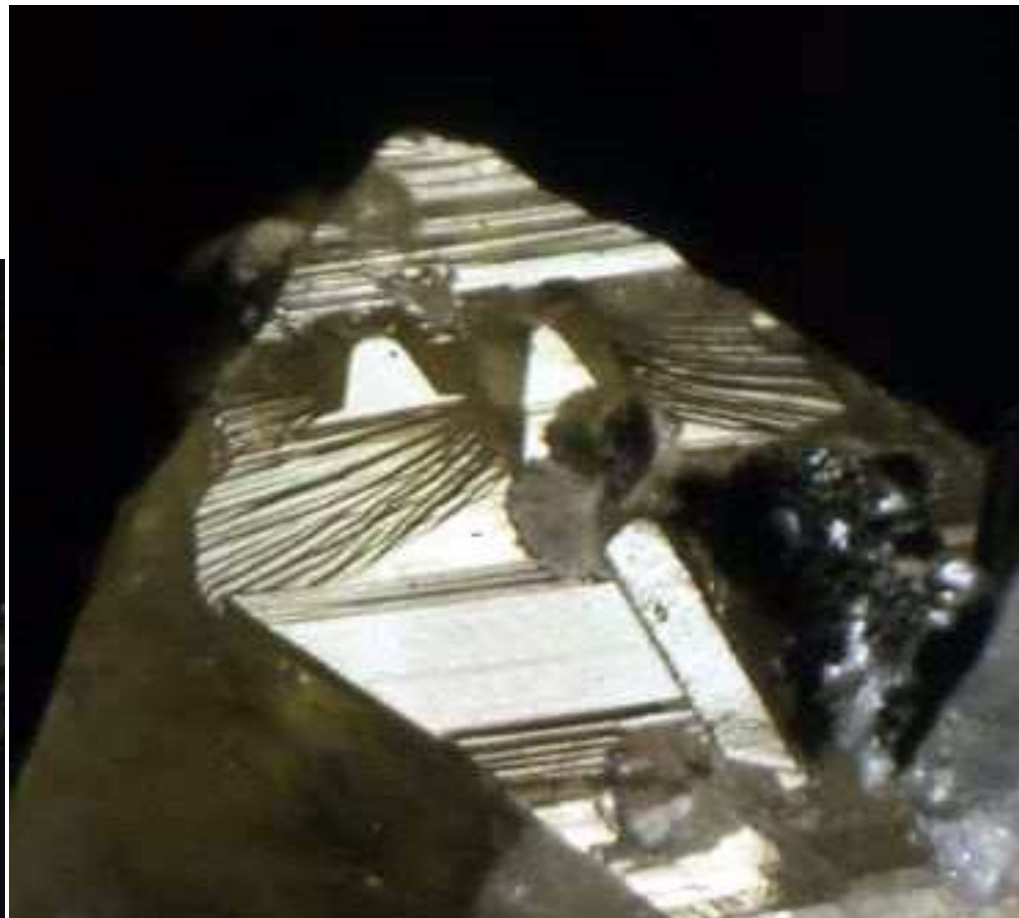
# Анатомия индивида.

## Реальные поверхности растущих кристаллов

### Вицинали роста на ромбоэдре кальцита



Кристалл кальцита 60 мм с наросшими сферолитами окенита и хлорита.  
Рудник Октябрьский, Талнах

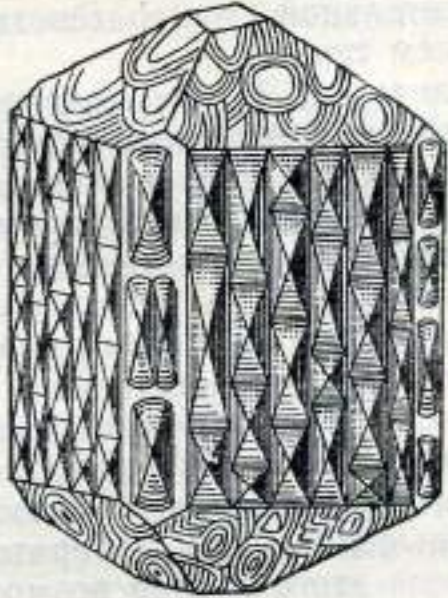




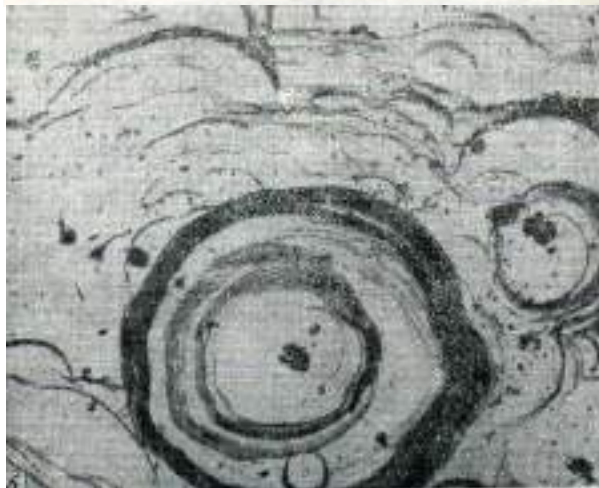
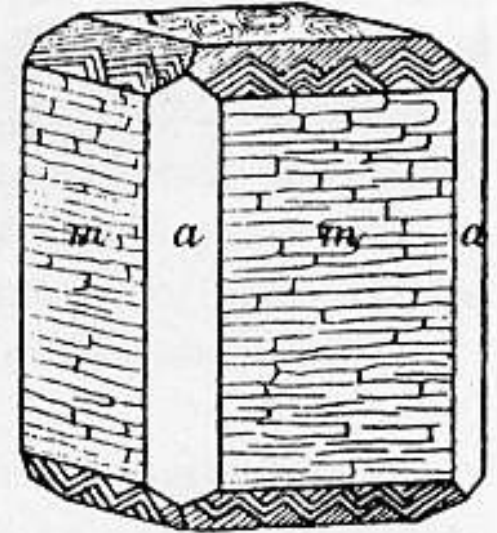
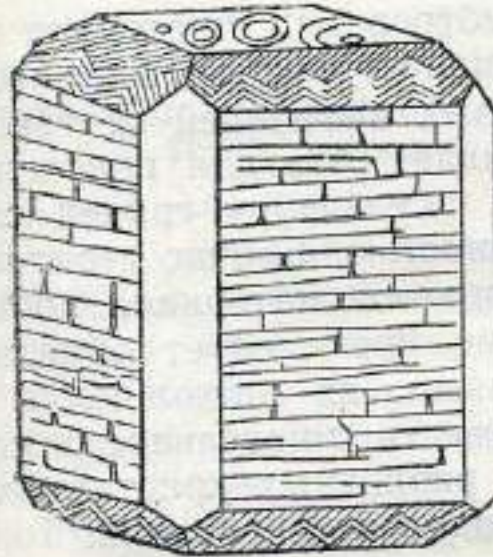
# Анатомия индивида.

## Реальные поверхности растущих кристаллов

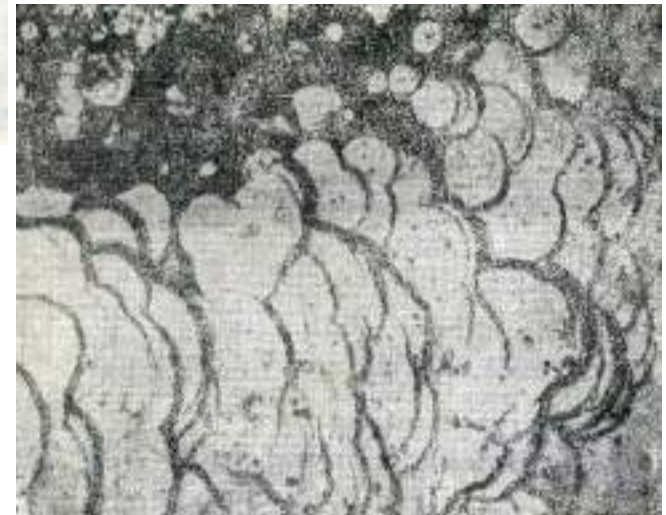
### Вицинали роста на кристаллах вилюита (Р.А. Прендель)



Макровицинали



Микровицинали



# Анатомия индивида.

## Реальные поверхности растущих кристаллов

### Вицинали роста на поверхности кристаллов апофиллита

Fig. 38.

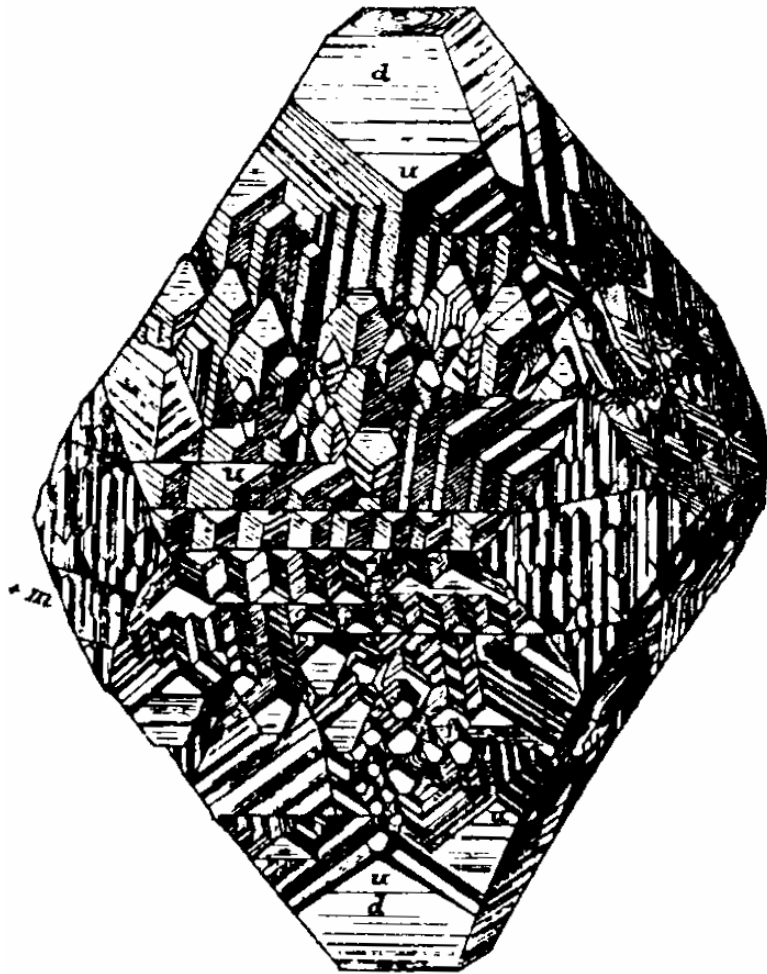
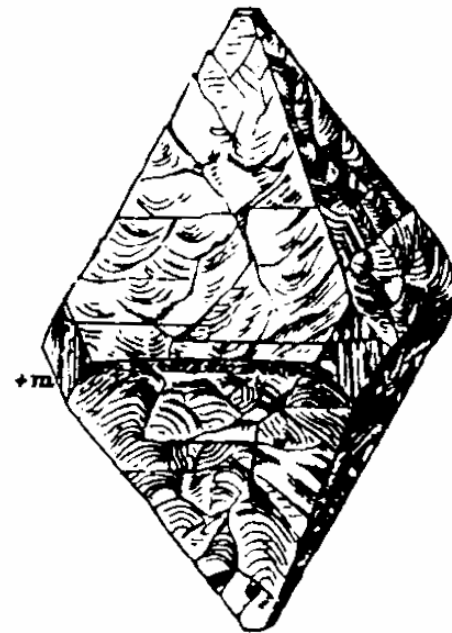


Fig. 39.





# Анатомия индивида.

## Реальные поверхности растущих кристаллов

### Вицинали роста на поверхности кристаллов апофиллита

Fig. 36.

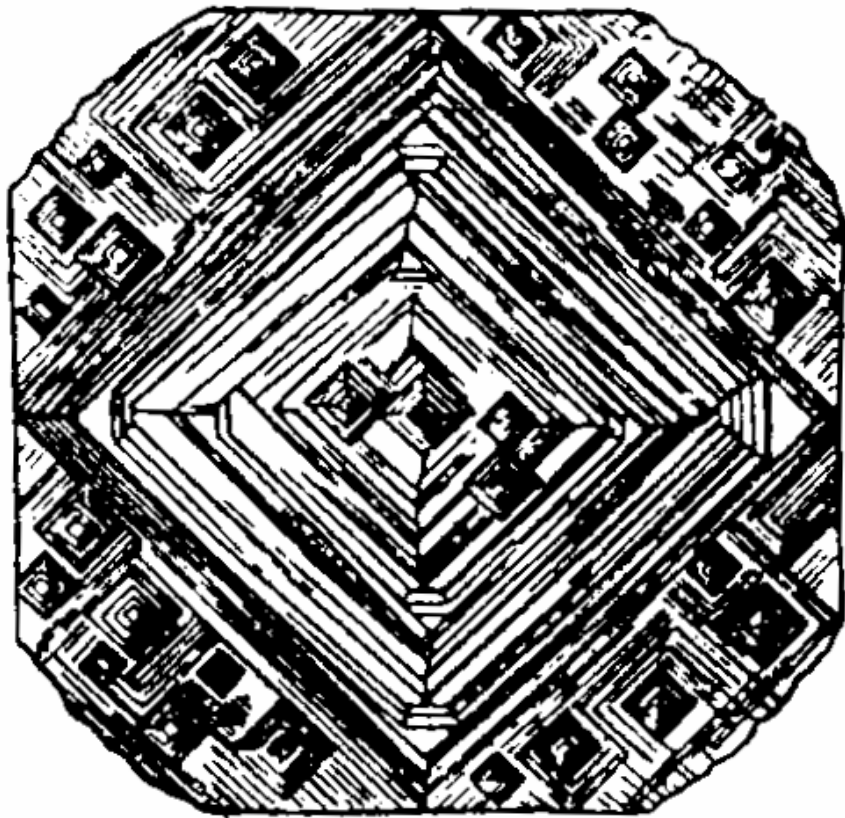
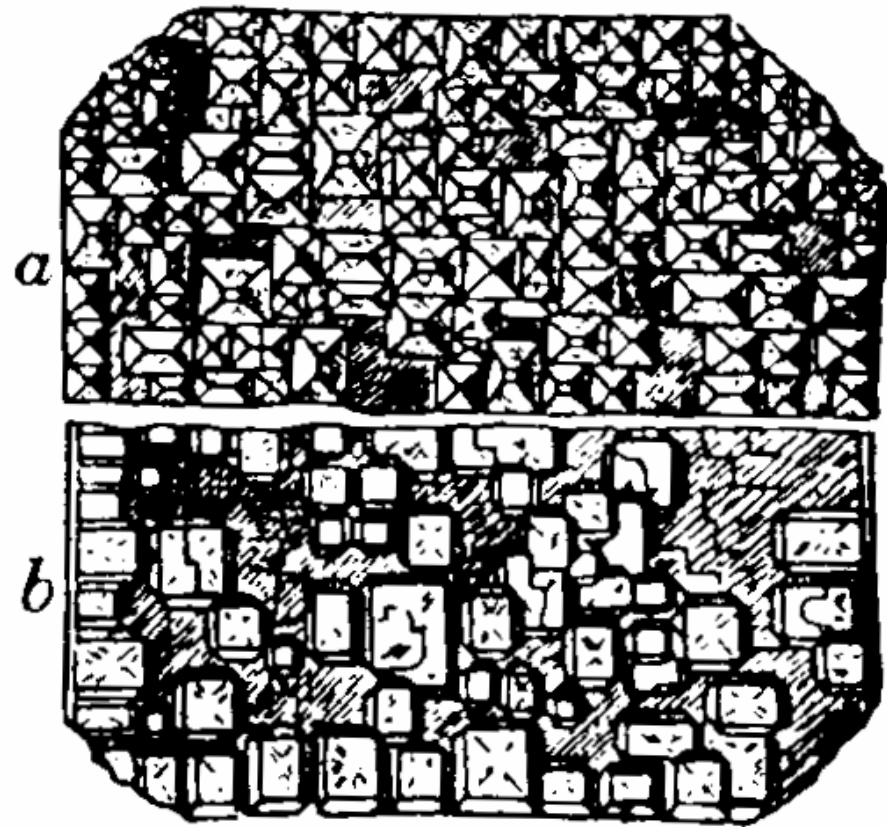


Fig. 37.



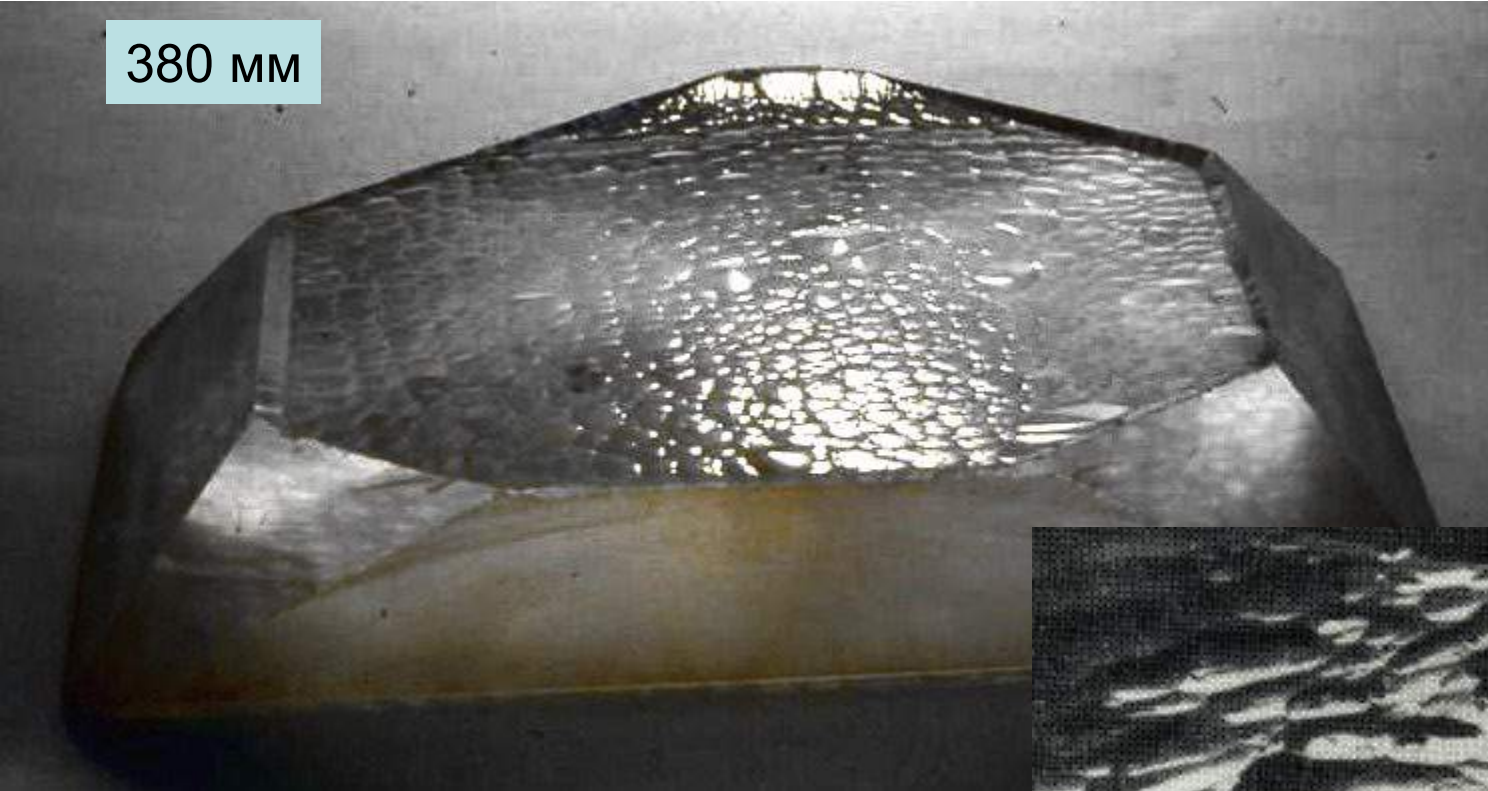


# Анатомия индивида.

## Реальные поверхности растущих кристаллов

Вицинали роста на грани пинакоида синтетич. кварца

380 мм



# Анатомия индивида.

## Реальные поверхности растущих кристаллов

### Вицинали роста на поверхности кристаллов



на двойнике гипса.  
49 мм. Salinas de Paracas



топаза. 2 мм



данбурита  
0.5 мм

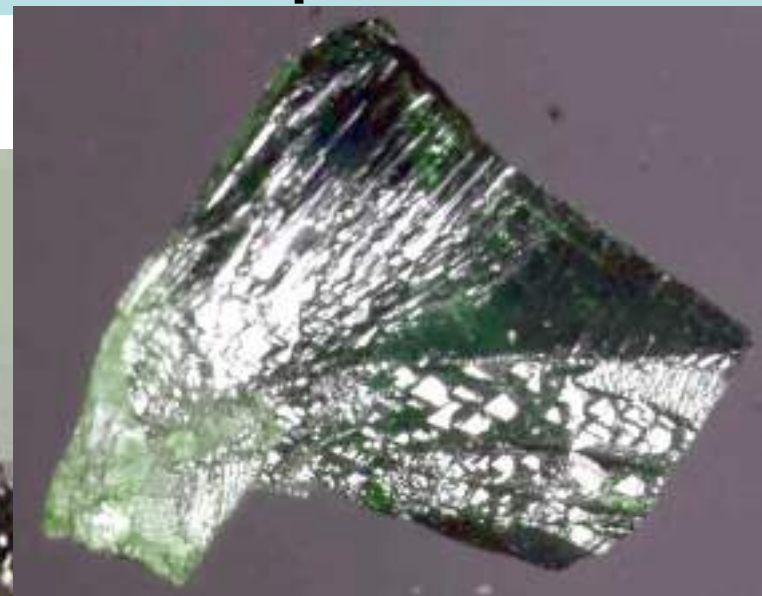


# Анатомия индивида.

## Реальные поверхности растущих кристаллов

### Вицинали роста на гранях кристаллов хромтитанита

13 мм. Два зарождения вициналей



11 мм. Два  
зарождения  
вициналей



# Анатомия индивида.

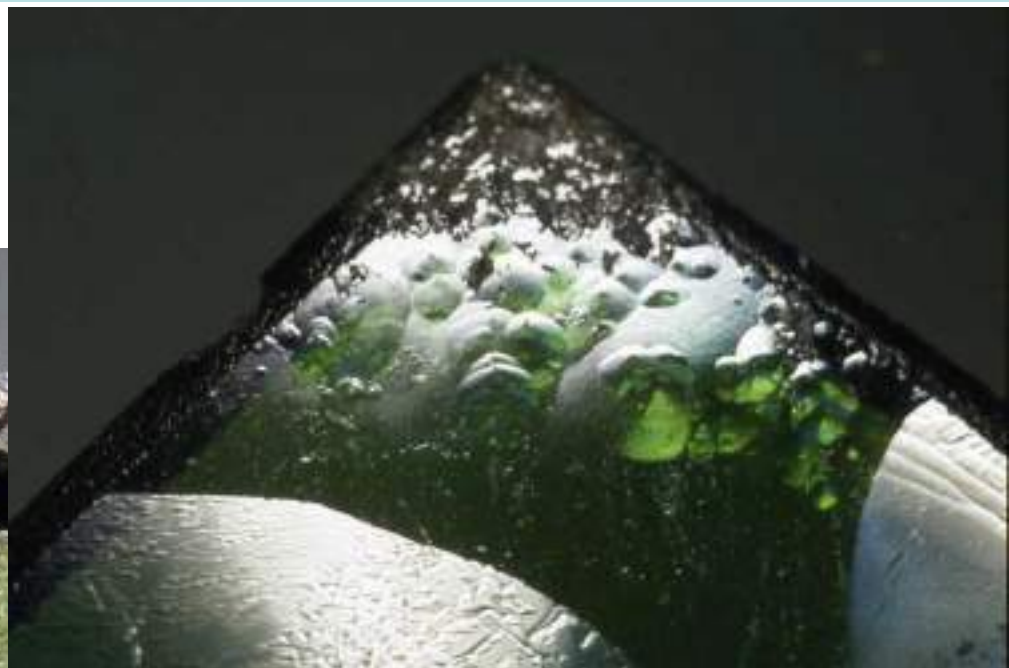
## Реальные поверхности растущих кристаллов

### Вицинали роста на гранях кристаллов хромтитанита

Колл. Э.М. Спиридонова

Фото М.А. Богомолова

16 мм. Два зарождения  
вициналей



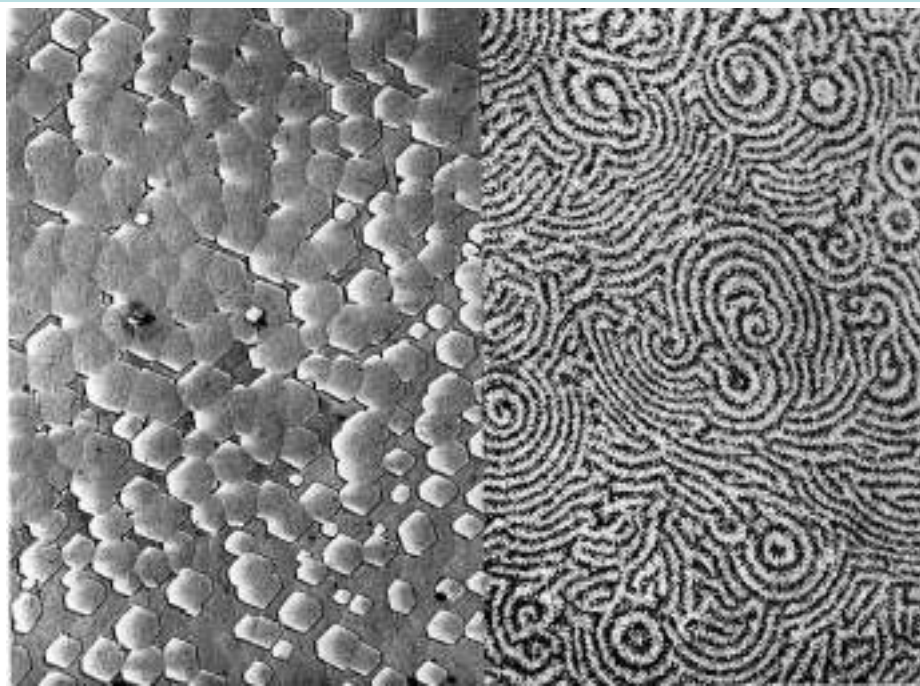
6 мм. Три  
зарождения  
вициналей

Сарановское, Западный Урал

# Анатомия индивида.

## Реальные поверхности растущих кристаллов

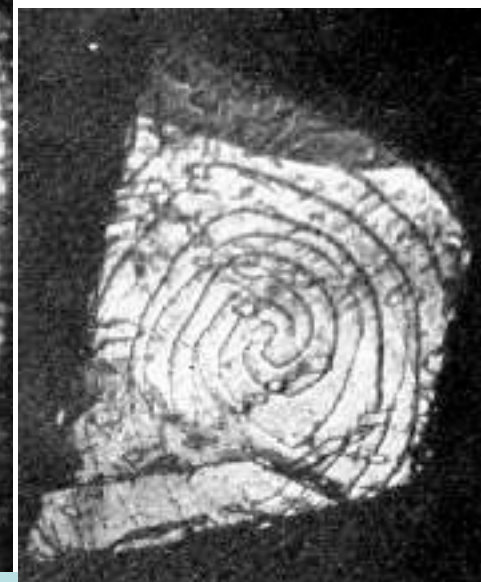
### Спирали роста на гранях кристаллов



Поверхность жемчужины.  
Слева x 240. Справа x 5000



На кристаллах серы 0.2 мм.  
Возгоны угольного пожара



На кристалле  
галита.  
2 микрона



На кристалле  
анортита.  
Линейка  
20 микрон



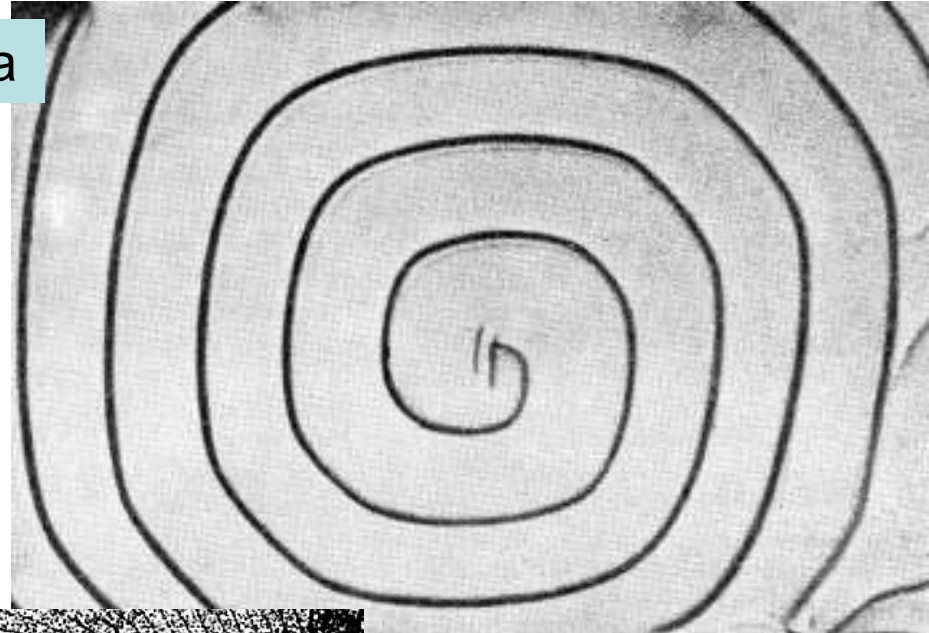


# Анатомия индивида.

## Реальные поверхности растущих кристаллов

### Спирали роста на гранях кристаллов

толуидина. Фото Г.Г. Леммлейна



трифениламина.  
Фото  
Г.Г. Леммлейна



Спирали роста,  
декорированные  
золотом

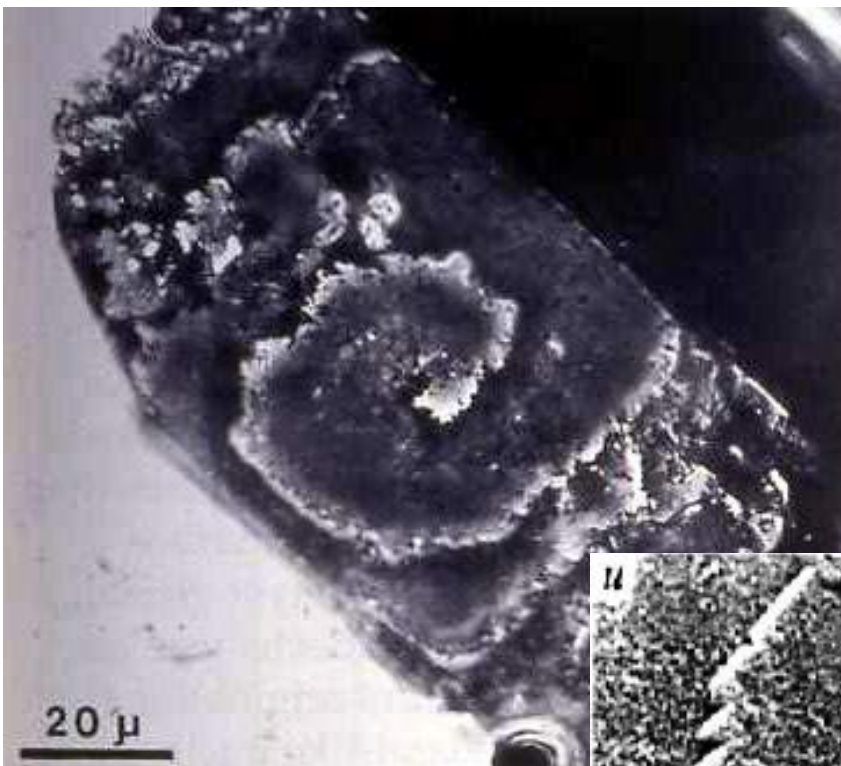


# Анатомия индивида.

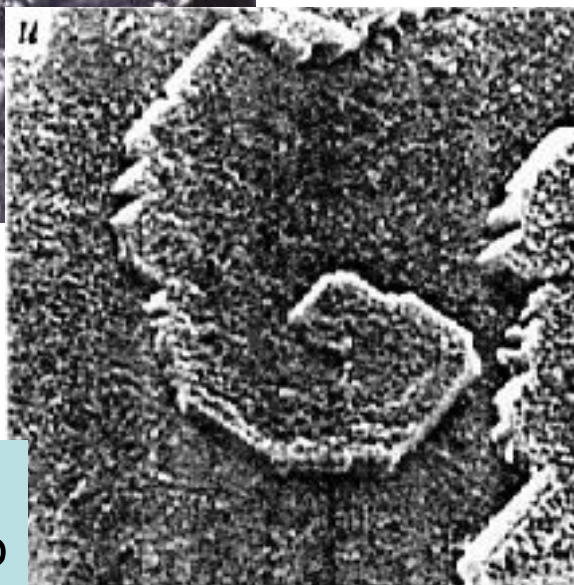
## Реальные поверхности растущих кристаллов

### Спирали роста на гранях кристаллов

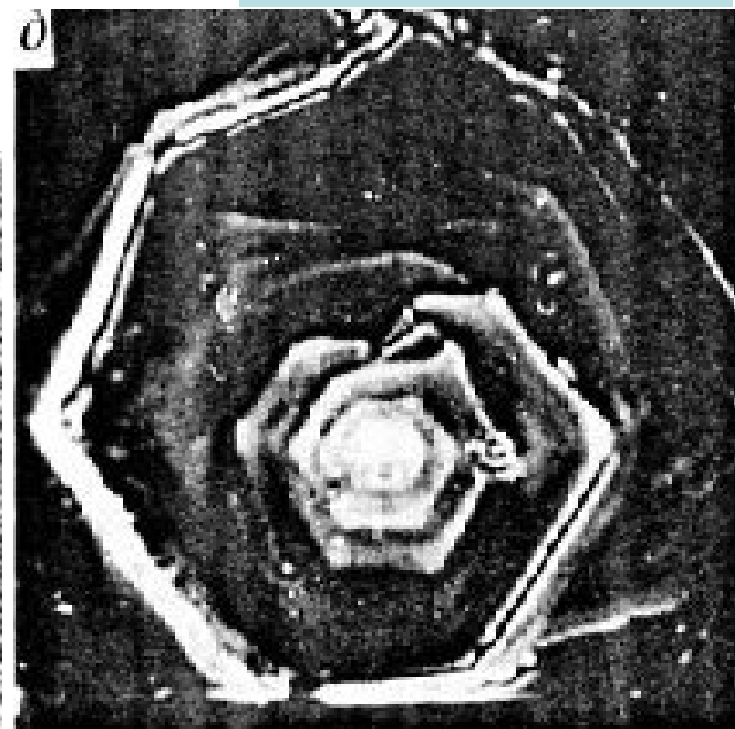
синтетического алмаза



На грани [111].  
0.1 мм. РЭМ-фото



На грани [111].  
0.01 мм. РЭМ-фото



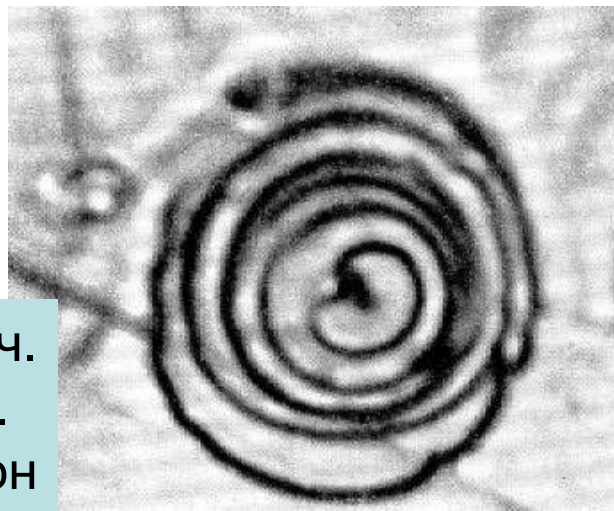
# Анатомия индивида.

## Реальные поверхности растущих кристаллов

### Спирали роста на гранях кристаллов



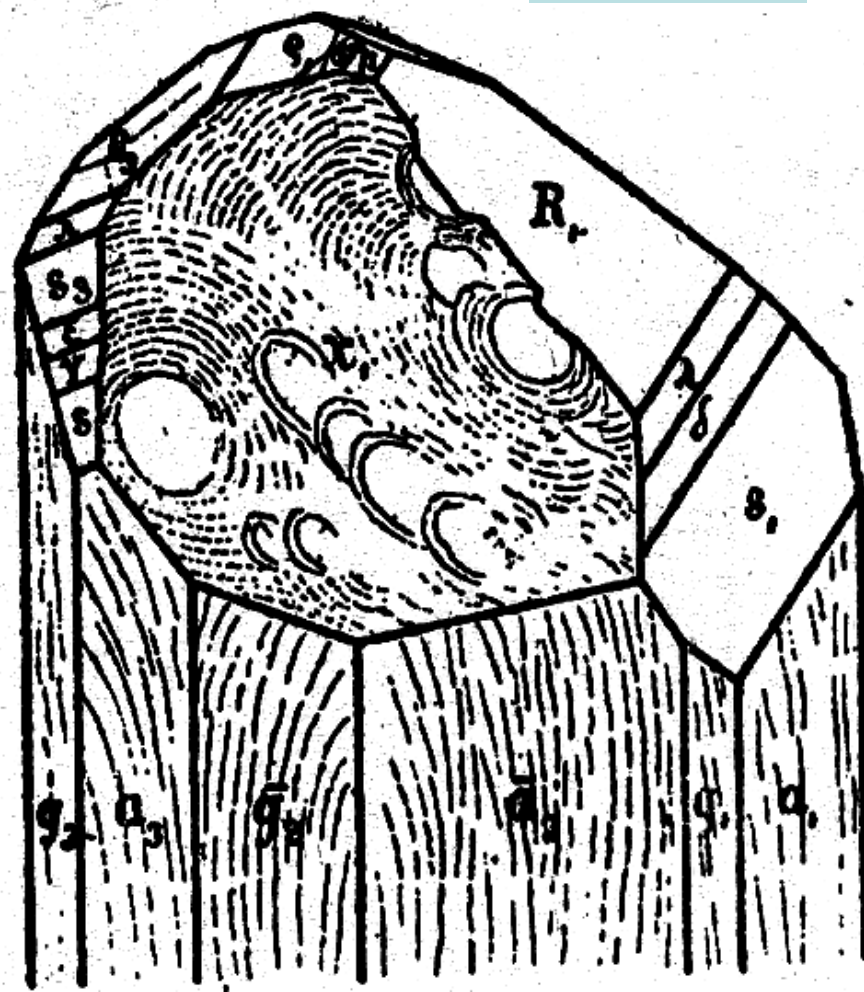
металлического цинка. 60 микрон



металлич.  
кадмия.  
30 микрон

Fig. 54.

фенакита

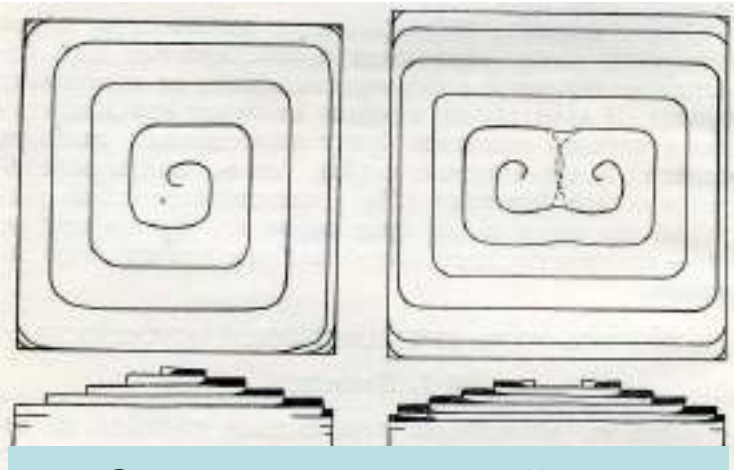




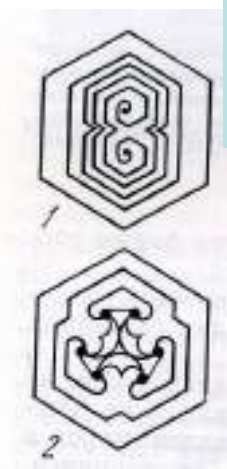
# Анатомия индивида.

## Реальные поверхности растущих кристаллов

### Террасы роста на гранях кристаллов



Одиночная и двойная



пинакоиде  
кристобалита

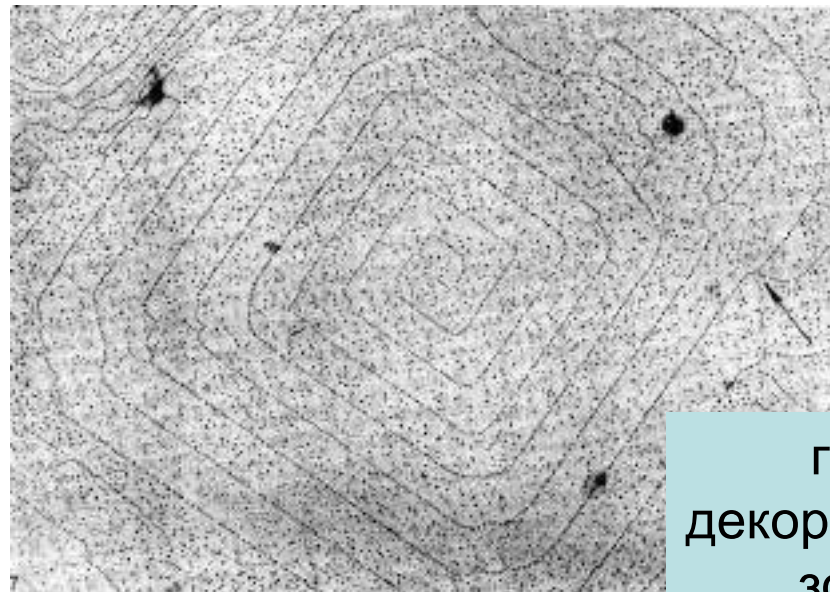
тетраэдра  
сфалерита



муассанита SiC



флогопита



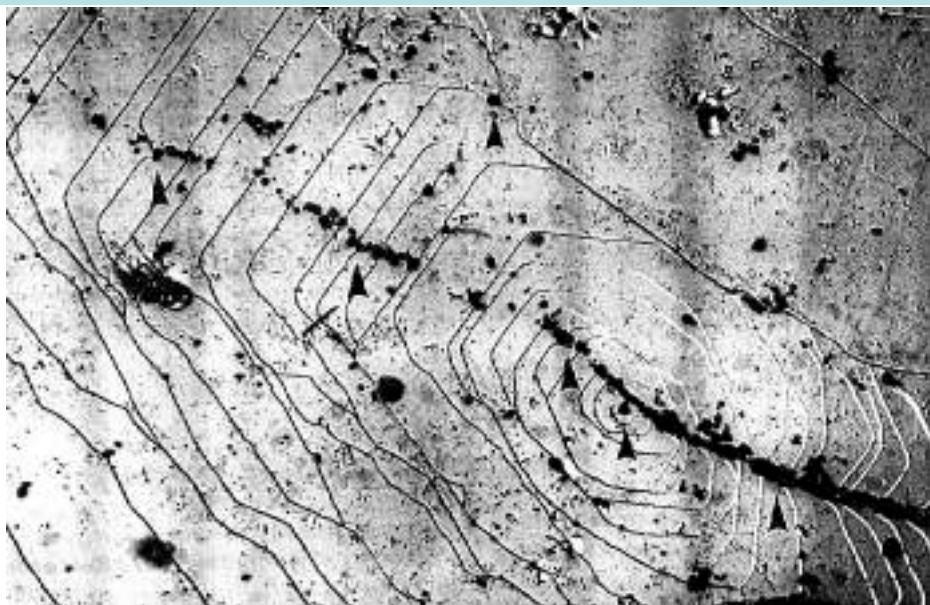
галита,  
декорированного  
золотом



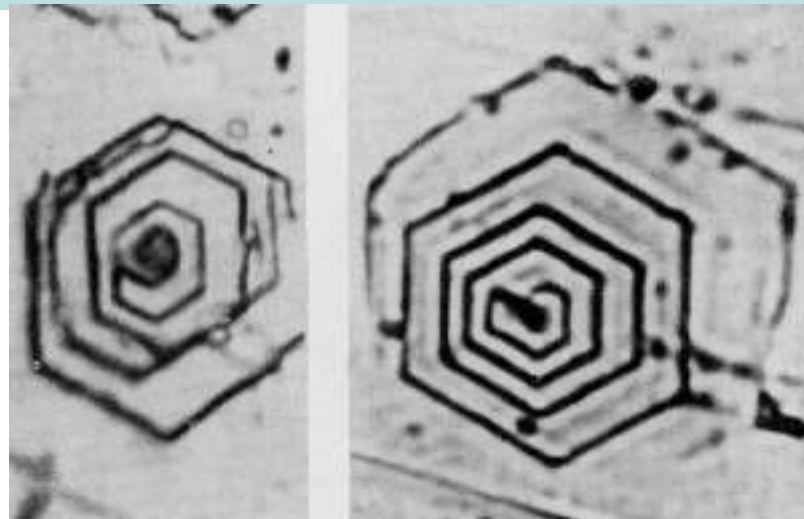
# Анатомия индивида.

## Реальные поверхности растущих кристаллов

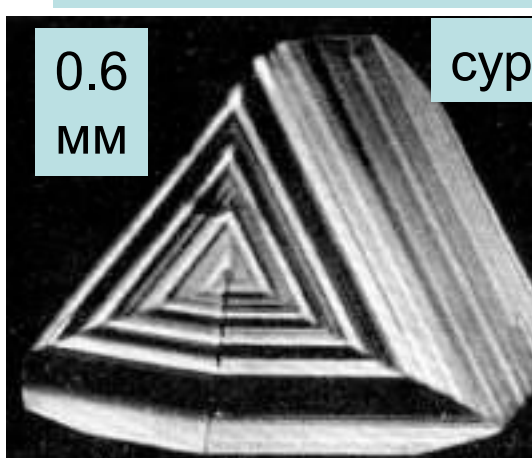
### Террасы роста на гранях кристаллов



пинакоиде берилла. 4 мм

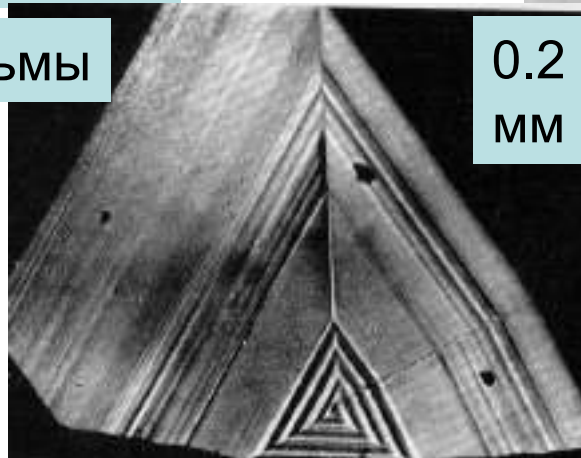


металлического цинка. 60 микрон

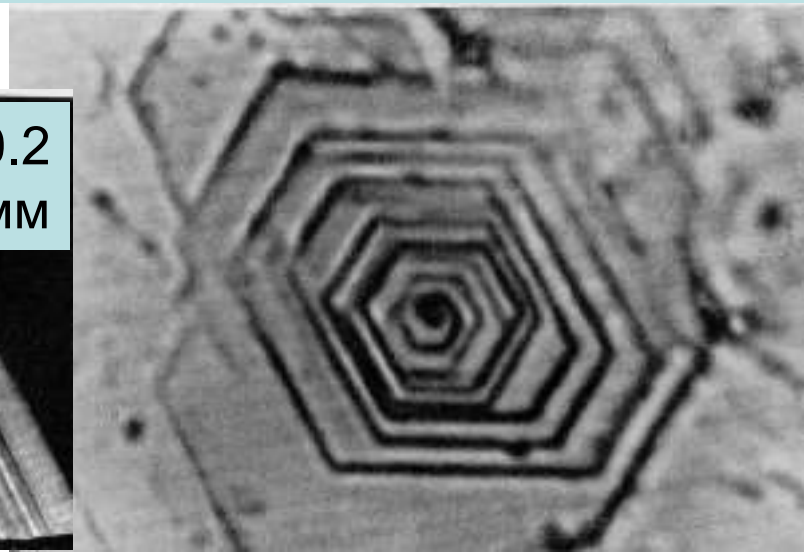


0.6  
мм

сурьмы



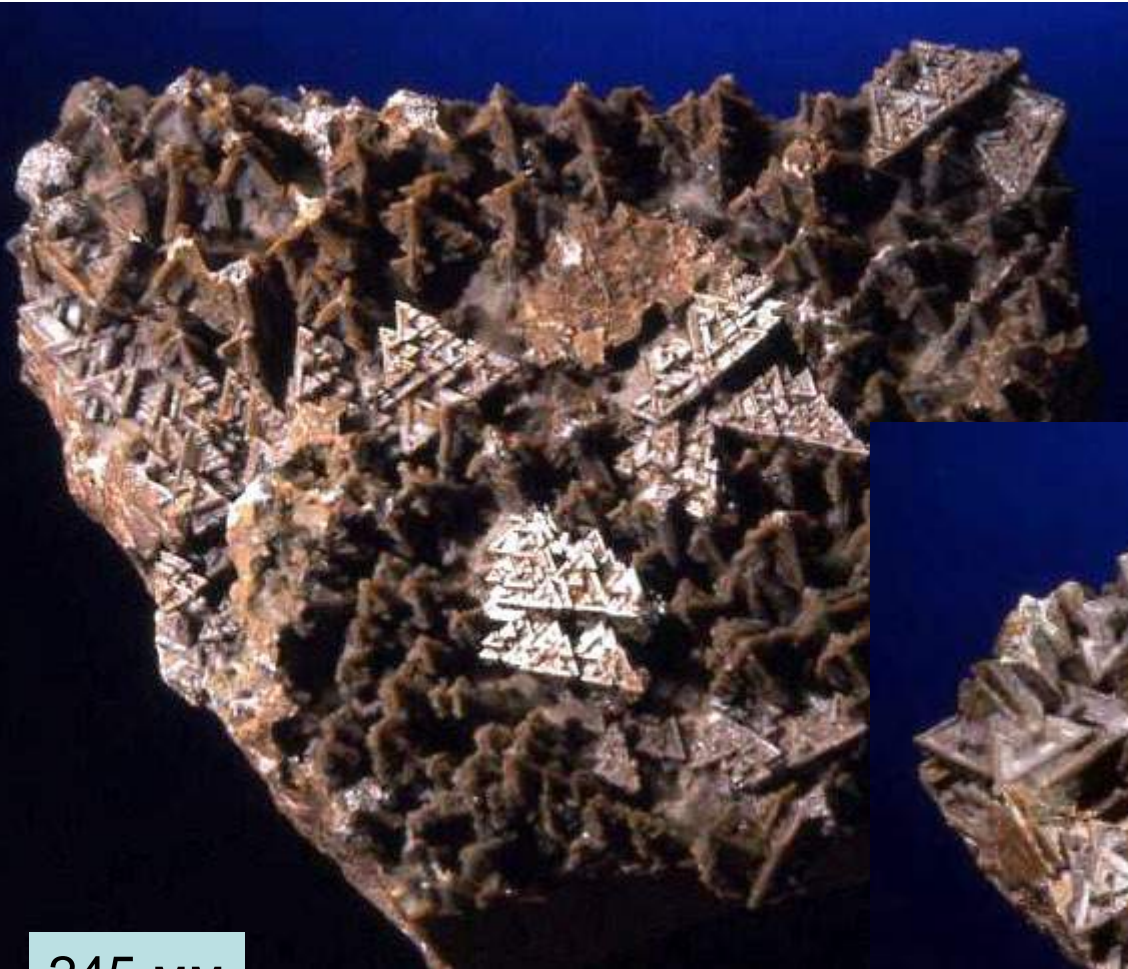
0.2  
мм



# Анатомия индивида.

## Реальные поверхности растущих кристаллов

### Террасы роста на гранях кристаллов синтет. шпинели



245 мм

Колл. Э.М. Спиридонова

Фото М.А. Богомолова

135 мм





# Анатомия индивида.

Реальные поверхности растущих кристаллов

Террасы роста на гранях кристаллов синтет. шпинели



72 мм



# Анатомия индивида.

## Реальные поверхности растущих кристаллов

Террасы роста на гранях кристаллов синтет. шпинели

Колл. Э.М. Спиридонова

Фото М.А. Богомолова

41 мм



При смене форм на поверхности кристаллов развиваются ростовые штриховки, которые являются микрогранями новой формы. Они весьма характерны для кристаллов пирита: штриховка на гранях куба обычно отвечает микрограням пентагондодэкаэдра (пиритоэдра); штриховка на гранях пиритоэдра обычно отвечает микрограням куба, реже октаэдра...

## Штриховки роста на гранях кристаллов пирита



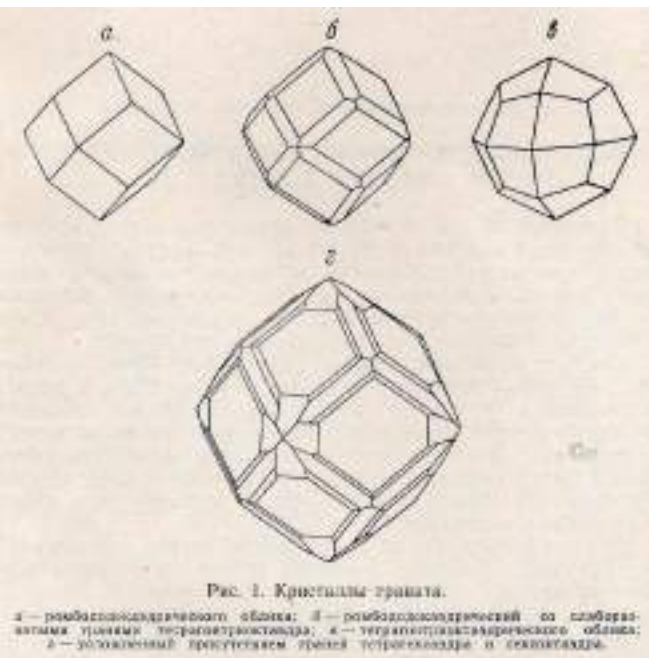
Из скарнов Мадана, Родопы, Болгария



# Анатомия индивида.

## Реальные поверхности растущих кристаллов

### Штриховки роста на гранях кристаллов граната



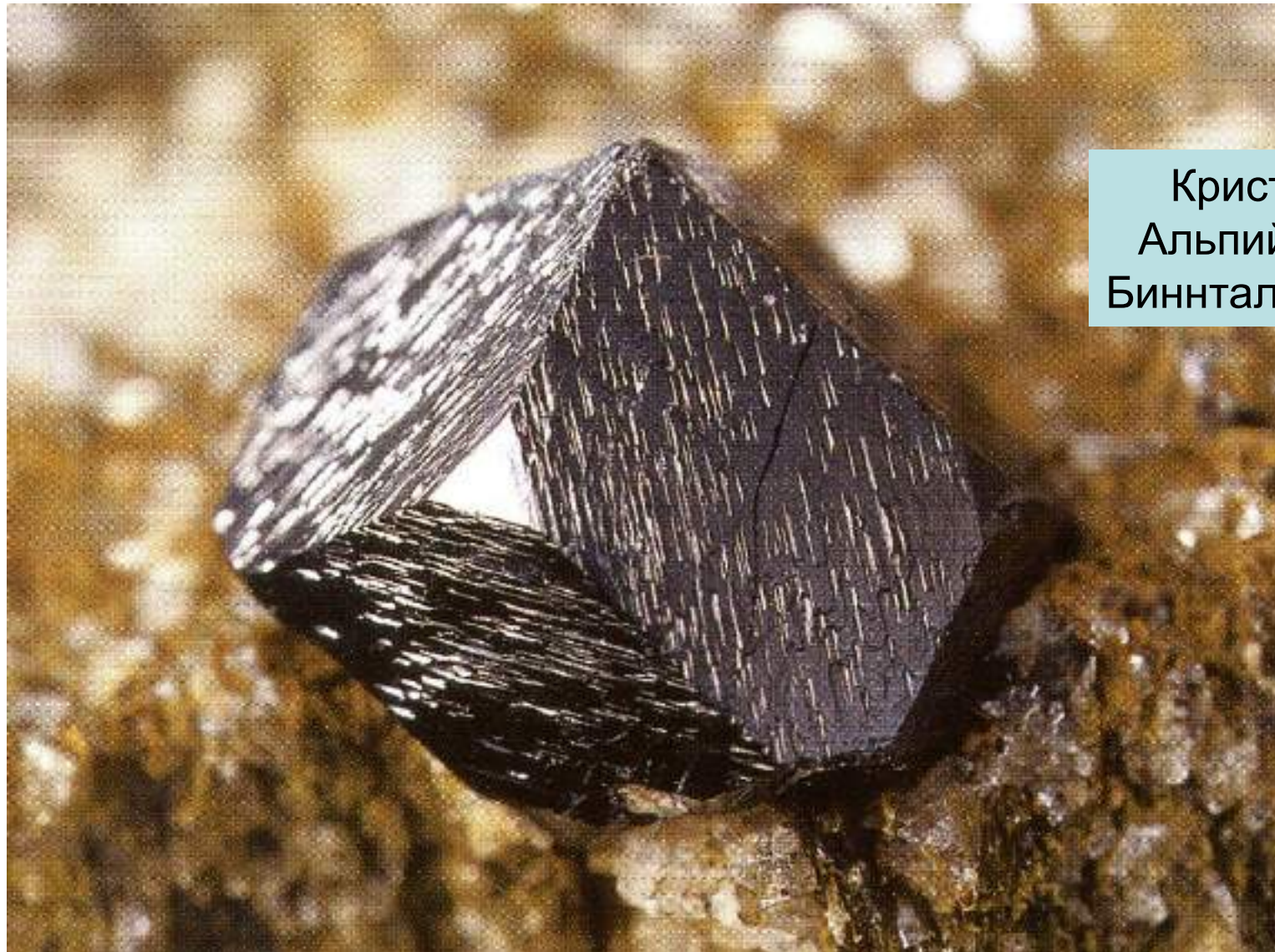
Типичные формы кристаллов граната



# Анатомия индивида.

## Реальные поверхности растущих кристаллов

### Штриховки роста на гранях кристалла магнетита



Кристалл 8 мм.  
Альпийские жилы.  
Биннталь, Швейцария



# Анатомия индивида.

## Реальные поверхности растущих кристаллов

### Штриховки роста на гранях кристаллов

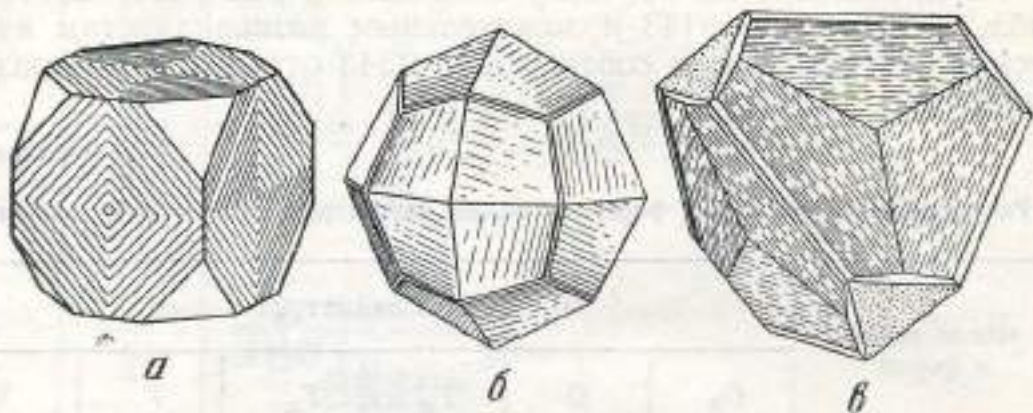


Рис. 36. Реберные формы в виде штриховок на кристаллах кубической сингонии (см. табл. 10)  
а — куприт (реберная форма 3); б — пштит (реберная форма 58); в — сфалерит (реберная форма 62)

Анальцим

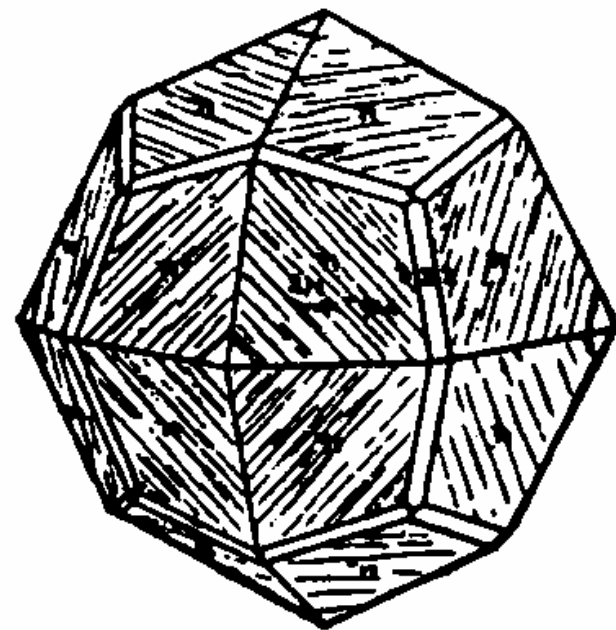
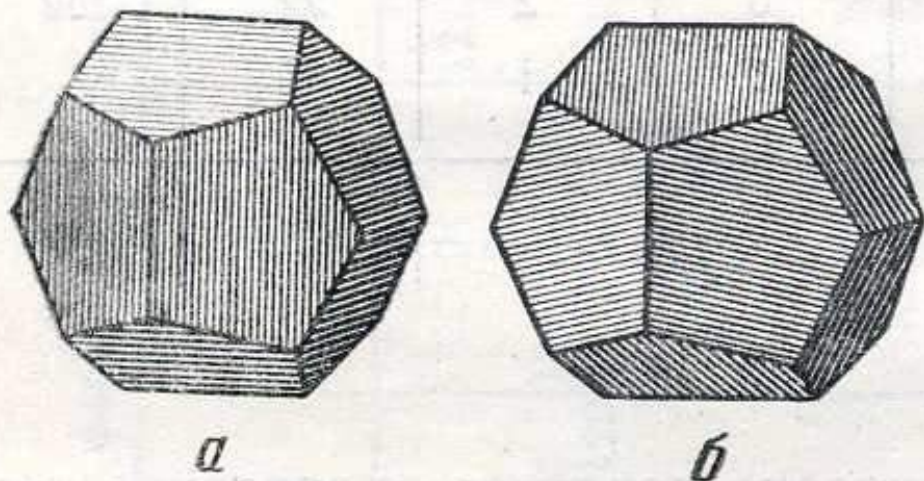


Рис. 37. Два типа штриховок на пентагон-додекаэдрах пирита



а — термоэлектрически положительный пирит (реберная форма 94); б — термоэлектрически отрицательный пирит (реберная форма 117)

# Анатомия индивида.

## Реальные поверхности растущих кристаллов

### Штриховки роста на гранях пиритозэдров

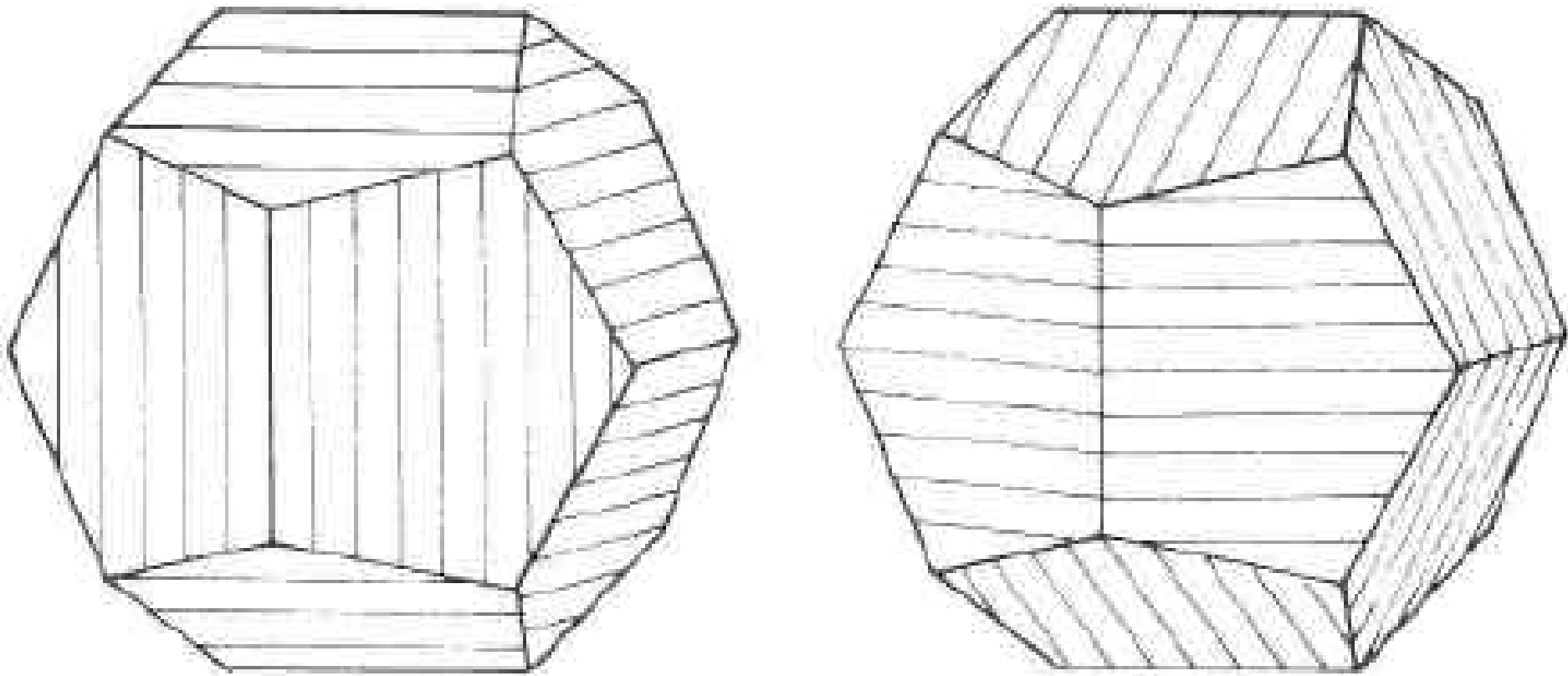


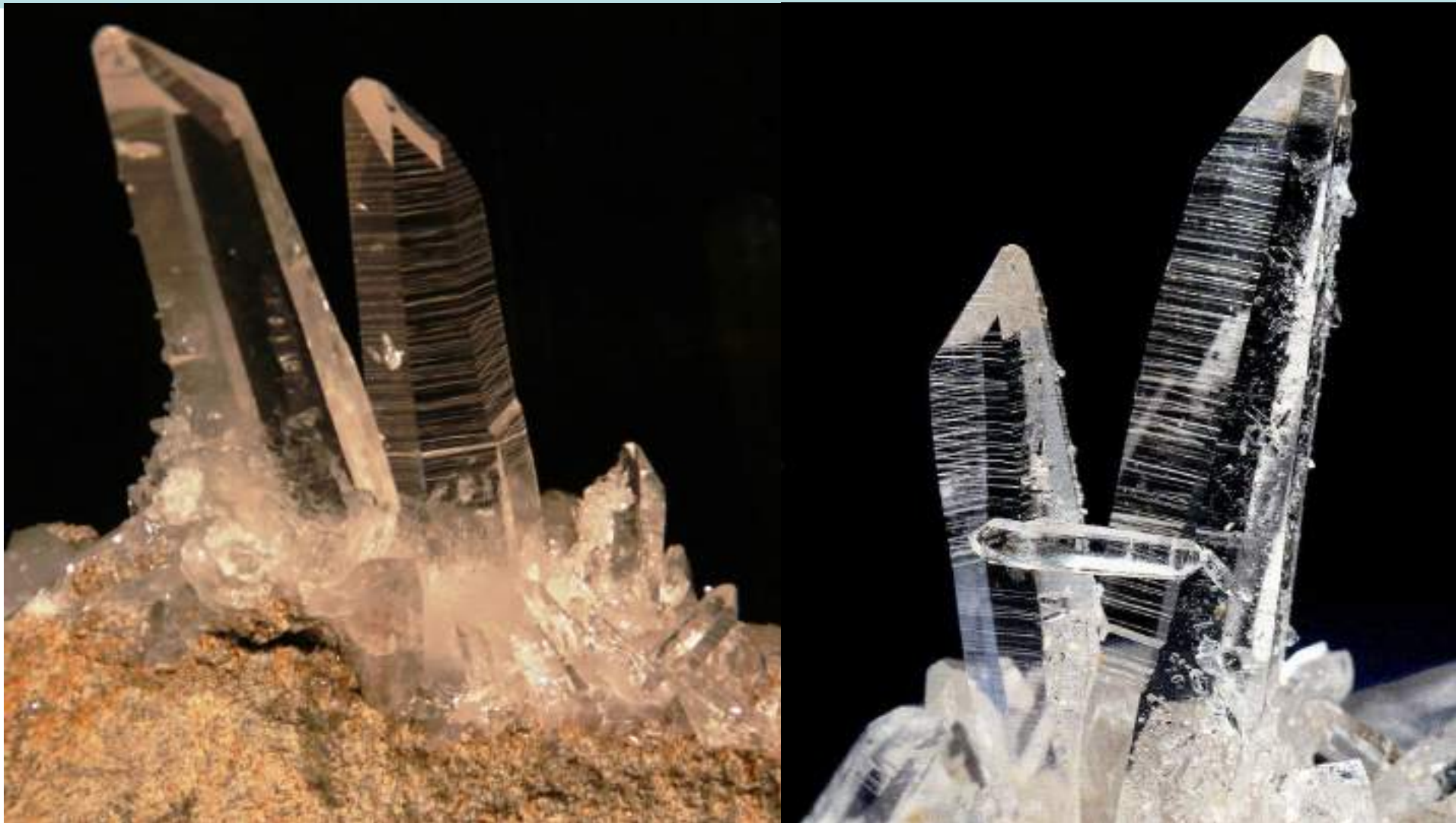
FIG. 1. Positive (left) and negative (right) striations.



# Анатомия индивида.

## Реальные поверхности растущих кристаллов

Штриховки роста на гранях кристаллов кварца



Из альпийских жил

# Анатомия индивида.

## Реальные поверхности растущих кристаллов

### Штриховки роста на гранях кристаллов кальцита



30 мм

в полости в метабазальтах



75 мм

на антимоните.  
Lan Tan,  
Гуанси, Китай



# Анатомия индивида.

## Реальные поверхности растущих кристаллов

### Штриховки роста на гранях кристаллов анатаза



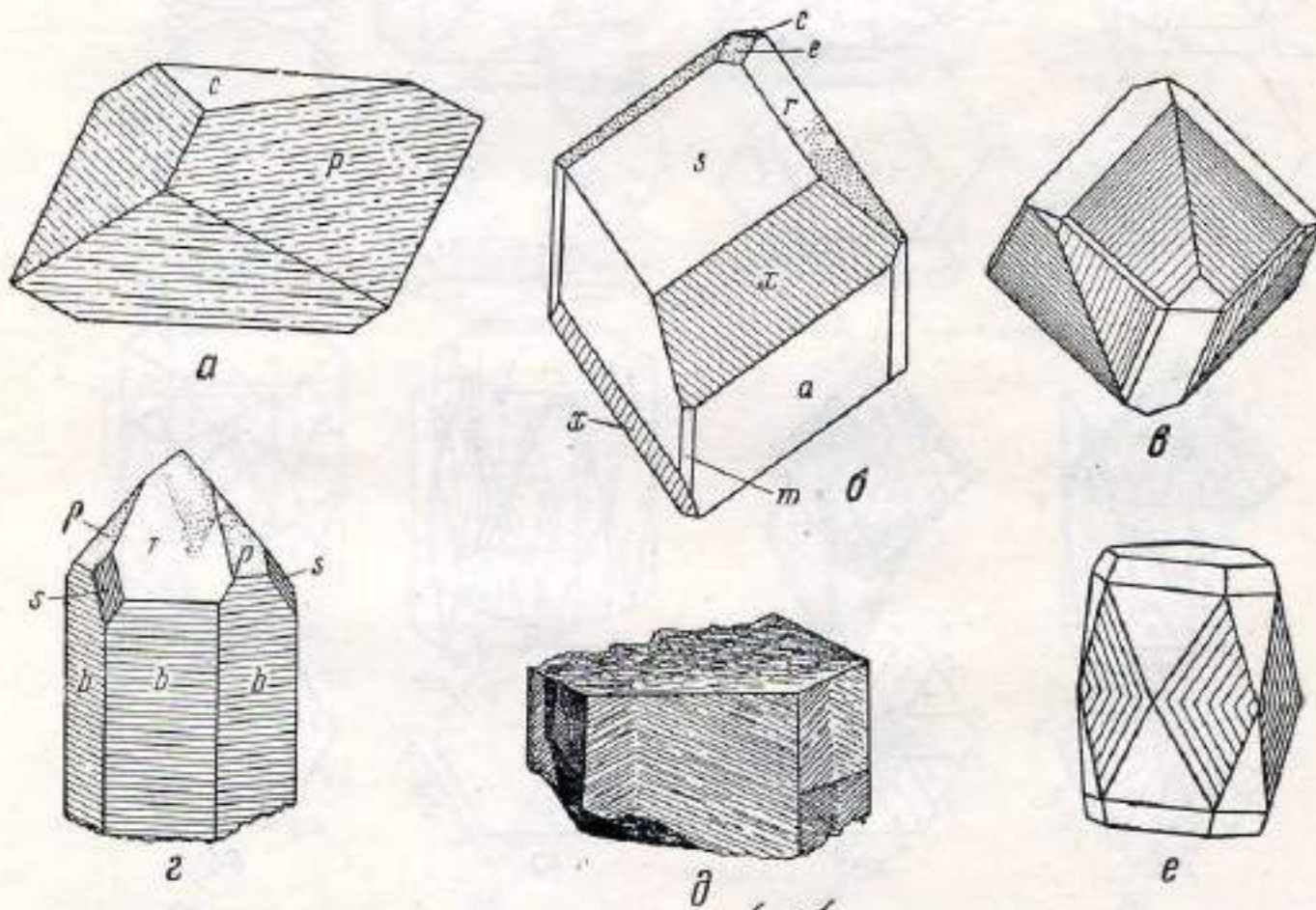
Альпийские жилы.  
Приполярный Урал



# Анатомия индивида.

## Реальные поверхности растущих кристаллов

### Штриховки роста на гранях кристаллов



Турмалин -  
шерл.  
В отличие  
от кварца  
штриховка  
вдоль  
удлинения  
кристалла

Рис. 31. Реберные формы в виде комбинационных штриховок на тригональных и гексагональных кристаллах (см. табл. 8)

*а* — гематолит (реберная форма 8); *б* — трехманит (реберная форма 10, табл. 8); *в* — шабазит (реберная форма 42); *г* — кварц (реберные формы 8 и 27); *д* — берилл (реберные формы 83 и 84); *е* — кокимбит (реберные формы 77 и 78)





Ильменский заповедник





Мачки.  
Улуг-Танзек,  
Тува





**Э.М. Спиридонов**

**Генетическая минералогия.**

**ГМ-1. Онтогения. Индивиды**

**Рост кристаллов**

**004. Взаимодействие  
растущих кристаллов  
и маточной среды**

# Взаимодействие растущих кристаллов и маточной среды

## Поверхность кристаллов и её взаимодействие с подвижными средами

Фундаментальный процесс, составляющий основу роста кристаллов,- адсорбция частиц на поверхности кристаллов. **Адсорбция** - концентрирование вещества на поверхности раздела фаз. Любой кристалл - результат адсорбции вещества из среды, а затем отбора, упорядочения его на своей поверхности. **Кристалл весь состоит из бывших поверхностей адсорбции.**

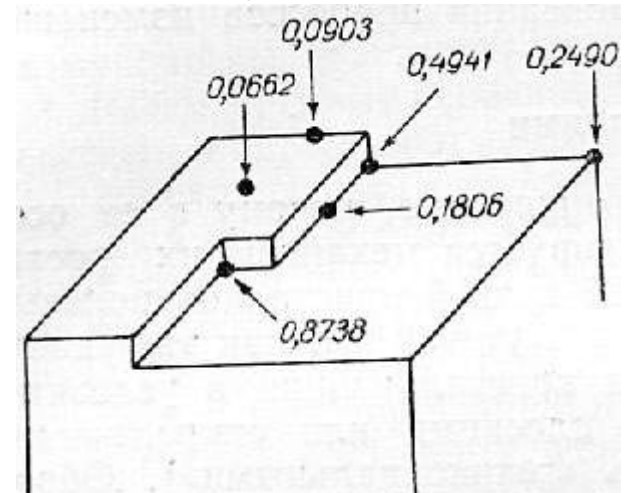
Рассмотрим проблему от упрощенной идеализированной модели с постепенным усложнением ситуации. Кристаллическая поверхность в вакууме при  $0^{\circ}\text{K}$  - можно получить её, расколов идеальный кристалл по спайности, это так называемый полукристалл. Частицы на поверхности будут иметь частично не скомпенсированные электрические заряды. Поверхность может быть не идеально ровной, обычно на ней имеются микроступени высотой в 1 - n атомных слоев. Сами ступени могут быть неровными, для многоатомных ступеней эти неровности именуют изломами. Отдельные атомы на гладкой поверхности или на ступени как наиболее слабо связанные с кристаллом считаются лишь частично ему принадлежащими и называются адсорбированными. Если кристалл ионный, то можно грубо оценить силы связи атомов в различных



# Поверхность кристаллов и её взаимодействие с подвижными средами

положениях на поверхности. Максимальная сила связи иона во внутреннем углу, меньшая - в изломе, еще меньшая на ступени, минимальная на гладкой поверхности.

Энергия присоединения ионов к различным участкам кристалла галита



При  $0^{\circ}$  К атомы неподвижны и не могут перемещаться ни в объёме, ни по поверхности. При  $T > 0^{\circ}$  К уже существуют тепловые колебания строительных частиц кристалла. Эти движения будут приводить к случайному накоплению кинетической энергии частицей, которая может превысить потенциальную энергию адсорбированной частицы и она перескочит в соседнюю потенциальную яму. Такие перескоки будут до тех пор, пока частица либо не попадет в глубокую яму, из которой не сможет уйти при данной температуре, либо оторвётся от поверхности и уйдет в среду кристаллизации. Чем выше  $T$ , тем более интенсивным будут и поверхностное движение частиц (диффузия) и уход

# Поверхность кристаллов и её взаимодействие с подвижными средами

частиц с поверхности в среду (испарение). Равенство потоков к поверхности и от неё существует при равновесии кристалл - флюид.

Если энергия адсорбции частицы на данной грани велика, то адсорбированная частица не будет диффундировать = мигрировать по поверхности кристалла, а сразу займет какое-то определенное положение.

Если в среде кристаллизации существует не только газ, соответствующий составу кристалла, то "посторонние" частицы будут вести себя в принципе так же, как и "свои". Различия будут только количественные: по энергиям связи с поверхностью кристалла и по содержаниям частиц разного сорта в среде (по их парциальным давлениям  $p$ ).

Фундаментальная формула Де Бура

$$[p_1 e^{(U_1/kT)}]/[p_2 e^{(U_2/kT)}] = [s_1]/[s_2],$$

где  $U_1$  и  $U_2$  - энергия связи (энергия адсорбции);  $k$  - постоянная Больцмана;  $T$  - абсолютная температура;  $s_1$  и  $s_2$  - площади на поверхности (на грани), занимаемые частицами разного сорта.

В формуле Де Бура выражено то, что ведущую роль в определении времени пребывания частиц на поверхности кристалла при

# Поверхность кристаллов и её взаимодействие с подвижными средами

равновесии играет энергия связи частиц с поверхностью - энергия адсорбции находится в показателе степени. Концентрация частиц или давление паров играют второстепенную роль. Иными словами, качество важнее количества. С этим связано то, что некоторые примеси влияют на кристаллизацию в ничтожных концентрациях -  $n$  частиц на миллион, а другие слабо влияют даже при концентрации до  $n10\%$ . По этой же причине на поверхности могут преобладать "свои" или "посторонние" частицы и это явление может проявляться по-разному для граней разных простых форм одного кристалла. Эти положения важные. Избирательность адсорбции, различия в концентрациях и подвижности разных частиц атомно-молекулярного масштаба на разных поверхностях кристаллов обуславливают подавляющую часть особенностей кристаллизации - определяют скорости роста граней, степень их дефектности... Вообще не существует универсальных адсорбатов. Но есть ряд веществ, которые хорошо адсорбируются на больших группах кристаллических веществ,- это так называемые модификаторы, поверхностно-активные вещества; для них характерно наличие нескомпенсированных зарядов и способность легко возбуждаться, порождая свободные химические связи. Сильно адсорбируются органические красители и нафтиды, т.к. они содержат



## **Поверхность кристаллов и её взаимодействие с подвижными средами**

нечётное число электронов в молекуле, чем обусловлена большая ненасыщенность связей и большая адсорбционная способность.

Каково взаимодействие поверхности кристалла с жидкостью?

Практическая неподвижность частиц твёрдой поверхности резко снижает подвижность контактирующих с ней адсорбированных частиц. Снижение подвижности по эстафете с затуханием передается в жидкость на неопределённо большое расстояние. Темп затухания зависит от вязкости и скорости движения жидкости. Около кристалла в слоях любой жидкости микронной толщины изменяются её вязкость, плотность, диэлектрические постоянные... Вблизи поверхности кристалла снижается растворимость, причём по-разному для разных граней. Любое изменение состояния среды - температура, давление, состав, механическая напряженность самого кристалла... через изменение потенциального поля поверхности будет приводить к какому-либо смещению состава адсорбированного слоя.

**Таким образом, система растущий кристалл – раствор сложная. Реально она состоит из подсистем – кристалл и адсорбционный пограничный слой, с одной стороны, и пограничный слой раствора и раствор на удалении от растущего кристалла.**

# **Поверхность кристаллов и её взаимодействие с подвижными средами**

В состав адсорбционного пограничного слоя в принципе входит всё находящееся в среде кристаллизации. При этом на фоне общего макроскопически равновесного состояния идет постоянная конкуренция за наиболее глубокие потенциальные ямы для каждой частицы и для каждой их группировки. Поэтому процесс отбора наиболее прочно связанных с поверхностью кристалла частиц требует относительно большого времени для установления равновесия.

**Итак, рост кристалла - это такая разновидность адсорбции, при которой состав и структура подложки постоянно воспроизводятся (редуплицируются) и поверхность перемещается, оставляя за собой кристаллическое вещество.**

Кристалл в равновесии со средой не изменяет массу, но при любых температурах идет внутренняя диффузия вещества со снятием напряжений и поверхностная диффузия с десорбцией частиц и закреплением их в местах с максимальной энергией адсорбции, т.е. происходит снижение свободной энергии кристалла, - происходят необратимые изменения пограничного адсорбционного слоя.

# Взаимодействие растущих кристаллов и маточной среды

## Массоперенос при кристаллизации

На процессы кристаллизации большое влияние оказывает характер массопереноса вещества из среды на поверхность кристалла. Выделяют три типа массопереноса при росте (и растворении) кристаллов: 1) диффузионный, 2) свободной конвекции, 3) вынужденной конвекции.

1) Диффузия. При существовании различий в концентрациях веществ (или каких-либо полей) в выделенном объёме жидкости, газа или твёрдого тела хаотическое движение частиц приводит к возникновению направленного макроскопического движения вещества из области повышенных в область пониженных концентраций. При разности  $T$  в растворе возникают различия в концентрациях - эффект Соре.

2) Свободная конвекция. При росте кристалла концентрация вещества в пограничном слое раствора понижена, а температура почти всегда повышена из-за выделения теплоты кристаллизации. В результате плотность раствора вблизи растущего кристалла ниже, чем на удалении. Поскольку процессы происходят под влиянием поля силы тяжести, раствор пограничного слоя всплывает и возникает конвекционный поток вверх от кристалла. На его место приходит новая порция - раствор вокруг растущего кристалла расслаивается, в нём возникает градиентная зона. При растворении из-за противоположных изменений плотности раствора

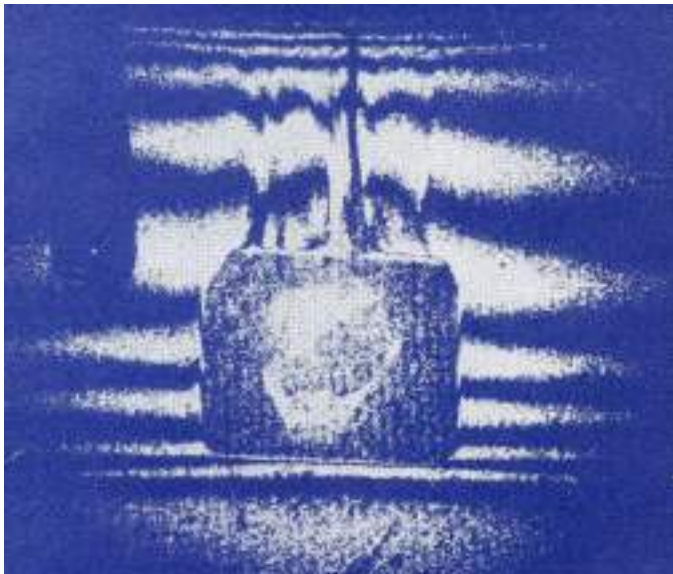


# Взаимодействие растущих кристаллов и маточной среды

## Массоперенос при кристаллизации

растёт и поток от поверхности кристалла направлен вниз. Эти концентрационные потоки именуется ловиц-вильфовскими.

Итак, растущие (или растворяющиеся) в гравитационном поле кристаллы генерируют зону расслоения раствора с чёткой горизонтальной ритмичной слоистостью. Нижние слои с повышенной плотностью и значениями концентрации, верхние - с пониженными. Эти слои по свойствам близки к не смешивающимся жидкостям. После извлечения кристалла в растворе в течение до 1 часа сохраняется расслоенность.

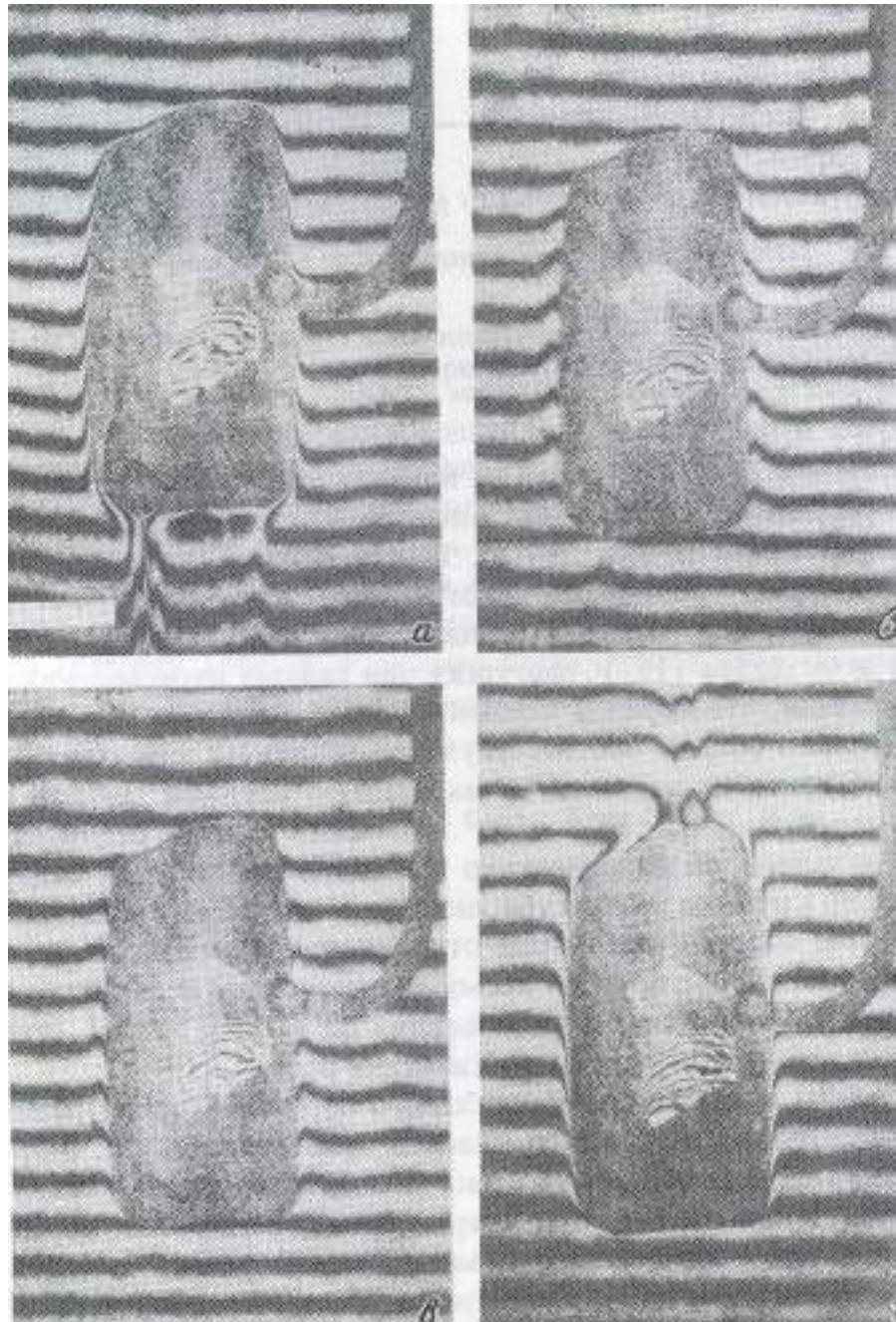


Интерференционные голограммы раствора около растущего кристалла



растворяющегося кристалла

# Взаимодействие растущих кристаллов и маточной среды



Интерференционные  
голограммы  
раствора при переходе от  
растворения кристалла  
к росту кристалла

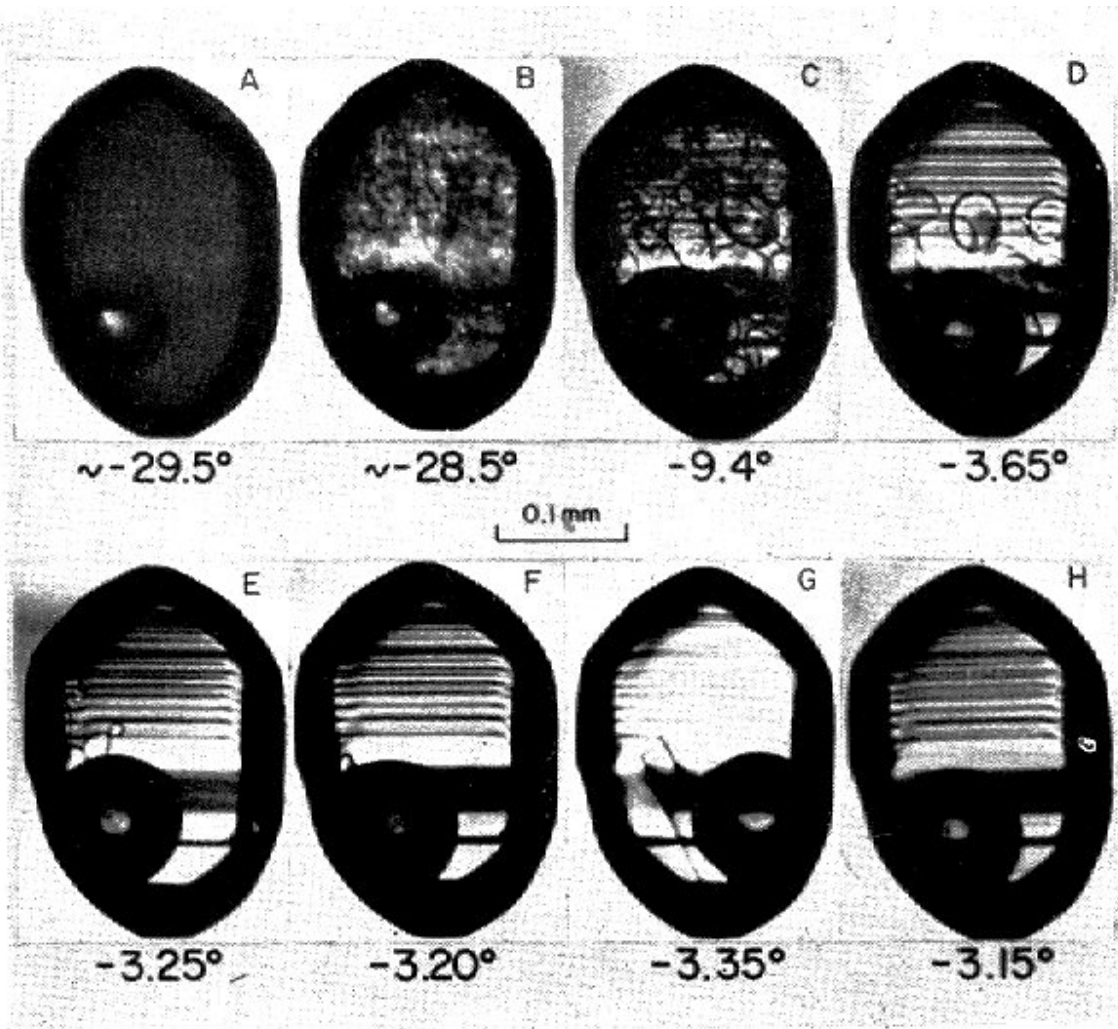
Помимо того, что кристалл практически постоянно охвачен градиентной зоной, около пограничного слоя кристалла обычны и конвективные потоки.

По этим причинам, растущие кристаллы (особенно крупные) реально не однородны.

В местах отрыва струй от поверхности кристалла обычно возникают флюидные включения



# Взаимодействие растущих кристаллов и маточной среды



Включение жидкости с кристалликами солей в сфалерите месторождения Creede.

Включение было заморожено (левое фото). Затем постепенно нагревалось. При этом, кристаллики солей начали растворяться, возникли конвективные потоки и произошло расслоение раствора во включении



# Взаимодействие растущих кристаллов и маточной среды

## Массоперенос при кристаллизации

Скорость свободной конвекции зависит от скорости роста (или растворения) кристалла и его размера, от разности плотностей кристалла и растворителя, от вязкости и теплопроводности растворителя, которые в значительной степени определяют толщину пограничного слоя раствора.

3) Вынужденная конвекция возникает при появлении разностей давления в подвижной среде: это поток жидкости под действием гравитации - движение грунтовых и артезианских вод; гидротерм за счёт повышения давления на глубине, а также вследствие вскипания растворов при возрастающей температуре; тектонических напряжений, понижающих пористость пород...

Массоперенос при диффузии минимален, при вынужденной конвекции максимален. Характер массопереноса оказывает сильное воздействие на морфологию растущих и растворяющихся кристаллов.

В каких средах реально действует только диффузионный механизм переноса вещества? В твёрдых телах, в переохлажденных расплавах с высокой вязкостью, в густых гелях, а также в тех случаях, когда кристаллизация из растворов происходит в тонких трещинах и в капиллярах. При этом обычны варианты диффузионного голодания, что приводит к росту скелетных кристаллов и дендритов. Увеличение

# **Взаимодействие растущих кристаллов и маточной среды**

## **Массоперенос при кристаллизации**

массопереноса сверх диффузионного обычно не только увеличивает скорость роста, но и приводит к росту полногранных кристаллов. В направленном потоке скорость роста граней, встречающих поток, больше, чем противоположных.

## **Кинетика кристаллизации**

Скорость роста граней определяет большое число свойств кристалла и сама определяется всей совокупностью внешних условий, формой поверхности и приповерхностной дефектностью. При возникновении и возрастании пересыщения некоторое время рост не начинается. Интервал пересыщений, когда нет роста, - "мертвая зона", её ширина зависит от загрязненности среды активными примесями и обратно от температуры. Обычным является одновременное присутствие на кристалле граней растущих и не растущих, что обусловлено специфичностью адсорбции на поверхностях с разным атомным строением.

После длительной выдержки не растущего кристалла в насыщенном растворе, последующего создания и увеличения пересыщения начинается быстрый рост. При разных механизмах роста зависимость скорости роста от пересыщения различается. При одинаковых пересыщениях и примесном составе раствора скорость роста

# **Взаимодействие растущих кристаллов и маточной среды**

увеличивается при росте температуры. Изменения скорости роста происходят не плавно, а часто скачками - аномалии скоростей приурочены к особым точкам воды, к интервалам ее структурной перестройки. Для многих веществ при постоянной температуре, пересыщении и составе среды обнаружено, что скорости роста не постоянны. Для крупных кристаллов водорастворимых солей колебания скорости роста составляют 2-4 раза, для мелких до 10 раз. Продолжительность флуктуаций скоростей составляет до многих десятков минут. Главные причины столь резких колебаний скоростей роста кристаллов во времени - колебания пересыщения непосредственно на границе раствора с кристаллом, что обусловлено неустойчивостью конвекционных потоков. С изменением пересыщения меняется число, активность и расположение центров роста на гранях, а соответственно и скорость роста граней. Флуктуативное зарождение новых центров роста на поверхности в свою очередь приводит к изменению пересыщения в разных участках поверхности кристалла и таким образом для всей системы постоянно поддерживаются переменные условия. С течением времени при неизменности внешних параметров роста наблюдается тенденция к уменьшению общей скорости роста кристаллов, что объясняется уменьшением числа активных центров на поверхности.



# Реальные скорости роста кристаллов

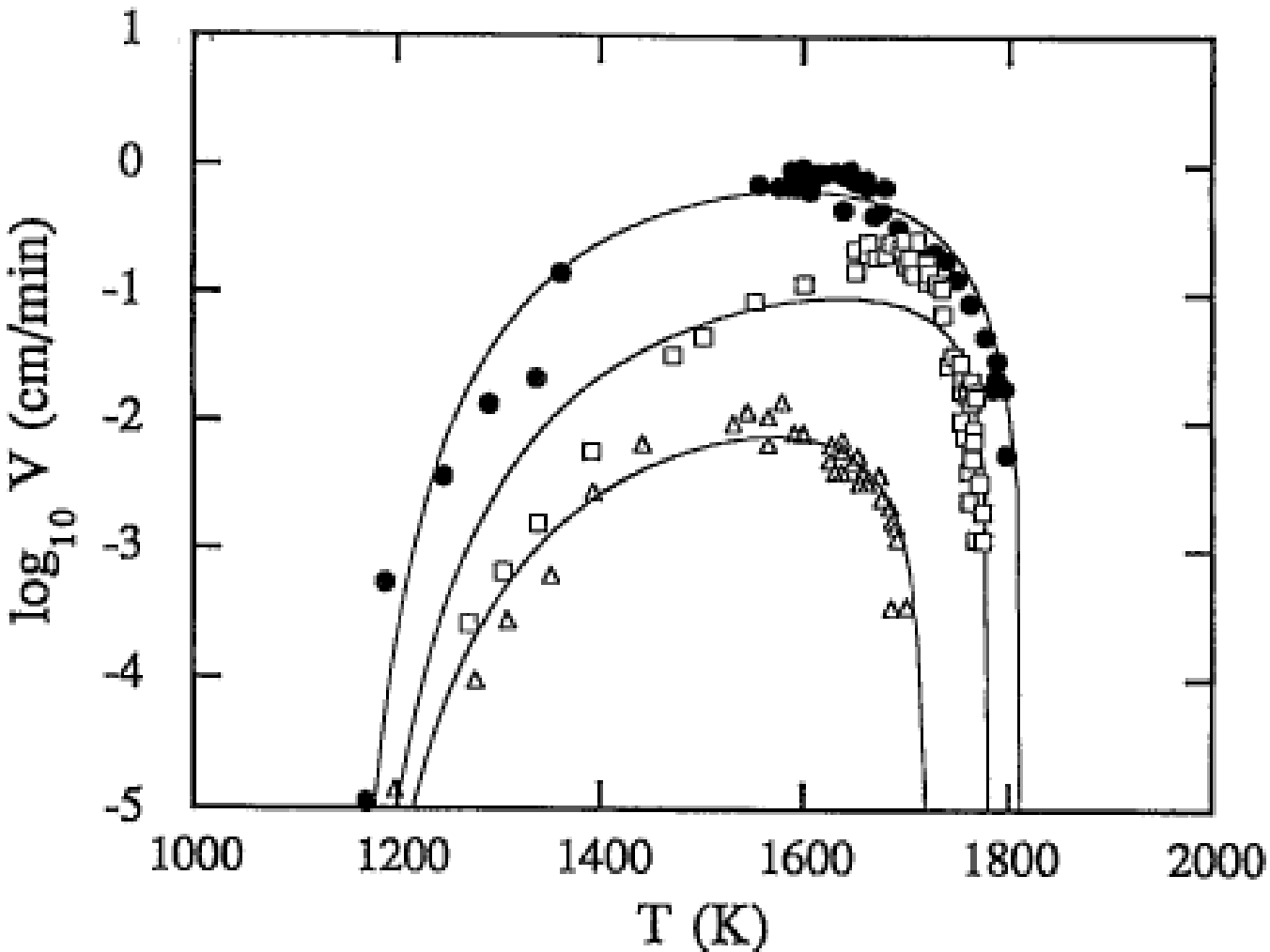


FIG. 1. Measurements of growth velocity in the synthetic Ab-An system (from Kirkpatrick *et al.* 1979) and calculated growth-velocity as a function of temperature for various An-concentrations: 100 mol.% (circles), 75 mol.% (squares), 50 mol.% (triangles).

Kirkpatrick R.J., Klein L., Uhlmann D.R. & Heys J.F., 1979.  
J. Geophys. Res. Vol. 84. P. 3671-3676

# Степени пересыщения и переохлаждения - форма кристаллов

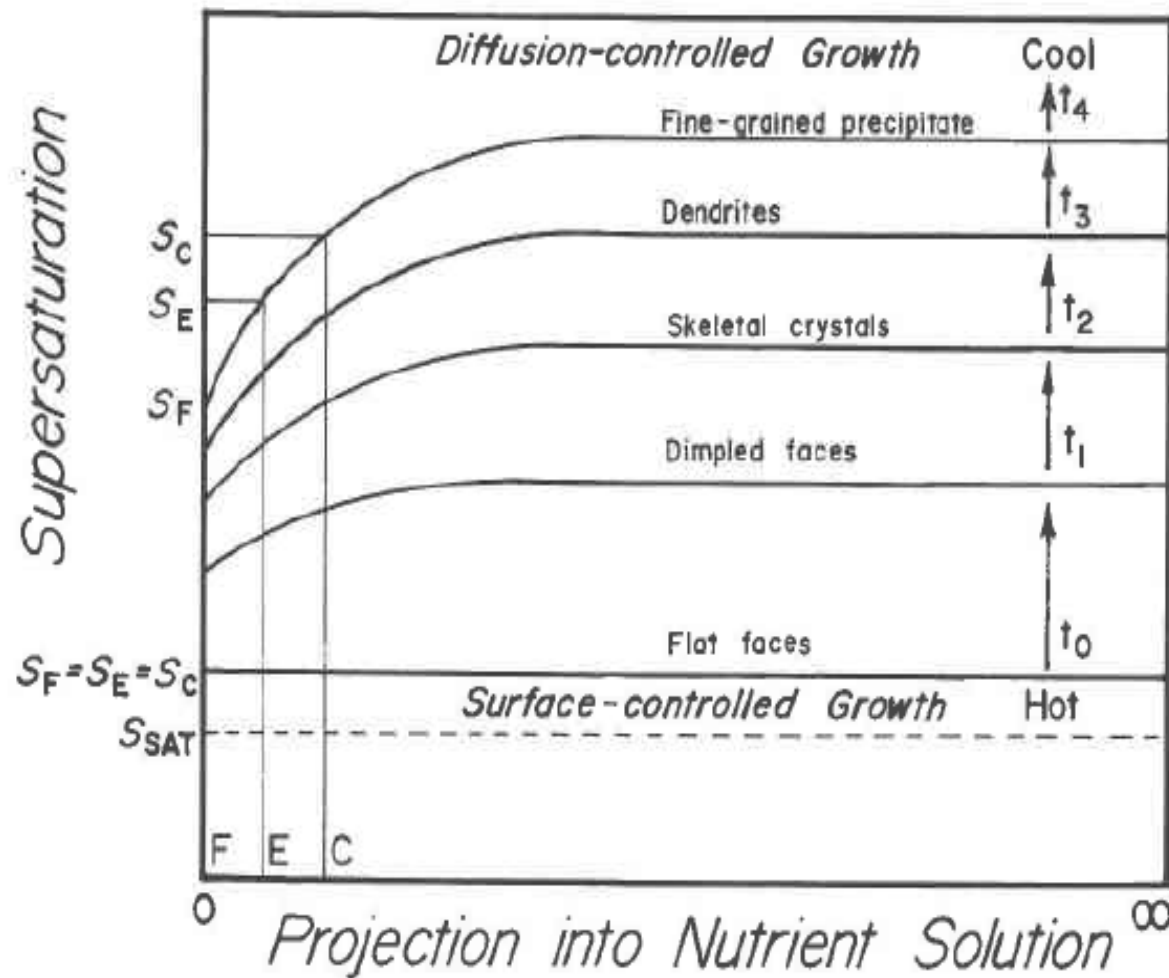


Fig. 6. Schematic profiles of nutrient concentration during quenching. At the inception of cooling at the end of an experiment ( $t_0$ ), the supersaturation profile was typical of surface-controlled growth ( $S_F = S_E = S_C$ ). As cooling progressed ( $t_1$  to  $t_4$ ), the profile gradually shifted to that resulting from diffusion-controlled growth ( $S_C > S_E > S_F$ ), explaining the shift from the formation of complex, euhedral crystals at the beginning of the cooling cycle to dendritic growth as cooling continued.

# Степени пересыщения и переохлаждения - форма кристаллов пирита

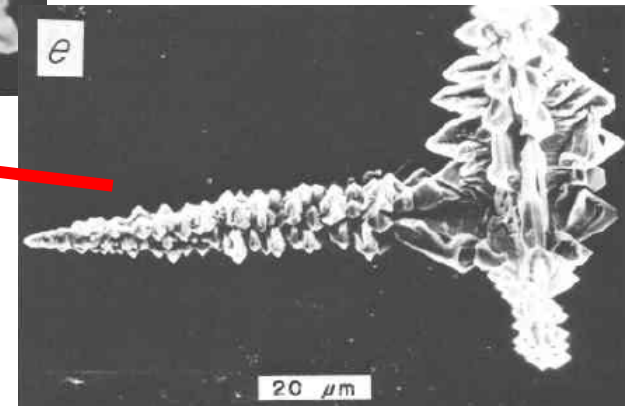
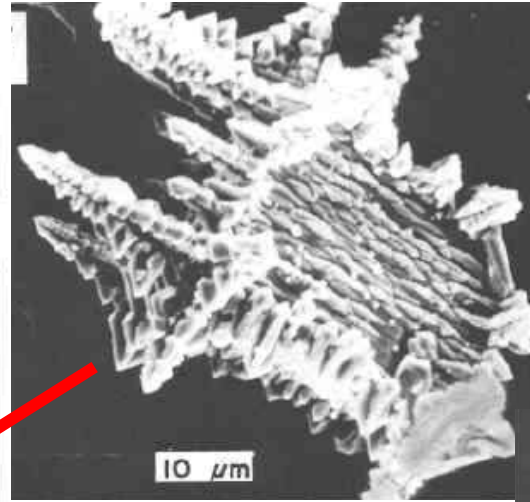
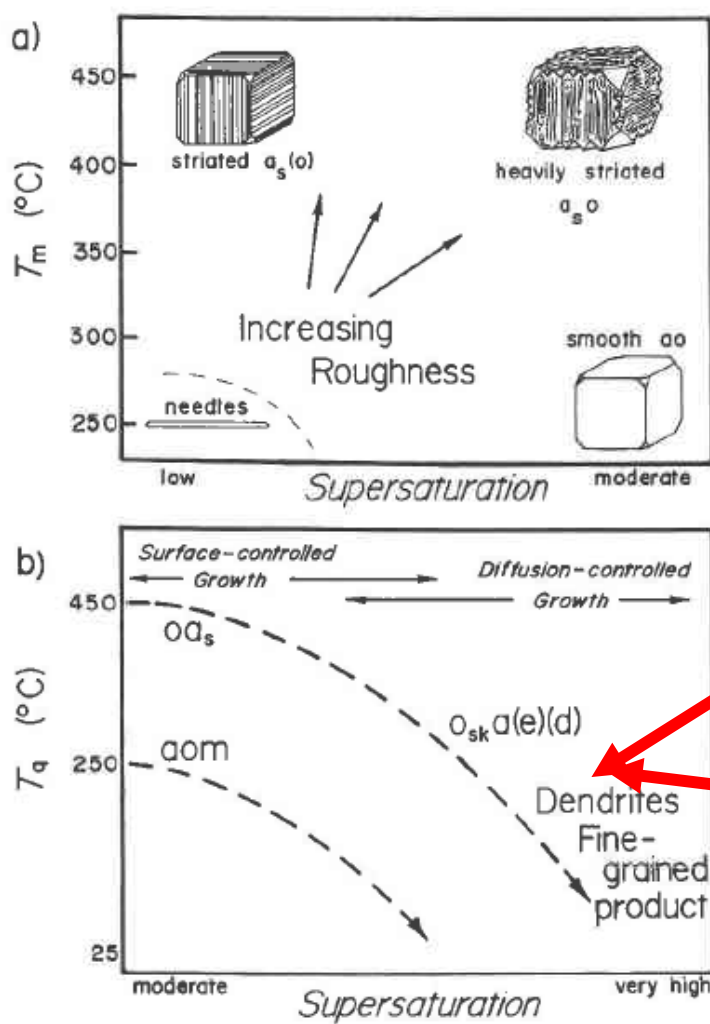
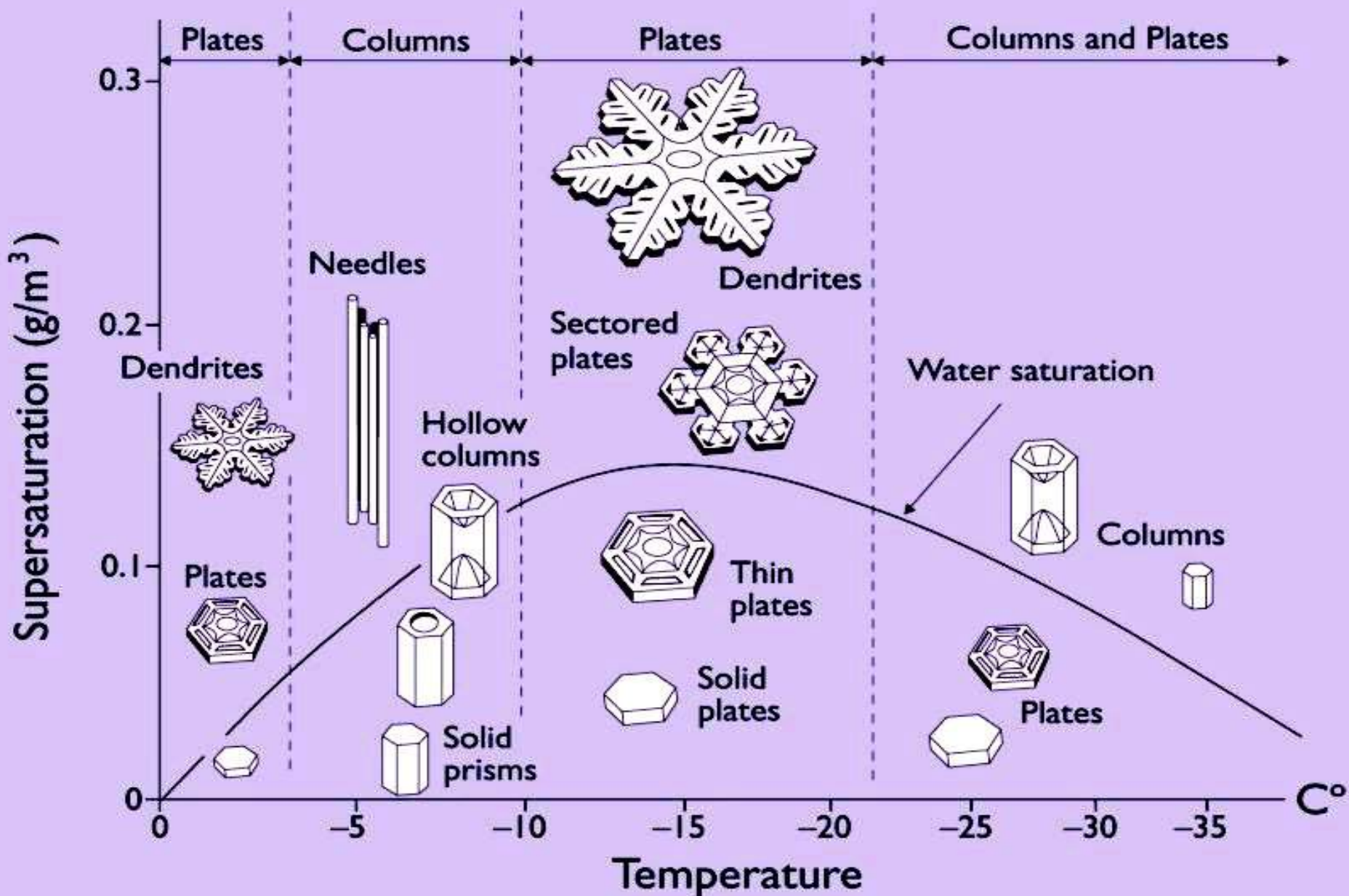


Fig. 4. Morphologies of hydrothermally grown pyrite. (a) Habits produced during steady-state conditions.  $T_m$  is the mean run temperature. The degree of supersaturation is known only approximately for this system. (b) Typical temperature vs. supersaturation paths (heavy dashed lines) and habits produced during quenching.  $T_q$  is the temperature at the beginning of the quench. Crystal forms are given in decreasing order of development using the letters  $a = \{100\}$ ,  $o = \{111\}$ ,  $e = \{210\}$ ,  $m = \{311\}$ , and  $d = \{110\}$ . Subscripts  $s$  and  $sk$  indicate the associated forms are striated or skeletal, respectively, and parentheses indicate minor development of the form or feature.

Murowchick J.B. & Barnes H.L.  
 Effect of temperature and degree of  
 supersaturation on pyrite morphology //  
 Amer. Mineral. 1987. Vol. 72.  
 P. 1241-1250.



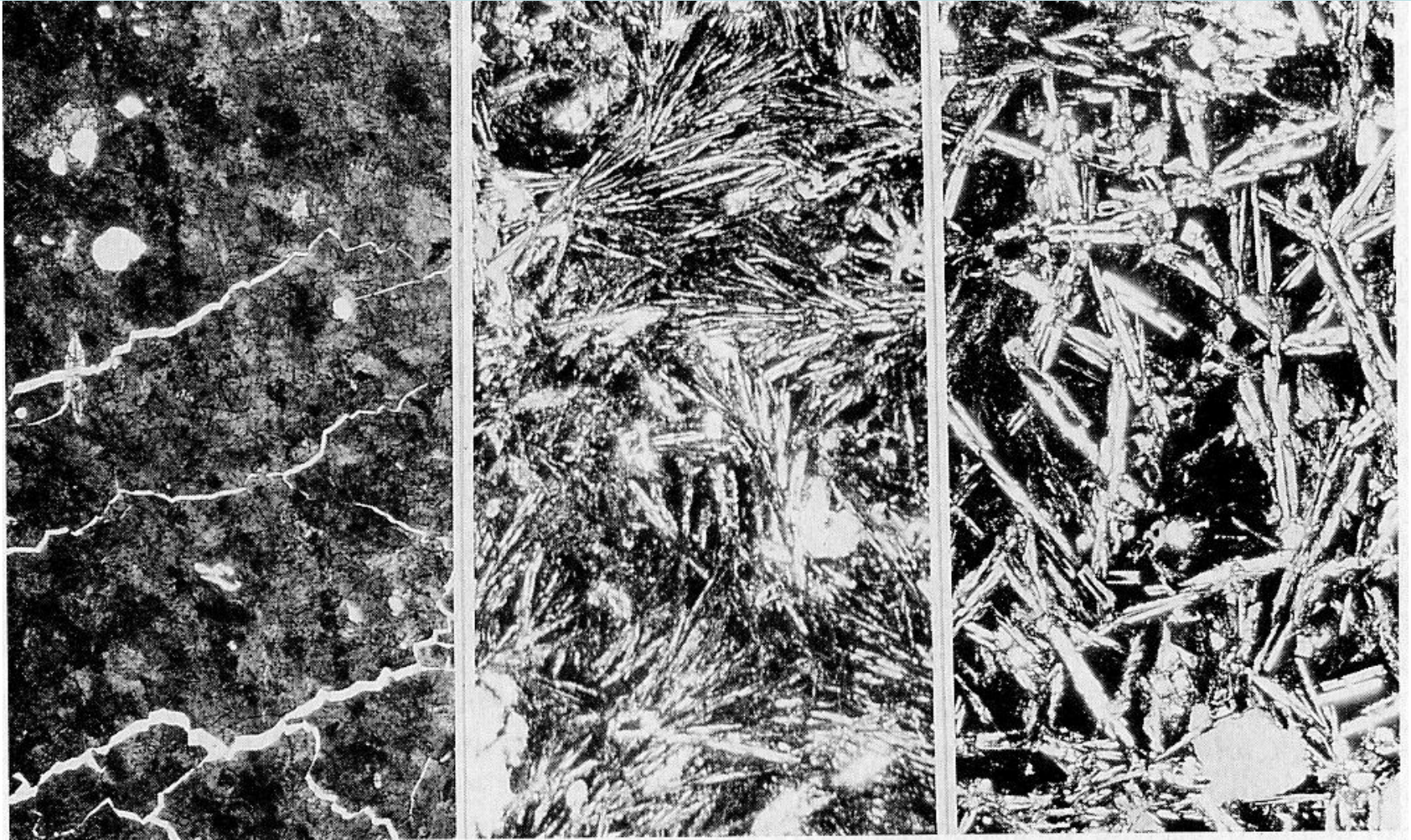
# Степени пересыщения и переохлаждения - форма кристаллов льда





# Степени пересыщения и переохлаждения - форма кристаллов плагиоклаза

Размеры и форма кристаллов плагиоклаза в шаровых лавах базальтов Срединно-Атлантического хребта. Слева – стекловатая корка, справа – базальты в центре шара. Шлифы при 1 николе. Ширина поля 1 мм





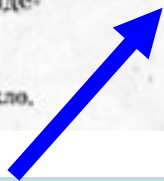
# Степени пересыщения и переохлаждения - форма кристаллов оливина

Форма кристаллов оливина, полученных при кристаллизации расплава базальтового состава при различных условиях

Изменение формы и состава оливина в зависимости от температуры закалки расплава оливинного габбро-норита

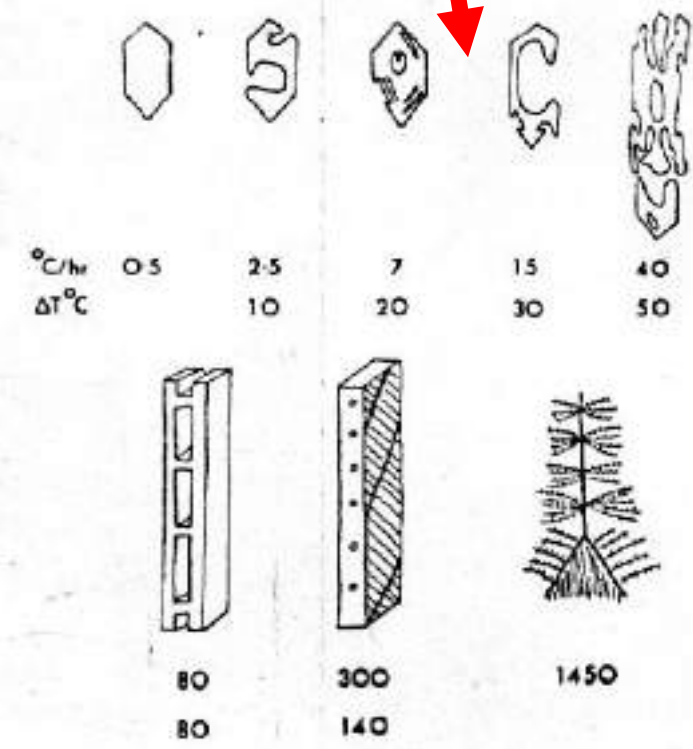
Температура, °C	Фазовый состав агрегата	Состав оливина		Форма выделения оливина
		2V	Содержание Fe <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub> , %	
1250	Ст	—	—	
1225	Ол+Ст	+87	8	Сильные изометричные кристаллы
1200	Ол+Ст	±90	12	
1170	Ол+Мп+Ст	—	—	Слабо удлинённые кристаллы, иногда с небольшими полостями
1150	Ол+Мп+Ст	-88	19	Толстостенные короткопризматические футлярообразные кристаллы
1130	Ол+Мп+Ст	—	—	
1100	Ол+Мп+Ст	-84	31	Тонкостенные, часто незамкнутые футлярообразные кристаллы длиннопризматического облика
1050	Ол+Мп+Ст	-79	Лейстовидные выделения	

Сокращения: Ол — оливин, Мп — моноклинный пироксен, Ст — стекло.



Зависимость от температуры закалки

Зависимость от скорости остывания, °C / час

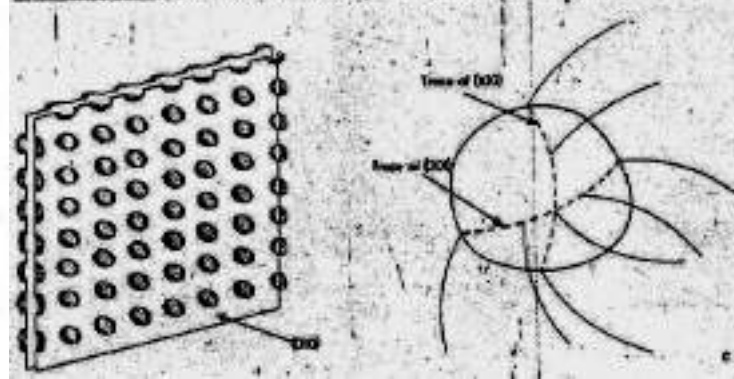
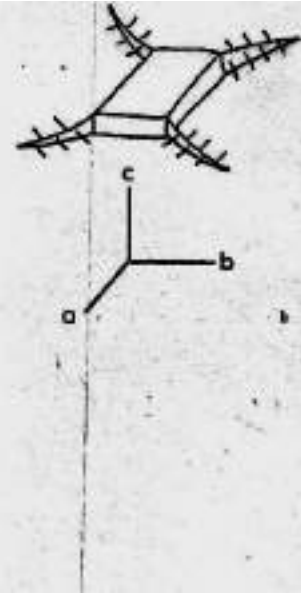
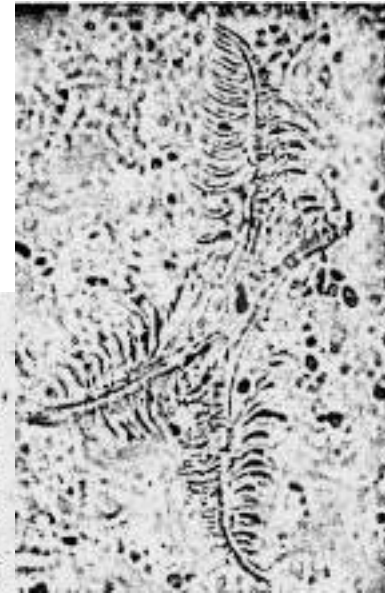
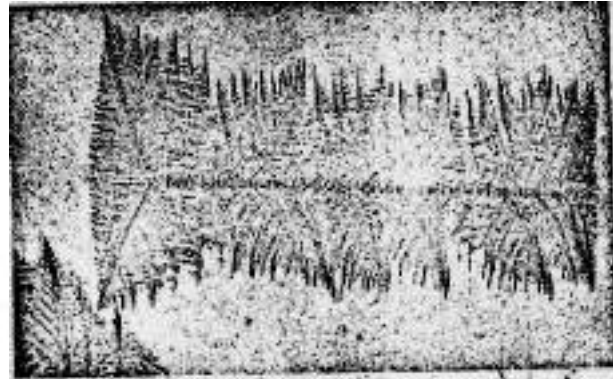
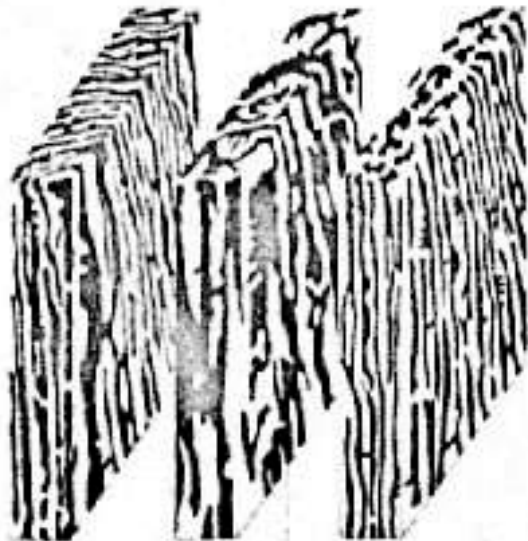




# Степени пересыщения и переохлаждения - форма кристаллов оливина

Форма кристаллов оливина, полученных при кристаллизации расплава базальтов при различных условиях

При  
очень  
быстром  
остывании



При крайне  
быстром  
остывании



Зебры Нгоронгоро

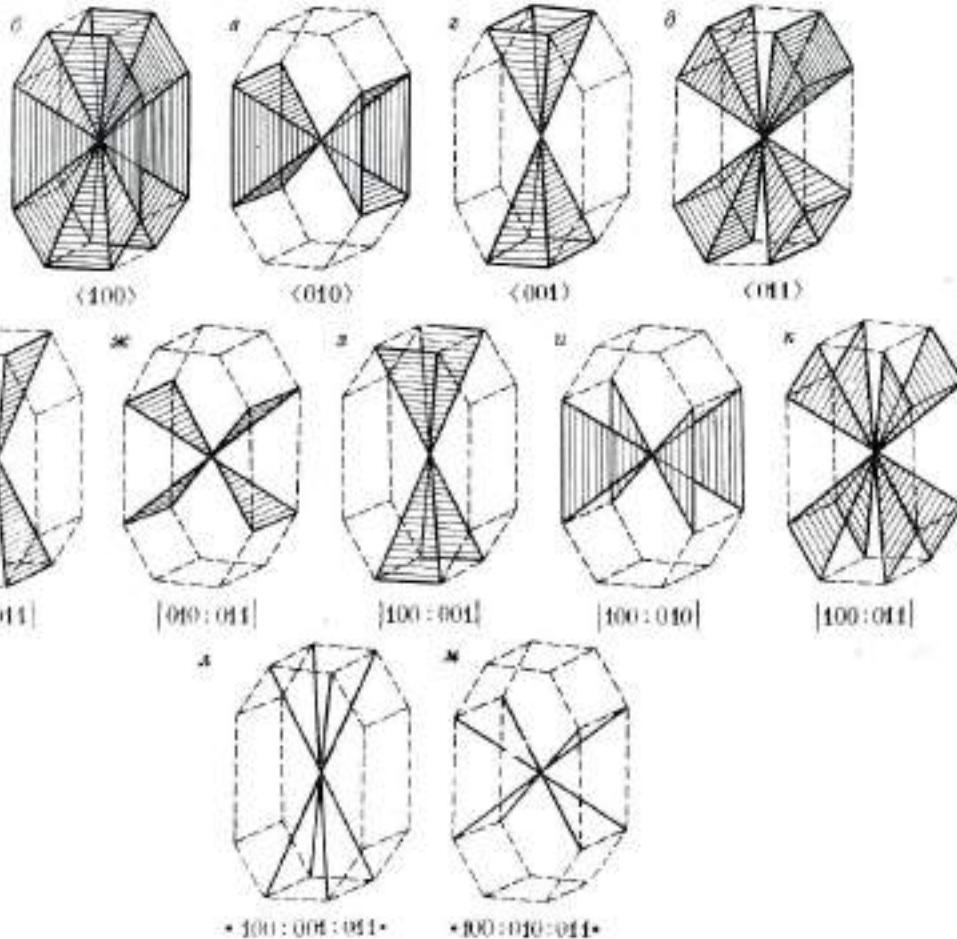
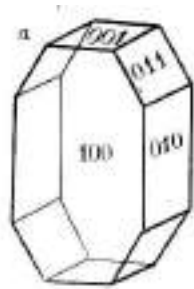




Улуг-Танзек, Тува



# Элементы строения кристаллов



Кристаллы образуют пирамиды роста граней, плоскости роста рёбер, линии роста вершин. Часто кристаллы растут из микроскопического размера зародышей, так называемых критических зародышей, обладающих той же кристаллической структурой, что и макрокристаллы.

Макрокристаллы возникают путём разрастания этих зародышей, при воспроизводстве, редупликации кристаллической структуры данного минерала.

**Э.М. Спиридонов**

**Генетическая минералогия.**

**ГМ-1. Онтогения. Индивиды**

**Рост кристаллов**

**005. Механизмы и варианты  
роста кристаллов**

# Основы теории зарождения и роста кристаллов

Механизмы роста кристаллов: нормальный, послойный при двумерном зародышеобразовании, дислокационный (спиральный), за счёт трёхмерных зародышей. Роль подвижности минералообразующей среды и вращения кристаллов при нормальном механизме роста.

Нодулярные и орбикулярные текстуры (оливин - хромшпинелиды, оливин – ильменит, овоиды K-Na полевого шпата в гранитах - рапакиви).

Связь формы кристаллов с их структурой.

Варианты роста кристаллов. Свободный рост кристаллов при постоянных условиях.

Принцип П. Кюри.

Отталкивание и захват твёрдых фаз и флюидных включений кристаллами. Формирование сингенетических включений в кристаллах, в том числе трубчатых.



**Механизмы роста кристаллов.**

**Их четыре**

# 1. Нормальный механизм роста кристаллов

Нормальный механизм роста кристаллов - тот, при котором поверхность кристалла любой ориентации, включая иррациональные, перемещается параллельно самой себе. Результаты **нормального роста**: округлые поверхности роста кристаллов, кривые поверхности скелетных и иных кристаллов.

При этом, кривизна поверхности кристалла в целом отвечает кривизне изотермической поверхности. **Нормальный механизм роста** «работает», когда существуют несингулярные поверхности с большим числом мест прикрепления частиц. На таких поверхностях частицы могут прикрепляться практически в любом месте, чем обусловлено почти параллельное перемещение поверхности растущего кристалла.

# Нормальный механизм роста кристаллов

Судя по наблюдениям за кристаллизацией льда в озере Байкал, правильная округлая форма кристаллов льда возникла при очень сильном ветре, который заставил кристаллы льда интенсивно вращаться, обеспечивая идеальные условия для нормального механизма роста кристаллов



# Нормальный механизм роста кристаллов



**Фото М.И. Кузьмина**

Нормальный рост кристаллов льда на Байкале, обусловленный очень сильным ветром, который заставил кристаллы льда быстро крутиться

# Нормальный механизм роста кристаллов



Нормальный рост кристаллов льда в Финском заливе, обусловленный очень сильным ветром, который заставил кристаллы льда быстро вращаться



# Нормальный механизм роста кристаллов



Похожие на куриные яйца ледяные шары скопились вдоль линии прибоя на финском острове Хайлуото

Нормальный рост кристаллов льда в Финском заливе, обусловленный очень сильным ветром, который заставил кристаллы льда быстро вращаться



# Нормальный механизм роста кристаллов



Нормальный рост кристаллов льда в Финском заливе, обусловленный очень сильным ветром, который заставил кристаллы льда быстро вращаться

# Нормальный механизм роста кристаллов



Хайлуото расположен на севере Балтийского моря в Ботническом заливе, который разделяет Финляндию и Швецию

Нормальный рост кристаллов льда в Финском заливе, обусловленный очень сильным ветром, который заставил кристаллы льда быстро вращаться

# Нормальный механизм роста кристаллов

Рисунки текстур гранитов – рапакиви согласуются с этими наблюдениями, поскольку овоиды K-Na полевого шпата с эпитактически выросшим олигоклазом или без него со всех сторон обтекают таблицы K-Na полевого шпата следующей генерации.

Это, как и концентрическое расположение включений биотита и гастингсита внутри овоидов, конформное их внешней форме, **свидетельствует о росте овоидов в расплаве в процессе вращения.**



# Нормальный механизм роста кристаллов



**О кристаллизации при движении – вращении в расплаве свидетельствует текстура гранитов рапакиви (выборгитов).  
«Обтекание» овоидов К-На полевого шпата  
пластинами К-На полевого шпата**

# Нормальный механизм роста кристаллов

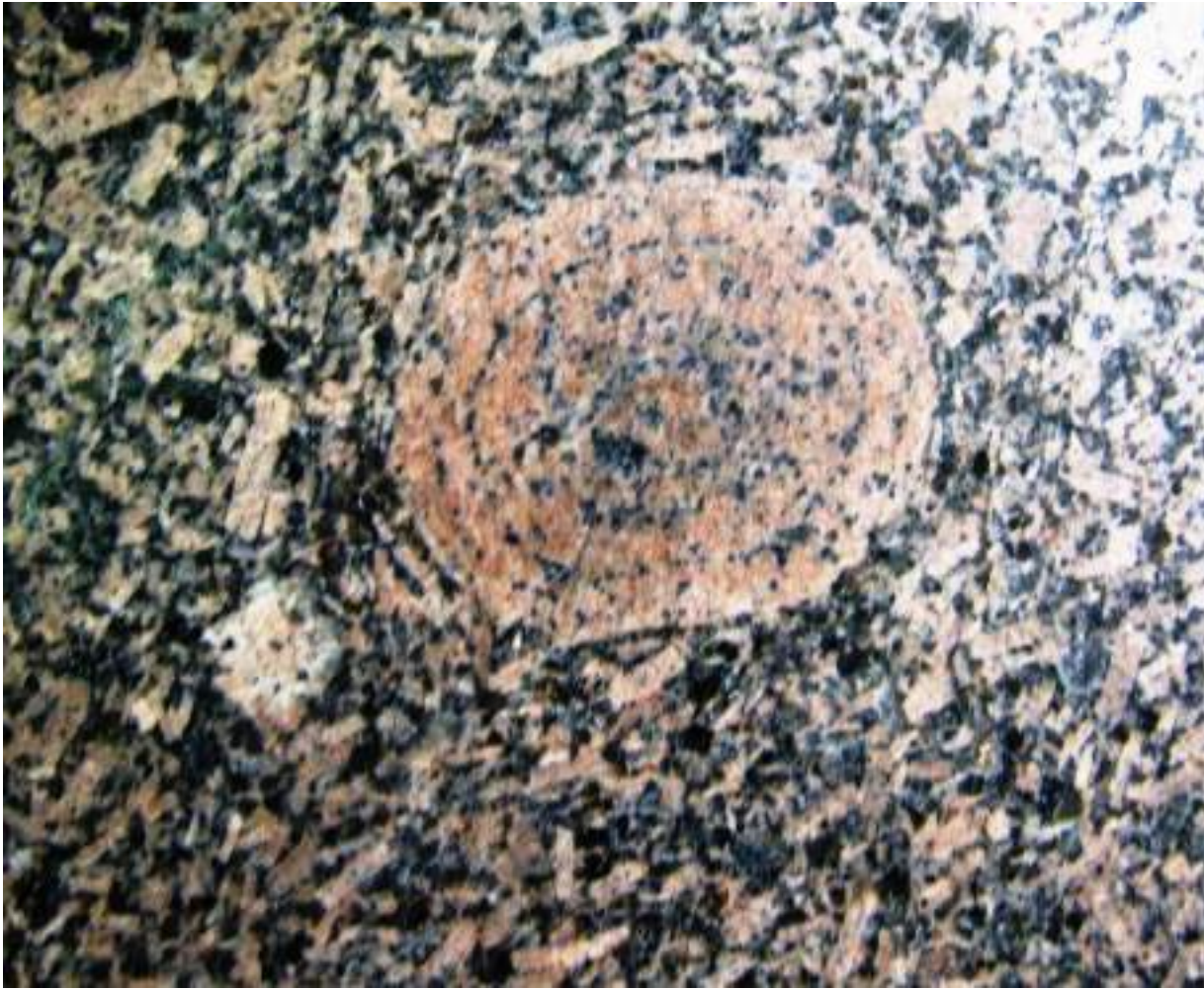


**О кристаллизации при движении – вращении в расплаве свидетельствует текстура гранитов рапакиви (выборгитов).**

«Обтекание» овоидов К-Na полевого шпата пластинами К-Na пол. шпата



# Нормальный механизм роста кристаллов



**О кристаллизации при движении – вращении в расплаве свидетельствует текстура гранитов рапакиви (выборгитов).  
«Обтекание» овоидов К-На полевого шпата  
пластинами К-На полевого шпата**



# Нормальный механизм роста кристаллов



**О кристаллизации при движении – вращении в расплаве свидетельствует текстура гранитов рапакиви (выборгитов).  
«Обтекание» овоидов К-На полевого шпата  
пластинами К-На полевого шпата**

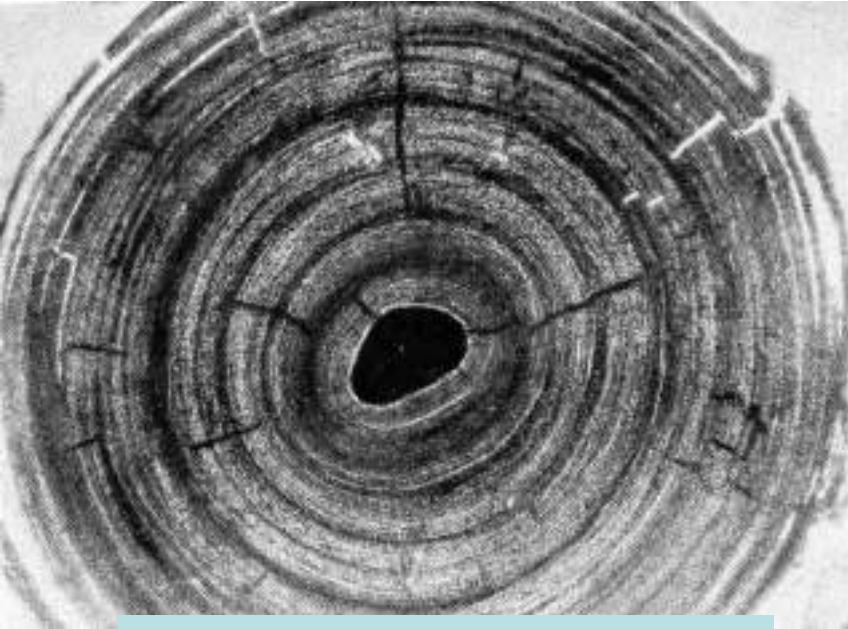
# Нормальный механизм роста кристаллов

Таким образом, **овоиды** в гранитах рапакиви **растут по способу оолитов и жемчужин, а не сферолитов.**

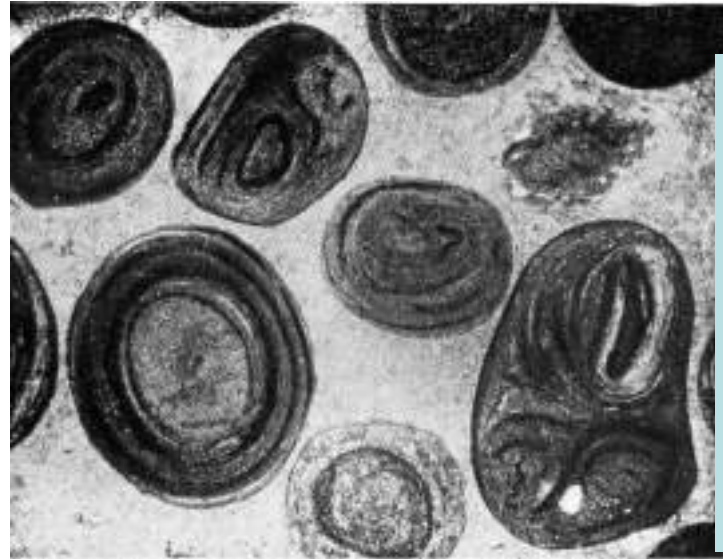
Подвижность и относительно низкая вязкость расплава гранитов - рапакиви в значительной степени обусловлена повышенной концентрацией в расплаве фтора, который в дальнейшем был фиксирован в биотите, апатите, амфиболе, акцессорном флюорите (до иттрофлюорита).

# Нормальный механизм роста

Железорудные морские толщи. Аятское месторождение, Зап. Сибирь

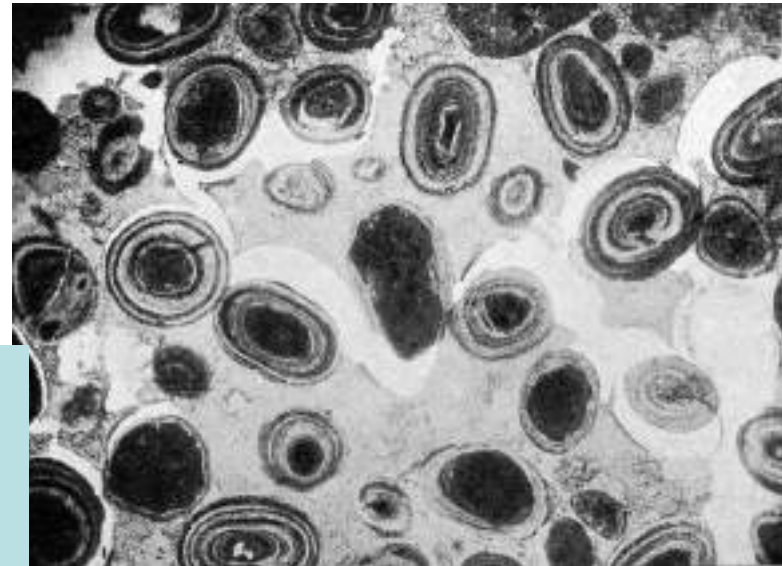


**Оолит гётита с гематитовым ядром**  
1 мм. При 1 николе



**Сложные оолиты**

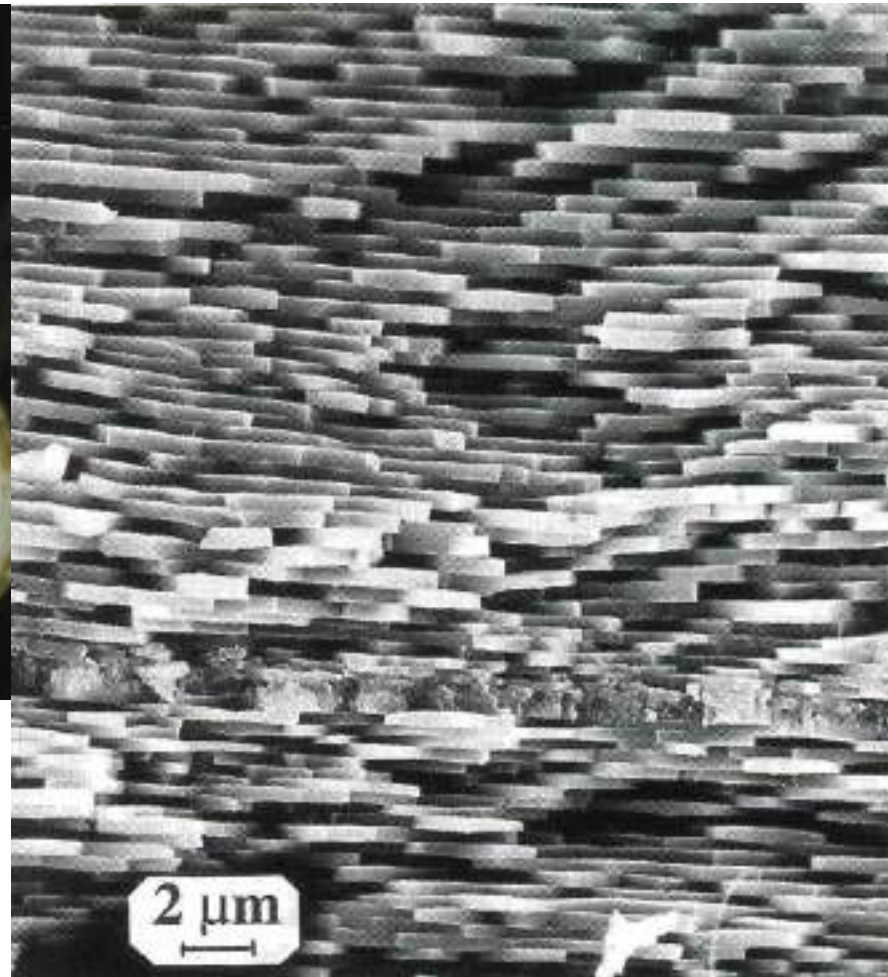
3 мм. При 1 николе.



**Оолиты шамозита с ядрами гётита кварца и глауконита.**  
3 мм. При 1 николе



# Нормальный механизм роста



Очевидно, что таков же механизм роста жемчужин идеальной формы в теле материнских моллюсков - нарастание по оолитовому механизму при вращении

# Механизмы роста кристаллов

## Нормальный рост

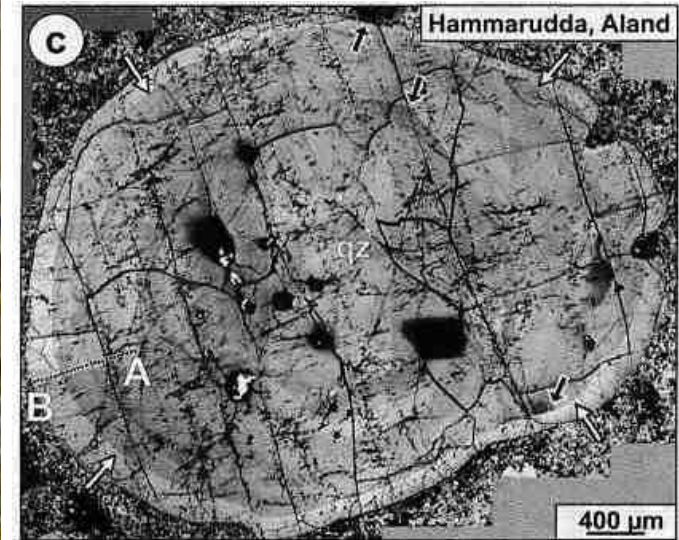


FIG. 8. Scanning-electron-microscope-derived cathodoluminescence images of quartz phenocrysts adjacent to rapakivi feldspars in (a) the Altenberg–Frauenstein microgranite, (b) the Land’s End granite, and (c) the Hammarudda porphyry. Trace-element traverses along the profiles A–B were determined with an electron microprobe. The white arrows mark marginal resorption-induced surfaces overgrown by bright luminescent quartz. Other resorption surfaces are indicated by black arrows. The bright overgrowth in the Altenberg–Frauenstein phenocryst is graphically intergrown with matrix K-feldspar. Key to abbreviations: kfs: potassium feldspar, pl: plagioclase, qz: quartz.

Вкрапленник кварца в гранитах-рапакиви (выборгитах)



# Нормальный механизм роста кристаллов

Наблюдения разделённых эвтектик оливин – хромшпинелидного состава в перидотитах складчатых областей (Хабарнинский, Верхняя Тура, Кемпирсайский, Урал; Радуша, Македония; Шорджинский, Армения; Ипягский, Азербайджан; Октопус клайм, Сискью, Калифорния) и платформ (Бор-Урях, Маймеча-Котуйская щелочная провинция, Восточно-Сибирская платформа) свидетельствуют, что таков же механизм образования орбикул оливина и нодулей хромшпинелидов.



# Нормальный механизм роста кристаллов

Оливин – овоиды -вкрапленники в оливин-хромшпинелидной матрице



Южный  
Урал

Фото  
Э.М.  
Спиридонова

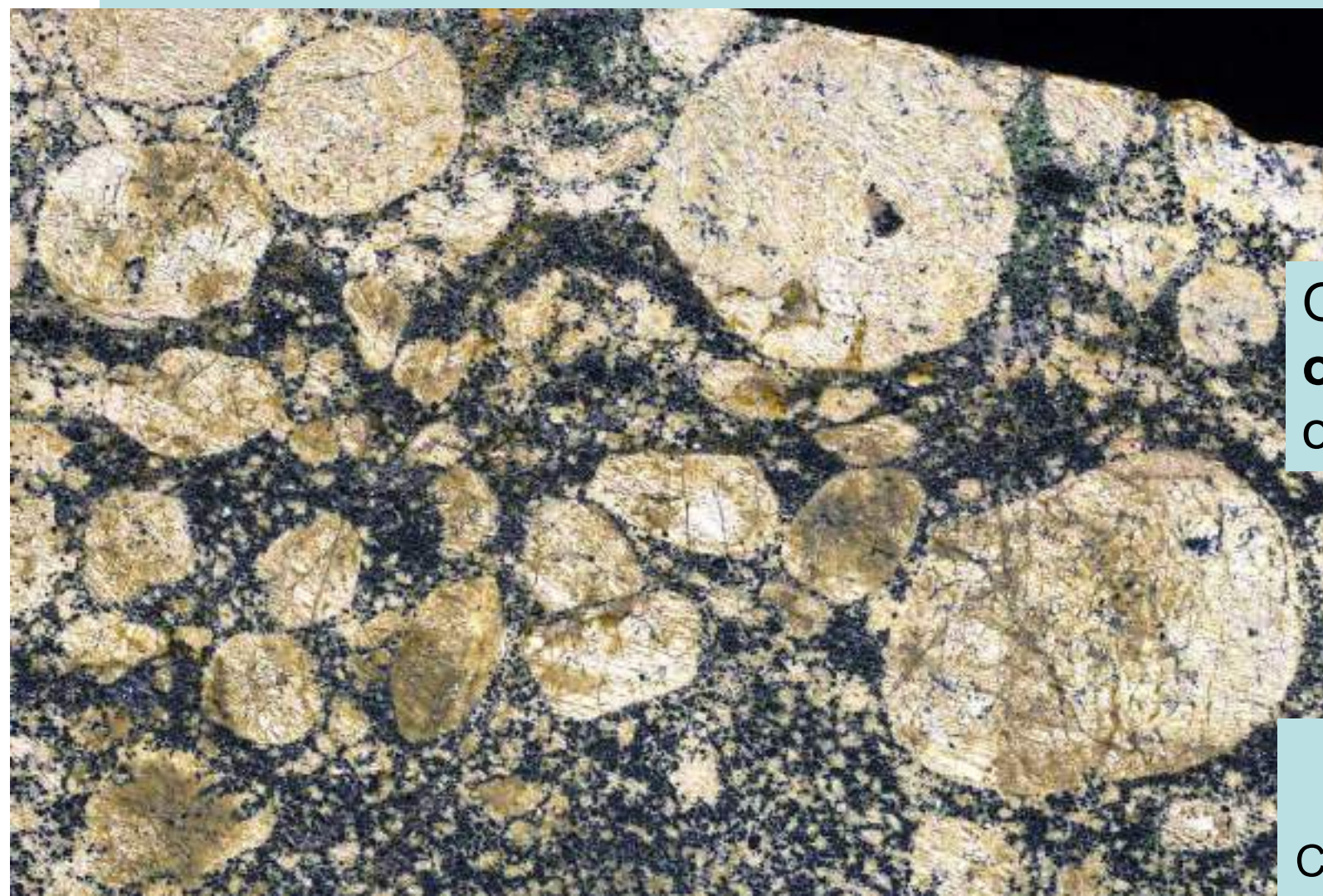
Овоиды – орбикулы оливина. 85x74 мм. Хабаровинский массив



# Нормальный механизм роста кристаллов

Оливин – овоиды -вкрапленники в оливин-  
хромшпинелидной матрице

Хабарнинский массив, Южный Урал



Овоиды –  
орбикулы  
оливина

59x34 мм

Фото  
Э.М.  
Спиридонова



# Нормальный механизм роста кристаллов

Разделённые эвтектики - оливин-хромшпинелидные орбикулы



112x61 мм. Радуша, Скопье,  
Македония

Фото Э.М. Спиридонова

ММ-55142. 96x78 мм.  
Радуша, Скопье, Македония

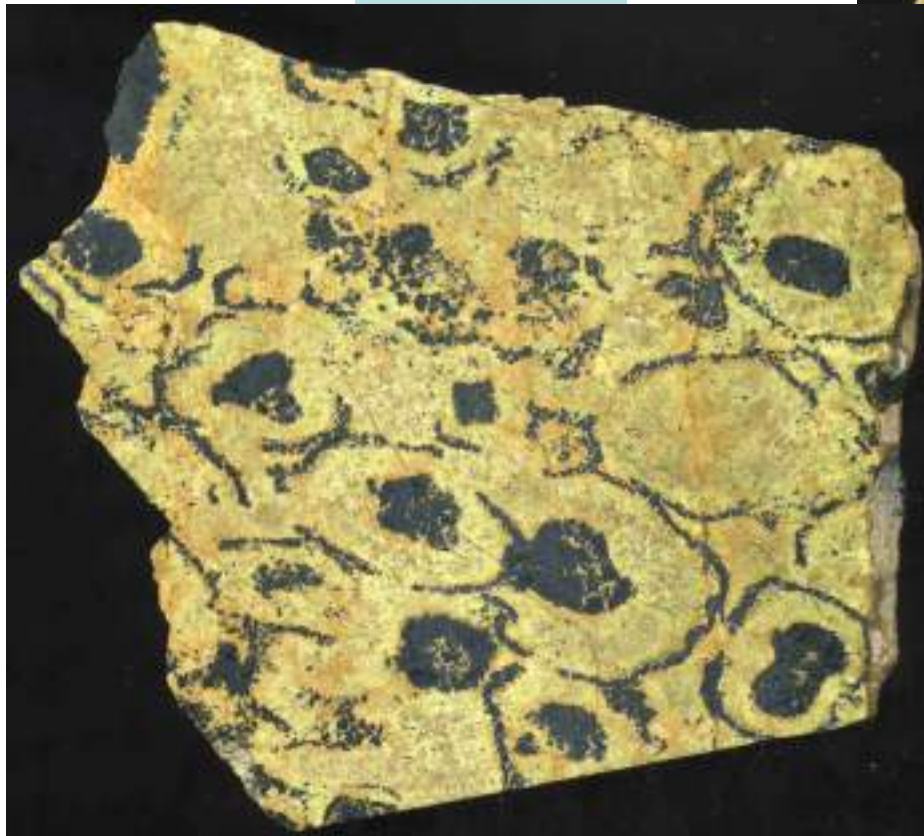




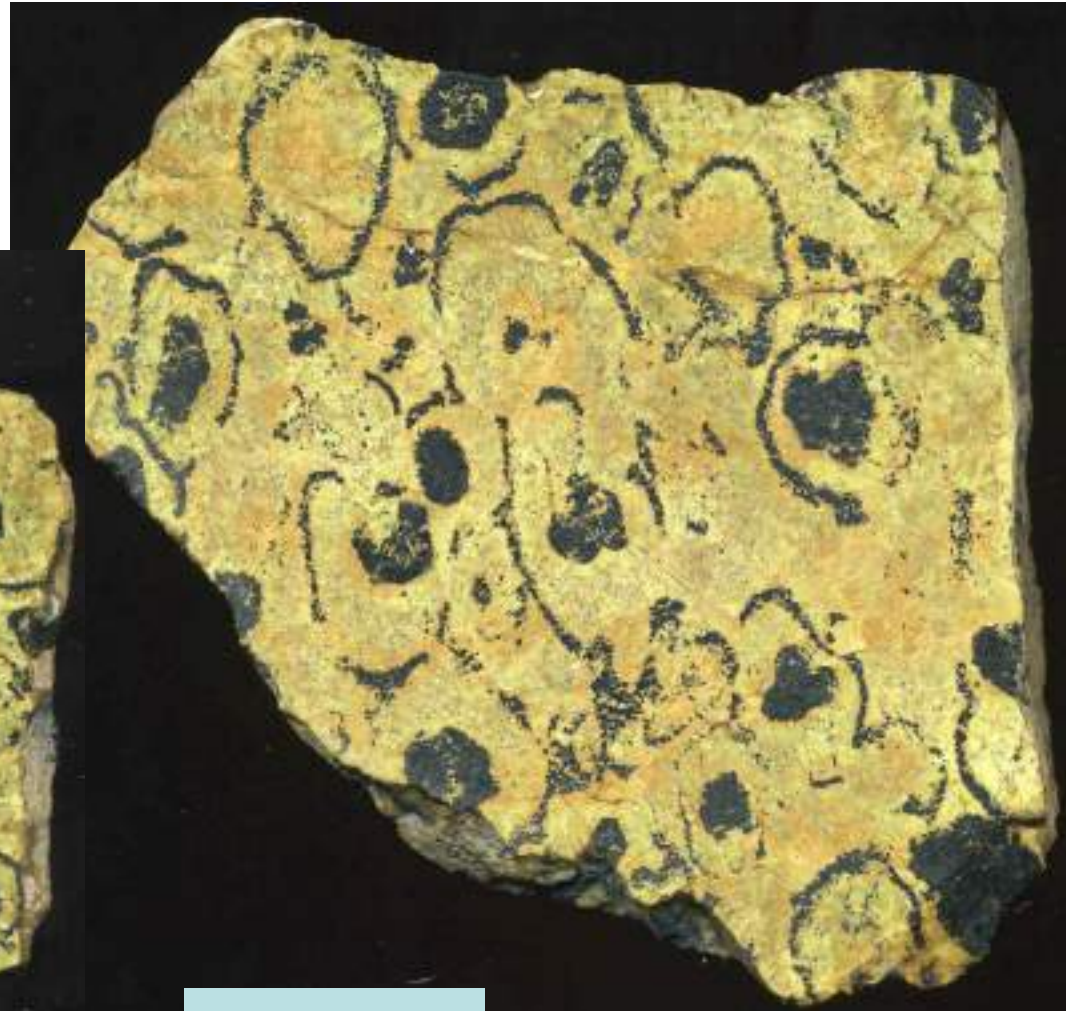
# Нормальный механизм роста кристаллов

Разделённые эвтектики - оливин-хромшпинелидные орбикулы

87x80 мм



100x95 мм



ММ-55142. Радуша, Скопье, Македония

Фото Э.М. Спиридонова

# Нормальный механизм роста кристаллов

## Нодули хромшпинелидов в оливиновой матрице

46x42 мм



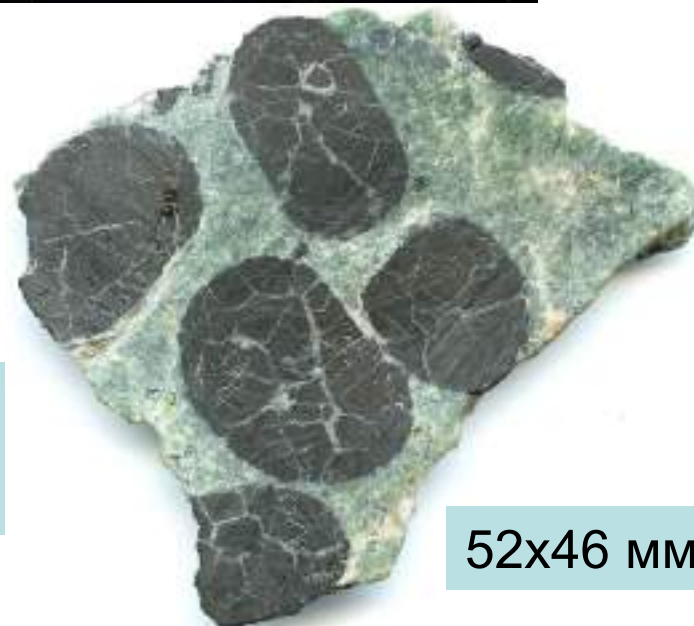
73x55  
мм



**Златоустовский  
массив, Урал**

Фото  
Э.М.  
Спиридонова

52x46 мм





# Норальный механизм роста кристаллов

Нодули хромшпинелидов в оливиновой матрице

92x57 мм



Массив Рай-Из, Полярный Урал

Колл. Э.М. Спиридонова  
Фото А.А. Машкиной



# Нормальный механизм роста кристаллов

## Нодули хромшпинелидов в оливиновой матрице

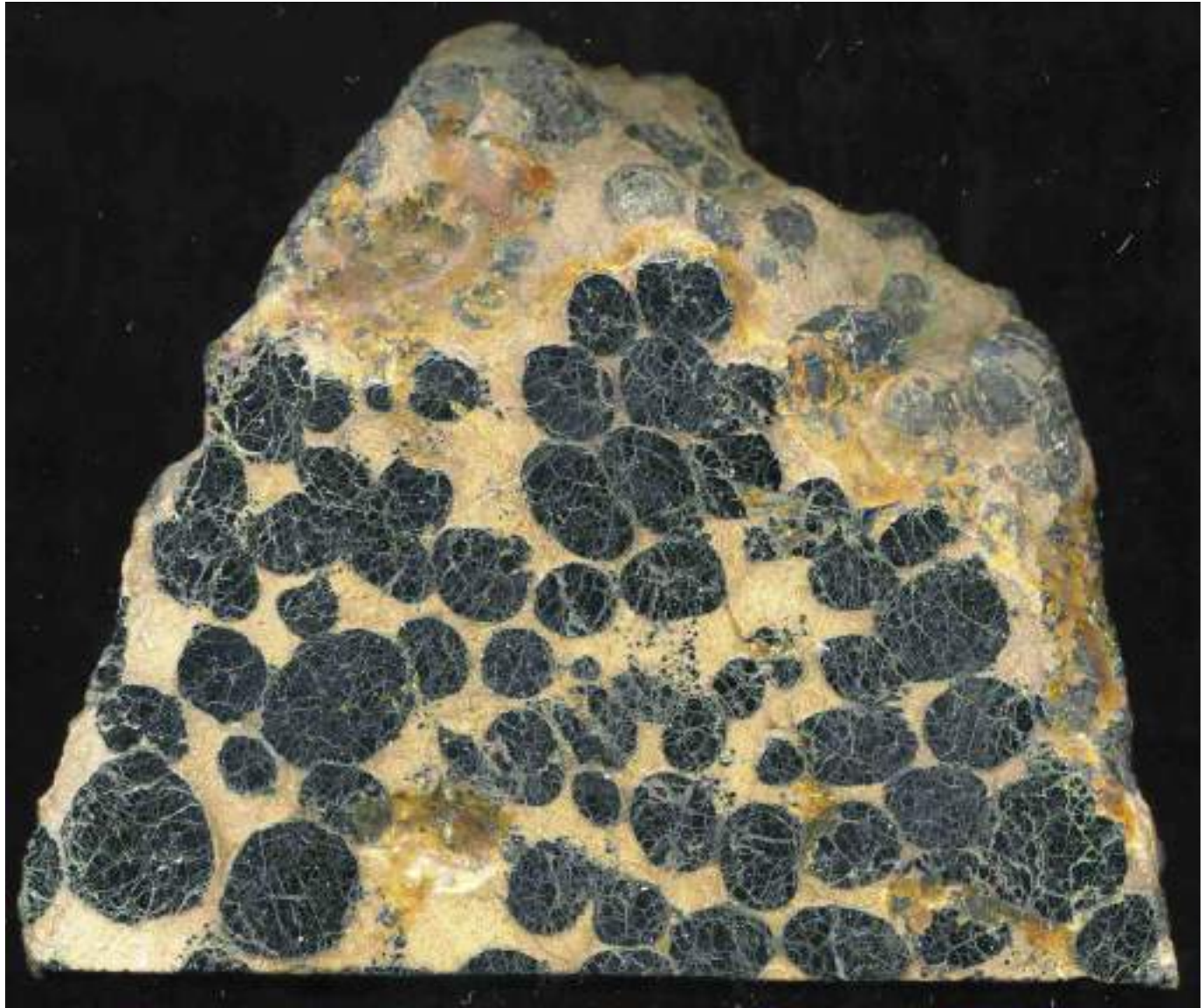
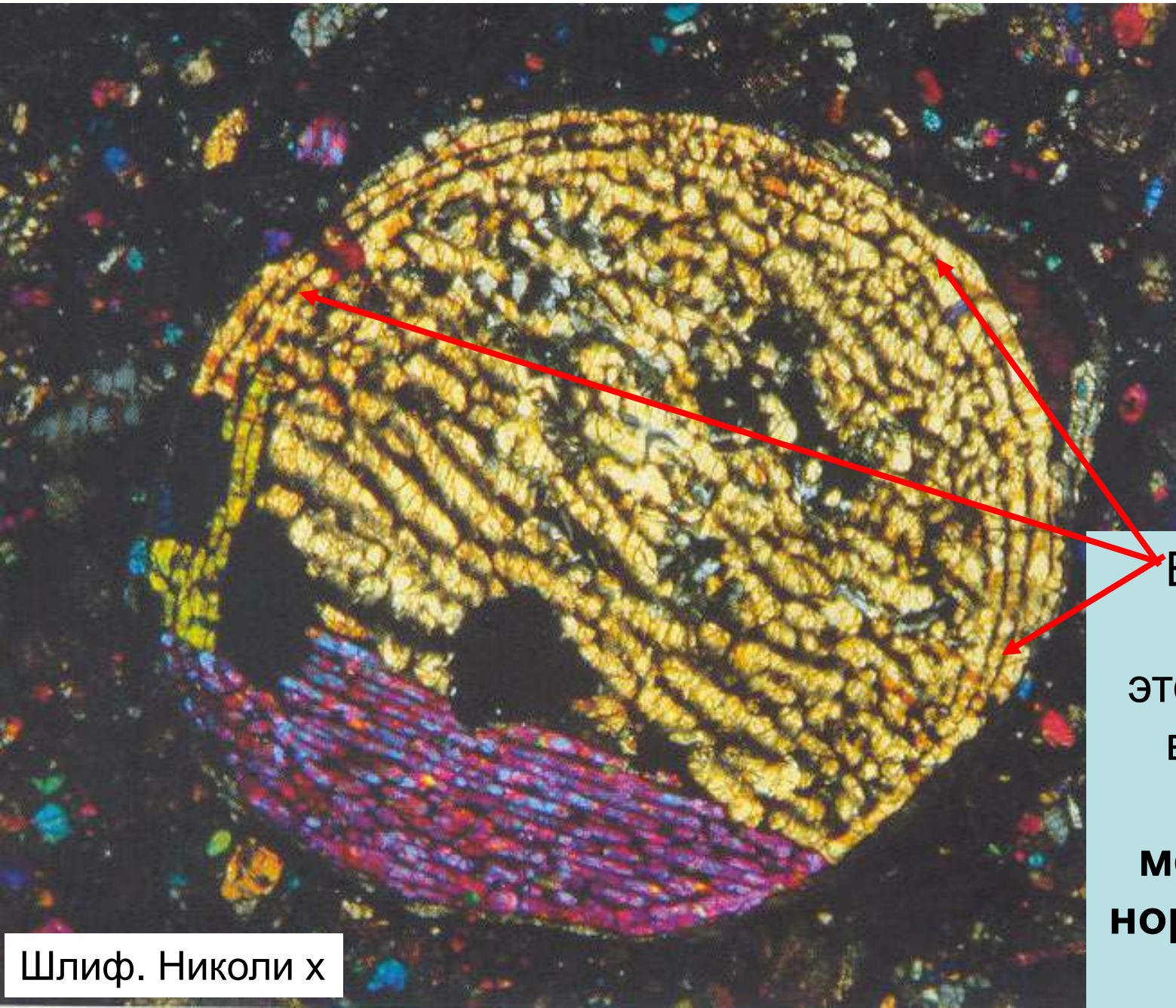


Фото  
ЭМС

70x57 мм. Хабаровинский массив, Южный Урал



# Нормальный механизм роста кристаллов



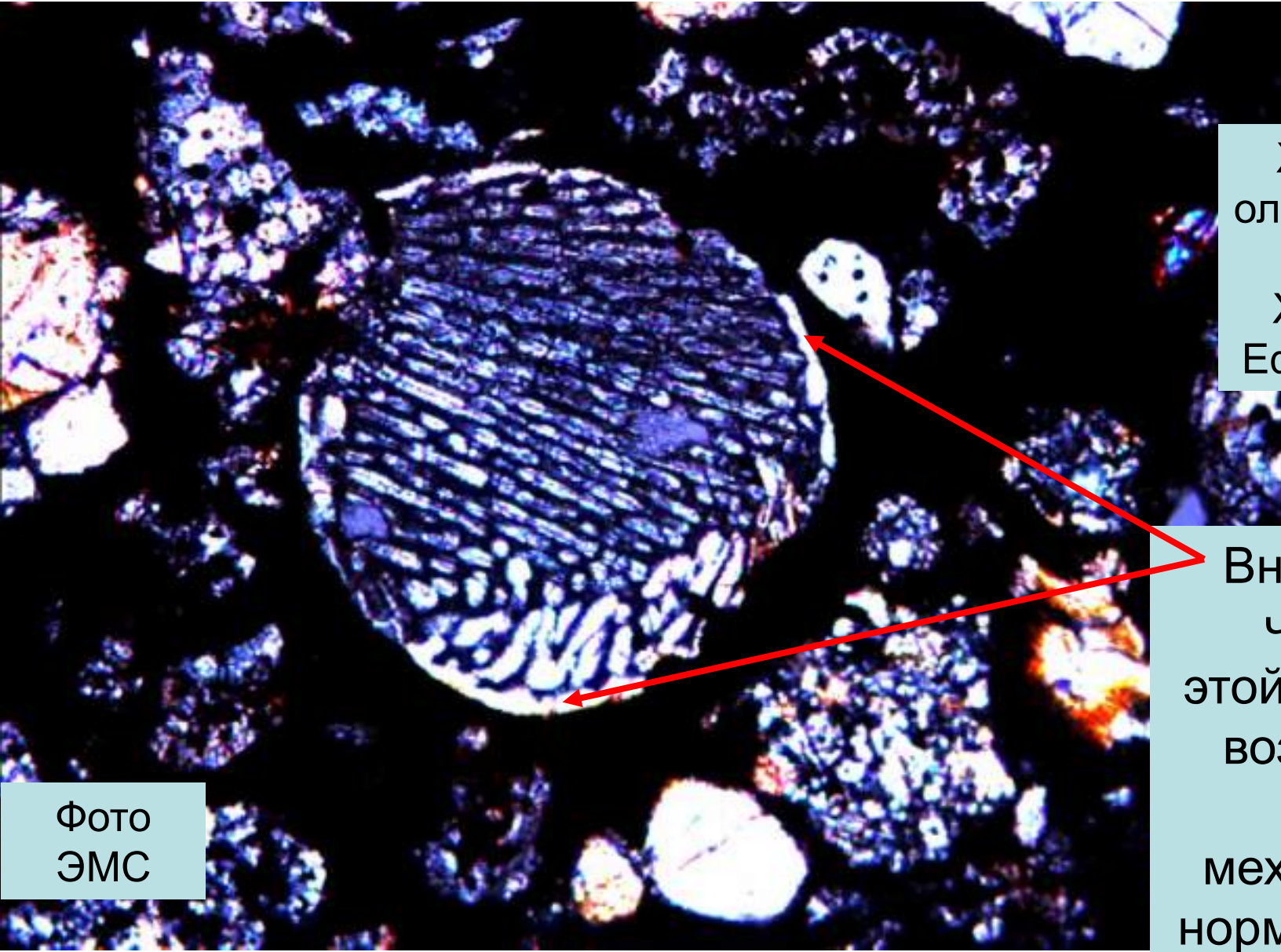
Хондра  
оливиновая  
4 мм.  
NWA 778.  
Алжир

Внешняя  
часть  
этой хондры  
возникла  
по  
механизму  
нормального  
роста

Шлиф. Николи х



# Нормальный механизм роста кристаллов



Хондра  
оливиновая  
2 мм.  
Хондрит  
Ефремовка

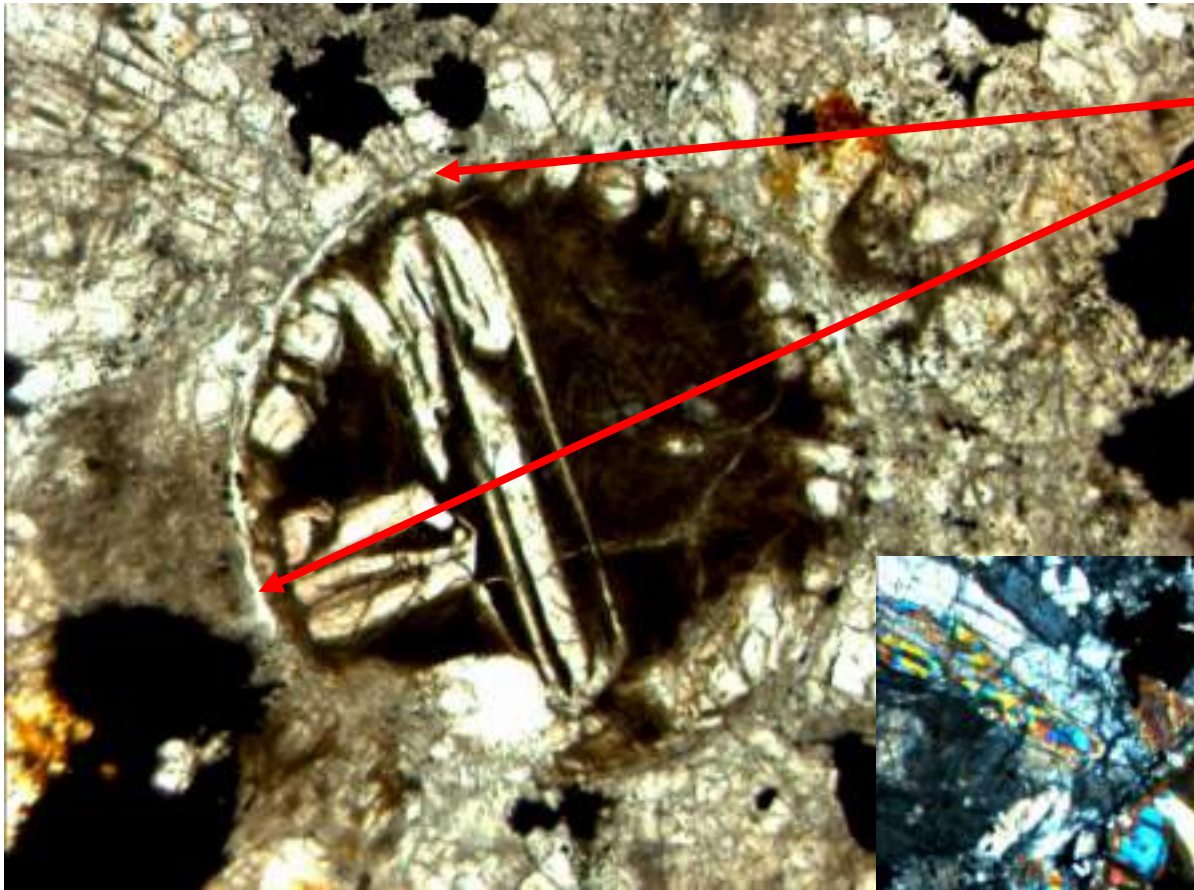
Внешняя  
часть  
этой хондры  
возникла  
по  
механизму  
нормального  
роста

Фото  
ЭМС

Шлиф. Николи х



# Нормальный механизм роста кристаллов



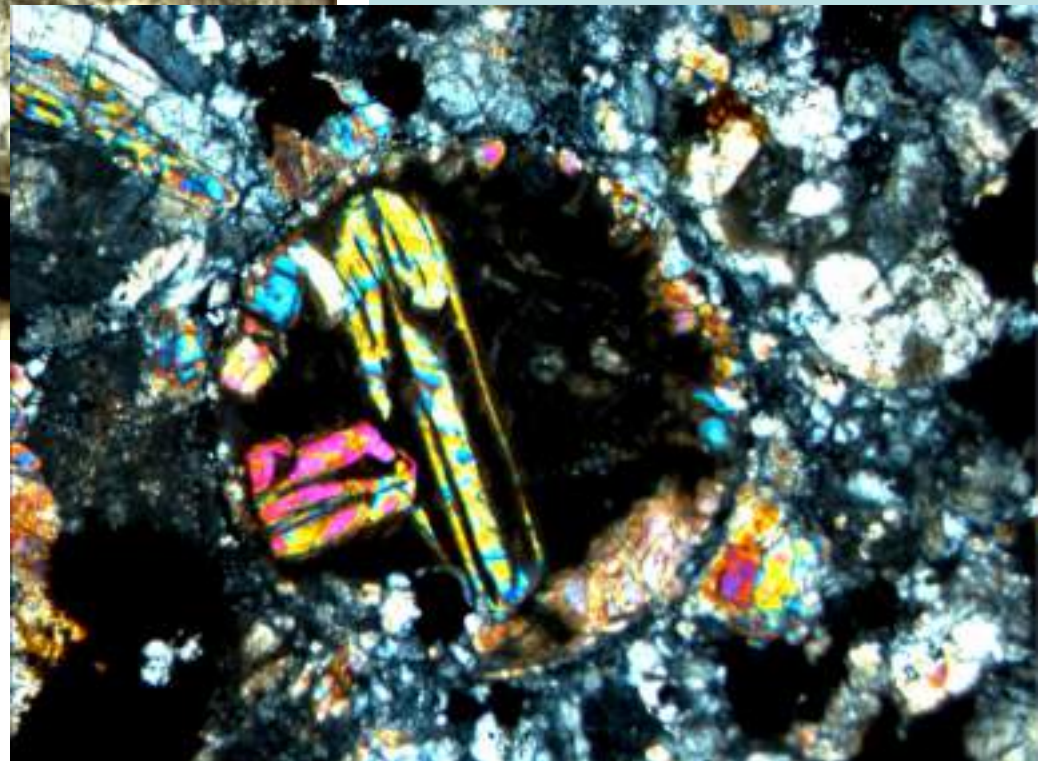
Внешняя часть  
этой хондры  
возникла  
по  
механизму  
нормального  
роста

Шлиф. При 1 николе

Хондрит Саратов. 3 мм

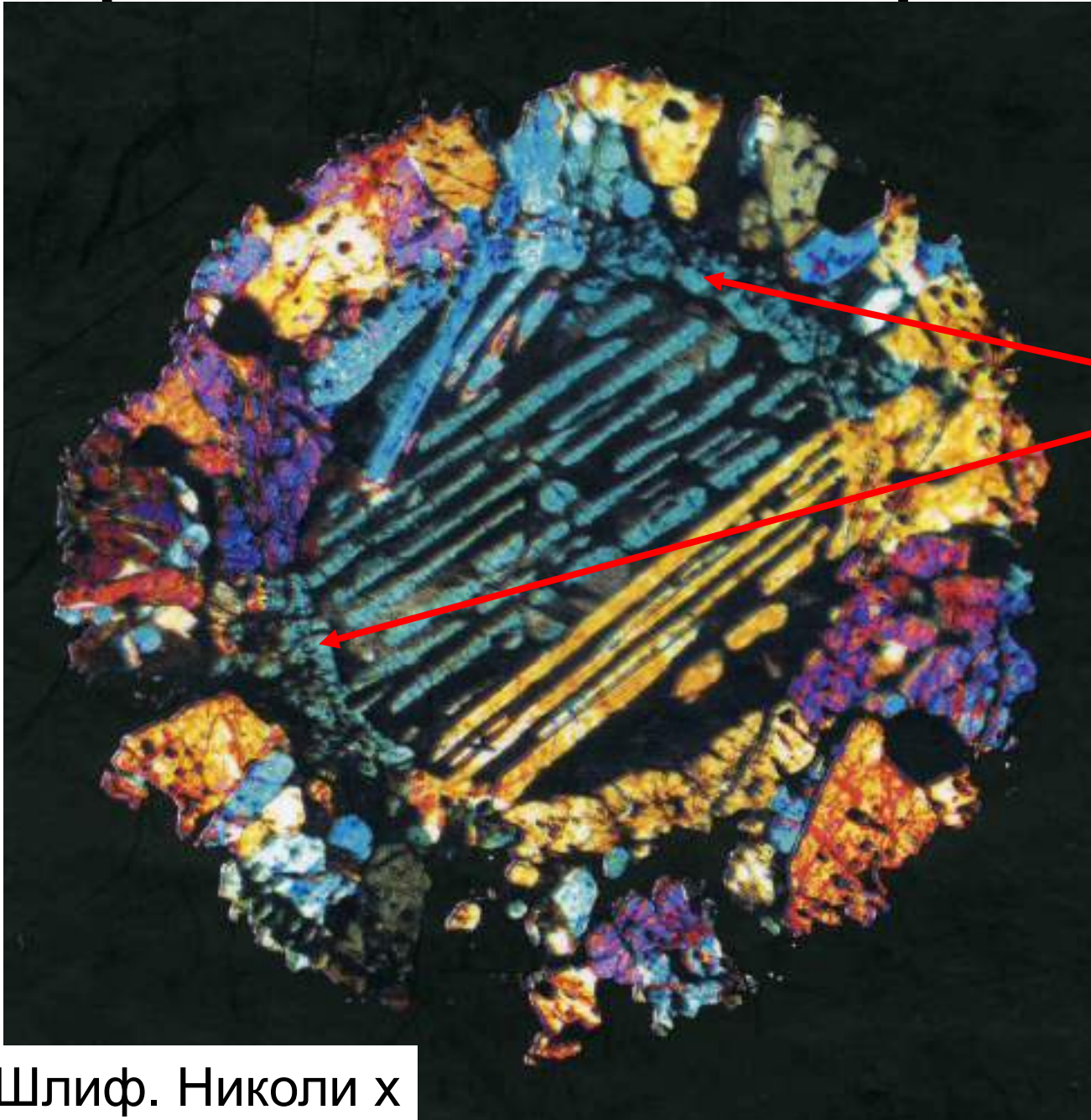
Фото  
ЭМС

Шлиф. Николи х





# Нормальный механизм роста кристаллов



Промежуточная  
часть  
этой  
оливиновой  
хондры  
возникла  
по  
механизму  
нормального  
роста

Шлиф. Николи х

**Вероятно,  
значительная подвижность  
минералообразующей среды -  
необходимое условие  
для реализации нормального  
механизма роста кристаллов**



# Механизмы роста кристаллов

При малой скорости роста, когда у частиц есть время на выбор мест с тах энергией связи, происходит постепенная ликвидация таких мест прикрепления и поверхность из гладко кривой превращается сначала в микро ступенчатую, затем - в макро ступенчатую и наконец замещается плоскими сингулярными гранями с высокой ретикулярной плотностью и рациональными индексами.

## 2. Послойный механизм роста при двумерном зародышеобразовании

Вы уже знаете, что энергии адсорбции собственных частиц на плоской кристаллической поверхности сильно различаются. В состоянии насыщения при определенных температуре и концентрации вещества в среде количество ионов (молекул), присоединяющихся к поверхности за единицу времени = поток на грань или скорость адсорбции и количество ионов (молекул), отрывающихся = поток от грани или скорость десорбции примерно равны. Поскольку вблизи от вершин и ребер энергия адсорбции выше, чем на гладкой поверхности грани, в этих местах частицы будут находиться дольше, плотность их там выше. Сохраняя температуру,

# Механизмы роста кристаллов.

## 2. Послойный рост при двумерном зародышеобразовании

создадим и будем увеличивать пересыщение. При постоянной температуре сохраняется скорость десорбции. Рост концентрации усилит поток частиц на грань, будет возрастать количество адсорбированных частиц, но роста, т.е. "вечной" фиксации частиц на грани не будет. Для устойчивого увеличения размера островков - зародышей слоя необходимо, чтобы такой двумерный зародыш достиг критического размера (подобно трёхмерному зародышу кристалла), которому отвечает определенная кривизна торца слоя - ступени. Естественно, что зарождение слоя более вероятно в местах наибольшего скопления частиц, т.е. вблизи вершин и ребер кристалла.

Далее слой будет распространяться по грани, причем на изломах его торца - ступени частицы будут адсорбироваться наиболее прочно, следовательно, надолго. Когда слой перекроет всю грань, ступень исчезнет и потребуются некоторое время, пока сочетание тепловых и концентрационных флуктуаций не породит новый закритический двумерный зародыш, который обеспечит возможность перекрытия грани новым слоем. Существование двумерных зародышей и рост грани моноатомными слоями вещества было экспериментально доказано

# Механизмы роста кристаллов.

## 2. Послойный рост при двумерном зародышеобразовании

советским исследователем Каишевым в 1966 г. при изучении без дислокационных граней кристаллов серебра. Данная теория удовлетворительно объясняет возникновение граней = плоских поверхностей с высокой плотностью частиц на них и прямолинейных рёбер.

Однако, есть противоречия между теорией и реальностью. При толщине нарастающего слоя = размеру атомов или молекул грань должна выглядеть идеально гладкой, ступени на ней - субмикроскопические. На самом деле, на гранях часто развит грубый рельеф и весьма часто развиты бугорки роста – **вицинали**. Далее, заметные скорости роста по механизму послойного роста при двумерном зародышеобразовании возможны только при пересыщении  $>25-50\%$ , тогда как реальные кристаллы растут и при пересыщении  $0,1\%$ . И еще - скорости роста реальных кристаллов гораздо выше теоретических скоростей роста идеальных кристаллов, согласно рассмотренной модели. Все эти противоречия были разрешены теорией дислокационного механизма роста кристаллов.

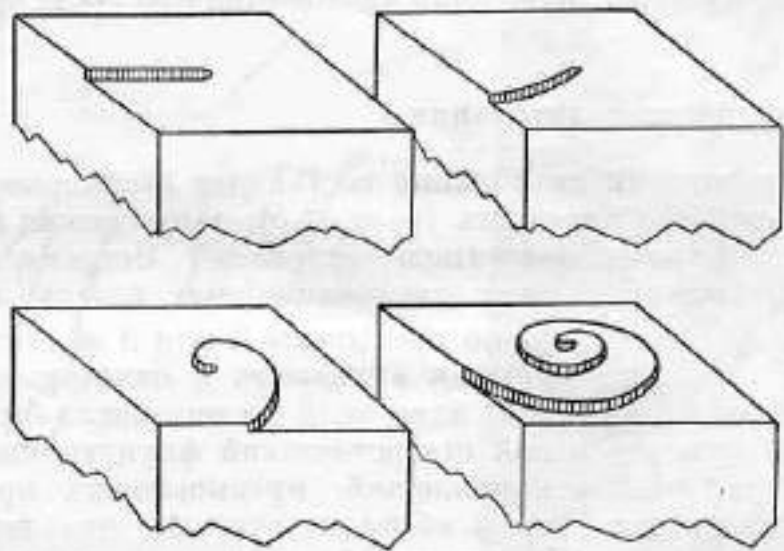


# Механизмы роста кристаллов.

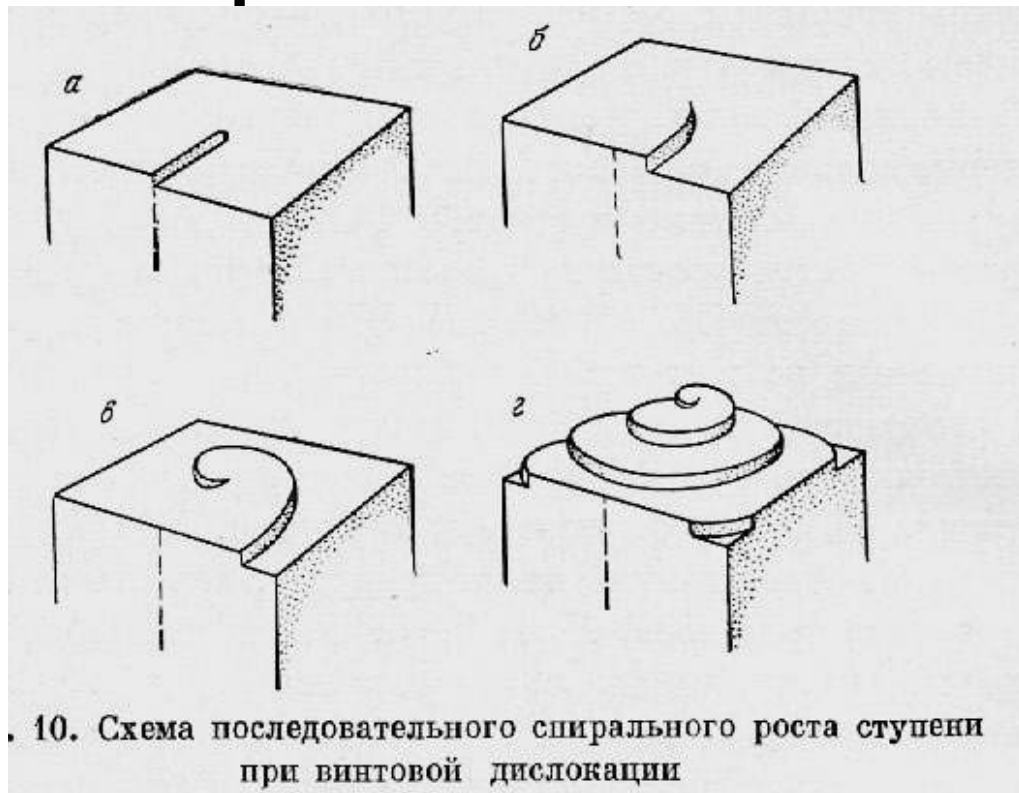
## 3. Послойный рост при дислокационном механизме роста кристаллов

В начале 30-х годов XX века Тейлор, Орован и Полани объяснили тот факт, что прочность реальных кристаллов на несколько порядков ниже теоретической прочности тем, что в реальных кристаллах присутствуют дефекты линейного типа = дислокации. В 1939 г. Бюргерс ввел понятие о винтовых дислокациях. В 1949 г. Франк использовал представление о винтовых дислокациях для объяснения процессов роста кристаллов; наличие у выхода винтовой дислокации на грань незарастающей ступени обеспечивает возможность роста кристалла без двумерного зародышеобразования. Бартон, Кабрера и Франк в 1951 г. доказали дислокационный механизм роста, что создало совершенно новый облик кристаллогении (иначе кристаллологии) - науки о росте и растворении кристаллов. Удалось объяснить высокие скорости роста и растворения граней и их рельеф – решить проблему образования вициналей и ступенек на гранях кристаллов, многие морфологические особенности в объёме кристаллов, их дефектность, физические свойства и многое другое.

### 3. Послойный рост при дислокационном механизме роста кристаллов



Ф и г. 34. Спиральное закручивание ступеньки на поверхности растущего кристалла, обусловленное присоединением атомов к краю ступеньки, возникающей в месте пересечения винтовой дислокации с поверхностью кристалла.



10. Схема последовательного спирального роста ступени при винтовой дислокации

На выходе винтовой дислокации на грань кристалла прямолинейная ступень превращается в спиральную, далее возникает конусообразное возвышение, образованное одной ступенью спиральной формы, затем - спиральные холмы. Такие спирали развиты на кристаллах самых различных минералов, выросших в любых обстановках. Форма площадок спиралей роста при больших пересыщениях (при быстрой скорости роста) близка к круговой, при малых пересыщениях (при меньшей

### 3. Послойный рост при дислокационном механизме роста кристаллов

скорости роста) – полигональная. Морфология нарастаний определяется симметрией соответствующей грани кристалла. Расстояние между витками спиралей зависит и от угла выхода дислокации на грань кристалла. При увеличении пересыщения угол конуса роста становится более крутым; высота ступеней в таких спиралях большая. При расстояниях между торцами (витками) спирали  $<$  длины света поверхности выглядят гладкими, а при постоянстве этих расстояний - плоскими.

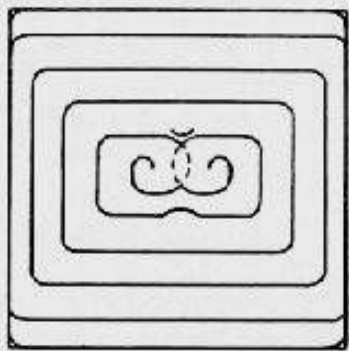
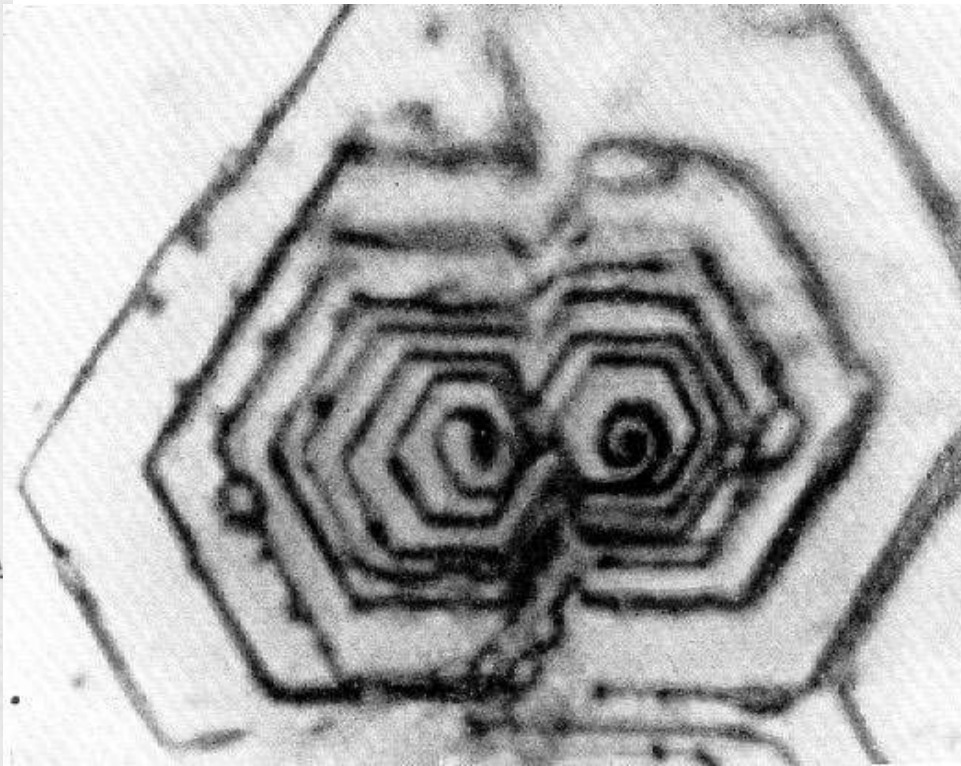


Рис. 11. Схема слияния двух разноименных винтовых дислокаций в замкнутую террасу



Слияние двух террас роста с разно направленными винтовыми дислокациями.

Металлический цинк



### 3. Послойный рост при дислокационном механизме роста кристаллов

Такие нарастания - псевдограницы = вициналы в течении десятилетий были предметом острых дискуссий. На грани кристалла выходит множество дислокаций от 10 до 10000 на  $1 \text{ см}^2$ , но они существенно различаются по способности генерировать ступени роста. Существует зависимость активности определенного центра роста, отвечающего выходу на грань дислокации, от пересыщения.

При относительно стабильных условиях на поверхности грани остается лишь несколько конусов роста (вициналей) или даже один, идет конкуренция - борьба за "питание" и за "пространство" между различными дислокациями и порожденными ими вицинальными холмиками - конусами роста. При любом изменении пересыщения на поверхности активизируется множество мелких центров роста, из которых при постепенной стабилизации условий сохраняется несколько новых, ранее не "работавших" конусов. Особенности развития конусов роста на поверхности грани определяются взаимным расположением соседних дислокаций и направлением их векторов Бюргерса. При значительном удалении друг от друга выходов дислокаций спирали роста сначала развиваются независимо, затем могут слиться. Чем больше вектор Бюргерса, тем толще генерируемый дислокацией слой роста, тем

### 3. Послойный рост при дислокационном механизме роста кристаллов

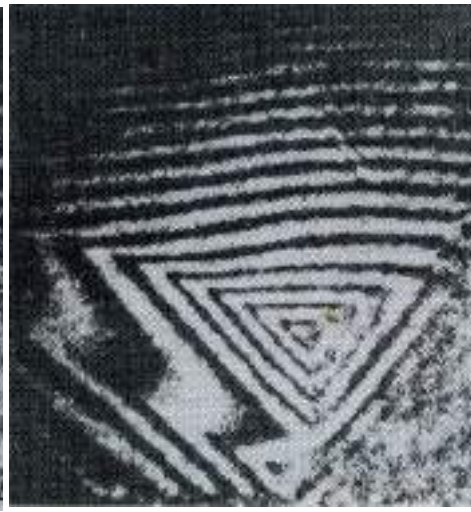
вероятнее перекрытие слоев роста других дислокаций и подавление их серии слоев. При одинаковом знаке векторов Бюргерса двух соседних дислокаций на расстоянии  $< d$  критического зародыша - эти дефекты объединяются; при разных знаках вектора Бюргерса - возникают замкнутые петли.



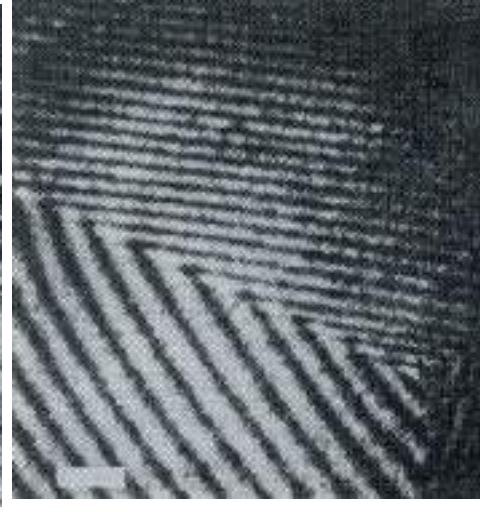
Начало



Через 10 минут



Через 22 минуты



Через 45 минут

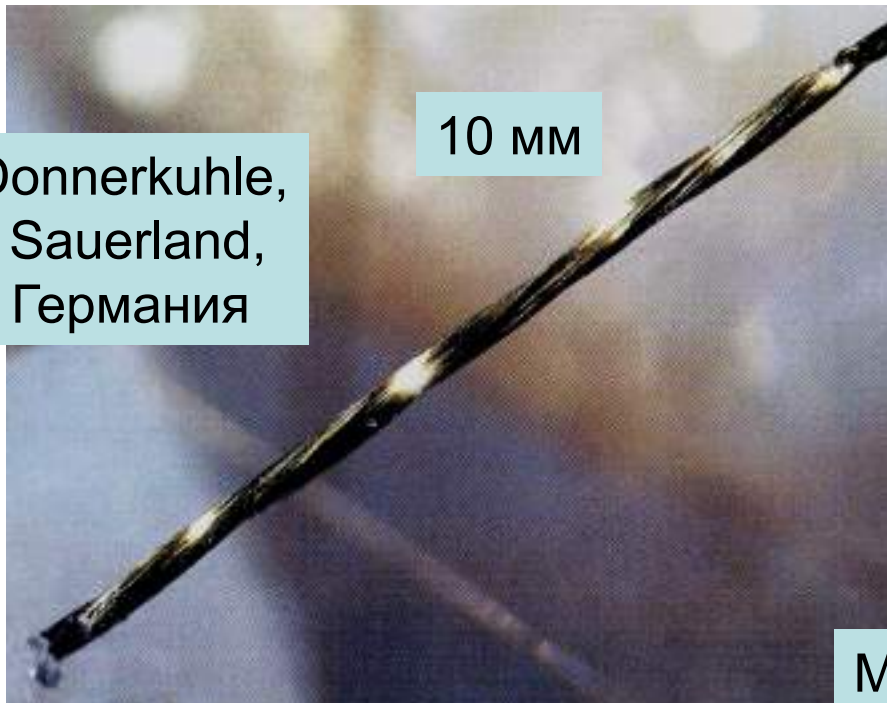
Конкуренция вициналей на поверхности растущего кристалла соли

### 3. Послойный рост при дислокационном механизме роста кристаллов

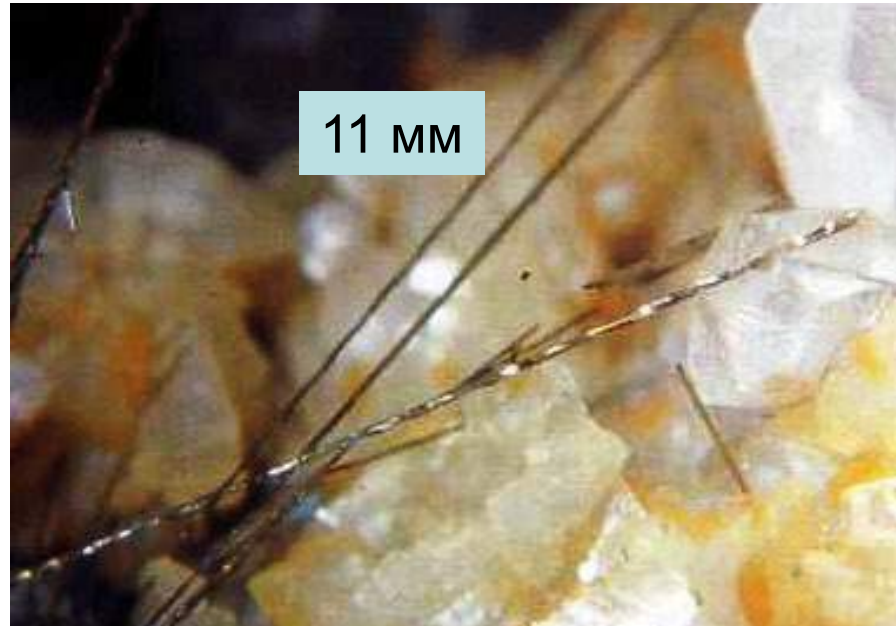
Спиральный (геликоидальный) рост - это фактически рост на винтовой дислокации. Это механизм роста нитевидных кристаллов как искусственных, так и природных. Для нитевидных кристаллов минералов со "слабой" структурой установлено периодическое осевое закручивание решетки, вызванное действием осевой винтовой дислокации, что выражено на кристаллах гипса, миллерита, джемсонита, малахита и др. Когда толщина волокон = нитевидных кристаллов предельно малая, то закручивается и решётка разновидности кремнезёма – халцедона.

Donnerkuhle,  
Sauerland,  
Германия

10 мм



11 мм

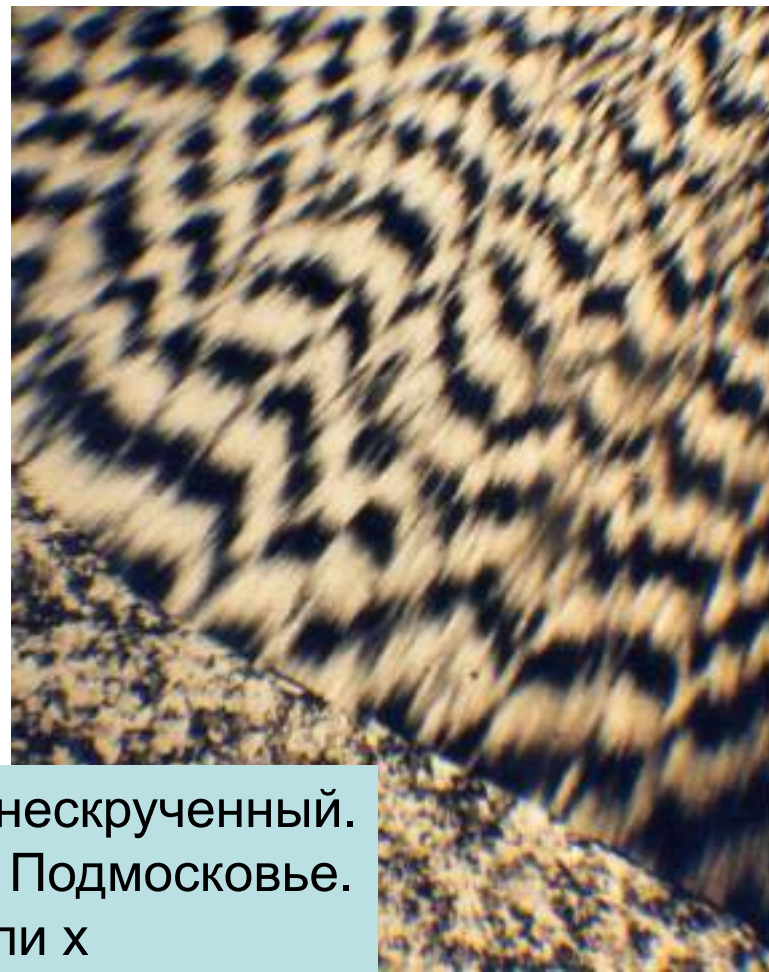
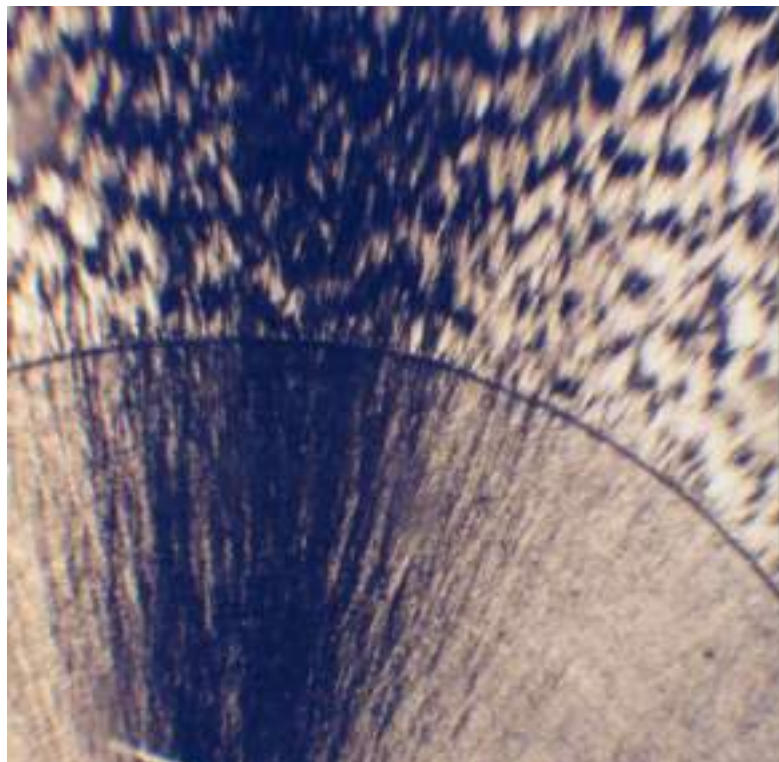


Миллерит



### 3. Послойный рост при дислокационном механизме роста кристаллов

Наличие спирально закрученных волокон халцедона... в слагаемых этими минералами сферолитах и сферолитовых корках - однозначный признак того, что данные сферолиты - продукты кристаллизации, а не колломорфные образования.

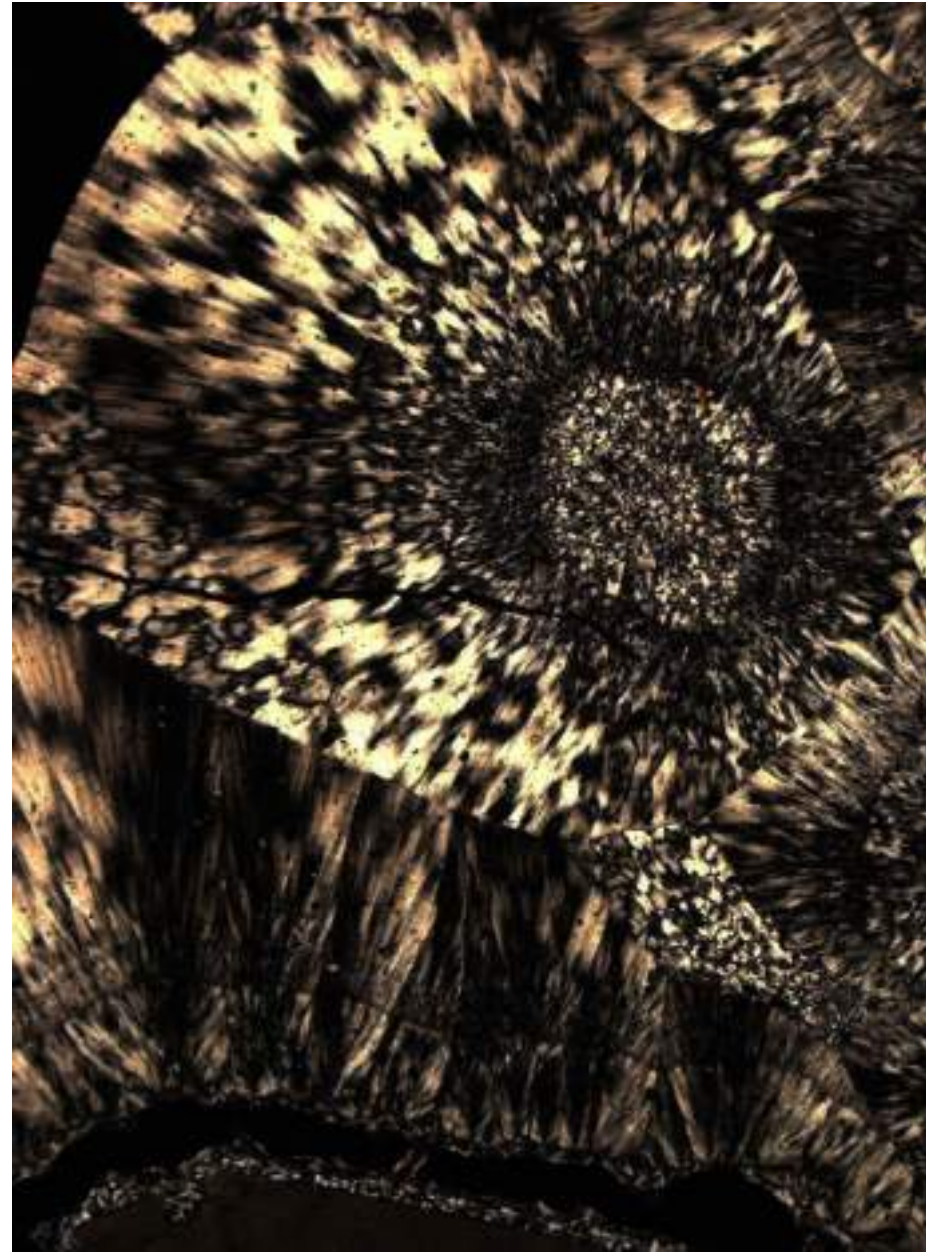


Халцедон скрученный и нескрученный.  
Агаты Голутвино, южное Подмосковье.  
Шлифы, николи х

### 3. Послойный рост при дислокационном механизме роста кристаллов

Наличие спирально закрученных волокон халцедона... в слагаемых этими минералами сферолитах и сферолитовых корках - однозначный признак того, что данные сферолиты - продукты кристаллизации, а не колломорфные образования.

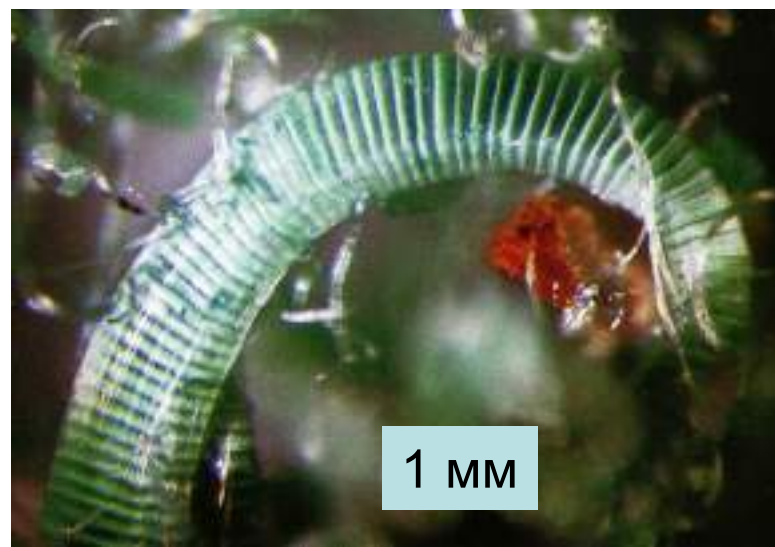
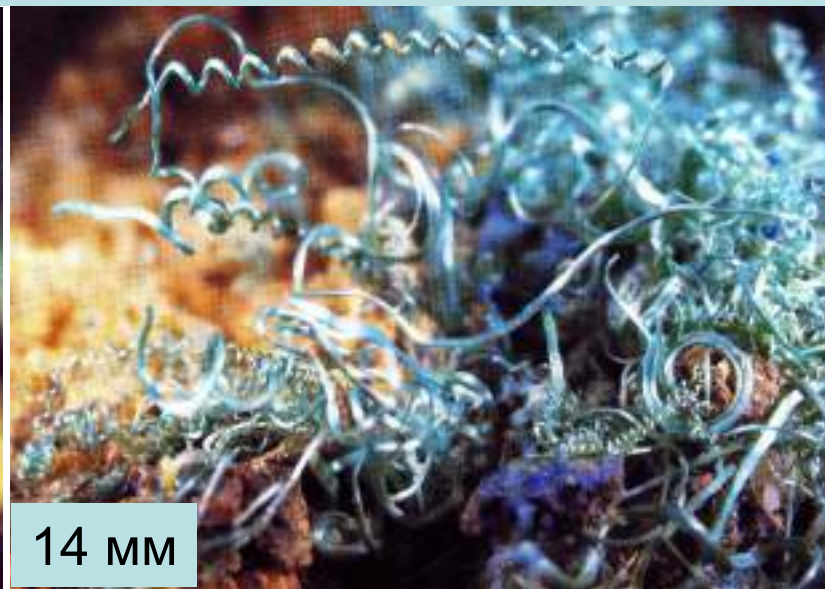
Халцедон скрученный.  
Агаты.  
Ермаковское, Забайкалье.  
Шлиф, николи х





### 3. Послойный рост при дислокационном механизме роста кристаллов

Скрученные локоны малахита. Schwaz-Brixlegg, Тироль, Австрия





### **3. Послойный рост при дислокационном механизме роста кристаллов**

**Наличие скульптуры спиралей на поверхности граней кристалла - однозначное свидетельство, что это поверхности роста.**

### **4. Рост за счёт трёхмерных зародышей**

Существует обширная минералогическая литература, описывающая этот механизм роста, - «сборка дома из готовых блоков». В настоящее время для микро- и нанообъектов получены прямые экспериментальные данные, свидетельствующие о значимости данного механизма роста кристаллов.

Обычно же возникновение трёхмерных зародышей бесспорно, когда появляются мелкие новые так называемые "паразитические" кристаллы. При очень больших интенсивностях зародышеобразования, например, при добавлении спирта в водный раствор соли, кристалл покрывается коркой неориентированных кристалликов и рост макрокристалла под слоем конкурентов вскоре прекращается. Таким образом, происходит рост не "за счёт", а при некотором кратковременном "участии" трёхмерных зародышей.

# Связь формы кристаллов с их структурой

В целом, данная проблема сложная и слабо разработана. Связь структуры с габитусом, как и связь структуры с конкретными простыми формами, неоднозначна. Хотя кристаллы кубической сингонии (гранаты..) чаще всего имеют изометричный облик. Более или менее изометричные структуры приводят к образованию квазиизометричных кристаллов (полевые шпаты). Минералы со слоистой структурой обычно образуют уплощенные кристаллы (графит, тальк, слюды, хлориты). Но те же слюды и хлориты часто образуют столбчатые, пирамидальные и даже игольчатые кристаллы, вытянутые  $\perp$  к плоскости слоистости. Цепочечные и ленточные структуры в общем способствуют появлению удлиненных столбчатых и игольчатых кристаллов (пироксены, амфиболы). В целом, та или иная форма кристалла позволяет предполагать ту или иную степень изометричности структуры, но не более.

Мощное влияние среды кристаллизации может изометричную структуру заставить дать игольчатый кристалл, а анизометричную - изометричный кристалл.

Принцип Бравэ, высказанный в 1851 г., - скорости роста различных граней кристалла зависят от их ретикулярной плотности, **кристаллы при своем росте покрываются самыми медленно растущими гранями (это справедливо)** – продолжение принцип Бравэ – кристаллы покрываются

# Связь формы кристаллов с их структурой

гранями с максимальной ретикулярной плотностью (а вот это далеко не всегда). Экспериментально показано, что принцип Бравэ подтверждается для кристаллов, выращенных из чистого однокомпонентного газа. Для кристаллов, выросших в более сложных системах, данный принцип выдерживается плохо. Настоящий парадокс - огранка кристаллов кварца: наибольшая ретикулярная плотность в его структуре у плоскости (0001), но грани базопинакоида отсутствуют на кристаллах кварца.

Принцип Доннея - Харкера, высказанный в 1937 г., - габитусная ранжировка граней зависит не только от их ретикулярной плотности, но и от элементов симметрии  $\perp$  к их плоскостям. Данный метод позволил по специальным таблицам и по интенсивностям отражений на рентгенограммах кристаллов определять морфологическую значимость граней. Удалось получить относительно близкую к действительности последовательность появления простых форм у кристаллов кварца, серы.

Следующий этап развития этих представлений - теория Хартмана, высказанная в 1955 г., - ближе других подошла к связи формообразования с процессами адсорбции. Согласно этой теории грани кристалла делятся в зависимости от их расположения по отношению к векторам наиболее сильных связей в структуре (ABC- векторы). Грани, в которых лежат два вектора наиболее сильных связей, - гладкие грани F (flat); грани, в которых



# Связь формы кристаллов с их структурой

лежит один вектор, - ступенчатые грани S (stepped); грани не параллельные ни одному из векторов - это неровные шероховатые грани K (kinked). Присоединение частиц из среды питания происходит прежде всего к шероховатым K граням (они быстро растут и исчезают); затем к S граням. Медленнее всего растут F грани, которыми и покрывается кристалл. Так, у кварца грань [0001] - шероховатая, она быстро сорбирует частицы и зарастает; грани призмы отвечают F граням, растут медленно и характерны для кристаллов кварца.

Трудность применения теории Хартмана в отсутствии чётких критериев для выделения векторов ABC. Кроме того, введение поверхностно-активных веществ-примесей может превратить атомно-гладкую поверхность в шероховатую и наоборот...

Есть и иные теоретические подходы...

**Но, ни одна из известных теорий не дает и не может дать точного метода расчёта структурных характеристик кристалла, строго отвечающих последовательности встречаемости граней в природных условиях.**

# Варианты роста кристаллов

Варианты роста кристаллов по степени свободы их формирования - отсутствию препятствий для поступления питания к их поверхности и для увеличения их размера. Варианты или группы таких условий роста : 1) рост кристаллов, взвешенных в магме или ином растворе, в т. ч. в газовом (снежинки); 2) рост кристаллов, зарождающихся на стенке жилы или на иной подложке или плавающих на поверхности рассола; 3) рост кристаллов в пористой твёрдой среде в присутствии раствора - метасоматический рост, перекристаллизация с укрупнением зерна; или без участия растворов - рекристаллизация при снятии напряжения в кристаллах.

**Первая группа** - это случаи всестороннего беспрепятственного поступления питания ко всей поверхности кристалла - можно говорить о вполне свободном или просто о **свободном росте кристаллов**. Эти условия способствуют развитию плоских граней, одинаковому развитию всех граней одной кристаллографической формы, так что форма кристаллов в наибольшей степени приближается к идеальной. Секториальность и зональность в таких кристаллах, как и иные проявления дефектности, в максимальной степени симметричны. В свободно растущих кристаллах, способных вращаться в среде питания, отсутствуют проявления асимметрии верх - низ гравитационного поля. Кристаллы свободного роста выделяются совершенством формы и качеством граней.

# Варианты роста кристаллов

## Кристаллы свободного роста. Барит



38 мм. El Creek, Дакота, США



Buk-Clifs, Grand-Jakchen,  
Mesa, Колорадо, США





20 мм

# Варианты роста кристаллов

## Кристаллы свободного роста. Гипс



Пещера Кунитанг, Туркмения



37 мм. Alabaster mine, Испания



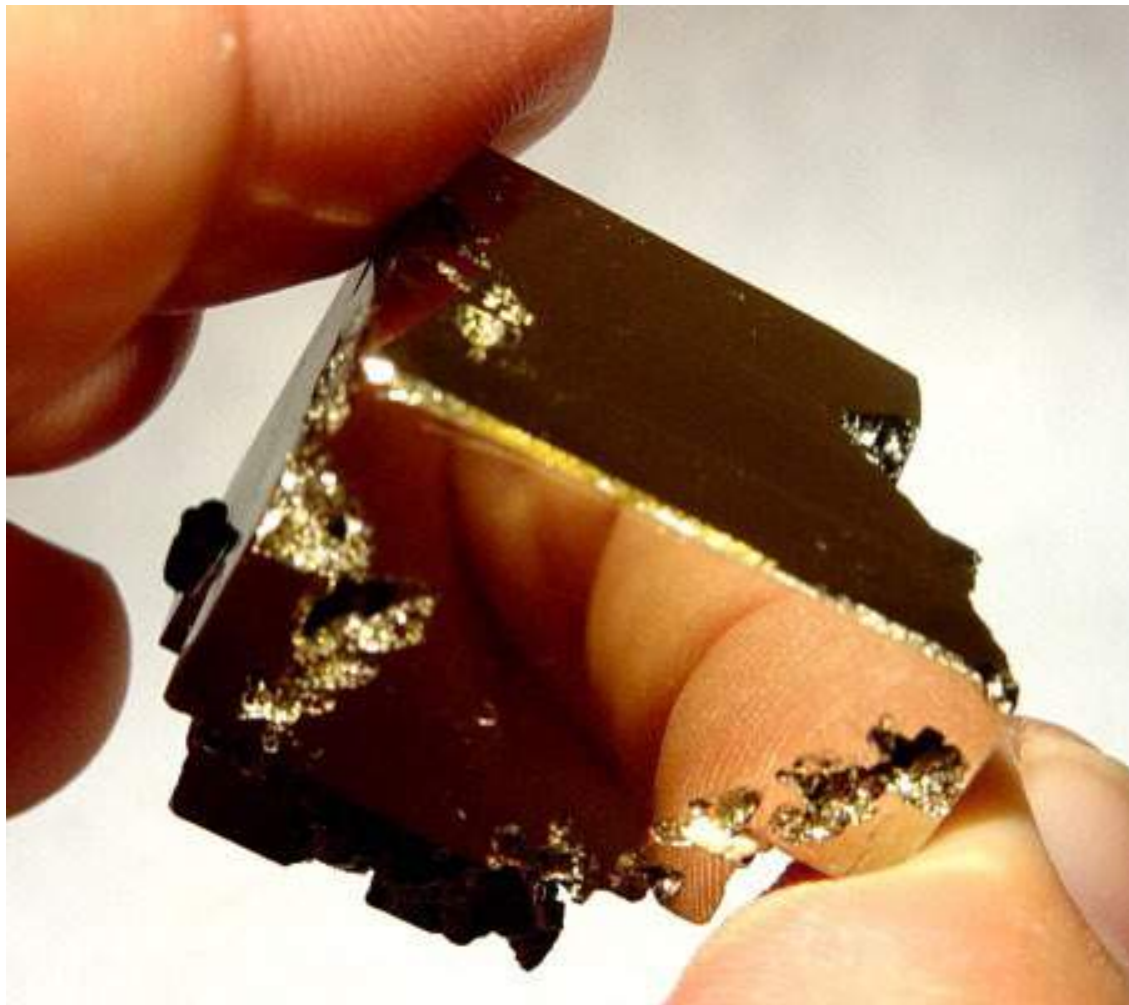
3.5 мм. Эйфель, Германия



90x50 мм.  
Кавник,  
Румыния

# Варианты роста кристаллов

## Кристаллы свободного роста



Пирит

Кальцит.  
Egglemont,  
Корнуолл, Англия



# Варианты роста кристаллов

## Кристаллы свободного роста



Гематит



Гематит.  
Bellerberg,  
Эйфель,  
Германия



# Варианты роста кристаллов

## Кристаллы свободного роста



Псевдобрукит. Кристаллы до 2 мм.  
Emmelberg, Эйфель, Германия

# Варианты роста кристаллов

68  
мм



## Кристаллы свободного роста

Аметист



Rio Grande  
do Sul,  
Бразилия

Азурит на корке смитсонита. Цумеб, Намибия



# Варианты роста кристаллов

## Кристаллы свободного роста

85 мм



45 мм



Берилл на корке мусковита. Хуебаодинг, Сихуань, Китай



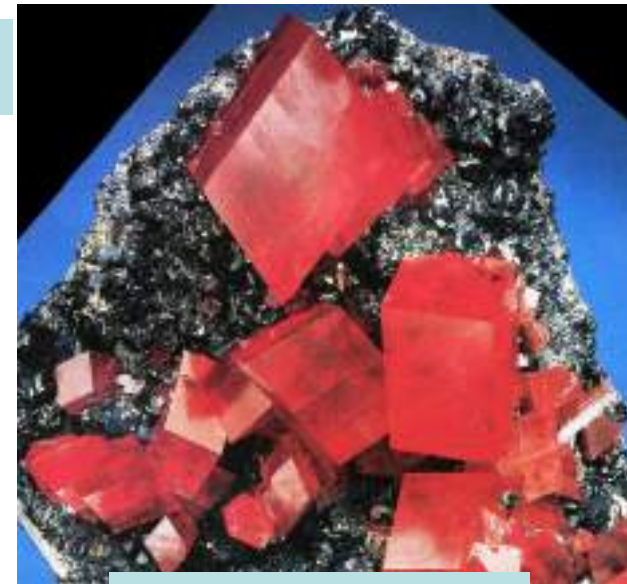
# Варианты роста кристаллов

## Кристаллы свободного роста



Церуссит.  
Kombat mine,  
Намибия

75 мм



Родохрозит  
на тетраэдрите

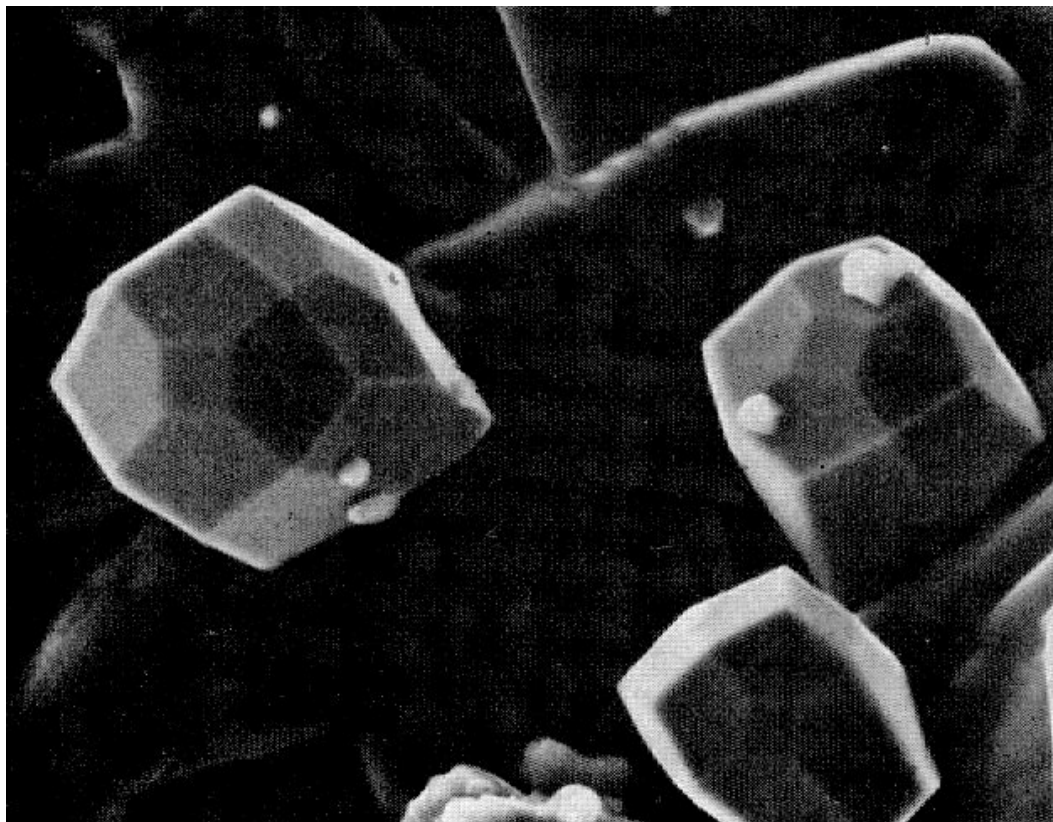


Реальгар.  
Южный Китай

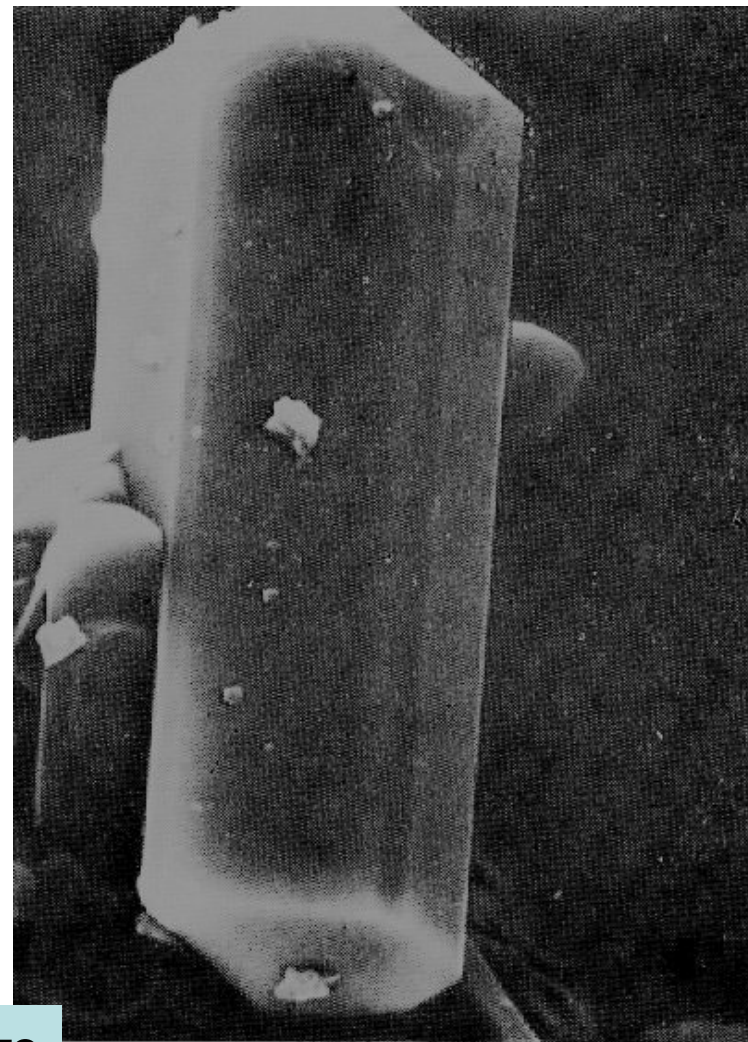


# Варианты роста кристаллов

## Кристаллы свободного роста в продушинах морских базальтов Луны



Кристаллы железа



Кристалл безводного  
хлор-фторапатита

~12 мкм

# Варианты роста кристаллов

С момента появления постоянного контакта кристалла с иными - при оседании индивидов на дно или при всплывании, при их агрегации - условия вполне свободного роста исчезают. Включаются новые факторы, присущие ограниченно свободному росту. Поэтому обычно свободный рост, если он имел место, реализуется лишь на начальных стадиях формирования кристалла.

**Вторая группа.** При соприкосновении кристаллов друг с другом они срастаются, конкурируя в борьбе за питание, свобода поступления вещества к ним ограничивается. Рост становится полусвободным или ограниченно свободным. Сюда входят и случаи одностороннего поступления вещества к поверхности кристалла, в частности питание и рост одной грани. Такие условия обычны при росте кристаллов на границе раздела жидкость - газ, твёрдое - газ, твёрдое - жидкость. В этих условиях обычно наличие твёрдых препятствий росту кристалла. Если нерастущая часть кристалла охвачена твёрдыми поверхностями - в корневой части друз, в кристаллических корках, то эта часть нередко деформируется под действием кристаллизационного давления или при тектонических деформациях субстрата. При этом деформации корневой части кристалла могут передаваться в свободно растущую головку кристалла. Симметрия кристаллов, растущих в таких условиях, пониженная: хорошо ограниченной



# Варианты роста кристаллов

головке противостоит клиновидная корневая часть; выпуклая нижняя часть "лодочек" галита и вогнутая ступенчатая верхняя, обращенная в воздух.

**Односторонний рост кристалла - однозначный признак такого роста.**

Для генетических построений важно установить агрегатное состояние среды кристаллизации. Если среда подвижная, то гравитационное поле проявляется в оседании твёрдых частиц – присыпок на верхние грани кристаллов. Это ведёт к повышению дефектности обращенных кверху частей кристаллов по сравнению с нижними. Итак, наличие присыпок и асимметричное распределение дефектности в кристаллах по признаку верх - низ - однозначное свидетельство, что данные прикрепленные кристаллы выросли в подвижной среде питания.

**Третья группа - метасоматический рост ...** будет рассмотрена позже.

Какие свойства наиболее приемлемы для выявления периодов стабильных условий в развитии кристаллов?

- 1) Постоянство соотношений роста разных граней, что проявлено прямолинейностью границ секторов роста.
- 2) Постоянство химического состава кристалла внутри сектора роста, отсутствие зональности.

# Принцип Кюри

Знаменитый французский физик Пьер Кюри сформулировал в 1894 г.: объект сохраняет лишь те элементы симметрии, которые совпадают с элементами симметрии окружающей (питающей) среды.

В случае идеальной кристаллизации, когда потоки питающего вещества подходят к кристаллу всесторонне и равномерно, т.е. равномерного питания со всех сторон, симметрия кристаллообразующей среды отвечает симметрии шара, кристалл сохраняет все присущие этому минералу элементы симметрии. Кристалл вырастает в виде правильного многогранника, соответствующего истинным простым формам.

Если кристалл растет на горизонтальной поверхности в спокойных условиях, то вокруг него создаются расположенные вертикально концентрационные потоки, поскольку рост идет в поле земного тяготения. В этом случае среда имеет симметрию конуса  $Z_{\infty}^{\infty}P - \infty m$ . Такие кристаллы сохраняют лишь те элементы симметрии, которые совпадают с элементами симметрии конуса, получают внешнюю симметрию  $Z_{np}P - nm$ , только одну ось симметрии  $n$  порядка и соответствующее число плоскостей симметрии.

При случайной ориентировке зародыша на горизонтальной поверхности вырастает кристалл вообще без элементов симметрии. При росте кристаллов в движущемся потоке, который имеет единственную плоскость симметрии, разрастание кристаллов идет навстречу потоку.

# Принцип Кюри

Если плоскость симметрии кристалла - затравки совпадает с плоскостью симметрии потока, то она сохраняется и в выросшей части кристалла. В случае несовпадения плоскостей симметрии выросший кристалл будет вообще лишен видимой симметрии.

Влияние симметрии среды зависит от типа движения, от характера завихрений. Если скорость потока мала и вихри не отрываются от растущего кристалла, задние грани слабо омываются и голодают, в них образуются включения. Если скорость движения очень велика, то вихри быстро сносятся с поверхности растущего кристалла, пересыщение в объёме вихря мало меняется, все грани растут равномерно. Время стационарного состояния вихрей прямо зависит от вязкости раствора и обратно пропорционально размеру кристалла и скорости потока. Во всех случаях, кроме изометрической среды питания, образующиеся кристаллы будут обладать ложными габитусными формами, т.е. искаженной внешней симметрией. По асимметрично выросшим кристаллам можно определять направление движения питающего потока. В крутопадающих жилах кристаллы кварца асимметричны (действие силы тяжести), тогда как в пологих жилах их облик симметричный. Итак, по форме кристаллов кварца в россыпи можно прогнозировать характер залегания жил.



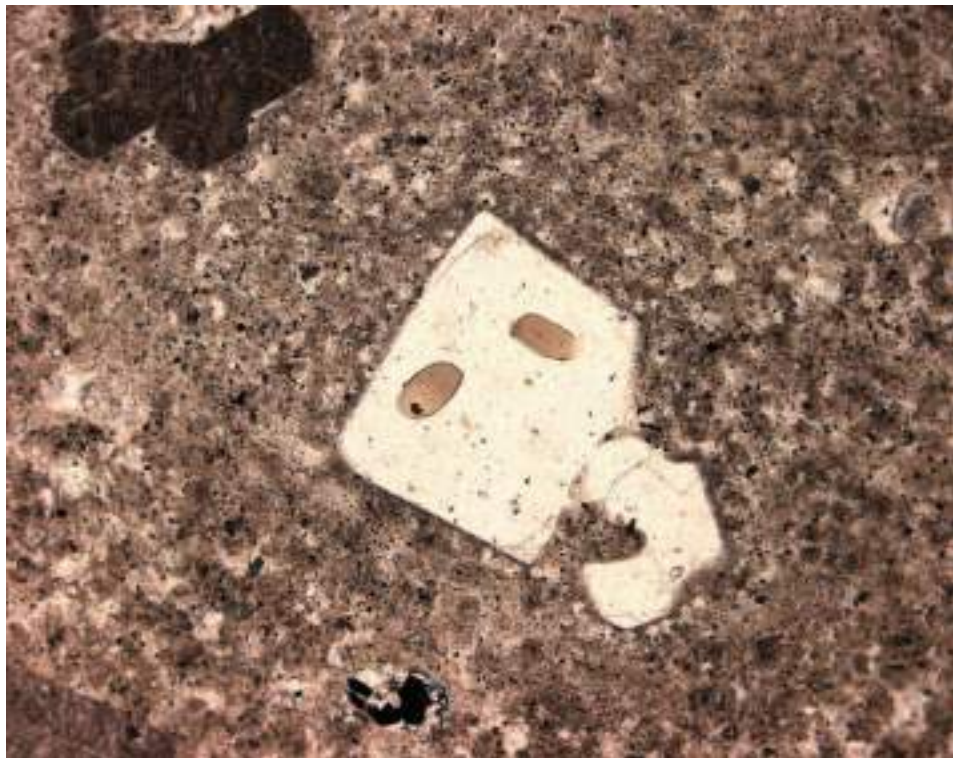
# Явления захвата включений

Выросшие кристаллы практически всегда содержат то или иное количество включений маточной среды. В магматических породах это расплавные включения (стекловатые или раскристаллизованные), реже газовые и многофазные включения. В гидротермальных и гипергенных образованиях это газовой-жидкие, жидкие, твёрдые и многофазные включения. На основе исследования включений в минералах руд и горных пород возникла особая наука – термобарогеохимия, поскольку изучение включений позволяет определить температуры и давления образования минералов и минеральных агрегатов и состав – химизм маточной среды. Для этого необходим поиск первичных = сингенетических включений. Это включения, возникшие в процессе роста, приуроченные к определённым секторам роста кристаллов. Нередко они удлинены в направлении максимального вектора роста кристалла. Нередки случаи, когда растущий кристалл содержит посторонний кристалл, под которым пузырёк маточной среды; при дальнейшем росте кристалл толкает посторонний кристалл и под ним возникает трубчатое включение маточной среды. Это истинно, «железно» первичные - сингенетические включения среды кристаллизации. Поэтому их следует специально искать.

При длительном поддержании высоких температур и когда вещество стенок включений имеет достаточно большую растворимость, происходит огранение включений - возникают "отрицательные кристаллы".

# Явления захвата включений

## Первичные расплавные включения



При 1 николе

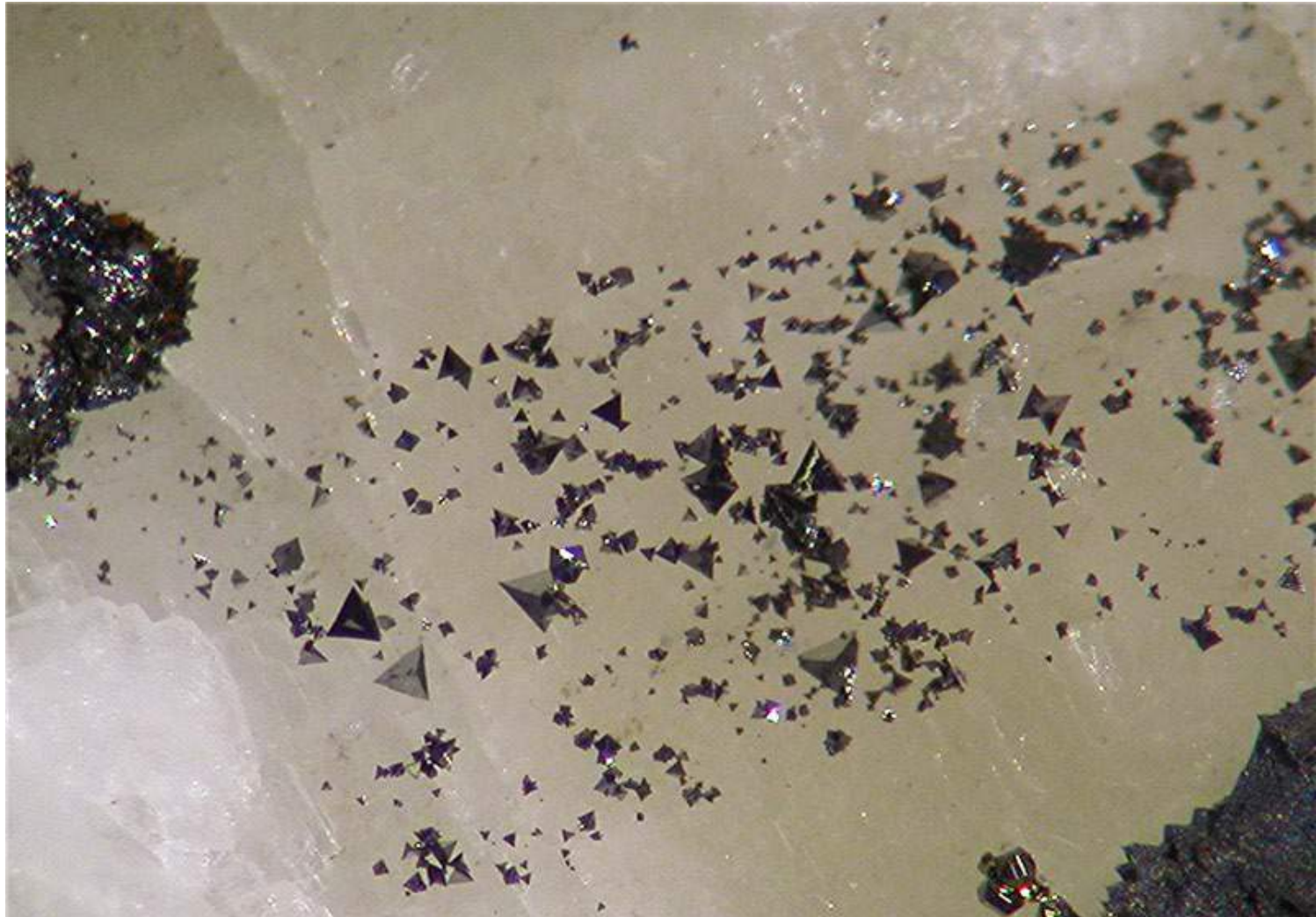


Николи х

Включения вулканического стекла кремнекислого состава по зоне роста во вкрапленнике кварца. Риодациты мелового возраста. Запад Горного Крыма, Балаклава

# Явления захвата включений

Протогенетичные включения – включения идиоморфных кристаллов в более позднем кристалле



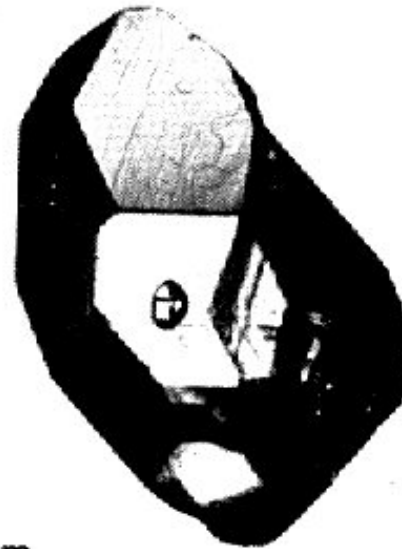
Кристаллы тетраэдрита в гидротермальном жильном кварце



# Явления захвата включений

Первичные = сингенетичные включения  
в виде «отрицательных» кристаллов

Включения до 6 мм  
в кристалле кварца 40 мм.  
Goboboseb Mountains, Намибия

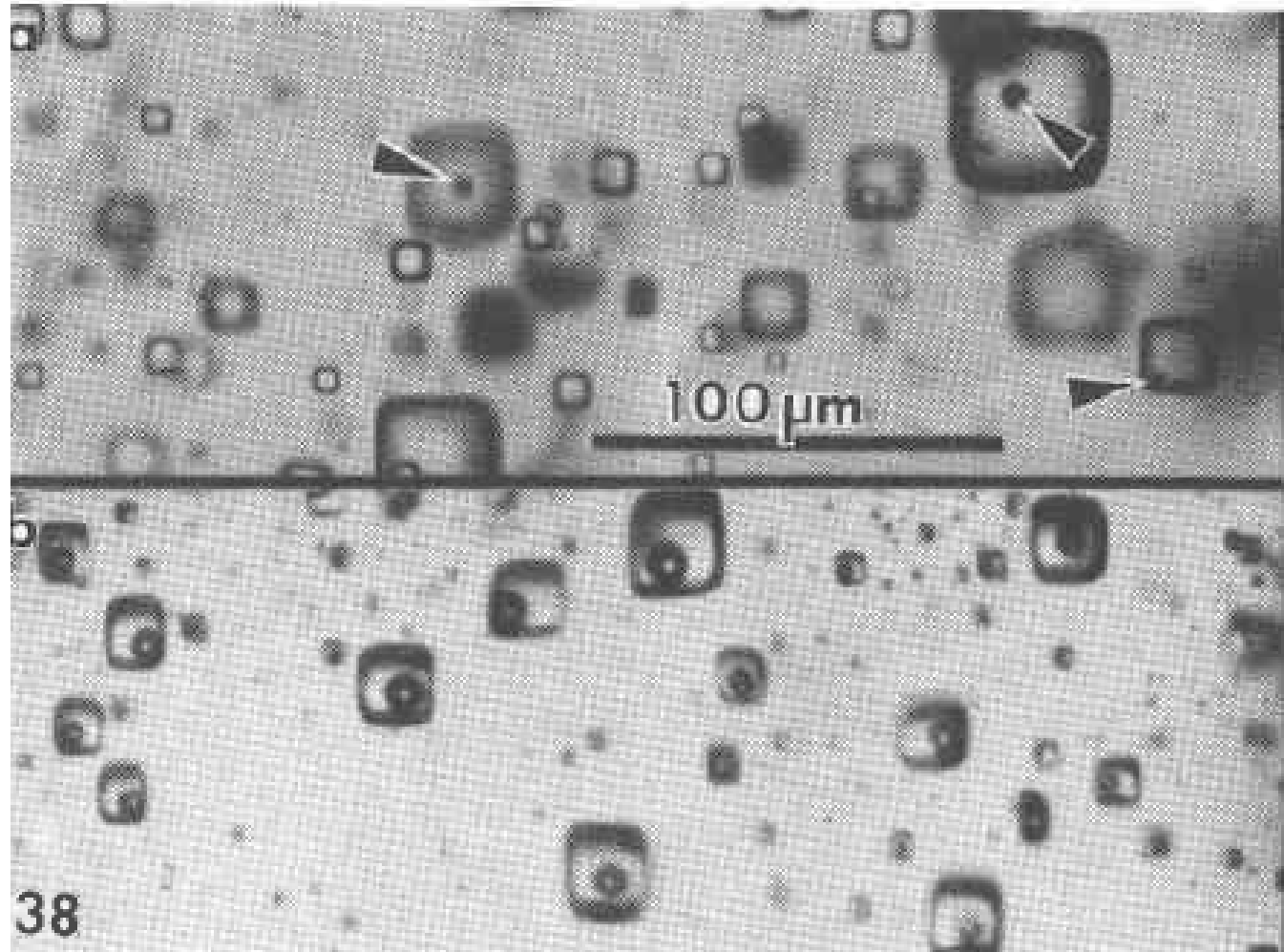


1 cm

Включение  
в горном хрустале  
в форме  
отрицательного  
кристалла  
кварца.  
Herkimer,  
Нью-Йорк, США

# Явления захвата включений

Первичные = сингенетичные включения  
в виде «отрицательных» кристаллов в галите

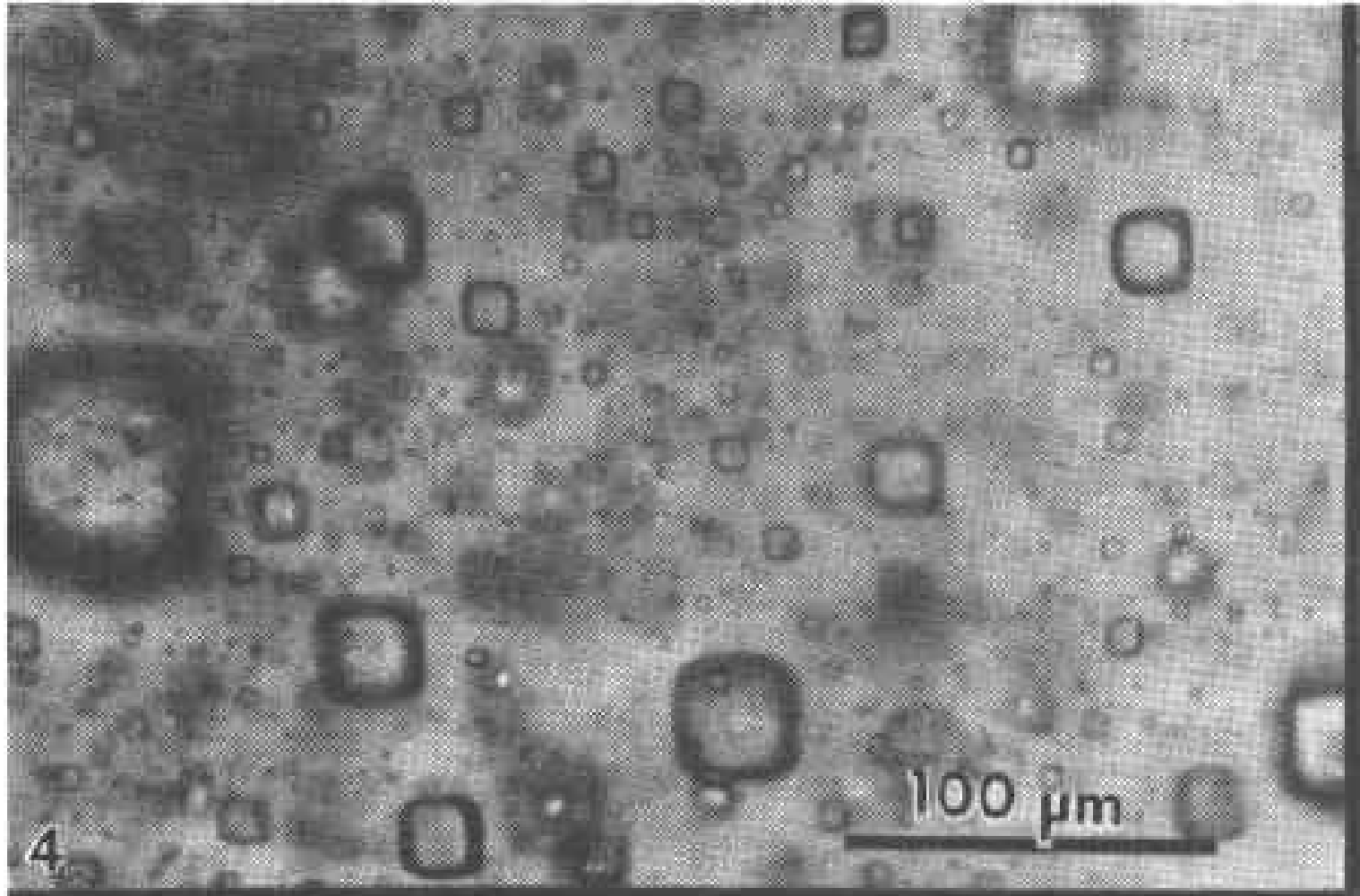


Roedder E., 1984.  
Amer. Mineral.  
Vol. 69.  
P. 413-439.

Включения рассола с газовым пузырьком в галите в форме отрицательных кристаллов галита. Delaware, New Mexico, США

# Явления захвата включений

Первичные = сингенетичные включения  
в виде «отрицательных» кристаллов в галите



Roedder E.,  
1984.  
Amer.  
Mineral.  
Vol. 69.  
P. 413-439.

Включения рассола в галите в форме отрицательных кристаллов галита.  
Palo Duro, Texas, США



# Явления захвата включений

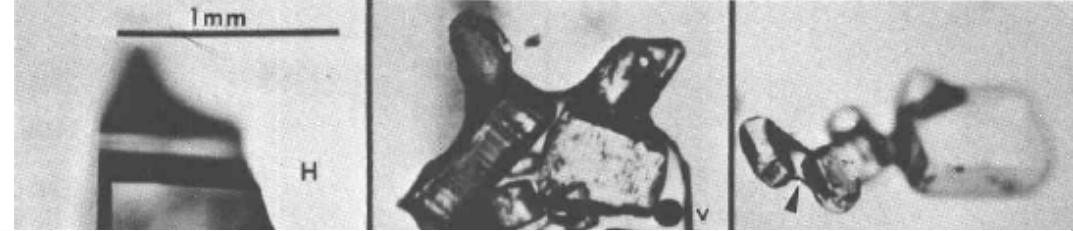


Fig. 21. Fluid inclusion (presumably primary) in single crystal recrystallized halite (H) from Vacherie salt dome, Louisiana, containing a vapor bubble (v), and a striated anhydrite crystal (A) that is presumably an accidental solid inclusion. From Roedder and Belkin (1979b).

Fig. 22. Fluid inclusion (presumably primary) in single crystal recrystallized halite (H) from Oakwood dome, East Texas, showing many anhydrite solid inclusions and small vapor bubble (v) in liquid (L). The liquid preferentially wets the anhydrite surface, and hence clung to these crystals as the inclusion changed shape. From Dix and Jackson (1982).

Fig. 23. Group of anhydrite crystals with fillets of adhering brine (arrows), in halite (H) from Rayburn dome, Louisiana, photographed in strongly convergent light, at slightly different levels of focus. In normal collimated microscope lighting, these fillets are hidden in broad black shadows. From Roedder and Belkin (1979b).

Fig. 24. Solid inclusions of halite (H), bridged by an aqueous inclusion (L), in sylvite (S) from the Permian El'tonskoye deposit, pre-Caspian basin, USSR. From Petrichenko (1977, his Fig. 99). An adjacent inclusion, out of focus, contains only gas.

Fig. 25. Three-phase inclusion in sylvite (S) from the Stebnikskoye potash deposit, pre-Carpathian depression, USSR. From Petrichenko (1977, his Fig. 88). The cubic daughter mineral is halite (H), and the hexagonal one is carnallite (C), in brine (B).

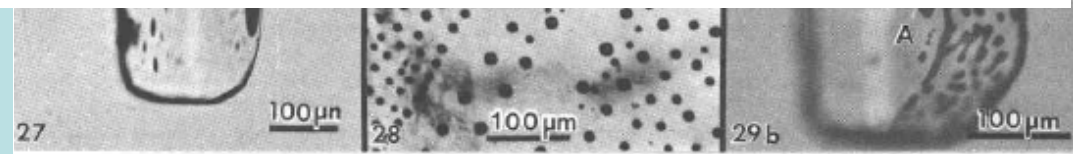
Fig. 26. Plane of secondary inclusions in halite crystal (H) from Week's dome, Louisiana, showing very small vapor bubble (v) and immiscible globule of oil (O) in brine (B). Note that the oil has an index of refraction near to that of the host salt. From Roedder and Belkin (1979b).

Fig. 27. Inclusions of dark brown fluid, presumably oil, each with a vapor bubble (arrows) on surface of anhydrite crystal (A) embedded in a single crystal of halite (H) from Rayburn dome, Louisiana. From Roedder and Belkin (1979b).

Fig. 28. Plane of secondary inclusions of low pressure organic gas ( $\text{CH}_4?$ ) in halite (H) from the Neogene Stebnikskoye potash deposit, USSR. From Petrichenko (1977, his Fig. 216).

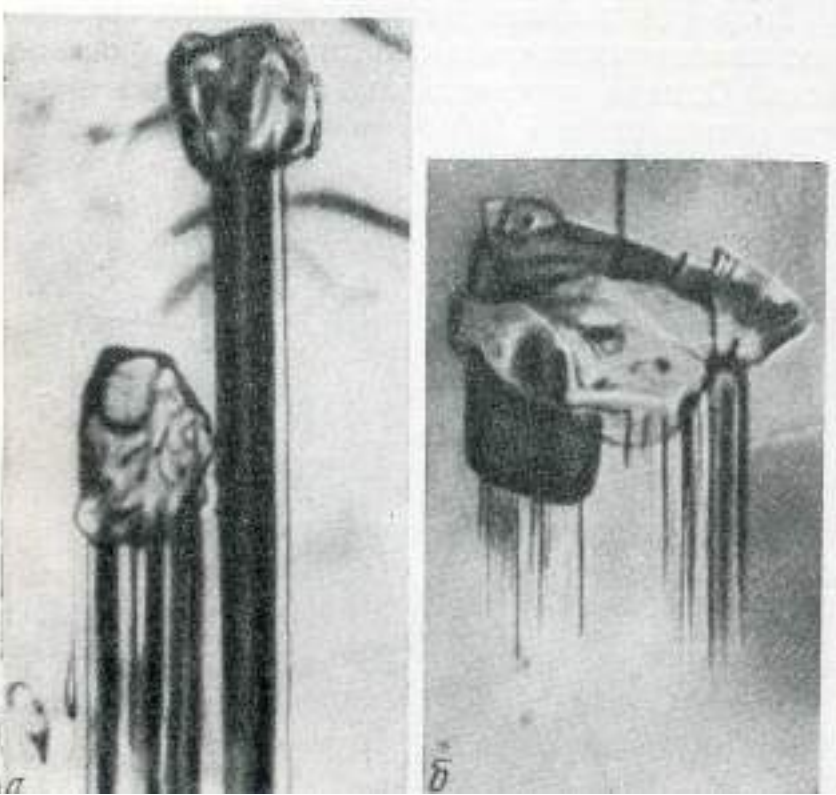
Fig. 29. Planes of high-pressure gas inclusions at the interface between included solid anhydrite crystals (A), and the single-crystal host halite crystals (H). From Roedder and Belkin (1979b). (a) From the Rayburn dome, Louisiana; (b) from the Winnfield dome, Louisiana.

Roedder E., 1984. Amer. Mineral.  
Vol. 69. P. 413-439.



# Явления захвата включений

Первичные = сингенетичные трубчатые включения



в растущем кристалле турмалина под  
посторонними включениями

в растущем кристалле аквамарина  
под сингенетичными включениями  
кристаллов мусковита



# Явления захвата включений

**Первичные =  
сингенетичные  
трубчатые  
включения**

В растущем  
кристалле аметиста  
под  
сингенетичным  
включением  
кристалла  
гётита





# Явления захвата включений

Первичные = сингенетичные струйчатые включения



Вкрапленники  
корунда - сапфира  
в щелочных  
базальтах.  
Камбоджа



которые возникли под  
сингенетичными включениями  
рутила в растущих  
кристаллах сапфира



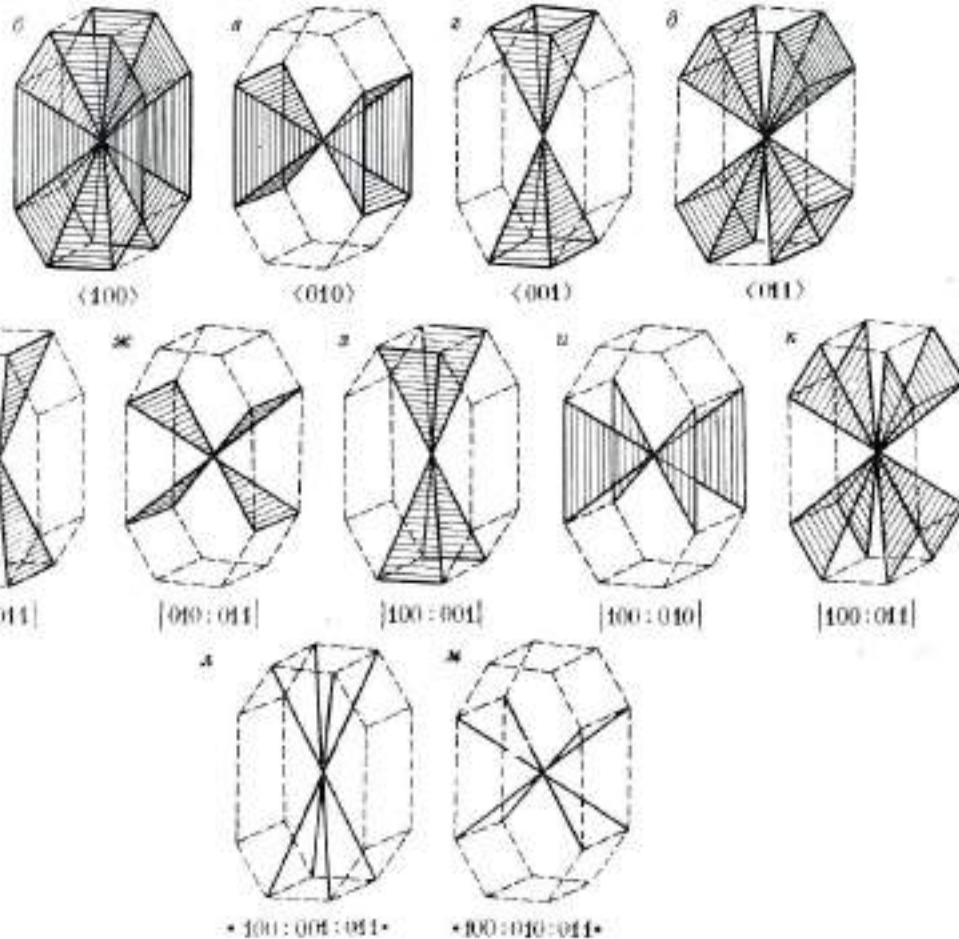
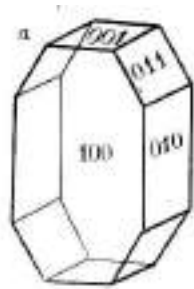


Жарки. Улуг-Танзек, Тува





# Элементы строения кристаллов



Кристаллы образуют пирамиды роста граней, плоскости роста рёбер, линии роста вершин. Часто кристаллы растут из микроскопического размера зародышей, так называемых критических зародышей, обладающих той же кристаллической структурой, что и макрокристаллы.

Макрокристаллы возникают путём разрастания этих зародышей, при воспроизводстве, редупликации кристаллической структуры данного минерала.

**Э.М. Спиридонов**

**Генетическая минералогия.**

**ГМ-1. Онтогения. Индивиды**

**Рост кристаллов**

**006.** Анатомия индивида  
(пирамиды, сектора,  
зоны роста) – источник  
генетической информации

# Анатомия индивида - источник генетической информации

5. Анатомия индивида - источник генетической информации.

Пирамиды роста, секторы роста.

Причины связи морфологии и окраски кристаллов топаза.

Эволюция форм кристаллов кальцита, апатита, барита, турмалина, фенакита, виллемита, диаспора.

6. Рост кристаллов при переменных условиях. Зональность и методы её выявления и наблюдения. Реальные скорости роста кристаллов.



# **Анатомия индивида - источник генетической информации**

Весь объём кристалла был когда-то на его поверхности. Поэтому изучение анатомии кристалла - источник информации о его генезисе.

Кристалл сложен пирамидами нарастания граней, поверхностями нарастания рёбер и линиями нарастания вершин. Реальные кристаллы всегда зональны, т.к. их рост происходил за счёт отложения вещества на поверхности кристалла микро- и макрослоями. Соответственно, пирамиды роста граней имеют пластинчатое строение, поверхности нарастания ребер - полосчатое, линии нарастания вершин - состоят из отрезков.

Некоторые грани не образуют своих пирамид роста, эти грани именуют гранями "торможения". Для кварца - это обычно грани призмы.

## **Пирамиды роста**

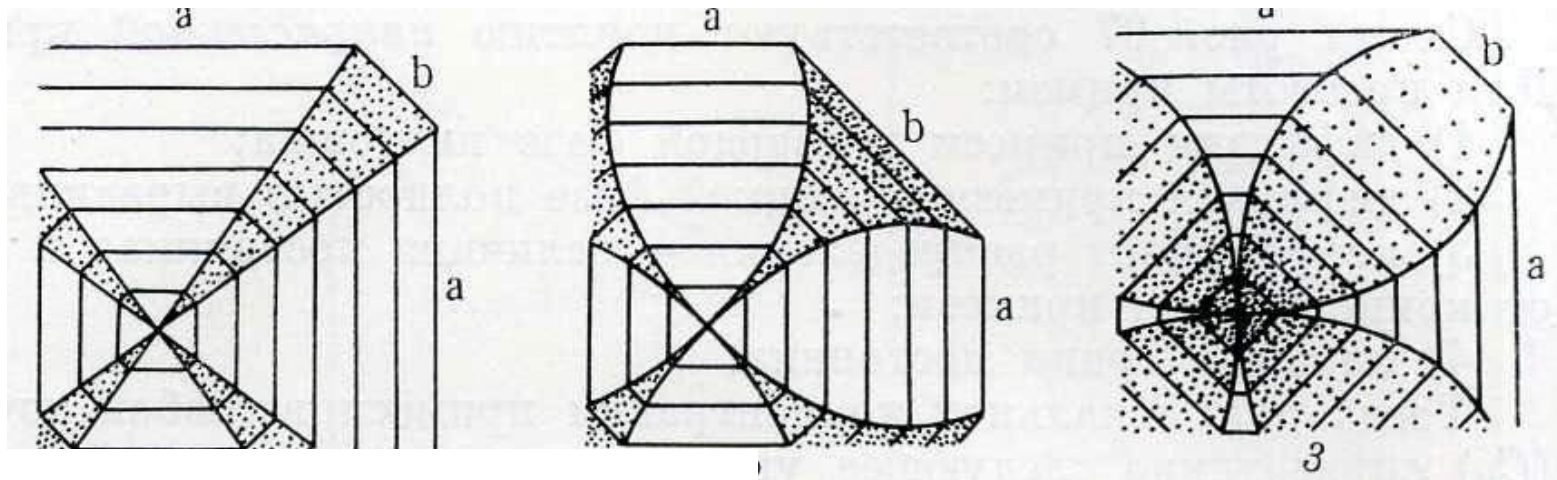
В идеально развитом кристалле все пирамиды нарастания граней исходят из одной точки - центра кристаллизации. Пирамиды роста фиксируют все особенности роста кристалла. Форма пирамид роста бывает копьевидной, чётковидной и более сложной с неправильными кривыми границами. Это свидетельствует о переменной скорости роста граней, вплоть до прерывистого. При остановке роста возникают секториальные фантомы. На форму пирамид роста влияют пересыщение, поглощение кристаллом примесей, ориентировка кристалла относительно

# Анатомия индивида - источник генетической информации

## Пирамиды роста

потока минералообразующего флюида. Кристалл при одностороннем питании приобретает ассиметричное строение, его центр смещается в сторону питающего потока. Соответственно, возможно решение и обратной задачи. В ряде кристаллов отдельные пирамиды роста настолько заметно отличаются по цвету, количеству примесей, тонкому рисунку зональности..., что можно говорить о секториальном строении таких кристаллов.

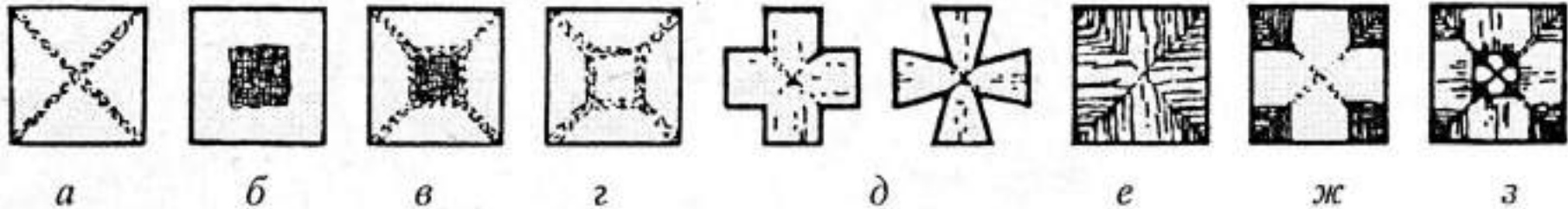
Различные  
типы  
пирамид  
роста



Пирамиды роста  
в кристалле  
льда

# Анатомия индивида - источник генетической информации

## Пирамиды - секторы роста



Распределение включений углеродистого вещества (графита) в кристаллах андалузита - хиастолита. Поперечное сечение кристаллов.

Бельков И.В. Кианитовые сланцы свиты Кейв.  
М.-Л.: изд. АН СССР. 1963. 136 с.



# Анатомия индивида - источник генетической информации

## Пирамиды роста

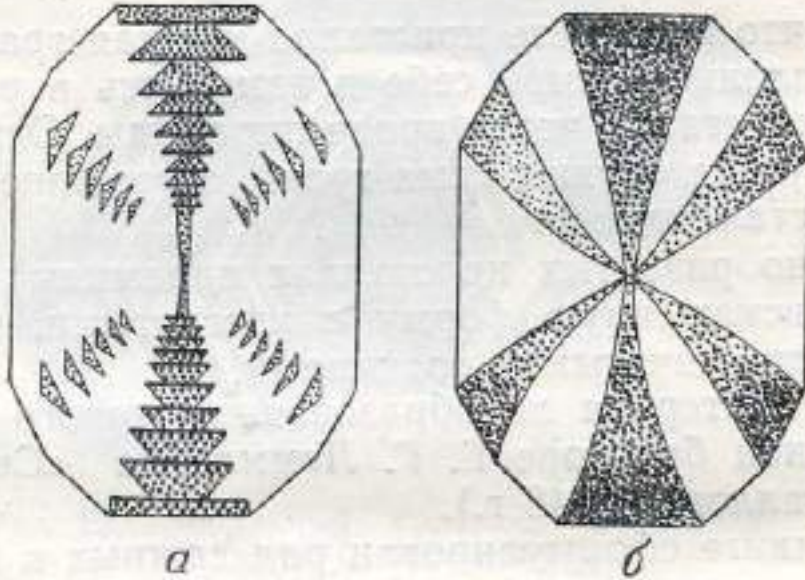


Рис. 83. Формы пирамид роста в кристалле брукита, выросшем при всестороннем и равномерном поступании питающих потоков.  
По Н. Ю. Икорниковой

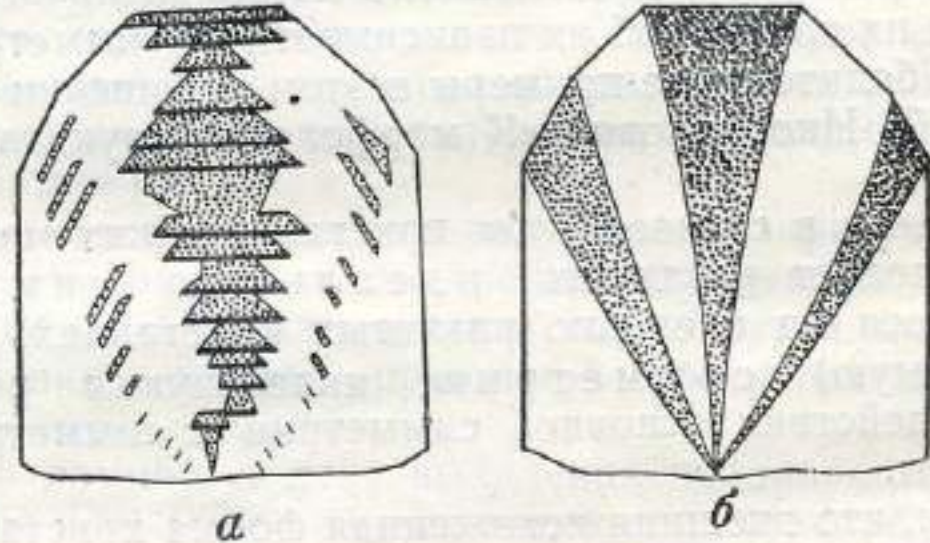


Рис. 84. Формы пирамид роста в кристалле брукита, выросшем так, что его ось [001] совпадала с направлением питающих токов.  
По Н. Ю. Икорниковой

Изотропное питание (рис. 83).

а – рост с остановками,

Одностороннее питание (рис. 84)

б – рост непрерывный

# Анатомия индивида - источник генетической информации

## Пирамиды роста

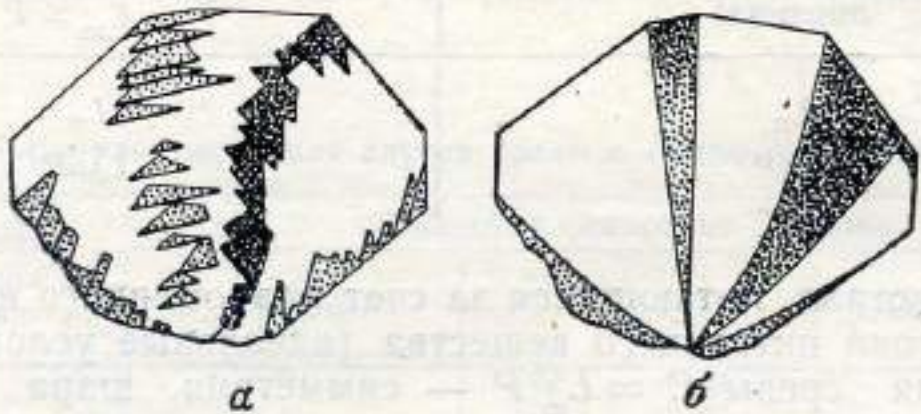
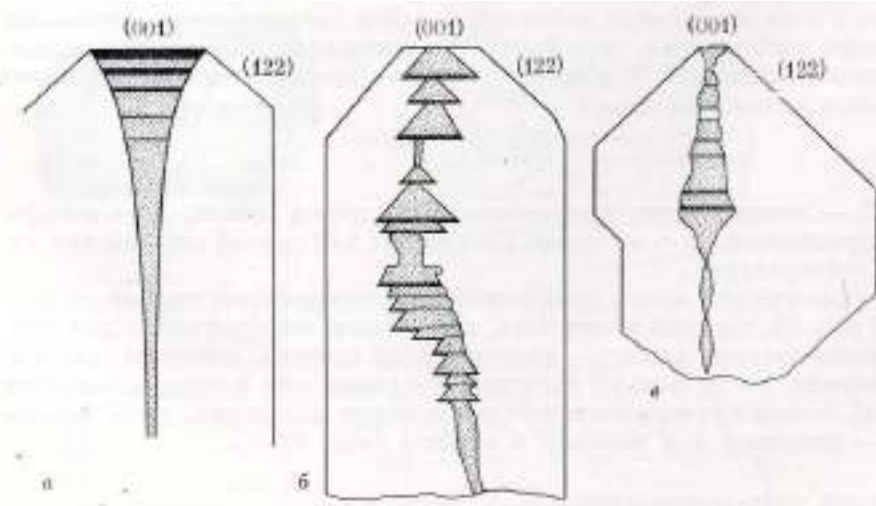


Рис. 85. Формы пирамид роста в кристалле брукита, выросшем при косом расположении оси  $[001]$  относительно направления питающих потоков.  
По Н. Ю. Икорниковой



Боковое питание.

а – рост с остановками,  
б – рост непрерывный

Различные типы пирамид роста в кристаллах брукита



# Анатомия индивида - источник генетической информации

## Пирамиды роста в кристаллах брукита



22x14 мм. Monts Karahan,  
Пакистан

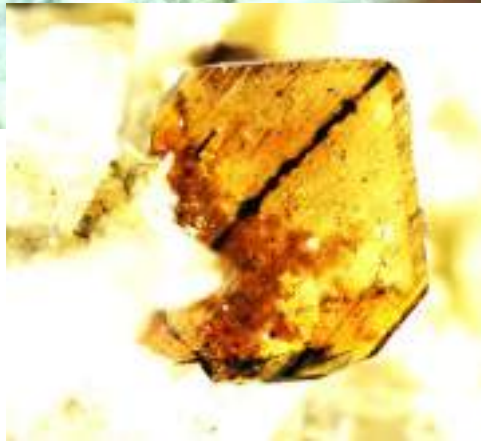


20 мм. Fitampito, Ikalnavony, Мадагаскар



# Анатомия индивида - источник генетической информации

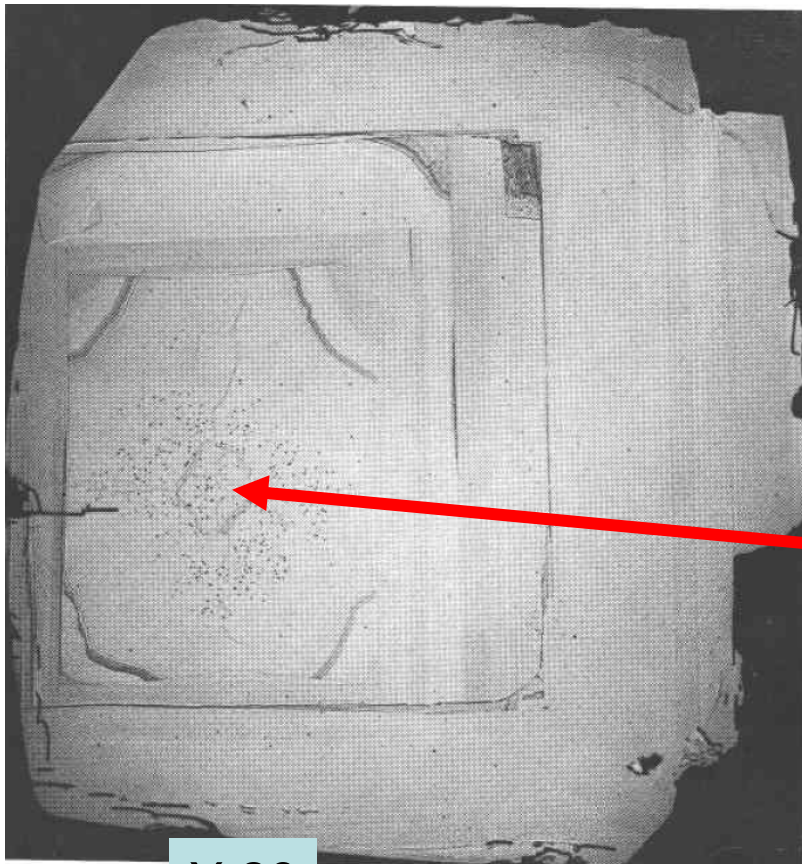
## Пирамиды роста в кристаллах брукита



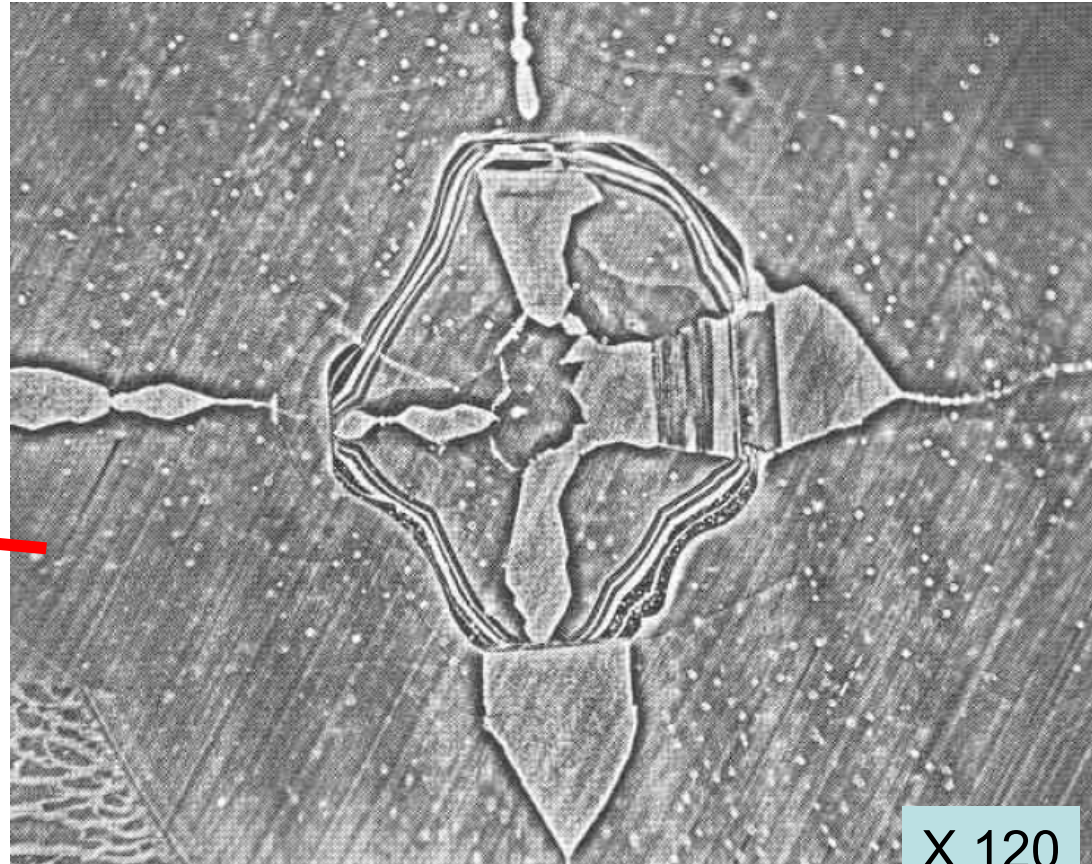
Альпийские жилы.  
Monte Brigaseto,  
Северо-Итальянские  
Альпы

# Анатомия индивида - источник генетической информации

## Пирамиды роста в кристаллах алмаза



X 28



X 120

Кристалл алмаза из кимберлитовой трубки Kimberley, ЮАР.  
Seal M., 1965. Amer. Mineral. Vol. 50. P. 105-123.



# Анатомия индивида - источник генетической информации

## Пирамиды роста в кристаллах топаза

По закону Бекке пирамиды роста разных простых форм имеют различные физические свойства: показатели преломления, твёрдость, электропроводность, степень интенсивности радиационной окраски (дымчатый кварц), плотность точечных дефектов и дислокаций. Различные грани кристаллов по-разному сорбируют примеси из среды питания. Интересны пирамиды роста топаза. Грани [120] (ромбические призмы, в поперечном сечении почти квадратные) и [112] (более острые, точнее сплюснутые бипирамиды) активно поглощают  $Fe^{2+}$ , их пирамиды роста окрашены в голубой цвет. Кристаллы топаза, образованные такими гранями, - из пегматитов Мурзинки, Ильмен... – голубого цвета. Грани [110] (призмы, вытянутые в поперечном сечении) и [111] (более тупые бипирамиды) активно поглощают  $Fe^{3+}$ , их пирамиды роста окрашены в чайный, розовый, жёлтый, фиолетовый цвета. Кристаллы, образованные такими гранями, - из кварцевых жил Бразилии, Южного Урала, Пакистана - розовые, жёлтые, фиолетовые. Кристаллы топаза, где развиты пирамиды роста граней [120] и [110], [112] и [110]..., - двуцветные: пирамиды роста граней [120] голубого цвета, пирамиды роста граней [110] чайного цвета различной густоты окраски; таковы топазы из пегматитов Волыни.



Грань [120]

Грань [110]

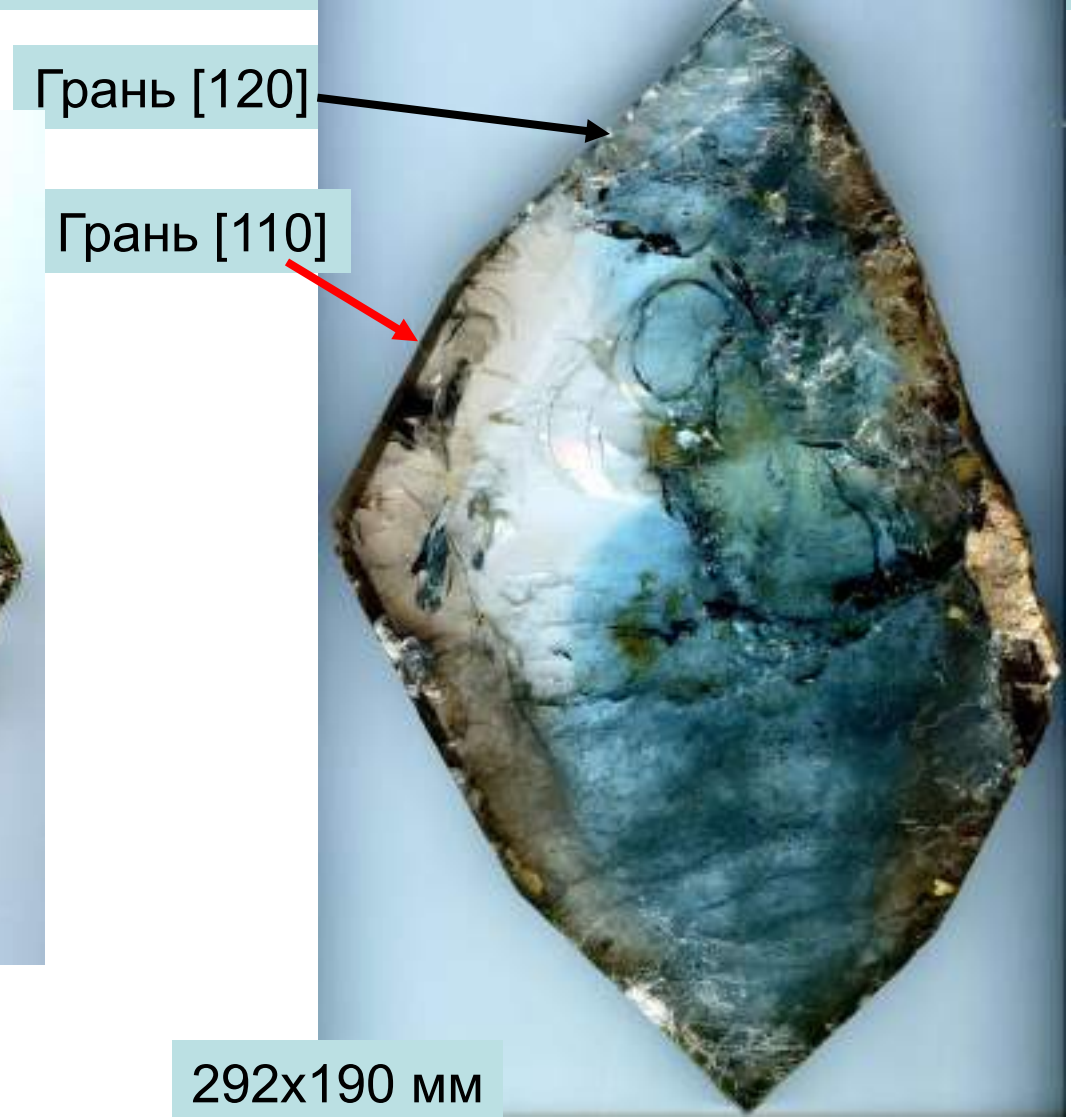
Пирамиды роста  
разной окраски =  
разного состава  
в кристаллах  
топаза  
гранитных  
пегматитов  
Волыни,  
Украина

171x146 мм



# Анатомия индивида - источник генетической информации

## Пирамиды роста в кристаллах топаза гранитных пегматитов Волыни, Украина



# **Анатомия индивида - источник генетической информации**

## **Сектора роста**

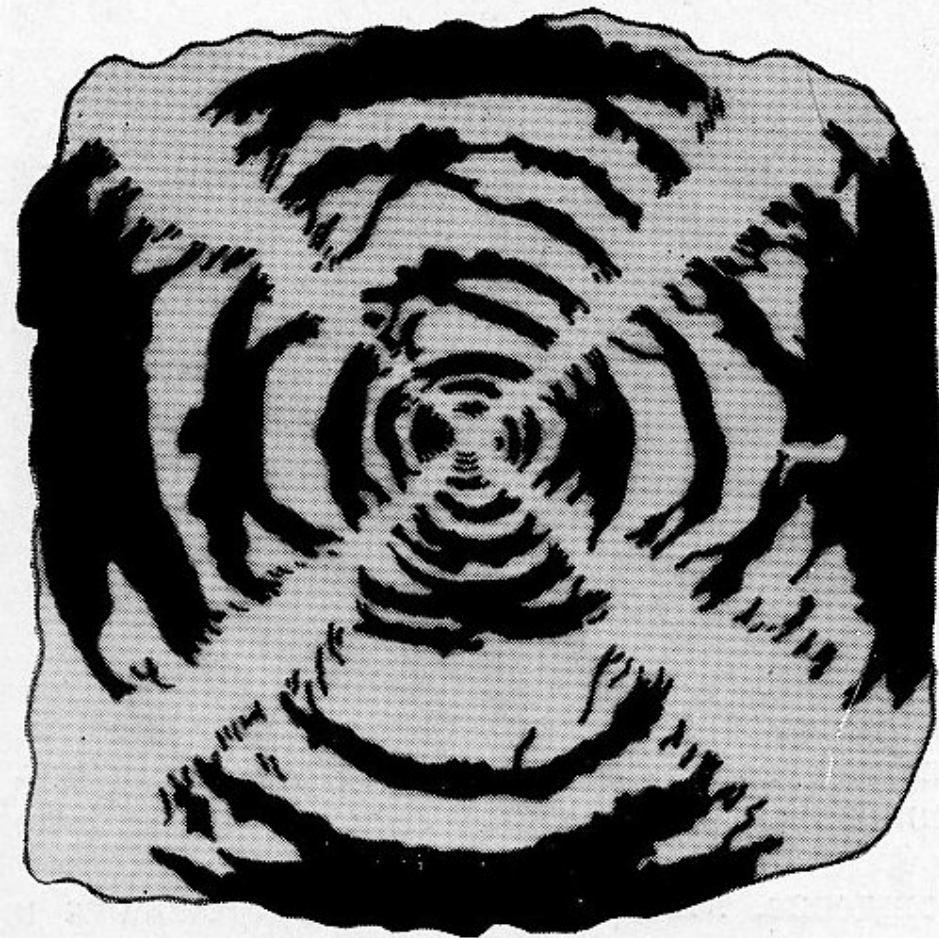
В ряде кристаллов отдельные пирамиды роста настолько заметно отличаются по цвету, количеству примесей, тонкому рисунку зональности ..., что можно говорить о секториальном строении таких кристаллов. Особенно выразительна секториальность в сочетании с зональностью у кристаллов аметиста и аметрина, сапфира, рубина, циркона, гранатов.

То, что различные сектора роста кристаллов одного минерала могут в несколько раз отличаться по содержанию элементов-примесей, следует иметь в виду при микрозондовых и иных исследованиях. В некоторых кристаллах везувиана, ставролита, титанавгита, турмалина... кристаллографически различные сектора роста отличны по валовому химическому составу, нередко имеют различную симметрию! Это еще один любопытный штрих к вопросу о том, что такое минерал.

Поскольку состав различных секторов роста одного кристалла нередко различен и соответственно различны параметры их кристаллической решетки, то вдоль контактов разных секторов нередко развиваются напряжения гетерометрии, порождающие образование трещин, изгибы, кручение кристаллов, расщепление кристаллов.



# Анатомия индивида - источник генетической информации. Сектора роста кристалла галита

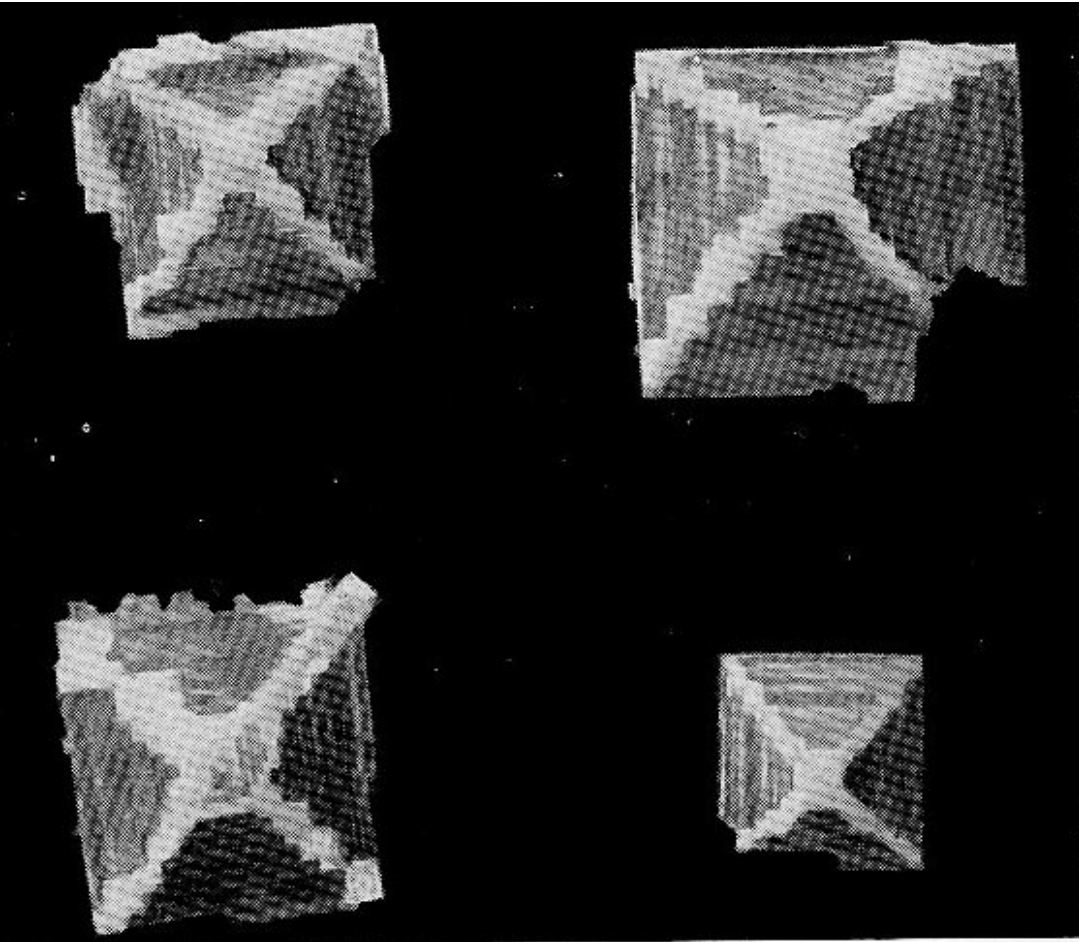


47

Зональная структура гигантского (около 7 см) кристалла галита, обусловленная распределением серповидных участков галита и галопелитового материала (черное) по зонам роста кристалла. Белый крест — диагональные плоскости куба (ребра «пирамид роста»). Светлое — галит.

Зарисовка образца в 9/10 нат. величины. Кунгур Прикаспия. Материалы А. Л. Протопопова и Л. П. Блазко, 1965.

# Анатомия индивида - источник генетической информации. Сектора роста кристалла галита



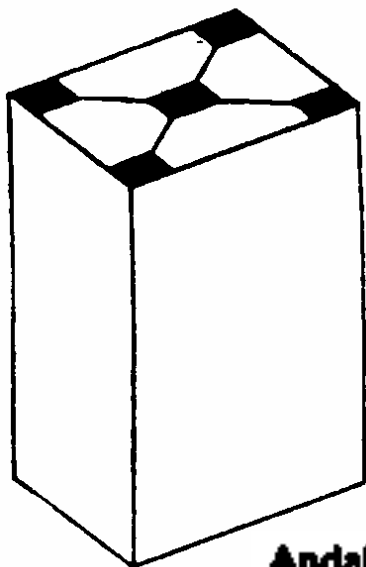
Секториально-  
зональные  
кристаллы  
галита

40

Зональная структура кристаллов галита со дна Кургузульской бухты зал. Кара-Богаз-Гол.  
×2. Материалы В. Н. Дубининой, 1951.

# Анатомия индивида - источник генетической информации. Сектора роста кристаллов андалузита

Fig. 2.



Andalusit

Fig. 3.

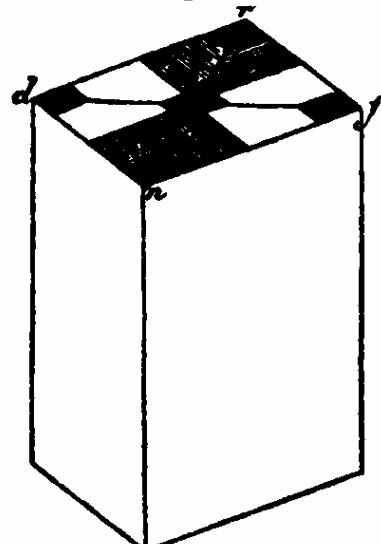


Fig. 4.

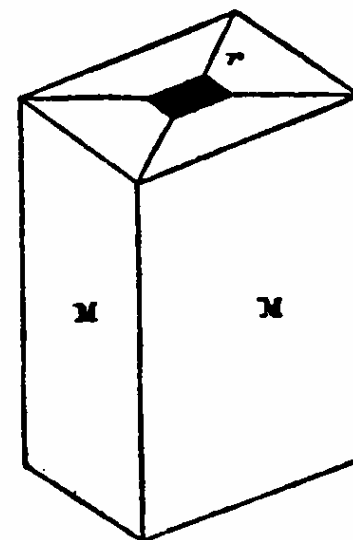
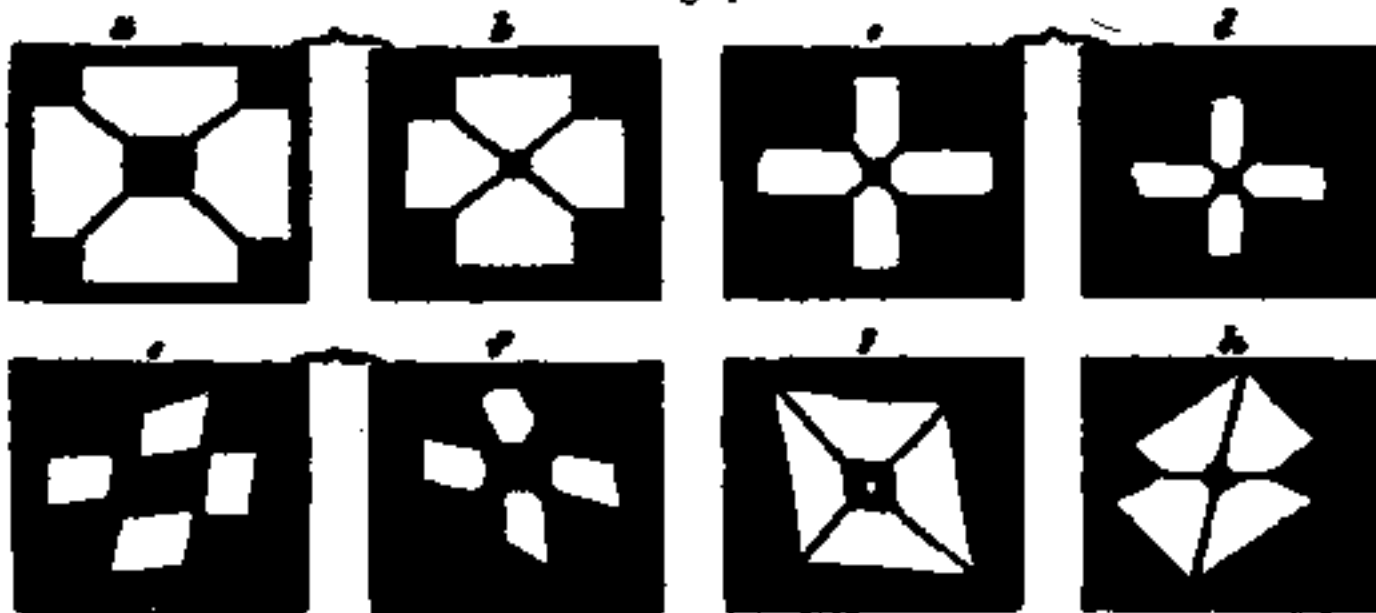


Fig. 7.





# Анатомия индивида - источник генетической информации

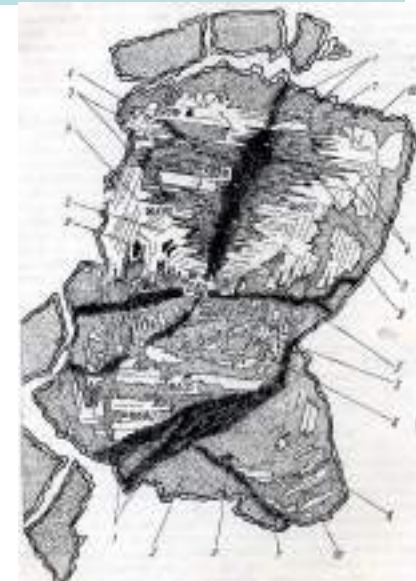
## Сектора роста



Секториально окрашенный флюорит.  
Эронго, Намибия



Секториальный алмаз 1.75 карат.  
Бразилия



Секториальный кристалл  
скарнового магнетита.  
Сарбайское,  
Северный Казахстан



Секториальный – звёздчатый алмаз

Секториальный кристалл  
фторапофиллита.  
31x29 мм



# Анатомия индивида - источник генетической информации. Сектора роста

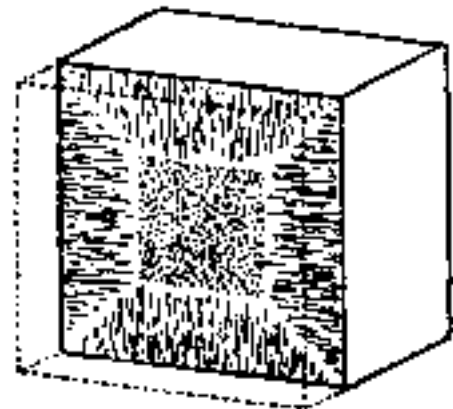


Кварц. Казахстан



Кварц.  
Катпар,  
Прибалхашье

Флюорит



Биотит



Аметист – кварц.  
36x26 мм.  
Tata, Марокко

# Анатомия индивида - источник генетической информации. Сектора роста



**Аметрин =  
секториальный  
аметист – цитрин**  
Anahi, Santa-Cruz,  
Боливия





# Альпийские жилы. Аметрин



120 мм

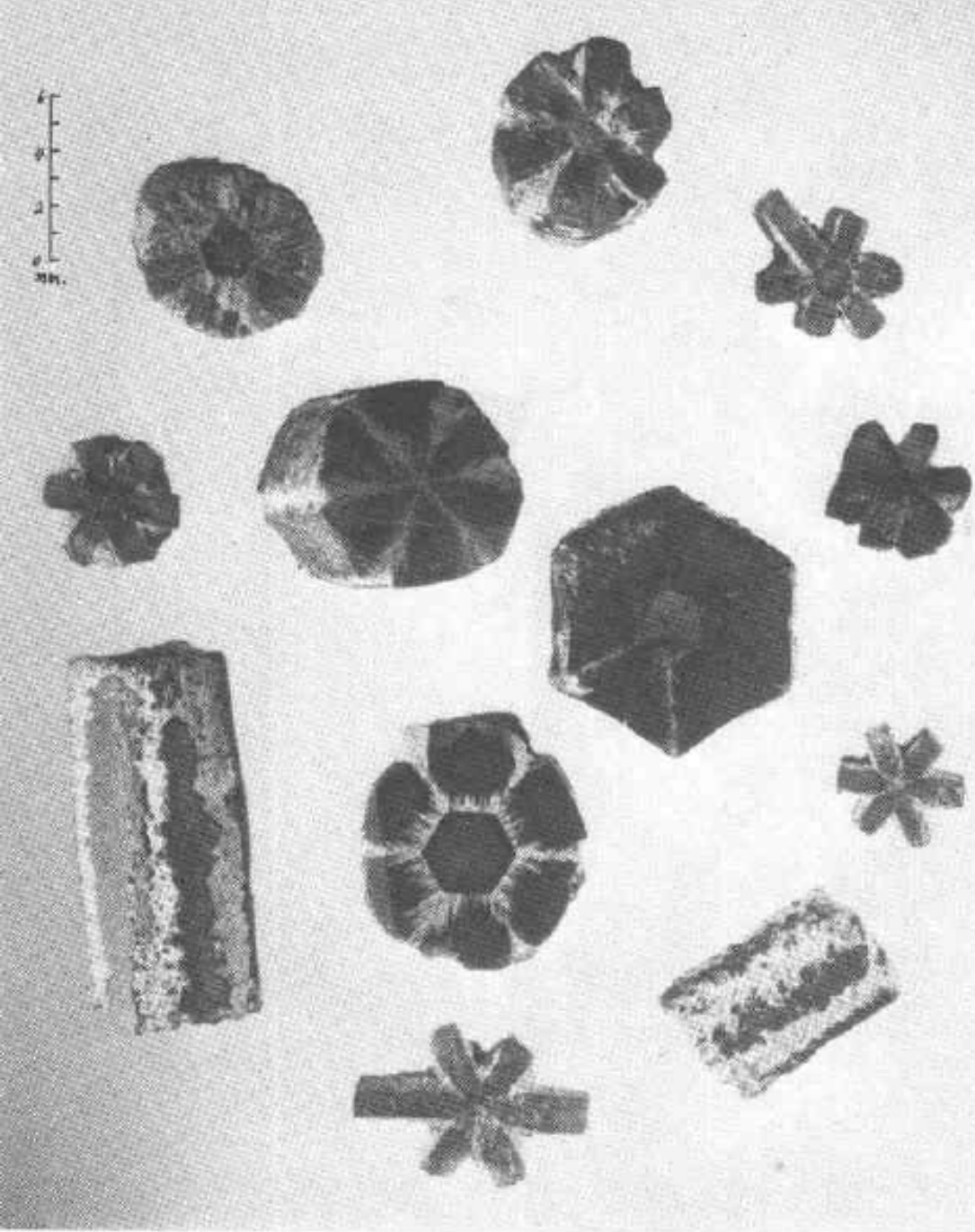


FIG. 1. Chivor trapiche emeralds.

**Анатомия индивида -  
источник генетической  
информации.  
Сектора роста**

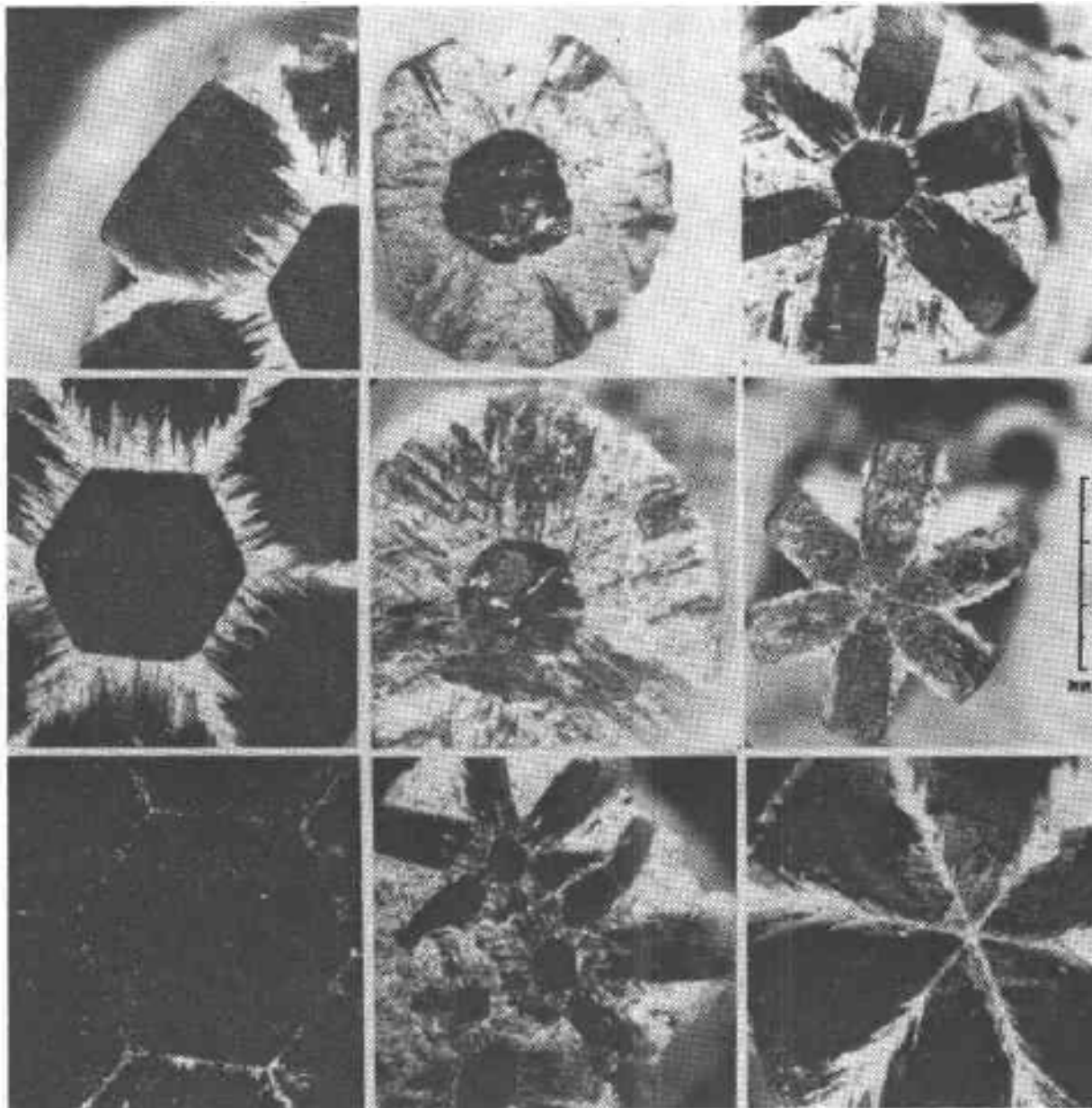
**Трапише - изумруд  
-  
секториальные  
кристаллы  
изумруда  
месторождения Чивор,  
Колумбия.**

Состав светлых и тёмных  
секторов различен.

Nassau K., Jackson K.A.,  
Amer. Mineral. 1970.  
Vol. 55. P. 416-427



# Анатомия индивида - источник генетической информации. Сектора роста



**Трапише - изумруд  
-  
секториальные  
кристаллы  
изумруда  
месторождения  
Чивор,  
Колумбия.**

Состав светлых и тёмных  
секторов различен.

Nassau K., Jackson K.A.,  
Amer. Mineral. 1970.  
Vol. 55. P. 416-427

FIG. 2. Cross-sections of Chivor trapiche emeralds.



# Анатомия индивида - источник генетической информации. Сектора роста

Структуры типа «песочных часов»

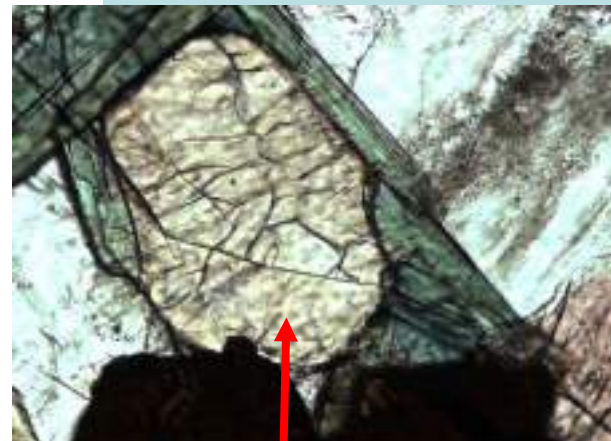


Секториальный кристалл гипса



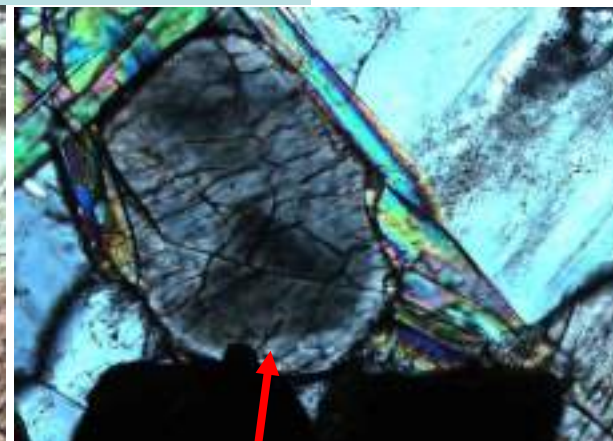
Николи х

Секториальные кристаллы астраханита



Секториальный кристалл эвдиалита

При 1 николе



Николи х

# Анатомия индивида - источник генетической информации. Секториальные кристаллы

Холингвортит  $RhAsS$ . Co-Cu-Ni руды. Йоко-Довырен, Прибайкалье

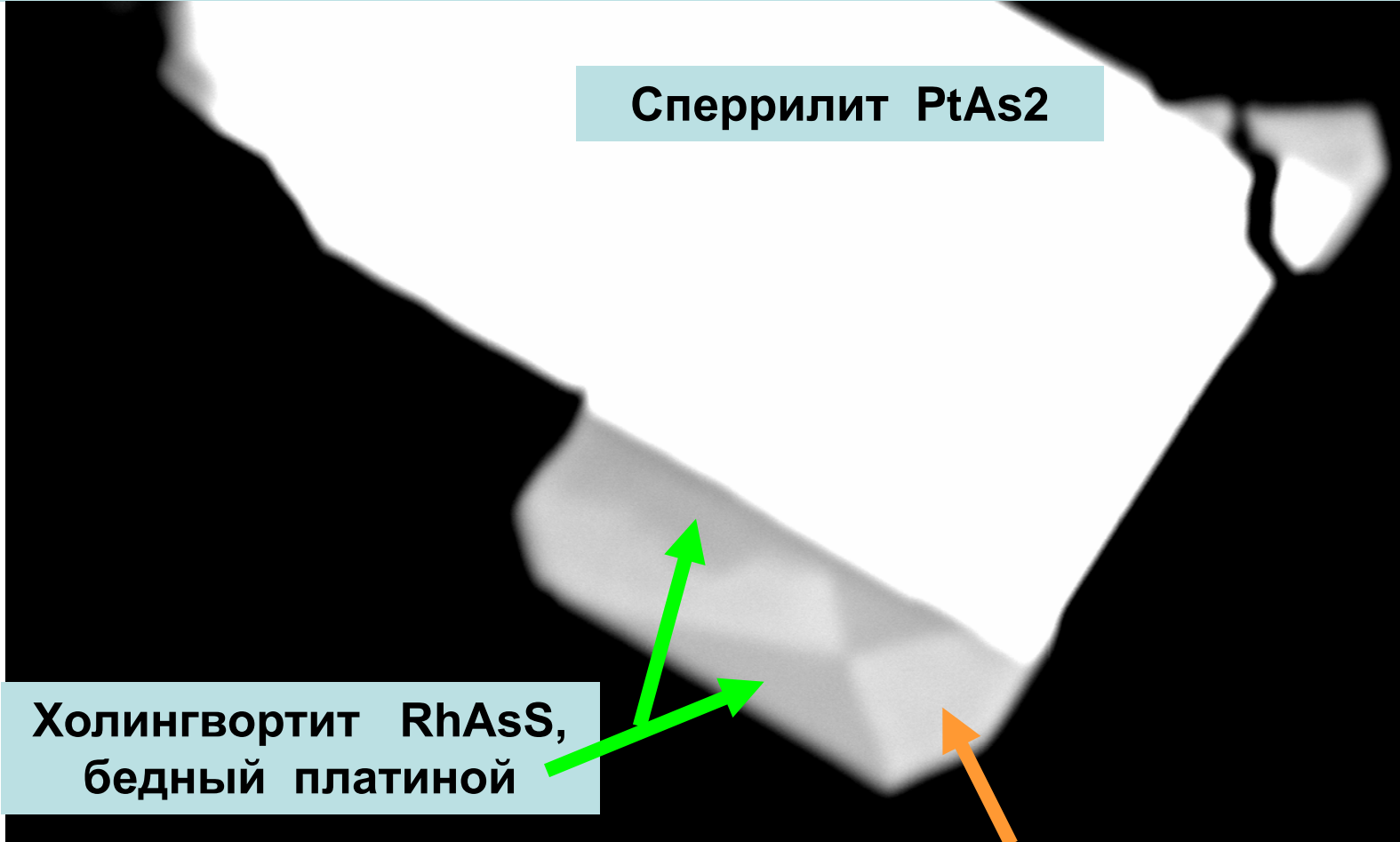
Сперрилит  $PtAs_2$

Холингвортит  $RhAsS$ ,  
бедный платиной

Холингвортит  $RhAsS$ , богатый платиной

5  $\mu m$  1172 AD

BSE image



Расслоенный толеитовый  
интрузив Йоко-Довырен, Северное Прибайкалье

**Состав светлого - октаэдрического сектора  
холингвортита RhAsS**

**(Rh0.84 Pt0.05 Ir0.02 Co0.04 Ni0.04 Fe0.02)1.01  
As1.00 S0.99**

**(Rh0.83 Pt0.05 Ir0.01 Co0.06 Ni0.03 Fe0.02)1.00  
As0.99 S1.00 Se0.01**

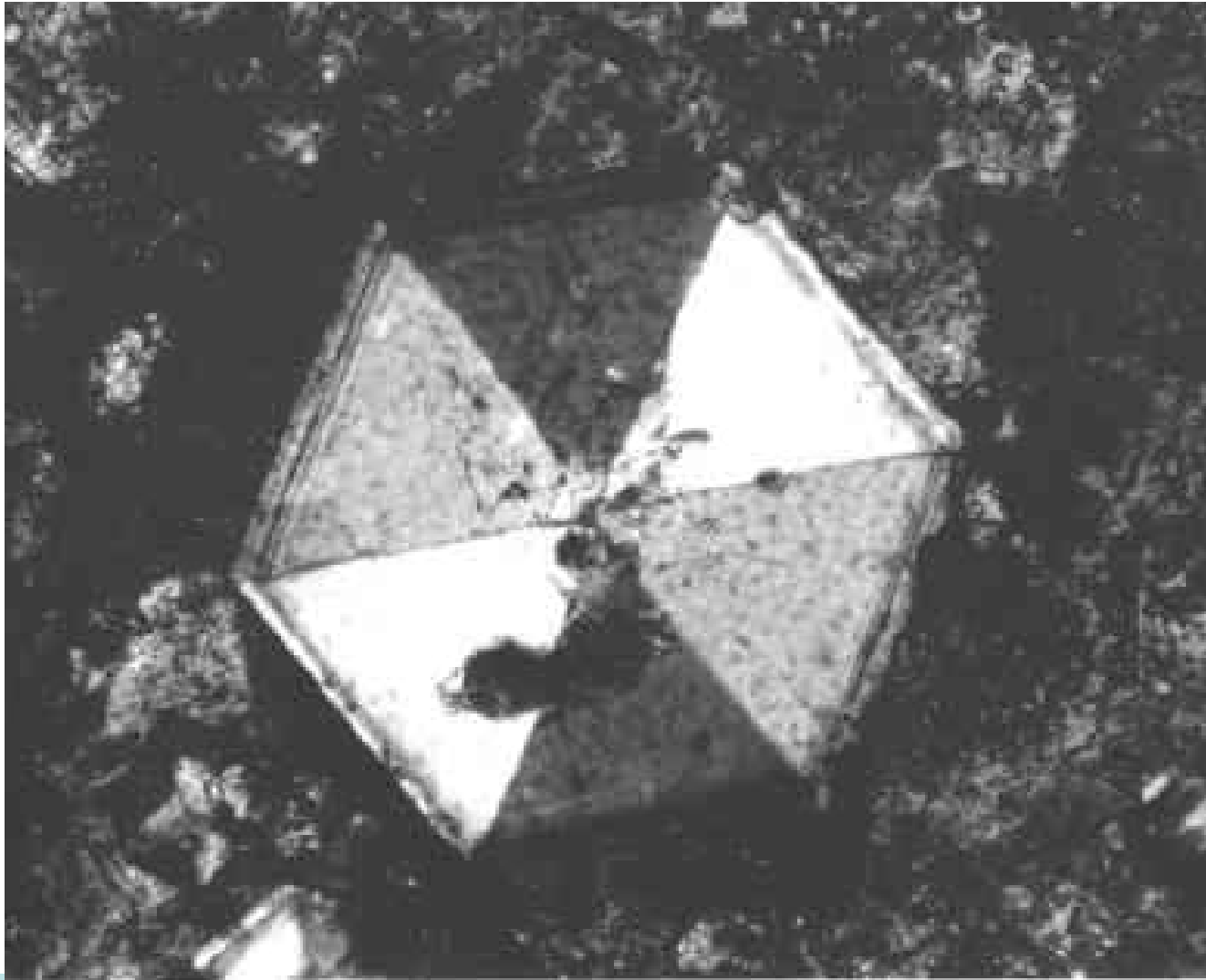
**Состав тёмного - кубического сектора холингвортита**

**(Rh0.83 Ir0.01 Co0.08 Ni0.04 Fe0.02)0.99  
As0.98 S1.02 Se0.02**

**(Rh0.87 Ir0.01 Co0.07 Ni0.04 Fe0.02)1.01  
As0.98 S0.99 Se0.02**



# Анатомия индивида - источник генетической информации. Сектора роста

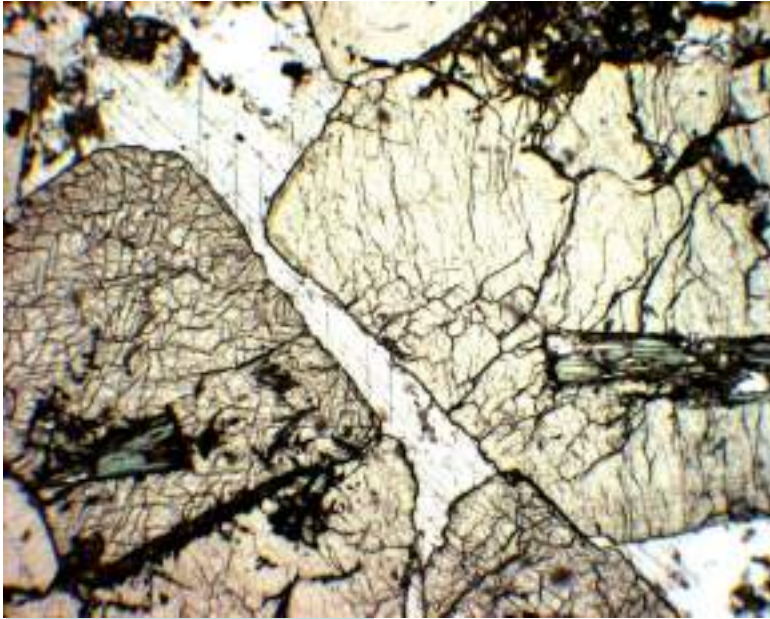


Николи х

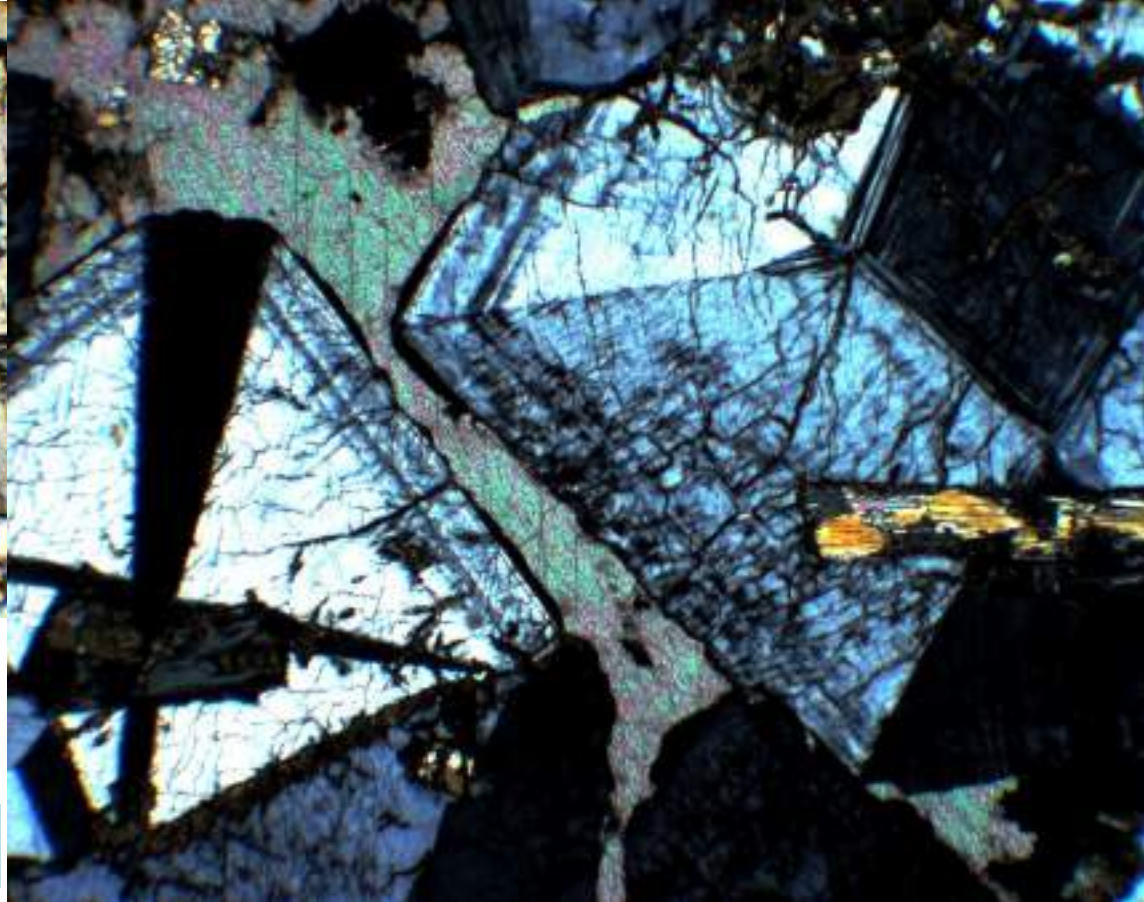
Секториальный кристалл родингитового гидрогроссуляр – андрадита.  
Рифт Осло, южная Норвегия.

Jamtveit B., 1991. Amer. Mineral. Vol. 76. P. 1314-1327.

# Анатомия индивида - источник генетической информации. Сектора роста



При 1 николе



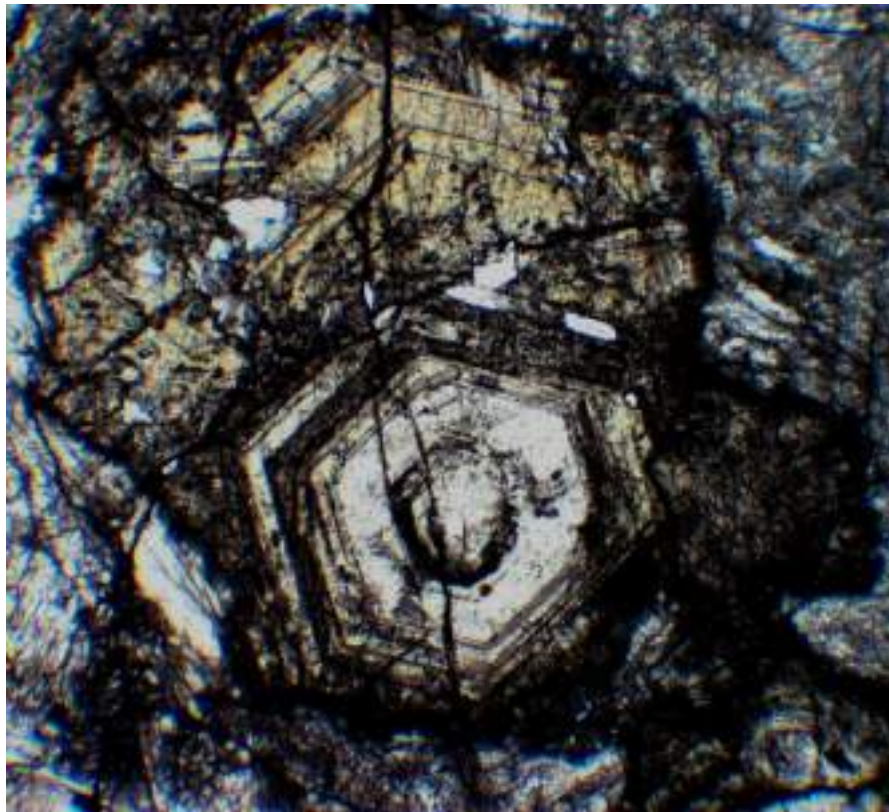
Николи x

Секториальные кристаллы позднескарнового гроссуляра - андрадита в ассоциации с кальцитом и салитом.

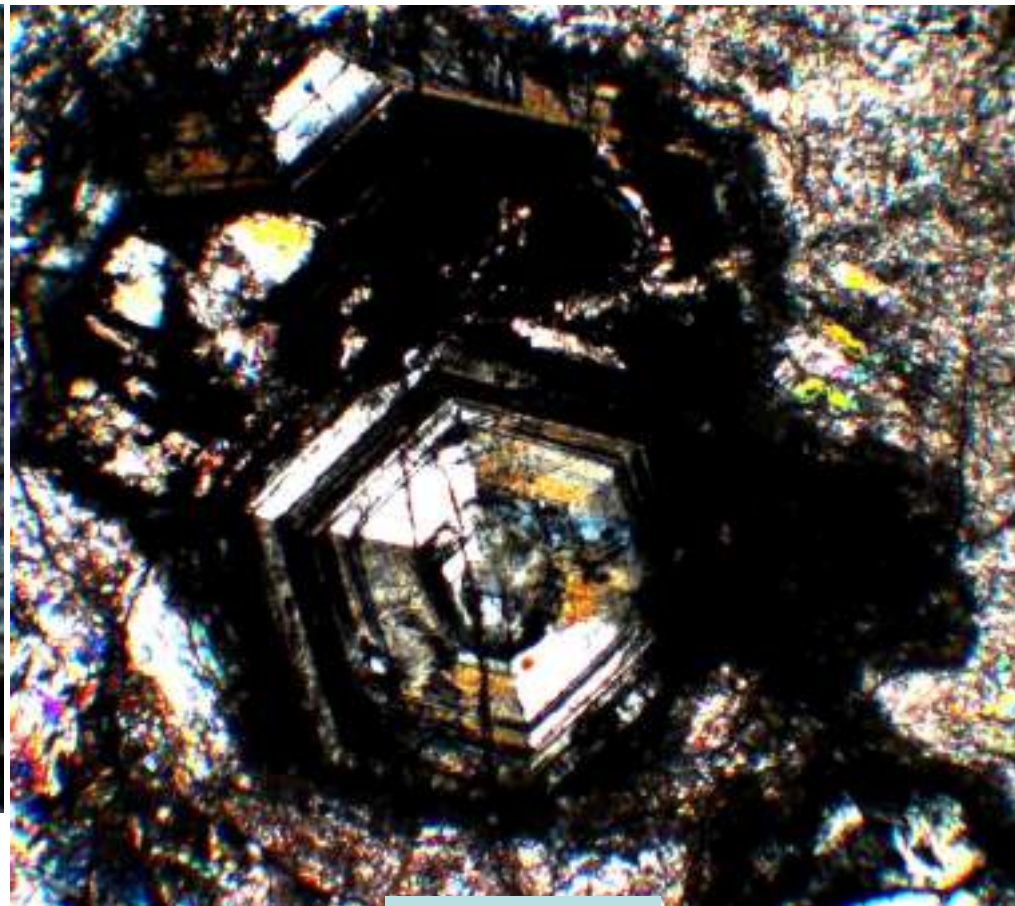
Чорух-Дайрон, Таджикистан



# Анатомия индивида - источник генетической информации. Секториально-зональные кристаллы



При 1 николе

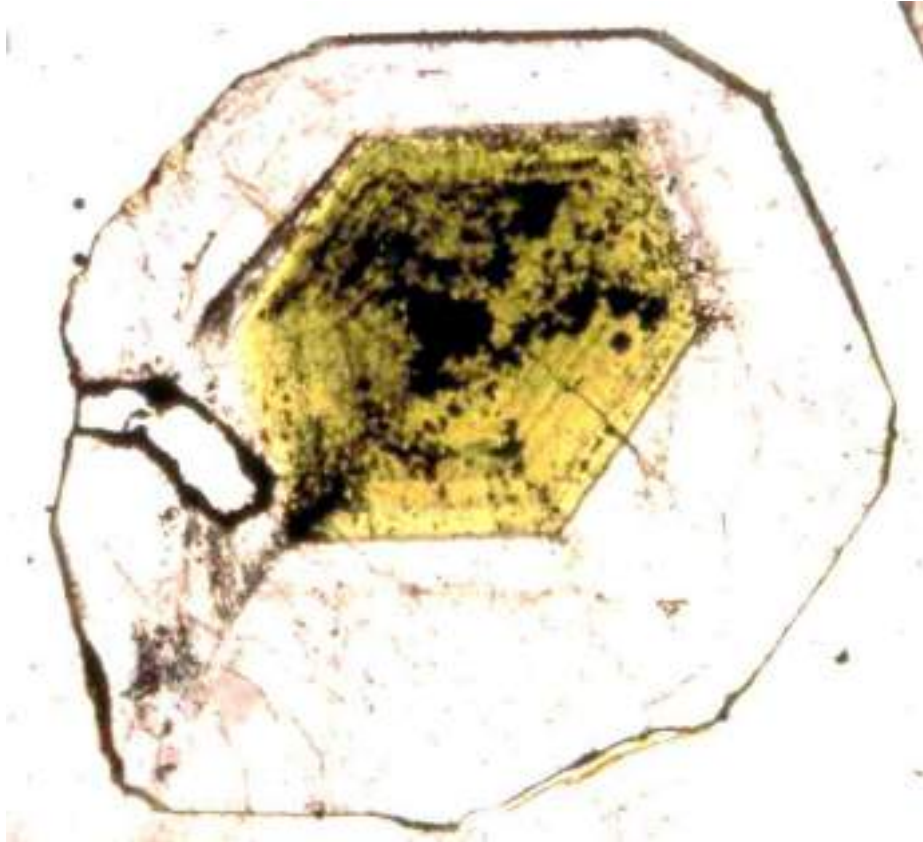


Николи х

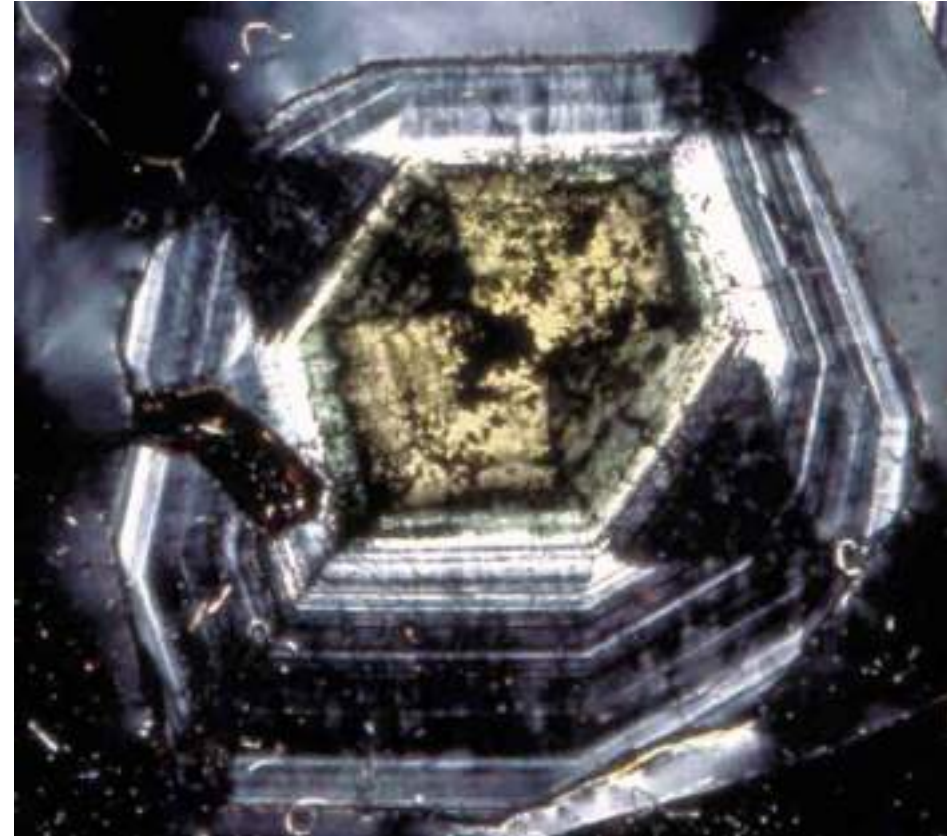
Позднескарновый гроссуляр - андрадит.  
Тырны-Ауз, Северный Кавказ



# Анатомия индивида - источник генетической информации. Секториально-зональные кристаллы



При 1 николе

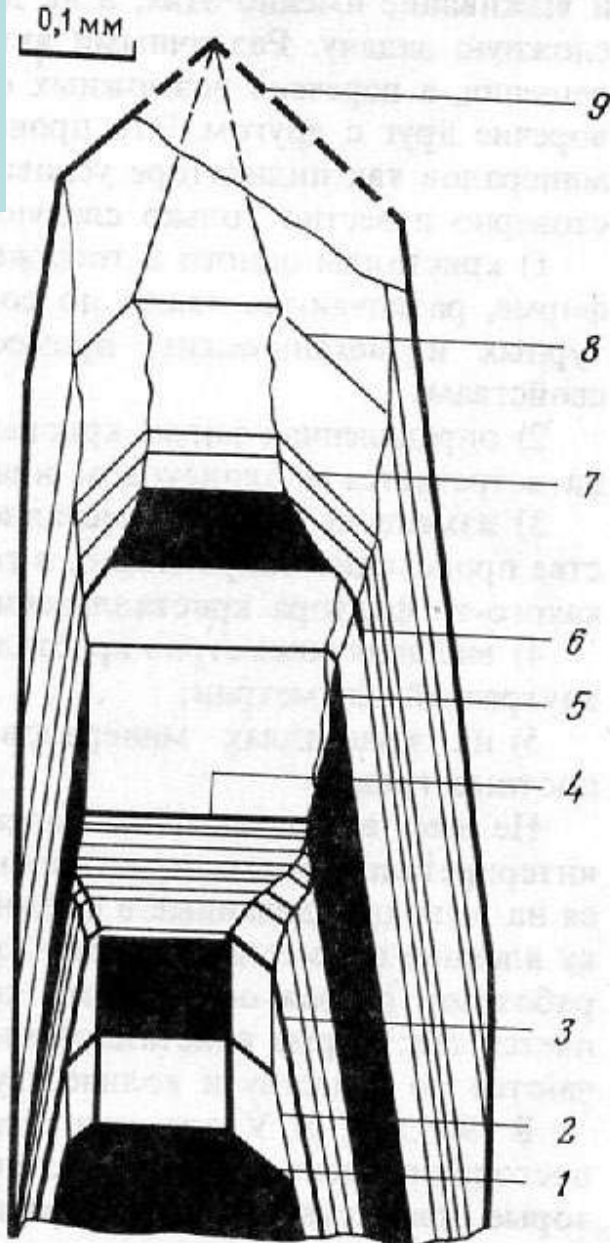


Николи х

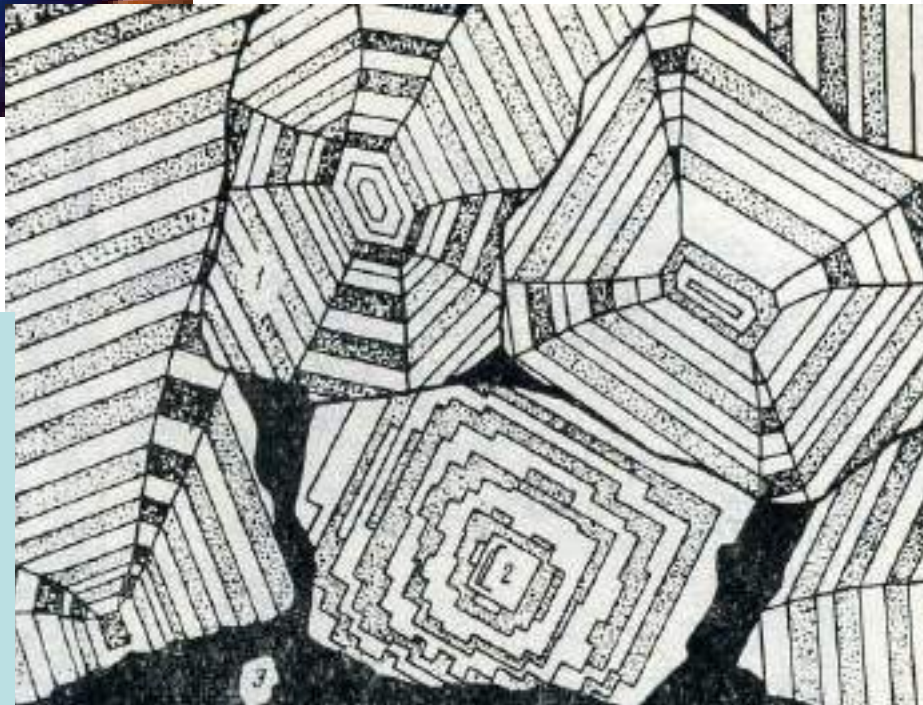
Хромисто - титанистый гидрогроссуляр. Родингиты.  
Гора Отдельная, Норильское рудное поле

# Анатомия индивида - источник генетической информации. Секториально-зональные кристаллы

Кристалл касситерита.  
Чёрное - густо  
окрашенные зоны



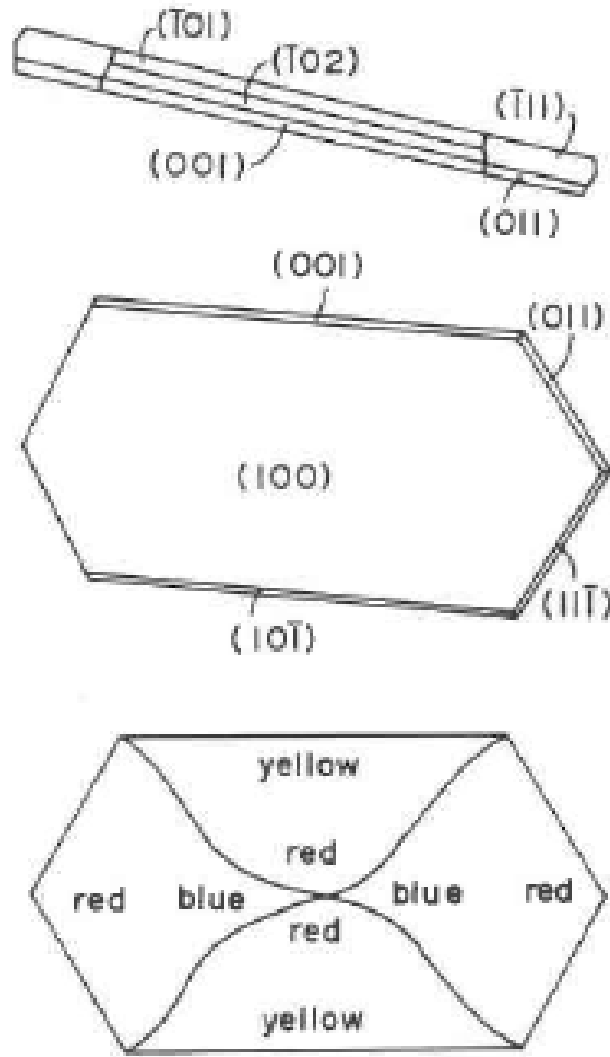
Алмаз – картина  
люминесценции



Кристаллы  
скарнового  
магнетита.  
Сарбайское.  
Северный  
Казахстан



# Анатомия индивида - источник генетической информации. Секториально-зональные кристаллы



Эпидот  
в метадолеритах триаса.  
Goose Creek, Loudoun county,  
Virginia

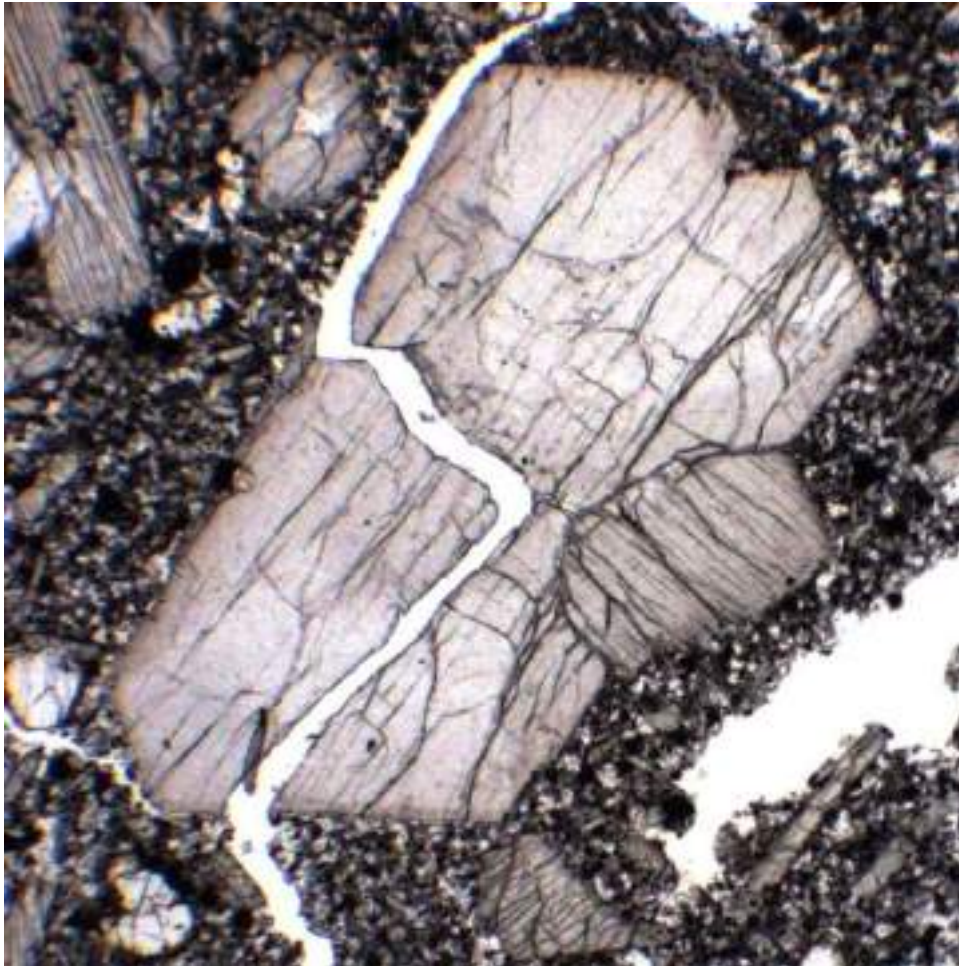
Shannon E.V., 1924  
Proc. US Nat. Museum.  
Vol. 66. P. 1-86

FIG. 9. Sector zoning in epidote, after Shannon (1924). The lower figure shows the birefringence observed on the flat-lying plate.

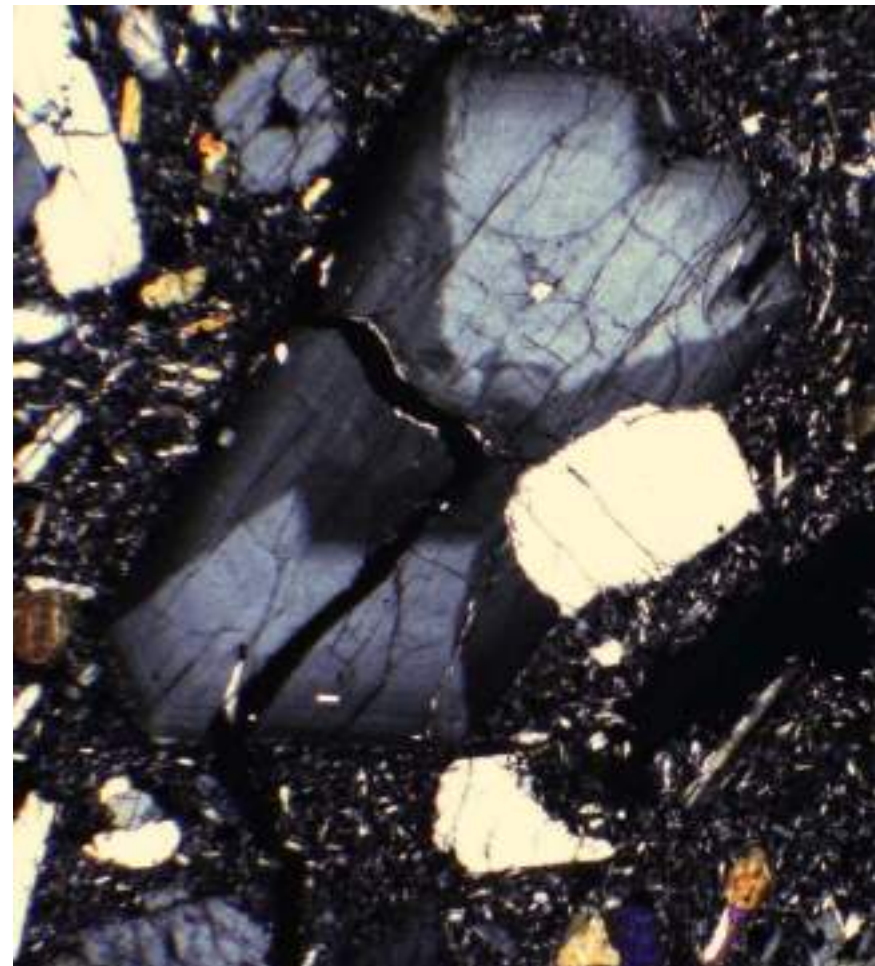


# Анатомия индивида - источник генетической информации. Сектора роста

Структуры типа «песочных часов» в кристаллах титанавгита.  
Высокотитанистые щелочные базальты. Волноваха, южная Украина



При 1 николе



Николи х

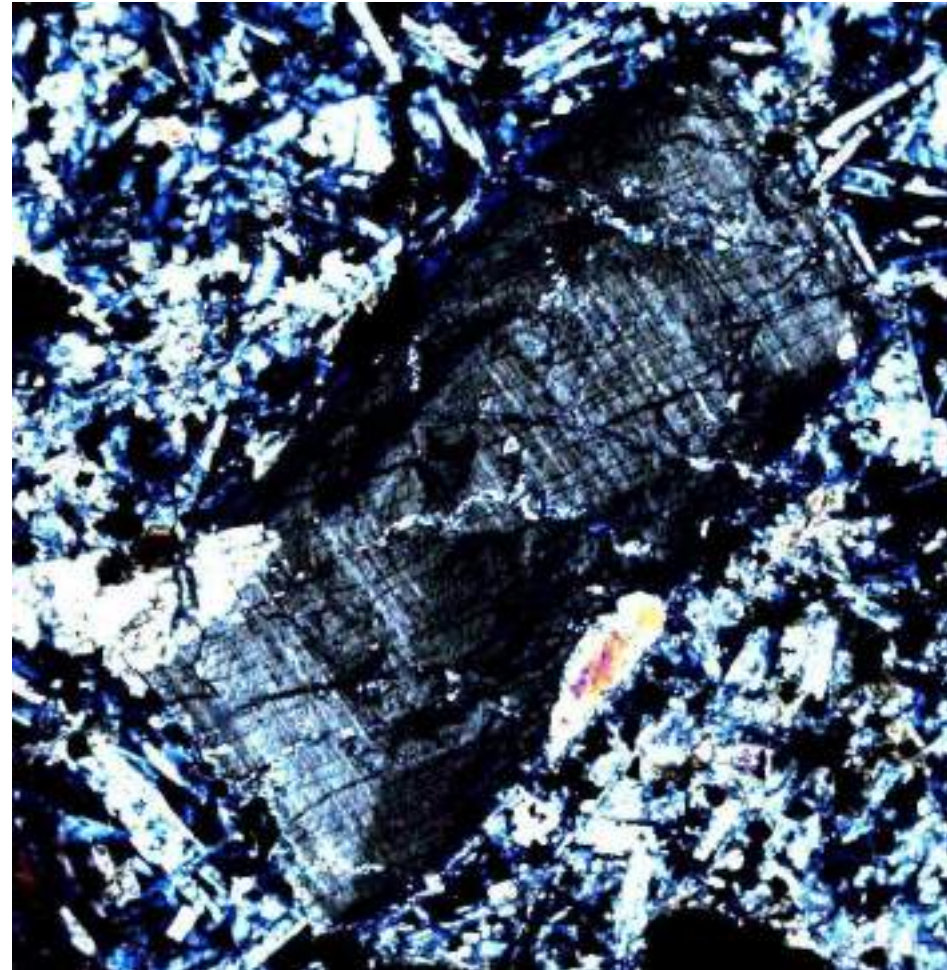


# Анатомия индивида - источник генетической информации. Сектора роста

Структуры типа «песочных часов» в кристаллах титанавгита.  
Высокотитанистые щелочные базальты. Волноваха, южная Украина



При 1 николе

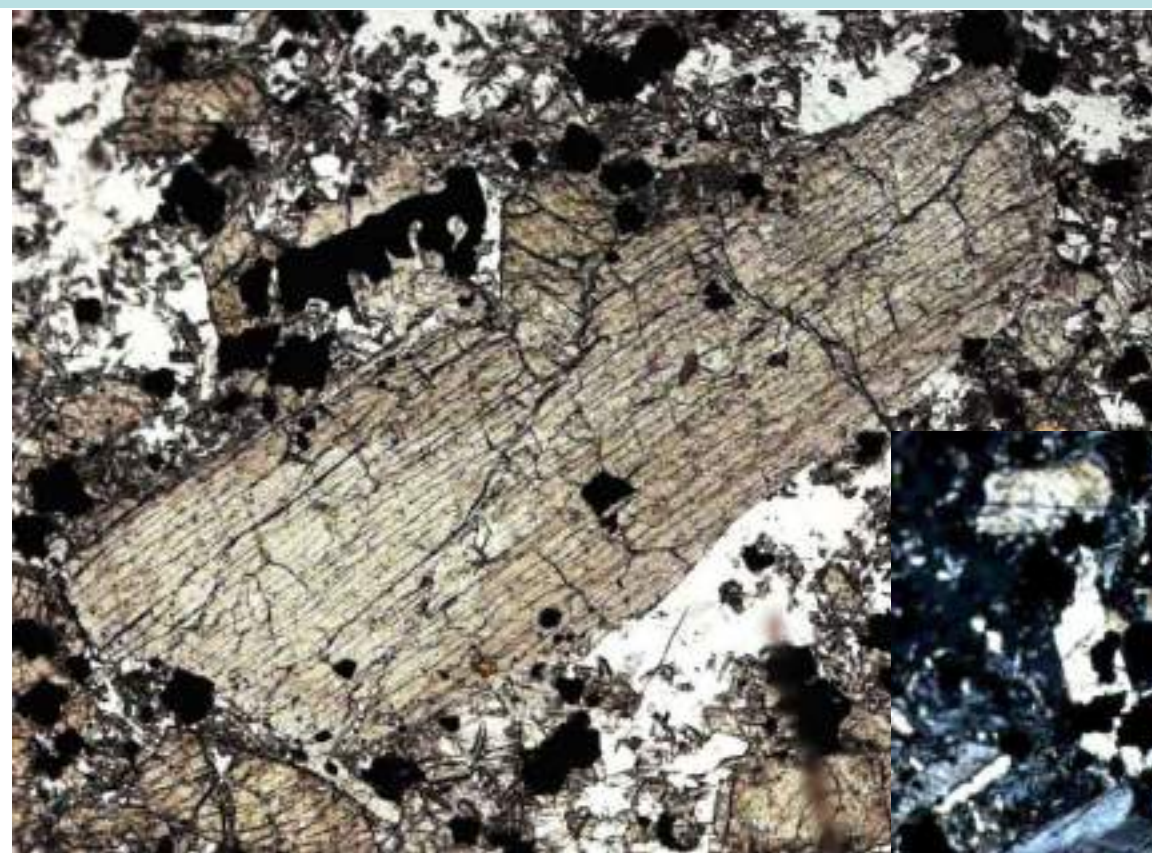


Николи х



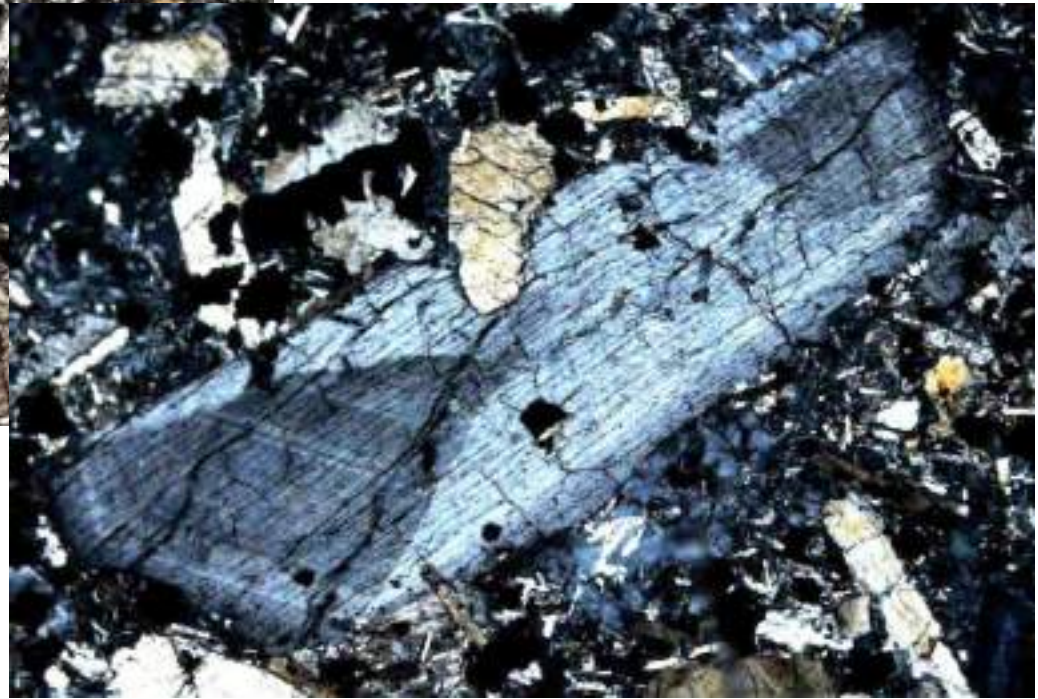
# Анатомия индивида - источник генетической информации. Сектора роста

Структуры типа «песочных часов» в кристаллах титанавгита.  
Высокотитанистые щелочные базальты. Волноваха, южная Украина



При 1 николе

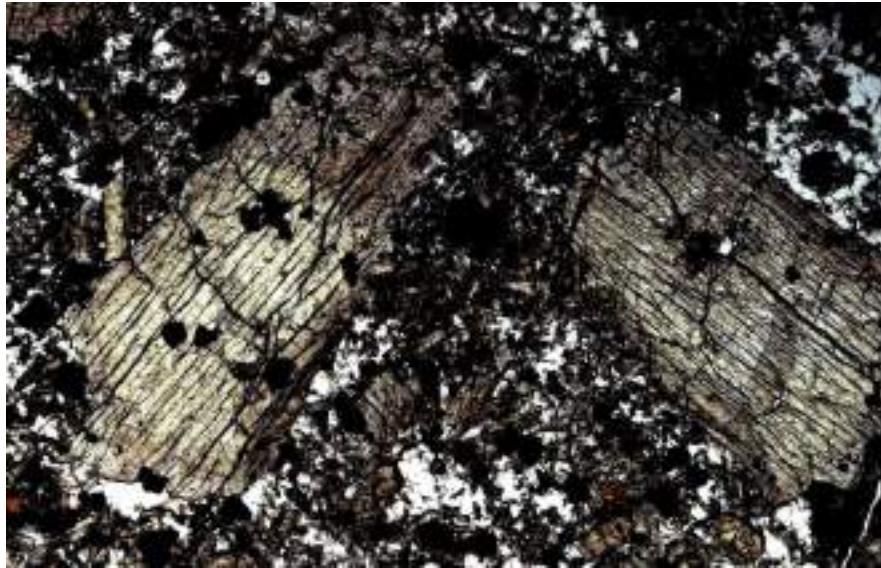
Николи х





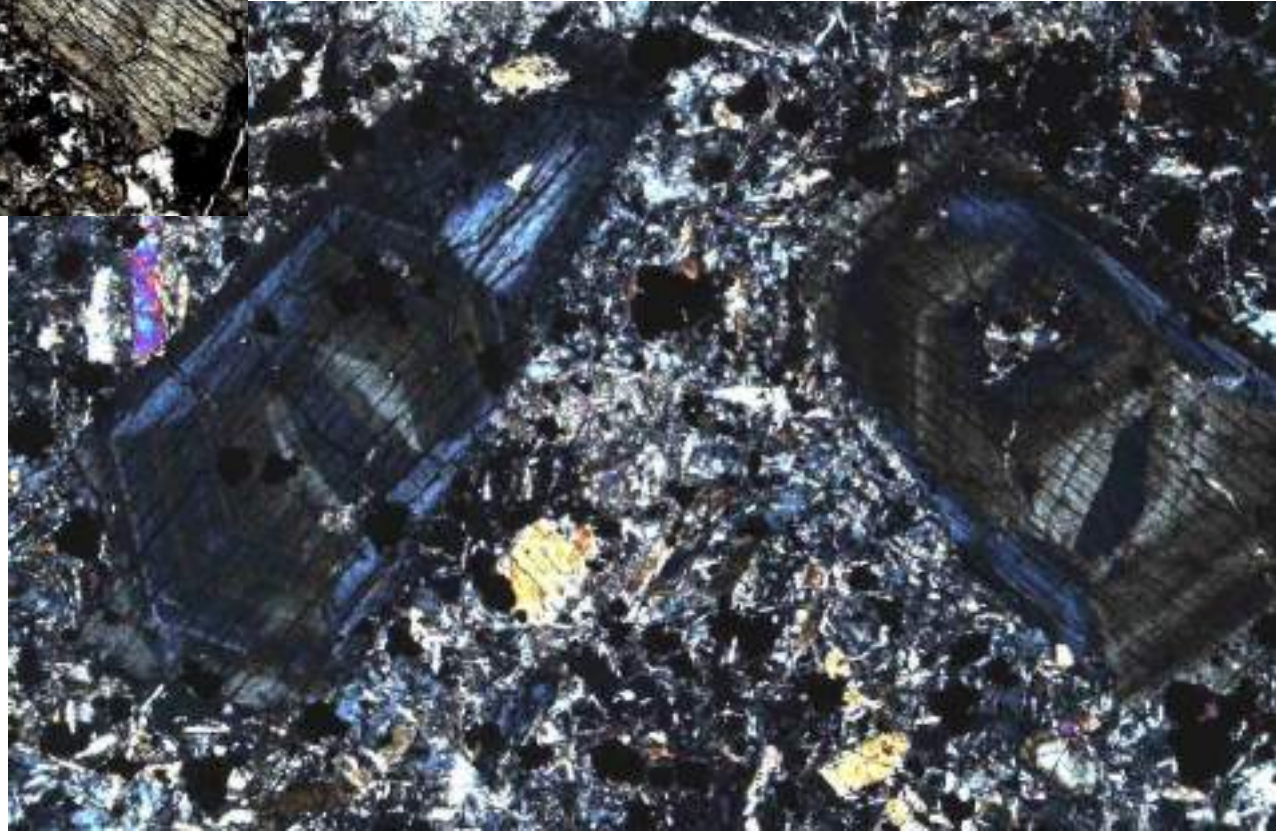
# Анатомия индивида - источник генетической информации. Секториально-зональные кристаллы

Титанавгит. Щелочные базальты. Волноваха, южная Украина



Николи х

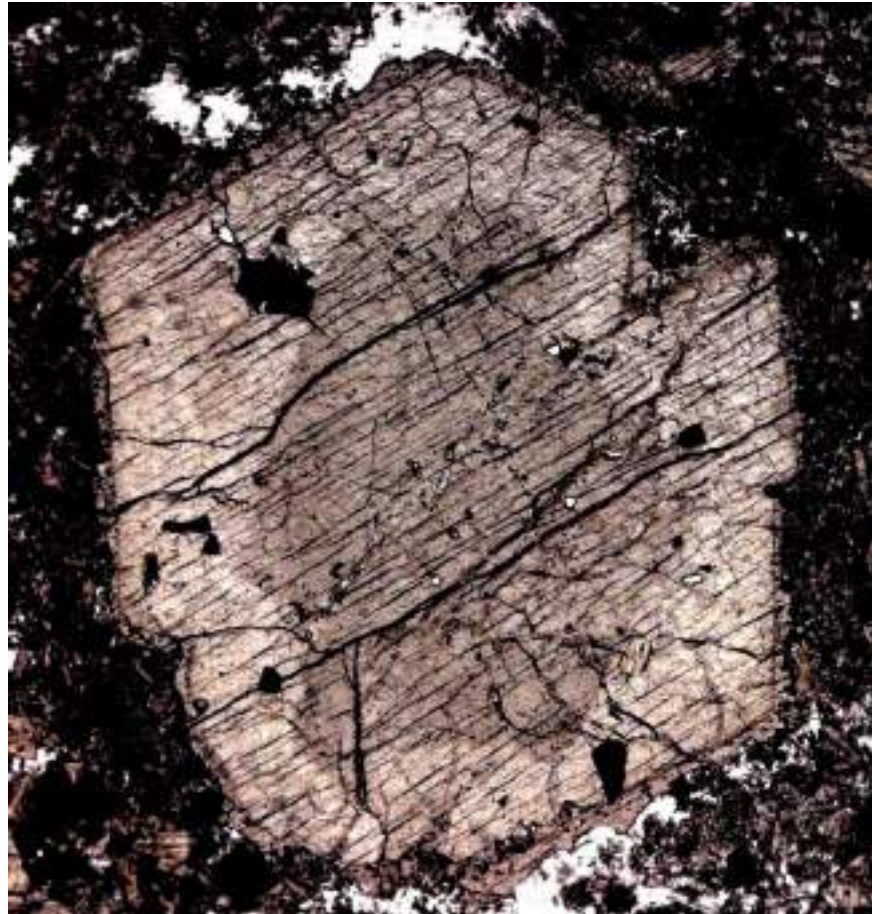
При 1 николе



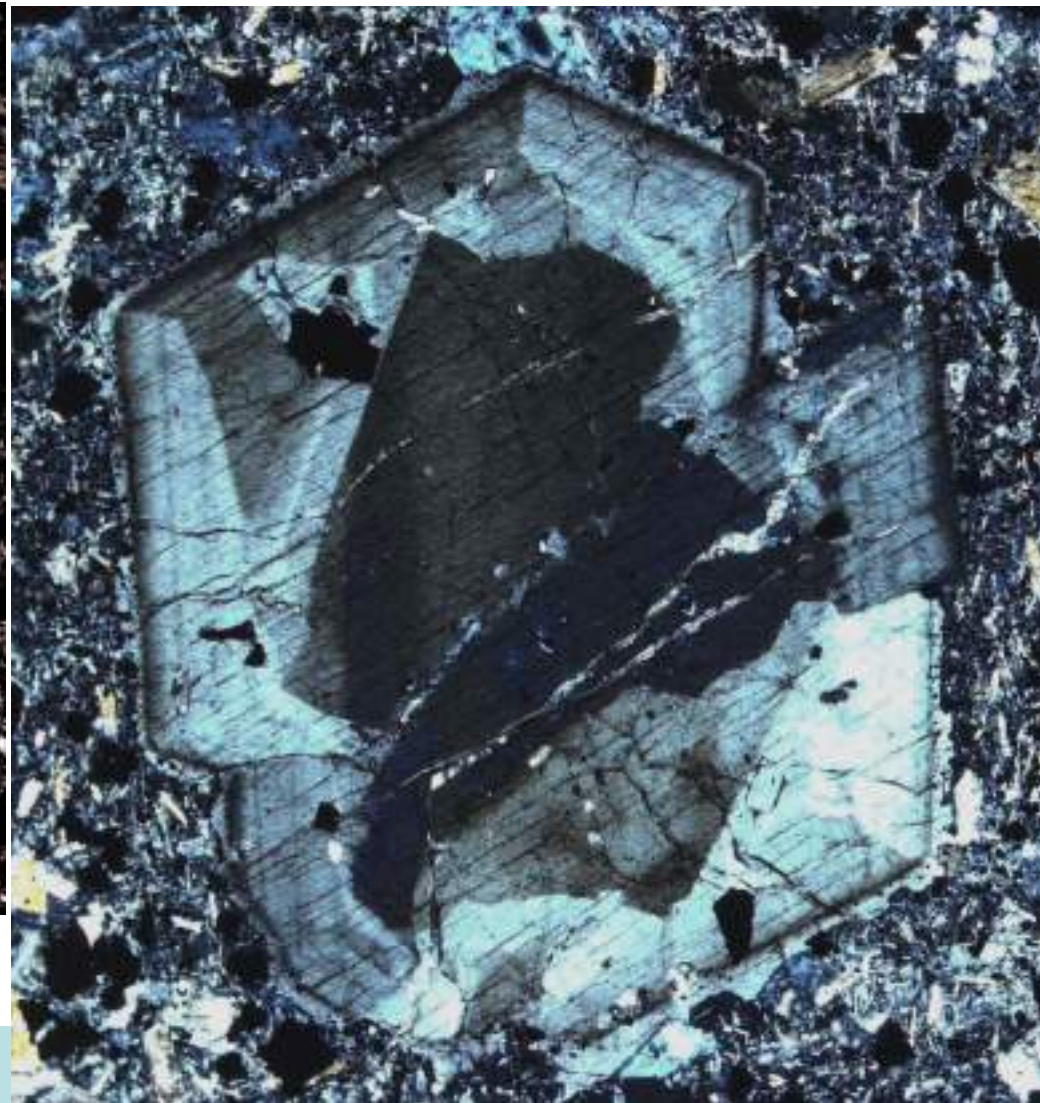


# Анатомия индивида - источник генетической информации. Секториально-зональные кристаллы

Титанавгит. Щелочные базальты. Волноваха, южная Украина



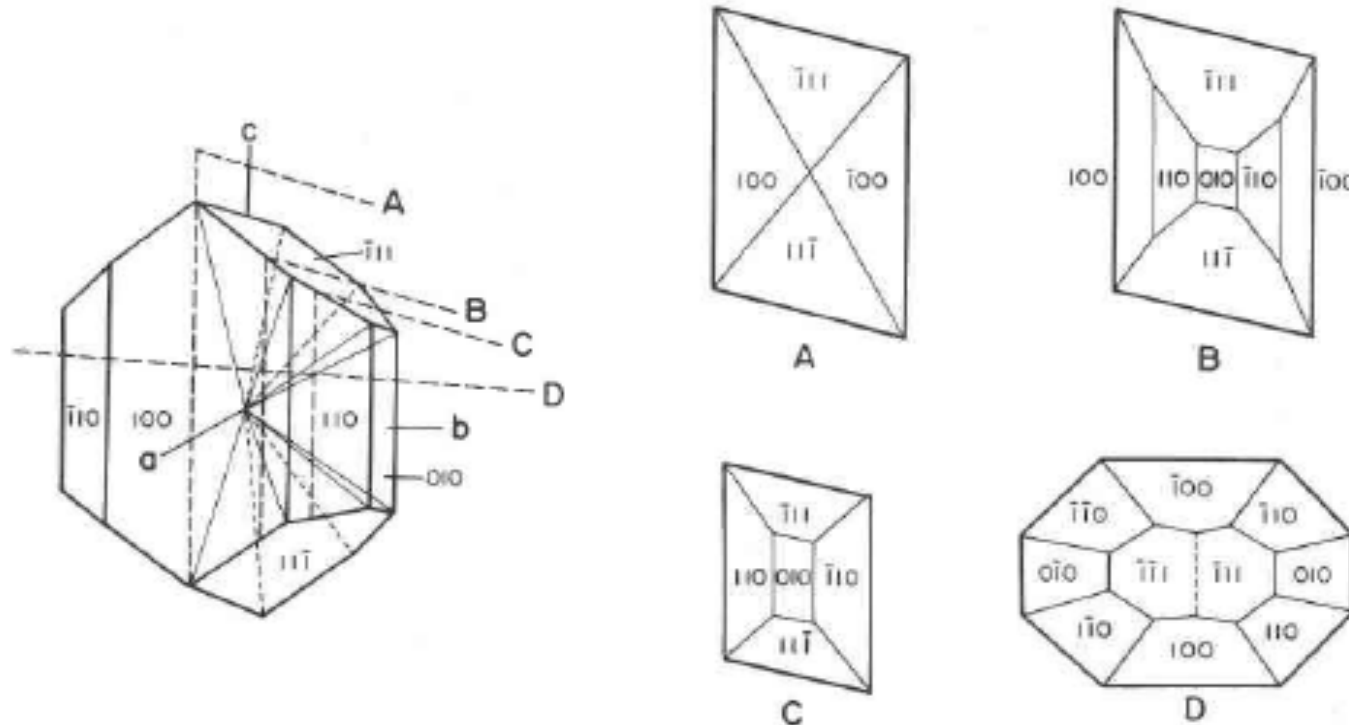
При 1 николе



Николи х

# Анатомия индивида - источник генетической информации. Секториально-зональные кристаллы

Титанавгит. Щелочные базальты



Leung I.S., 1974  
Amer. Mineral.  
Vol. 59. P. 127-138

FIG. 3. A 12-pyramid morphological model of titanite showing how composite sectors can be derived.

TABLE 2. Average Composition of Sector-Zoned Titanites (Wt Percent)

Specimen Locality	MgO		Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		SiO <sub>2</sub>		CaO		TiO <sub>2</sub>		FeO	
	( $11\bar{1}$ )	(100)	( $11\bar{1}$ )	(100)	( $11\bar{1}$ )	(100)	( $11\bar{1}$ )	(100)	( $11\bar{1}$ )	(100)	( $11\bar{1}$ )	(100)
Goldfield	17.49	14.20	3.10	7.15	50.36	45.93	19.82	20.62	0.82	1.95	8.54	9.91
McMurdo	14.70	10.89	4.41	10.65	49.98	42.42	21.85	21.89	2.11	4.83	6.82	8.24
Oka	11.05	9.40	9.57	12.71	41.79	39.28	24.68	24.40	3.33	4.76	7.42	8.60
Löbauerberg	11.35	10.05	4.00	6.96	48.65	45.89	24.12	23.49	2.37	4.02	7.56	8.89
Crawfordjohn	11.13	10.16	6.71	8.96	48.19	46.00	23.06	23.07	2.56	3.74	8.06	8.08





# Анатомия индивида - источник генетической информации. Сектора роста

Кристалл эгирина. Нефелиновые сиениты. Илимаусак

Analysis no.	[100]		[001]		[110]		
	4	24	17	34	25	28	35
SiO <sub>2</sub>	50.45	51.62	50.08	51.07	51.61	52.00	51.03
TiO <sub>2</sub>	0.63	0.79	0.37	0.42	1.30	0.52	1.16
ZrO <sub>2</sub>	0.52	0.15	1.18	1.13	0.40	0.17	0.41
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.96	1.07	0.86	0.75	1.04	1.72	1.22
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	28.07	31.41	24.90	25.00	27.93	30.13	26.42
FeO	3.38	0.19	5.21	6.24	2.98	0.81	3.74
MnO	0.19	0.22	0.33	0.38	0.24	0.40	0.24
MgO	0.02	0.00	0.02	0.04	0.00	0.01	0.00
CaO	3.44	1.00	5.70	5.28	2.26	1.13	3.56
Na <sub>2</sub> O	11.41	13.03	10.09	10.64	12.29	12.97	11.57
Total	99.07	99.29	98.54	100.95	100.05	99.86	99.35
Formula based on four cations and six O atoms							
Si	1.980	1.992	2.002	2.006	1.991	1.993	1.986
Al	0.020	0.008	0.000	0.000	0.009	0.007	0.014
T <sub>tot</sub>	2.000	2.000	2.002	2.006	2.000	2.000	2.000
Al	0.024	0.034	0.021	0.035	0.039	0.071	0.042
Ti	0.018	0.023	0.011	0.013	0.038	0.015	0.034
Fe <sup>2+</sup>	0.828	0.906	0.748	0.721	0.810	0.868	0.774
Fe <sup>3+</sup>	0.111	0.013	0.174	0.200	0.096	0.026	0.122
Mn	0.007	0.007	0.013	0.012	0.008	0.011	0.008
Mg	0.000	0.000	0.000	0.003	0.000	0.000	0.000
M1 <sub>tot</sub>	0.988	0.983	0.978	0.984	0.988	0.991	0.980
Ca	0.144	0.041	0.245	0.220	0.092	0.046	0.148
Na	0.868	0.974	0.777	0.815	0.917	0.963	0.872
M2 <sub>tot</sub>	1.012	1.015	1.022	1.035	1.009	1.009	1.020
Trace elements (SIMS) (ppm)							
Ca	35.8	5.7	37.4	81.3	15.4	8.0	35.5
Nd	13.2	1.4	15.3	24.0	4.2	1.9	16.7
Sm	2.9	0.3	3.7	9.3	0.9	0.4	3.2
Eu	0.2	0.02	0.3	1.0	0.08	0.02	0.2
Dy	1.2	0.2	2.0	8.2	0.5	0.5	1.5
Er	1.1	0.7	2.3	6.1	0.9	2.3	1.8
Yb	5.8	8.1	11.1	12.3	6.6	12.6	9.7
Ti	4120	6422	2500	2906	10058	3804	8000
V	8.5	9.1	5.9	6.3	7.2	7.2	8.4
Cr	1.5	2	1.6	1.5	1.5	1.7	2.4
Sr	4.0	3.3	4.8	7	5.1	3.2	4.2
Y	8.5	5.5	19.2	28.1	8.2	25.8	11.2
Zr	3825	1131	8763	8332	2922	1288	3061

Note: ZrO<sub>2</sub> = Zr from the ion probe and is not included in calculation of formulae. Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and FeO are calculated from Fe<sub>tot</sub> and pyroxene stoichiometry. Points are located in Fig. 1c.

Химический состав секторов и зон.

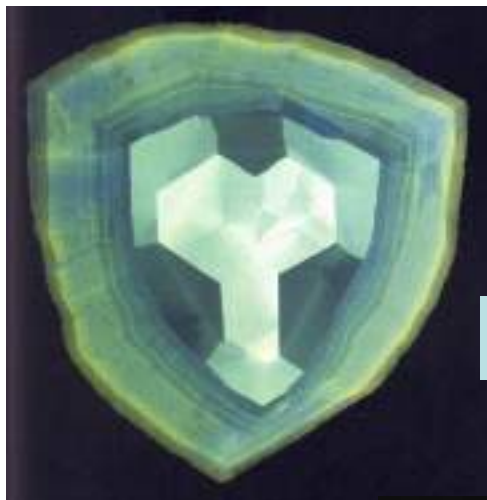
Рисунок кристалла на предыдущем слайде

# Анатомия индивида - источник генетической информации. Сектора роста

Секториальные кристаллы турмалина из пегматитов Мадагаскара

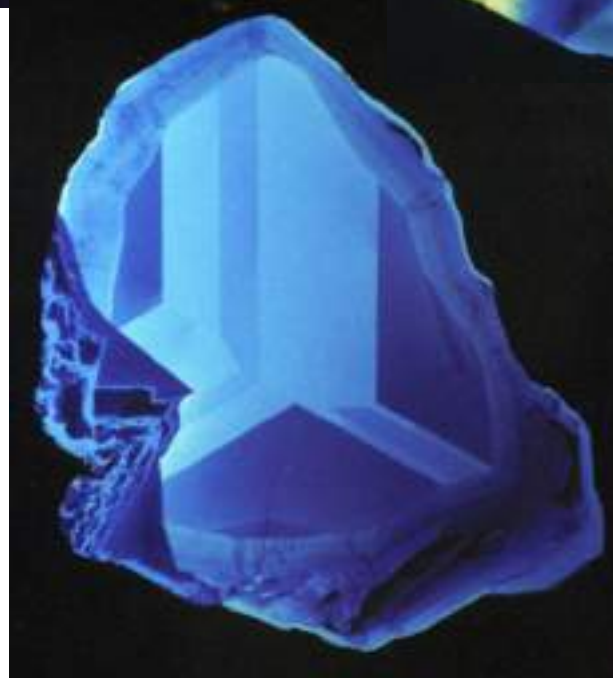
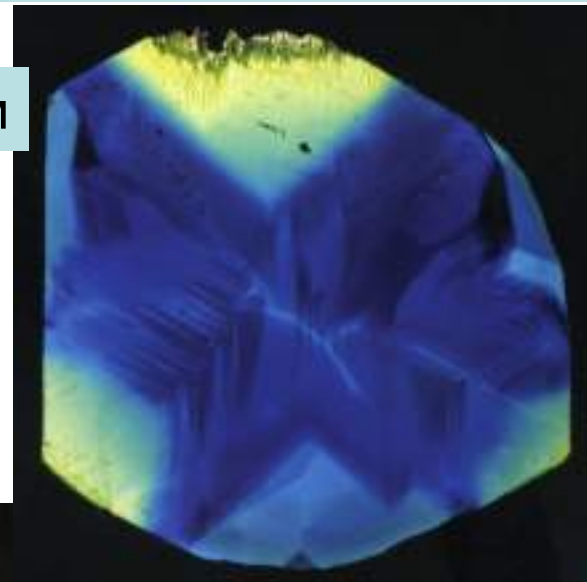


19  
мм



27 мм

29 мм



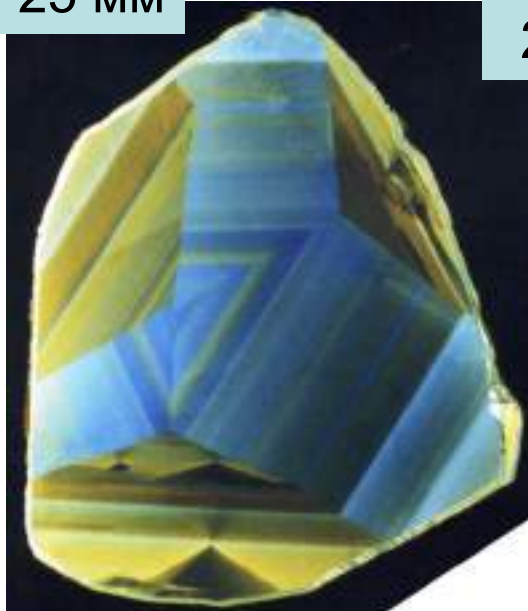
25  
мм



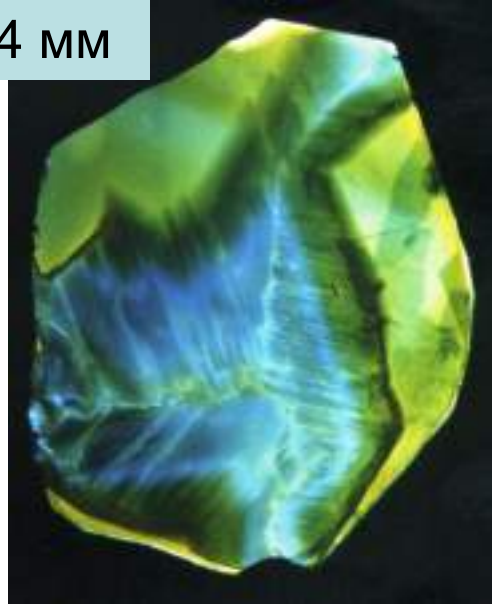
# Анатомия индивида - источник генетической информации. Секториально-зональные кристаллы

Турмалин из пегматитов Мадагаскара

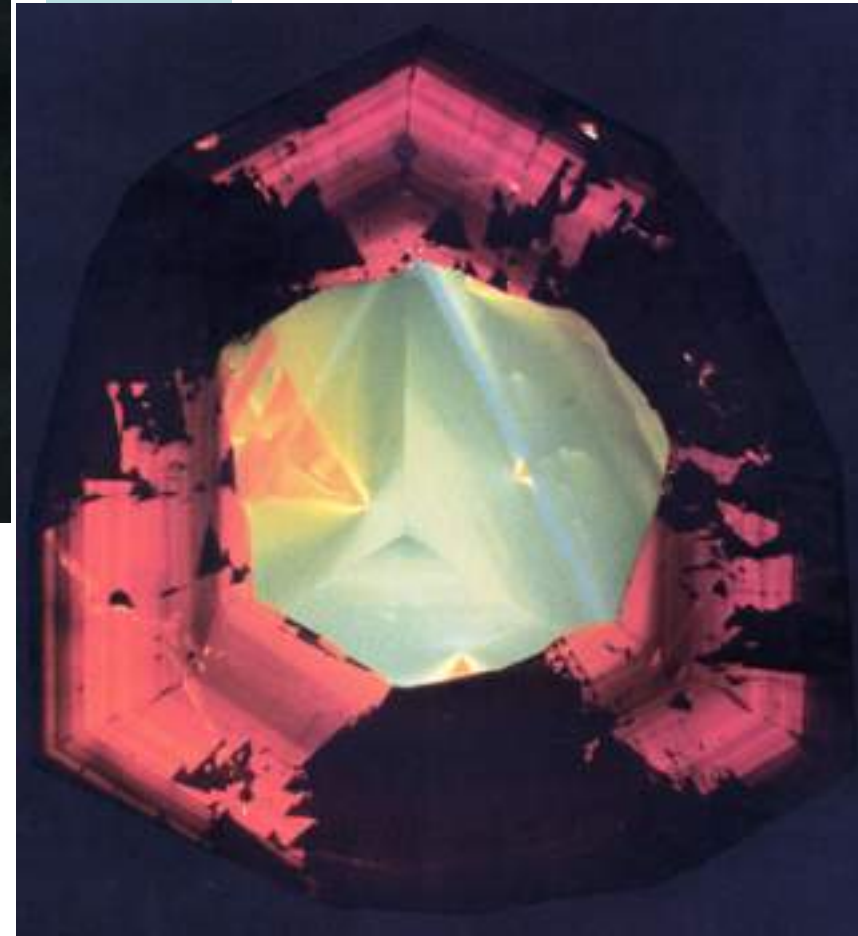
25 мм



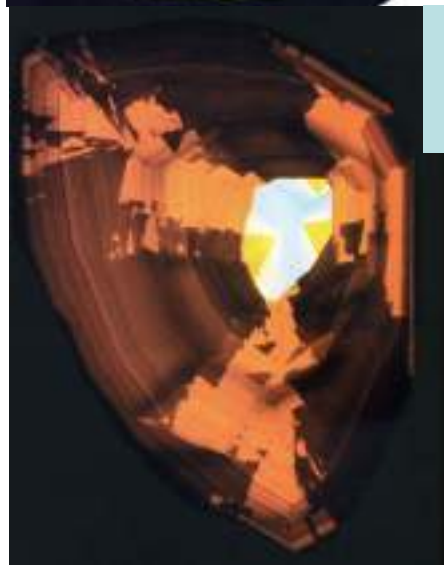
24 мм



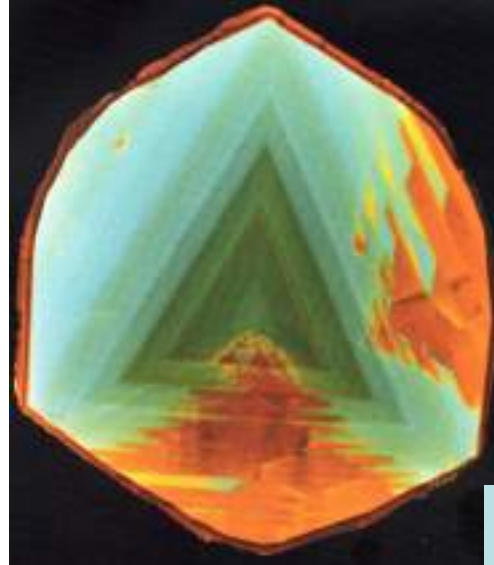
59 мм



30  
мм

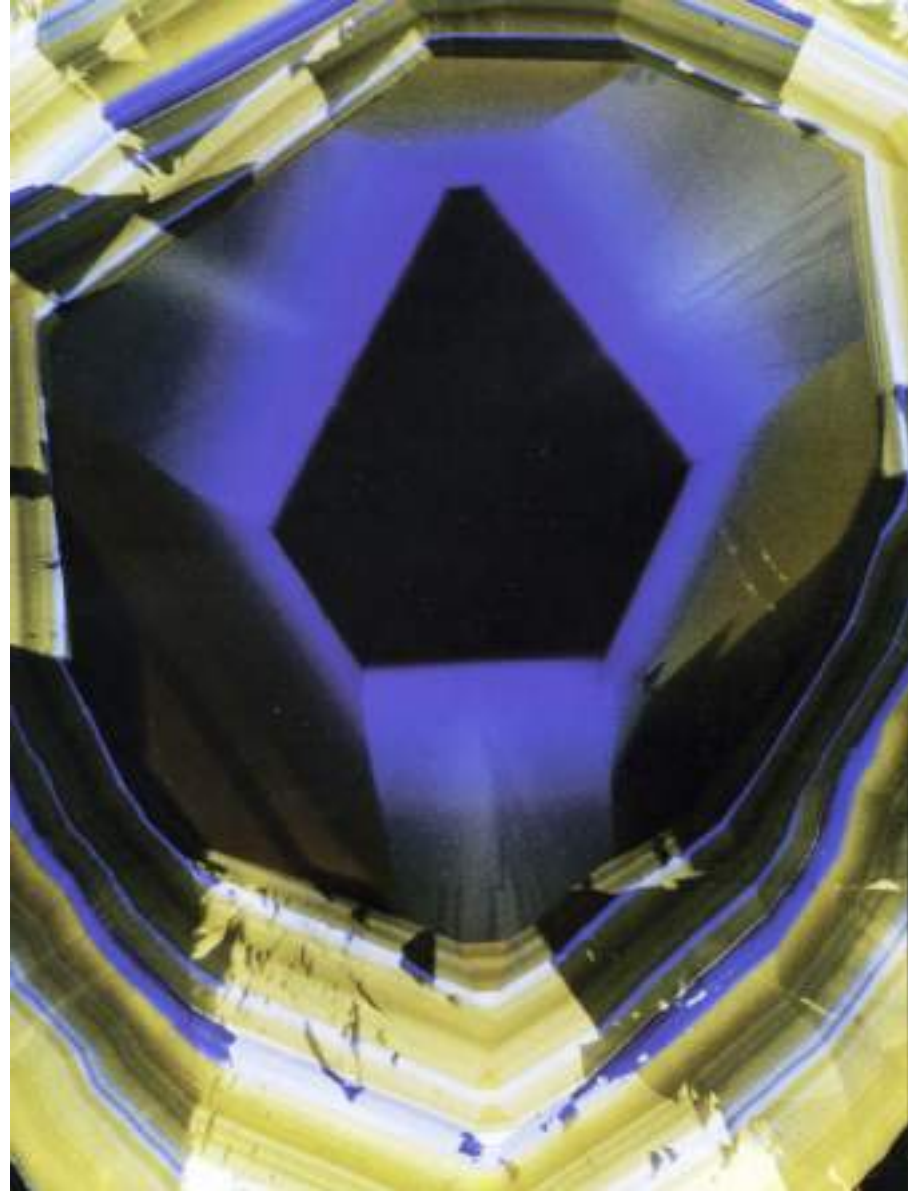


44 мм



# Анатомия индивида - источник генетической информации. Секториально-зональные кристаллы

Турмалин из пегматитов Мадагаскара



40  
мм

# Анатомия индивида - источник генетической информации. Сектора роста

В гранитных пегматитах среди кварцевых монцонитов горы Витоши (окрестности Софии, Болгария) в макроскопически совершенно однородных кристаллах турмалина одни сектора роста по составу отвечают Fe-Ca ферувиту, другие – Na-Fe-Mg шерл-дравиту (Vergilov Z. & Kostova B. Composition, anatomy and growth mechanism of tourmalines from Vitosha pegmatites // Год. Софийского ун-та «Св. К. Орхидски». 2000. Сер. геол. и географ. Т. 92. С. 105-119)



# Анатомия индивида - источник генетической информации. Сектора роста

Секториальный кристалл турмалина – эльбаита.

Химический состав его различных секторов.

Различия в содержаниях Mn – 80 раз, Ti и Mg – 20 раз, K – 10 раз, Fe – 7 раз, Ca и Na – 3 раза

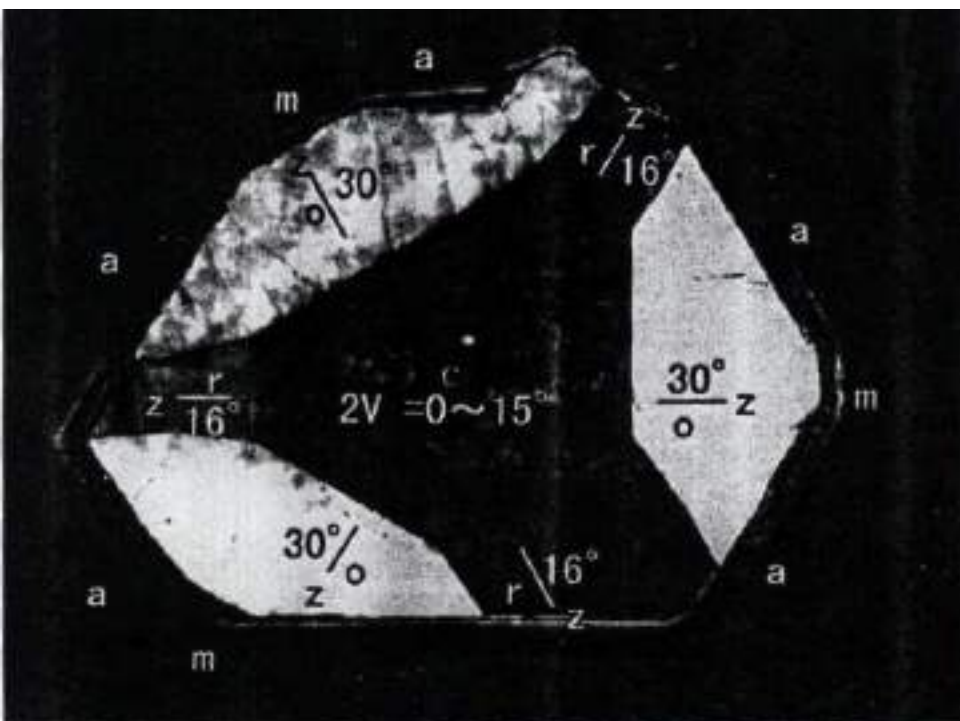


FIGURE 1. Photomicrograph of the (0001) thin section of tourmaline (specimen A) from Jochy, Madagascar (crossed nicols). The hexagonal (rhombohedral) domain (center) corresponds to the c{0001} sector, which was produced on the (0001) crystal face by crystal growth. The symbols r and o correspond to  $r\{10\bar{1}1\}$  and  $o\{02\bar{2}1\}$  sectors,

50° to 54° at room temperature, except that 27 reflections were used for the c sector. Several fragments were selected from each sector and the X-ray diffraction analyses were repeated several times. The unit-cell parameters were slightly different between the fragments and related to compositional differences. The unit-cell parameters of the four sectors are given in Table 1.

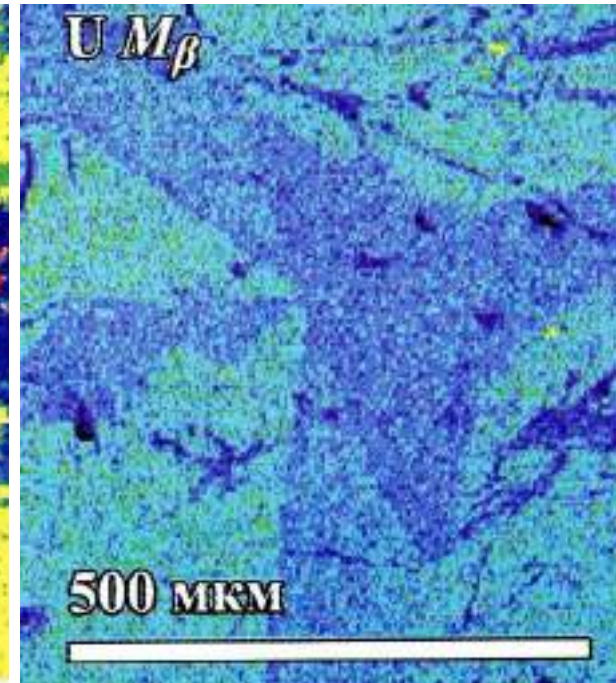
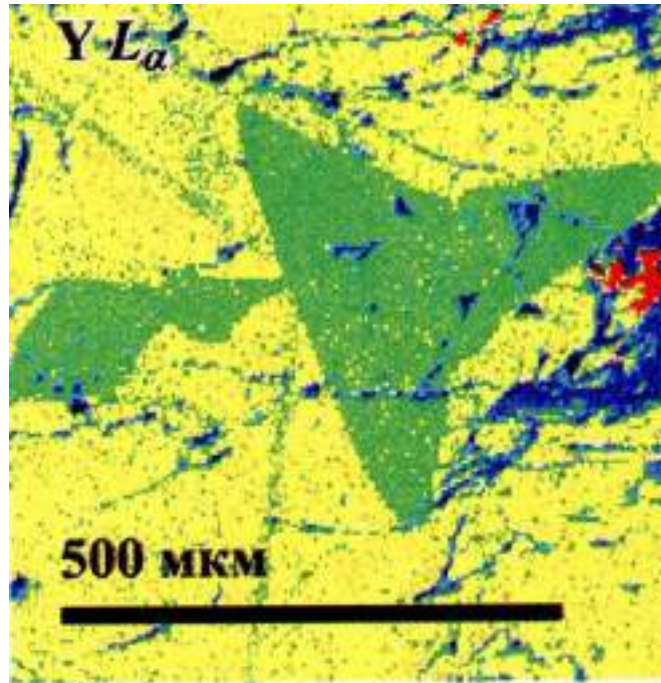
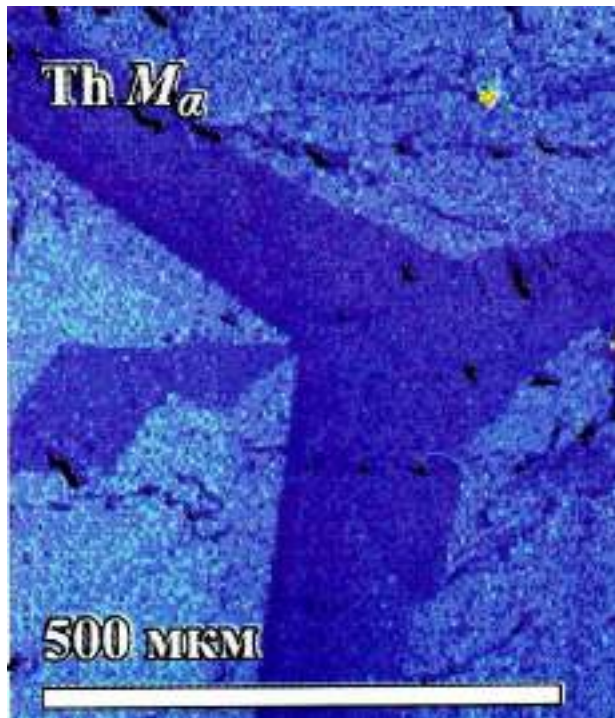
TABLE 1. EPMA composition of (Li, Ca, Na) tourmaline (specimen A)

	Sector				
	o	r	c	a	*
SiO <sub>2</sub>	38.31	38.18	38.38	38.38	37.22
TiO <sub>2</sub>	0.00	0.04	0.22	0.18	0.07
B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	11.09	11.15	11.20	11.13	10.81
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	38.57	39.97	39.94	39.88	38.03
FeO	0.02	0.06	0.07	0.68	0.10
MnO	0.05	0.08	0.09	0.83	4.06
MgO	0.00	0.00	0.01	0.00	0.18
CaO	4.69	3.58	3.30	1.69	2.63
Na <sub>2</sub> O	0.54	1.08	1.20	1.82	1.40
K <sub>2</sub> O	0.09	0.01	0.01	0.00	0.02
Li <sub>2</sub> O	2.96	2.73	2.72	2.31	1.81
H <sub>2</sub> O	2.78	2.90	3.08	3.07	3.07
F	2.21	1.96	1.63	1.62	0.64

# Анатомия индивида - источник генетической информации. Секториально-зональные кристаллы

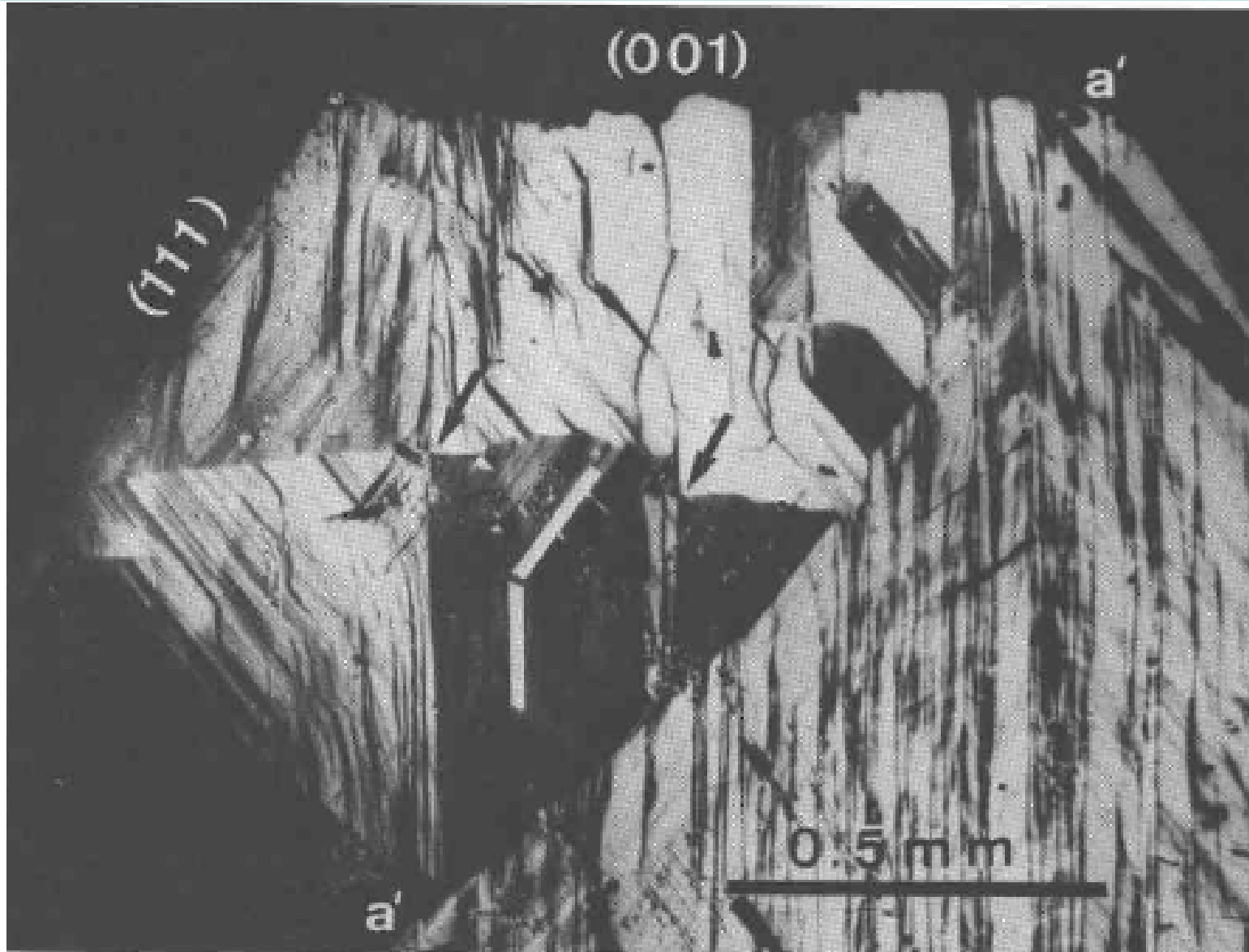
## Монацит (Ce,La,Nd,Th,Y,U...)[(PO<sub>4</sub>),(SiO<sub>4</sub>)]

Граниты Адуйского плутона, Средний Урал



# Анатомия индивида - источник генетической информации. Секториальные двойники роста

Секториальные двойники в кристалле цеолита – гармотома



Шлиф,  
николи X

Akizuki M.,  
1985.  
Amer.  
Mineral.  
Vol. 70.  
P. 822-828



# Анатомия индивида - источник генетической информации

## Зональность кристаллов

Массоперенос основных компонентов и примесей сквозь пограничный слой раствора около кристалла и кинетика роста граней могут протекать в трёх режимах: стационарные условия, затухающие колебания, незатухающие колебания (Петровский, 1999). Рост кристалла в режимах незатухающих или затухающих колебаний приводит к периодическому захвату примесей, в результате чего пирамиды роста приобретают зональную (часто тонкозональную) структуру.

В пределах пирамид роста обычно выделяются слои, параллельные грани, в пределах которых состав или цвет... существенно отличны от состава или цвета...соседних слоев. Такие слои - зоны роста, явление изменчивости состава или любых свойств кристалла от слоя к слою, - зональность. Зональное строение кристаллов Вам хорошо знакомо: зональные и сложно зональные кристаллы турмалина, плагиоклаза магматитов, зональные кристаллы граната скарнов и метаморфических пород...Стандартно резко зональны кристаллы арсенидов и сульфоарсенидов Fe – Ni - Co, пирита  $FeS_2$  - bravoита - вазсита  $NiS_2$  - каттьерита  $CoS_2$ , марказита с Ni - Co, минералов ряда золото – серебро...

# Анатомия индивида - источник генетической информации. Зональность и скорости роста кристаллов

Зональность в основном следствие неравномерного распределения точечных дефектов в разных слоях роста. Зональность минеральных индивидов - отражение переменных условий кристаллизации. Ритмические колебания всех физико-химических параметров характерны для многих эндогенных месторождений, прежде всего гидротермальных. Давно установлена связь ритмичных зон в минералах соляных озер с сезонно-климатической сменой условий минералообразования. Разные скорости роста самосадочных гипса, галита.. с неравномерным захватом примесей; весенние периоды мутной талой воды порождают "грязные" полосы - зоны в кристаллах. На кристаллах с такой зональностью легко определять истинную скорость роста - она для гипса составляет  $n$  мм/год, для галита до 3-5 см/год, для легко растворимых карналлита и мирабилита до 25 см/год. Максимальная скорость роста установлена для гематита, образующегося на Везувии у мест выхода фумарольных струй,- до 10 см/день. Скорость роста оксидов Fe-Mn в конкрециях на дне океанов - до 0,05 мм/год. Скорость роста порфиробластов граната в метаморфитах по данным изотопного Sm-Nd метода датирования менее 0,0001 мм/год.

Зональность, как и секториальность, легче изучать не в целых

кристаллах, а в пластинах, вырезанных параллельно направлению роста какого-либо пояса граней. Методы изучения зональности: под биноклем и микроскопом, микрофотометрированием плоскопараллельных пластин, структурным травлением, автордиографией, рентгеновской томографией, рентгеновским или более жёстким облучением, декорированием точечных дефектов с помощью диффузии атомов Na, Ag, Au... вглубь кристалла. Наиболее чувствительный метод - рентгеновская дифракционная томография. Зональность по составу обычно определяют микрозондовым анализом вкост зон роста. Наблюдения рисунков зональности кристаллов с известным положением в пространстве позволяет в ряде случаев реконструировать направление движения рудоносных растворов.

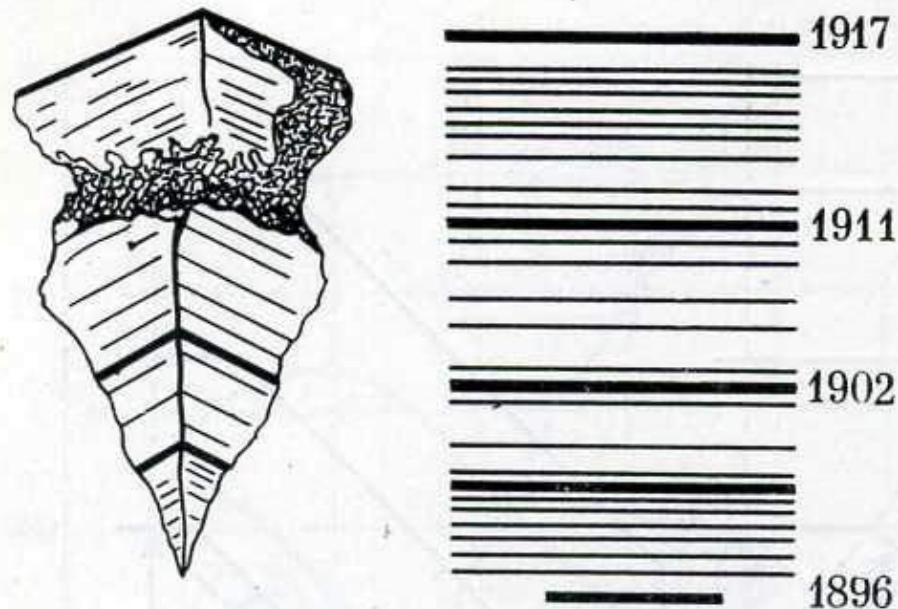


Рис. 115. Гипс с зонально распределенными включениями грязевых частиц. Справа — интервалы и даты (годы) нарастания слоев, в которых зафиксирована сезонная ритмичность. 0,9 натур. вел., Сакское озеро, Крым



# Анатомия индивида - источник генетической информации. Зональность кристаллов

44

Зональная структура зерна галита, в котором видны микро-включения рапы с пузырьком газа и включения сильвина (С).  
×61; без анализатора. Калининградская обл., соляная толща. Материалы Н. В. Мелковой, 1967.



Первичные включения по зонам роста



# Анатомия индивида - источник генетической информации. Зональность кристаллов



Топаз 139x105x64 мм. Гранитные пегматиты Волыни, Украина

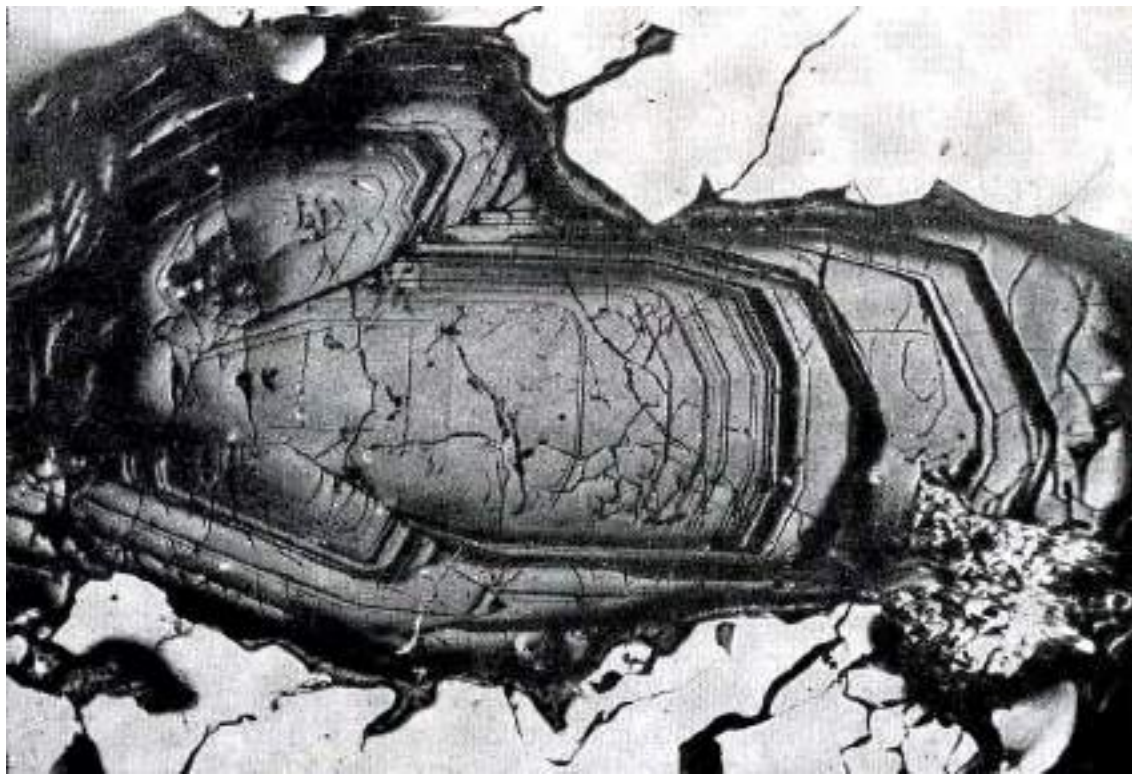
# Анатомия индивида - источник генетической информации. Зональность кристаллов



Корунд («сапфир»). Штат Мату Гроссу, Бразилия



# Анатомия индивида - источник генетической информации. Зональность кристаллов



При 1 николе

Зональный авгит-ферроавгит в пирротине.  
В отражённом свете. 3 мм. Питкьяранта

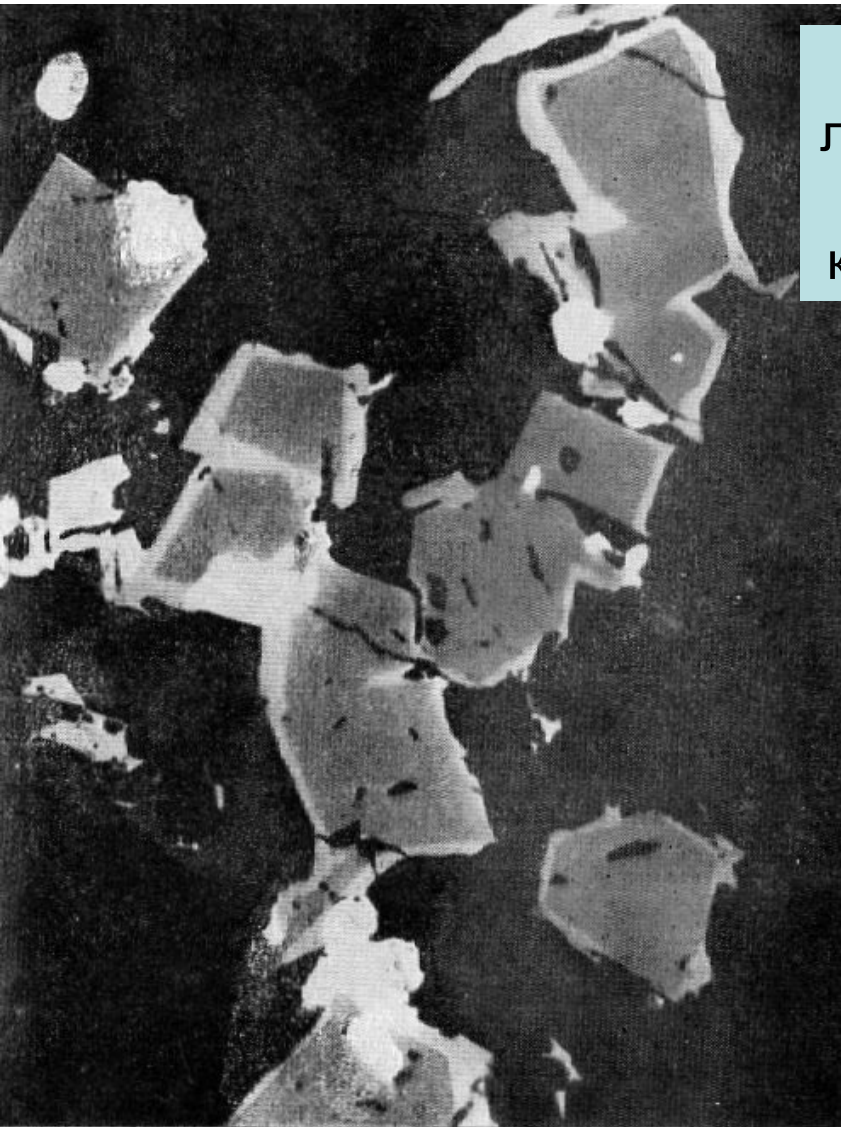
Вкрапленник зонального  
эгирин-авгита  
в щелочных базальтах



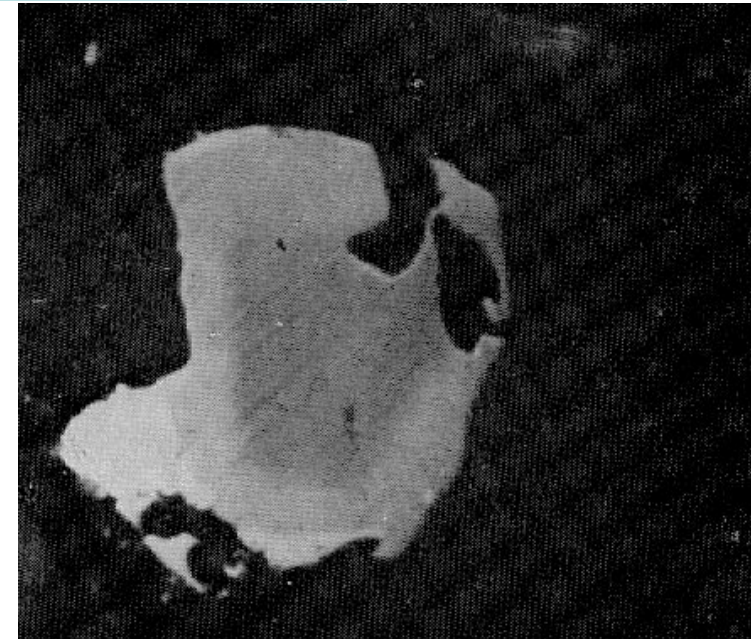
Николи х



# Анатомия индивида - источник генетической информации. Зональность кристаллов



Резко зональные лунные хромшпинелиды – ядра алюмохромит, каймы хромульвошпинель



Плавно зональный лунный титанистый хромит. 0.1 мм

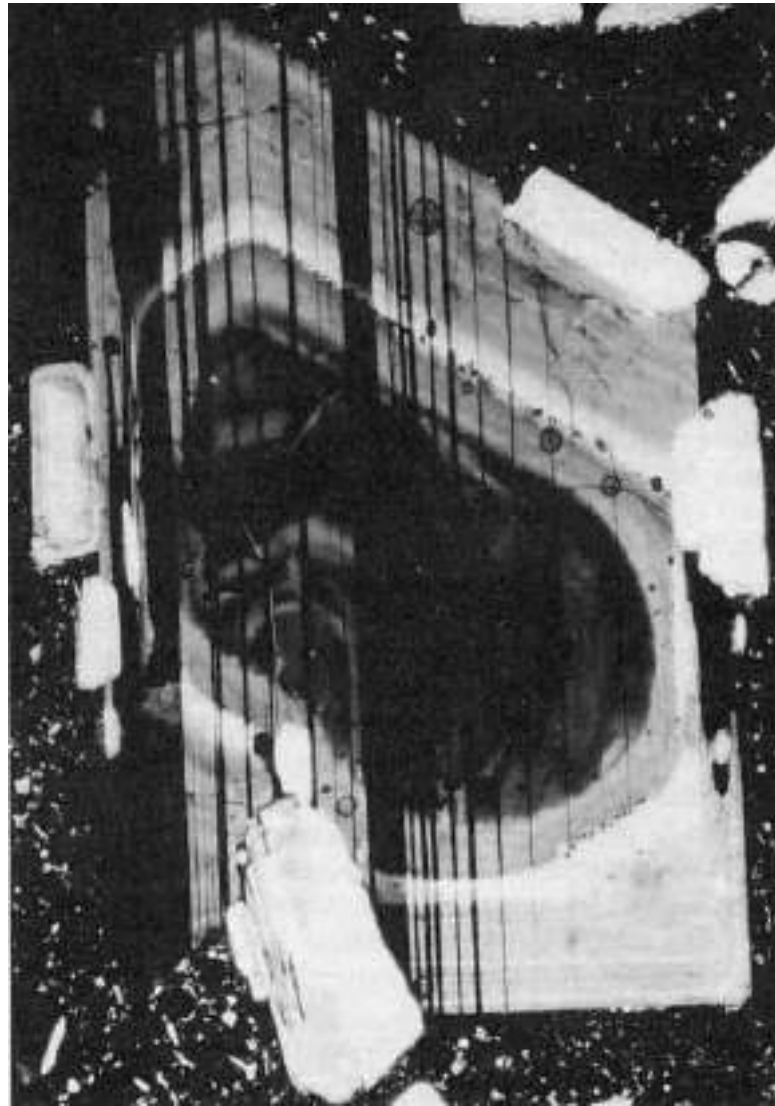
25 мкм

В отражённом свете

# Анатомия индивида - источник генетической информации. Зональность кристаллов



Кристалл лабрадора –  
спектролита.  
Анортозиты.  
Финляндия



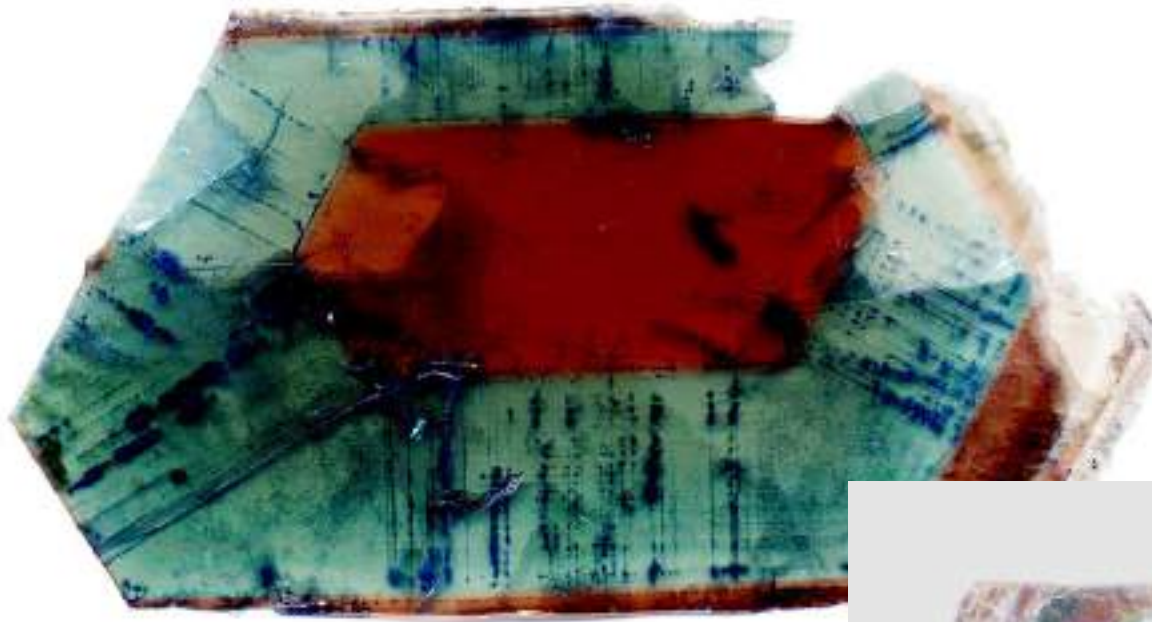
Шлиф.  
Николи  
x

Андезин - олигоклаз – вкрапленник.  
Трахиандезиты. Вулкан Сент-Хеленс, США



# Анатомия индивида - источник генетической информации. Зональность кристаллов

Сложно зональные кристаллы флогопита – тетраферрифлогопита



107x64 мм

105x56 мм

Камафориты.  
Ковдор,  
Кольский полуостров



# Анатомия индивида - источник генетической информации. Зональность кристаллов

Корунд – сапфир. Цейлон = Шри Ланка



С объёмной  
зональностью



С поперечной  
зональностью

# Анатомия индивида - источник генетической информации. Зональность кристаллов

Кристаллы берилла с поперечной зональностью



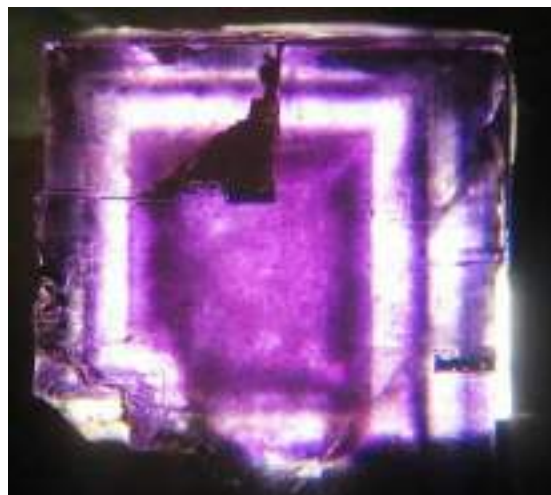
29 мм. Erongo, Намибия



40x30 мм.  
Изумрудные копи, Урал



# Анатомия индивида - источник генетической информации. Зональность кристаллов



Флюорит



110x90 мм. Okorusu mine, Намибия



Annabele  
Lee mine,  
Иллинойс,  
США

270  
мм

# Анатомия индивида - источник генетической информации. Зональность кристаллов



Барит

150  
X  
100  
мм

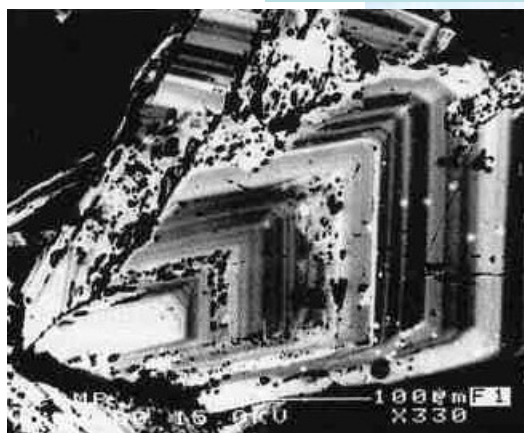


Хаммам  
Зриба,  
Тунис



70  
мм

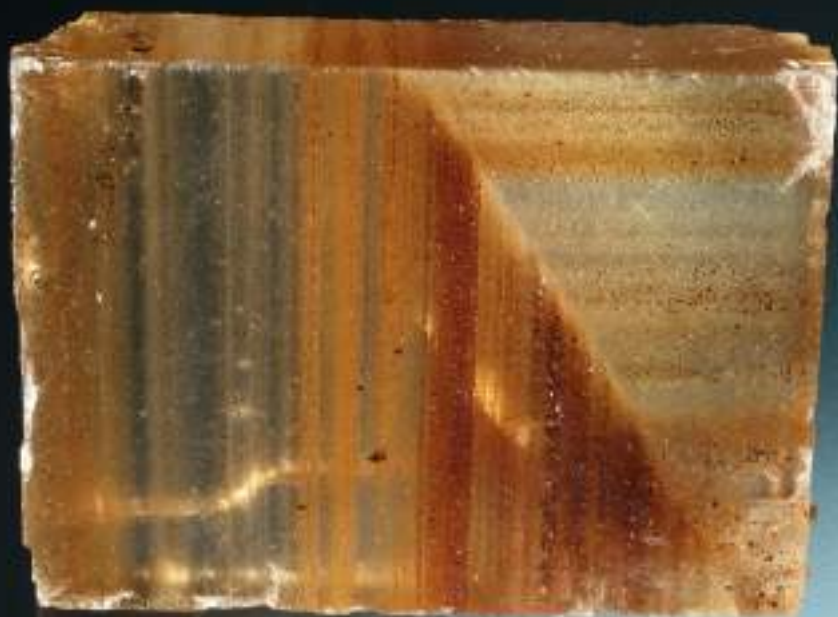
Кумберлэнд,  
Англия



Барит – стронциевый барит.  
Фотография в  
отражённых электронах



# Анатомия индивида - источник генетической информации. Зональность кристаллов



Галит 70 мм. Украина



65 мм

Галит. Hattorf-Wintershall, Германия



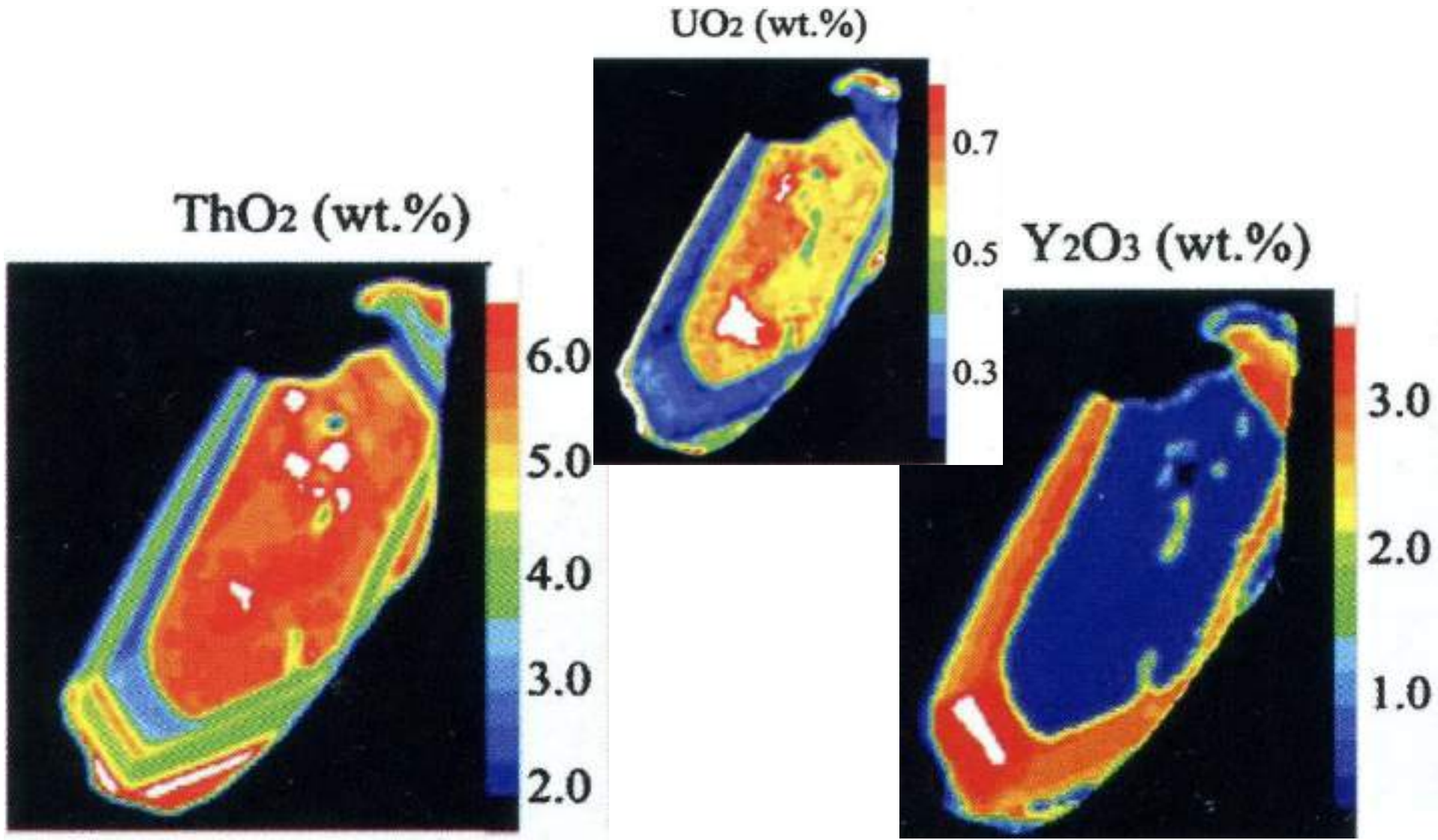
Сиде-  
рит  
до  
12  
мм



# Анатомия индивида - источник генетической информации. Зональность кристаллов

**Монацит** в гранит - мигматитах пояса Риоке, Япония.

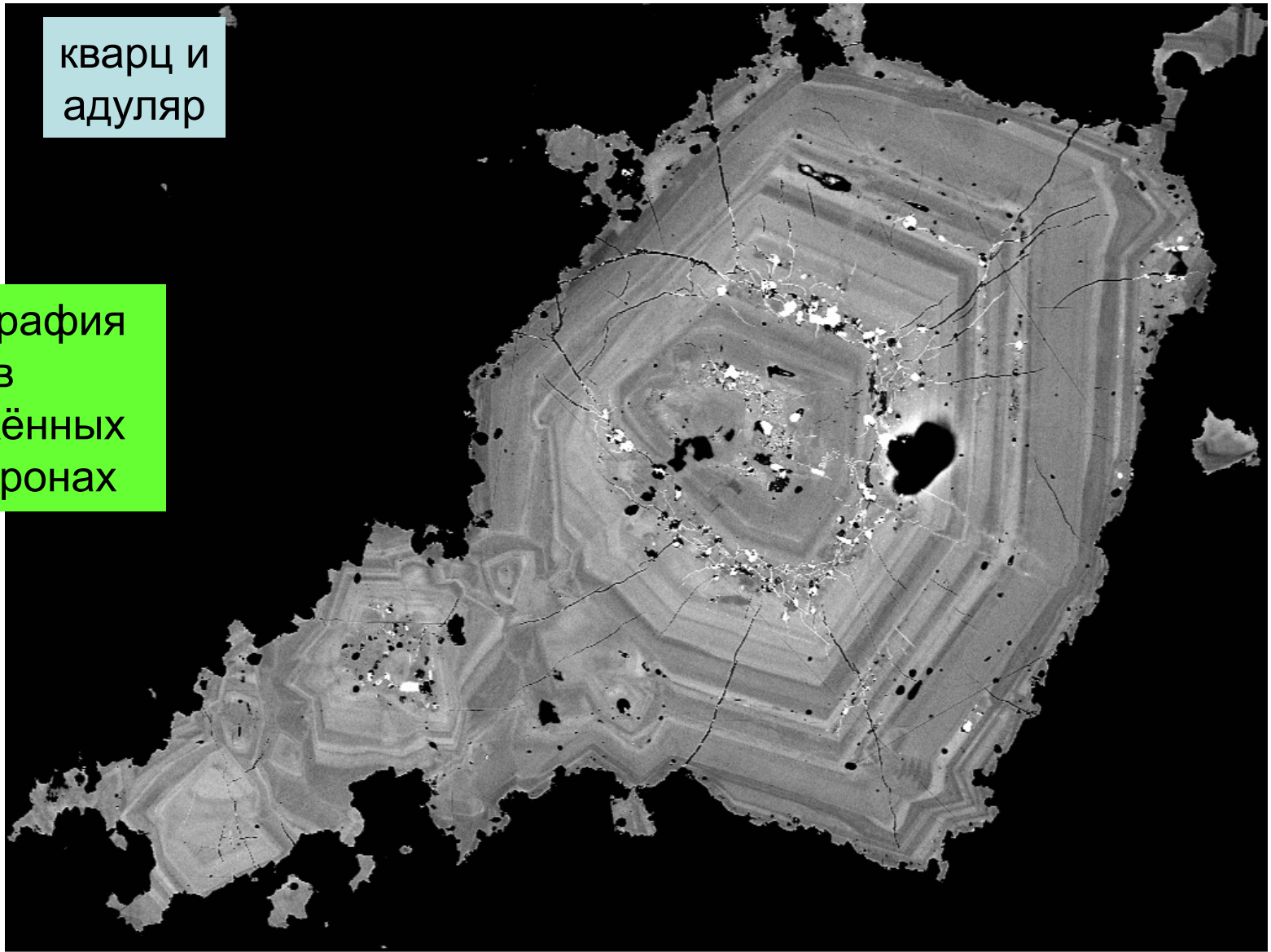
Карты распределения тория, урана, иттрия



# Вулканогенное месторождение золота Озерновское, Камчатка

кварц и  
адуляр

Фотография  
в  
отражённых  
электронах

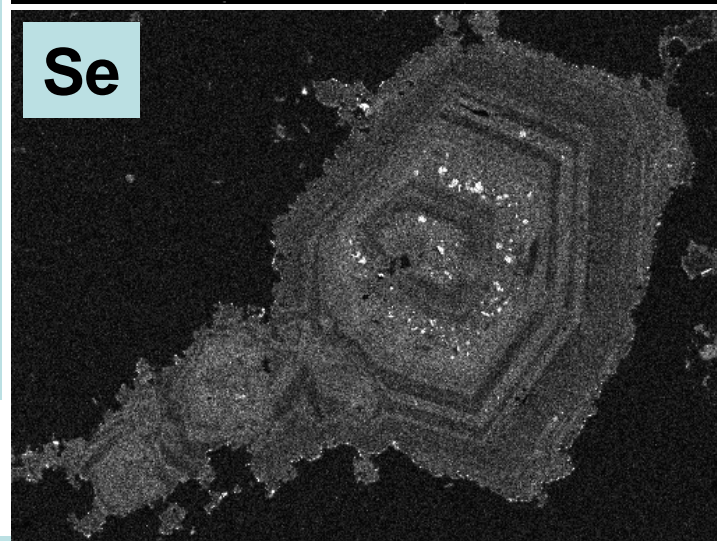
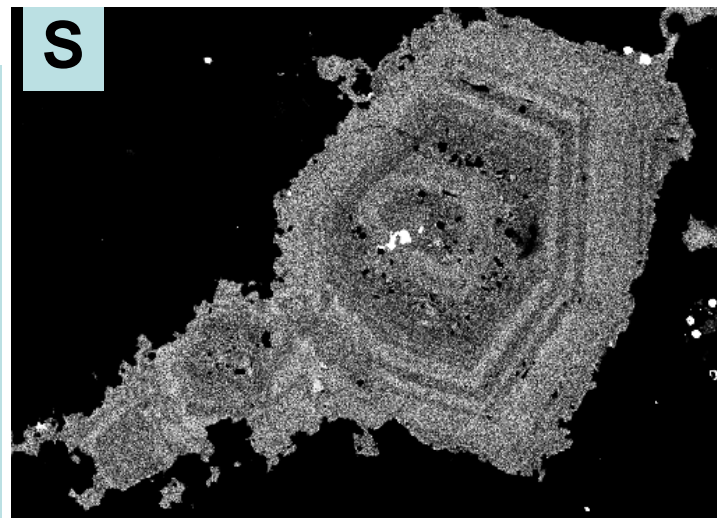
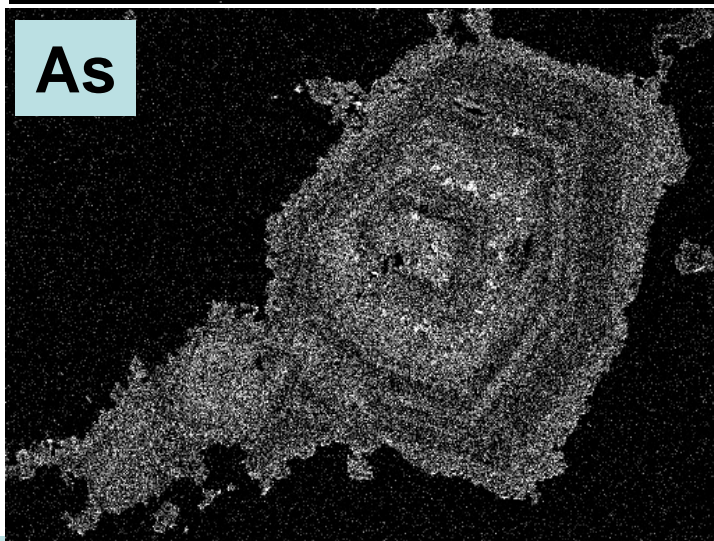
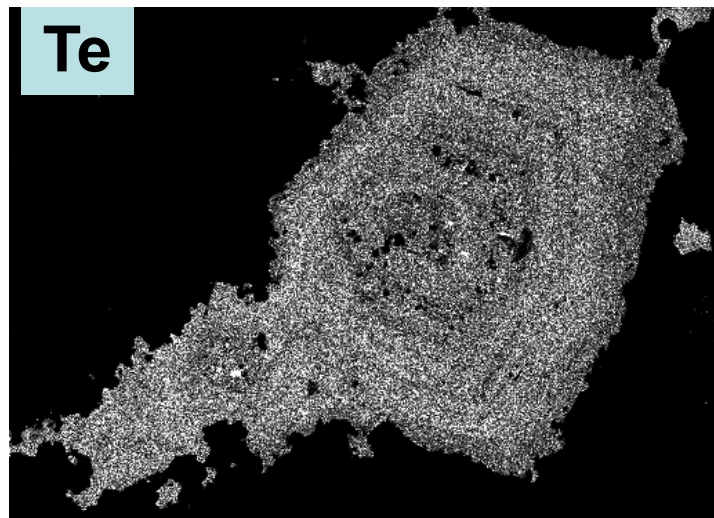


400µm

Сложно и осцилляционно зональные кристаллы мышьяковисто – сурьмянисто - селенистого голдфилдита  $\text{Cu}^{1+}_{10}\text{Cu}^{2+}_2(\text{Te},\text{Sb},\text{As})_4(\text{S},\text{Se})_{13}$



# Анатомия индивида - источник генетической информации. Зональность кристаллов



Карты  
распре-  
деления  
химических  
элементов.

Фотографии  
в  
характерис-  
тическом  
рентгенов-  
ском  
излучении

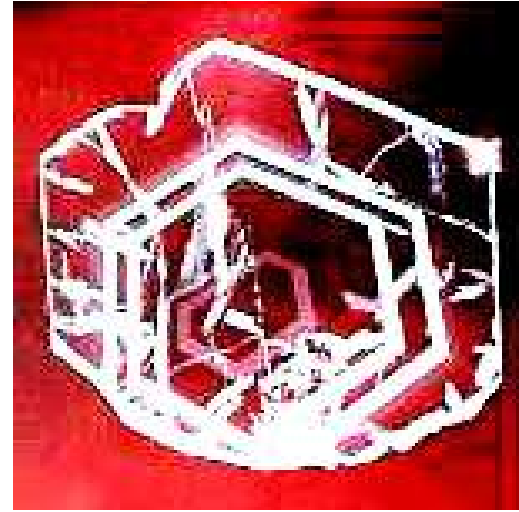
Сложно и осцилляционно зональный кристалл мышьяковисто – сурьмянисто - селенистого голдфилдита  $\text{Cu}^{1+}_{10}\text{Cu}^{2+}_2(\text{Te},\text{Sb},\text{As})_4(\text{S},\text{Se})_{13}$

Великолепно проявлен изоморфизм  $\text{Te} - \text{As}$  и  $\text{S} - \text{Se}$



# Анатомия индивида - источник генетической информации. Зональность кристаллов

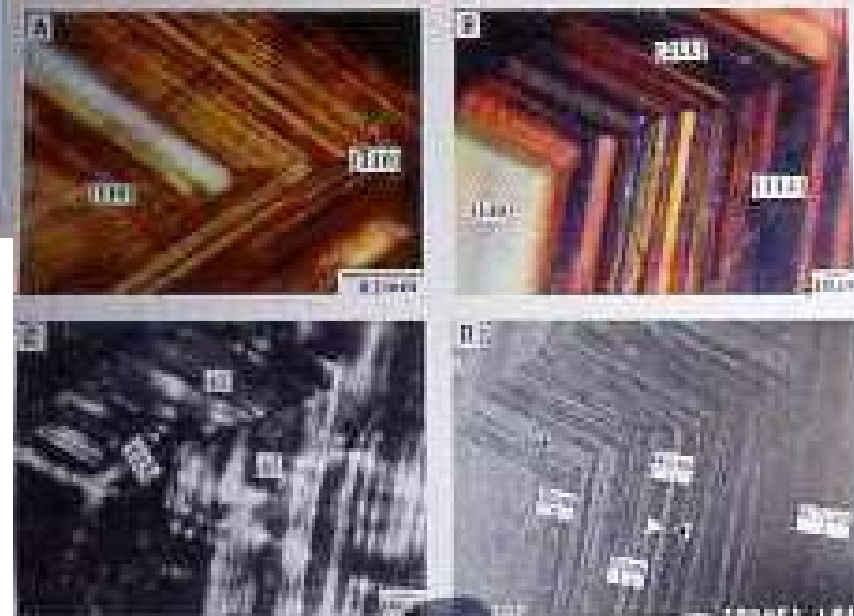
Кварц гидротермальный. Картины катодолюминесценции



30 мм.  
Японский  
двойник.  
Бразилия



Вкрапленник  
в риолитах



**Анатомия индивида  
- источник  
генетической  
информации.  
Зональность  
кристаллов**

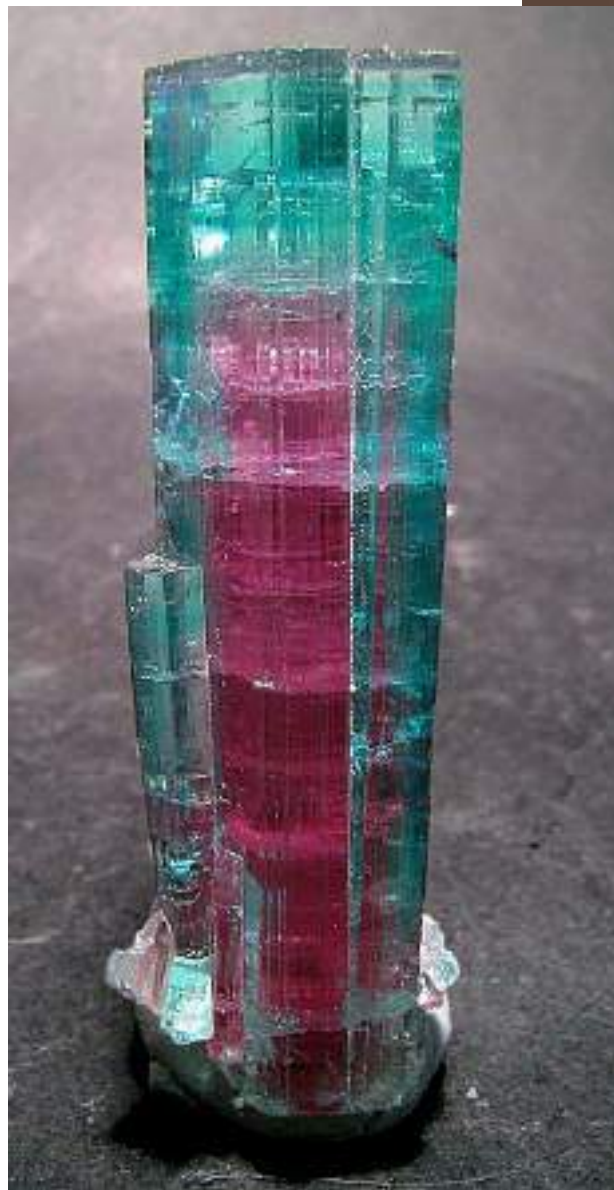
Берилл



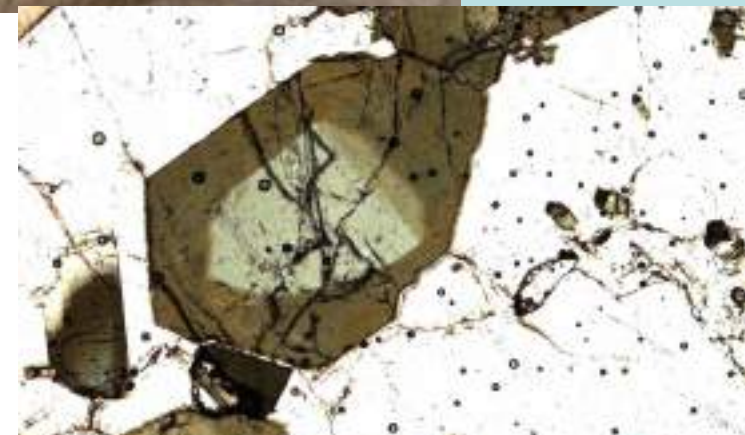
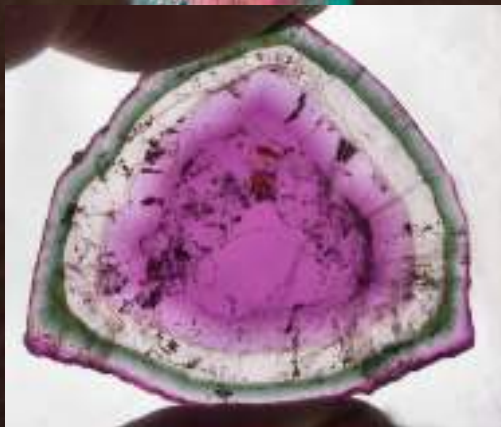


# Анатомия индивида - источник генетической информации. Зональность кристаллов

Турмалин



15 мм



Дравит - шерл.  
Шлиф при 1 николе. Шабры



# Анатомия индивида - источник генетической информации. Зональность кристаллов

Турмалин гранитных пегматитов. Поперечно-зональный



# Анатомия индивида - источник генетической информации. Зональность кристаллов

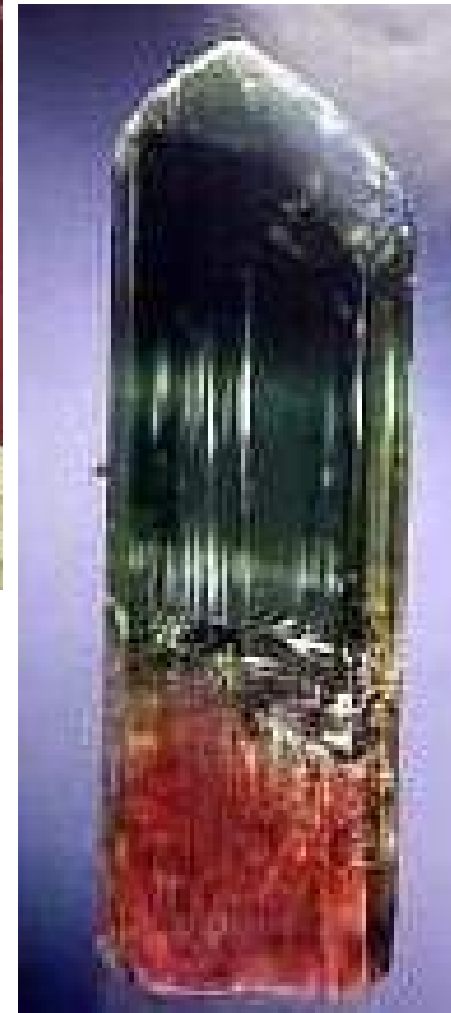
Турмалин гранитных пегматитов. Поперечно-зональный



Эльбаит 54 мм.  
Golconda mine,  
Minas Gerais, Бразилия



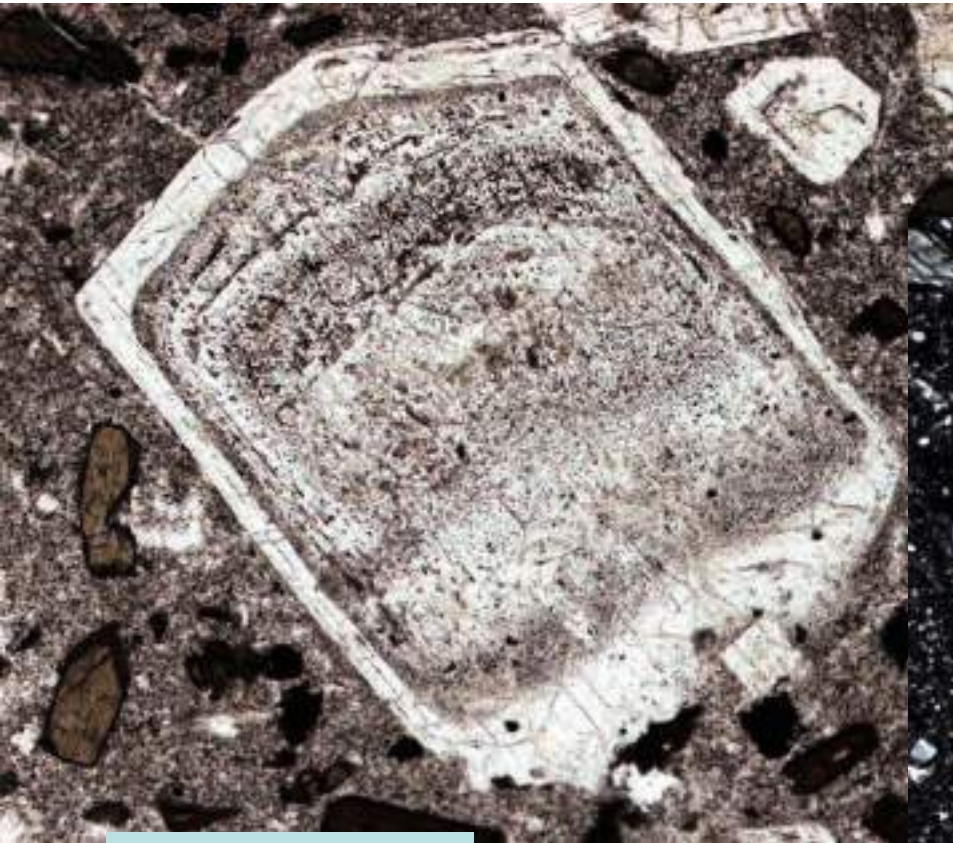
Эльбаит 21 мм.  
Pala, Калифорния,  
США



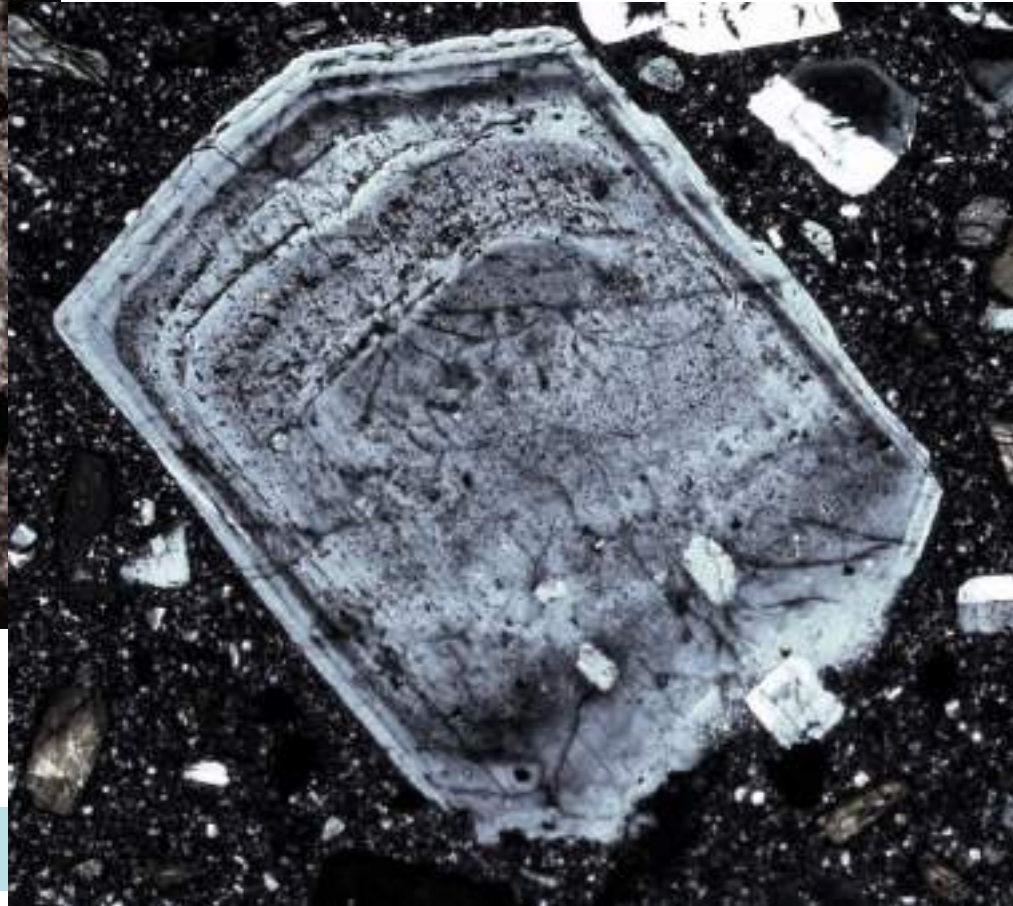
114 мм.  
Нигерия



# Анатомия индивида - источник генетической информации. Зональность кристаллов



При 1 николе



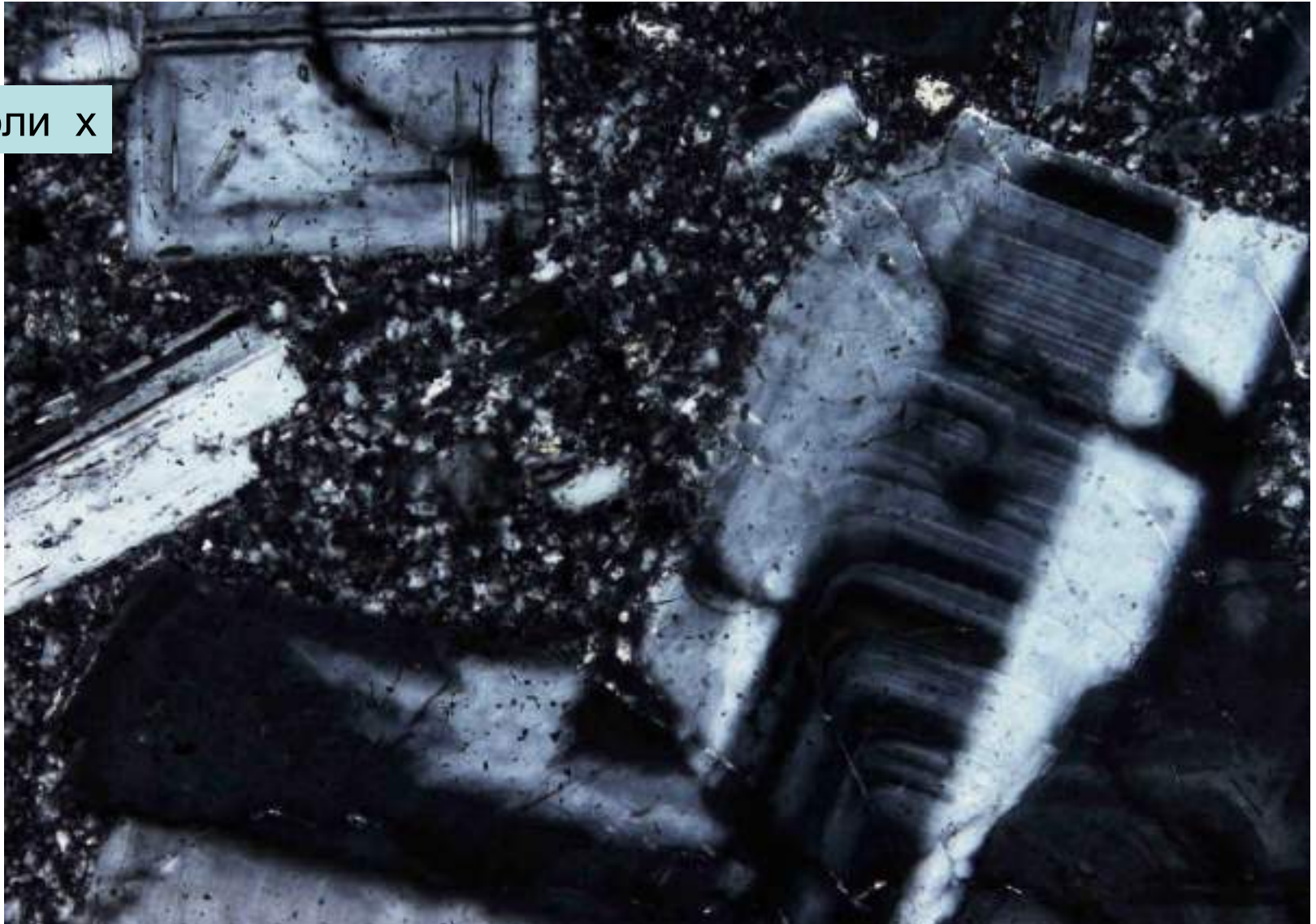
Николи х

Вкрапленник осцилляционно-зонального андезина.  
Паргаситовые андезиты Армении



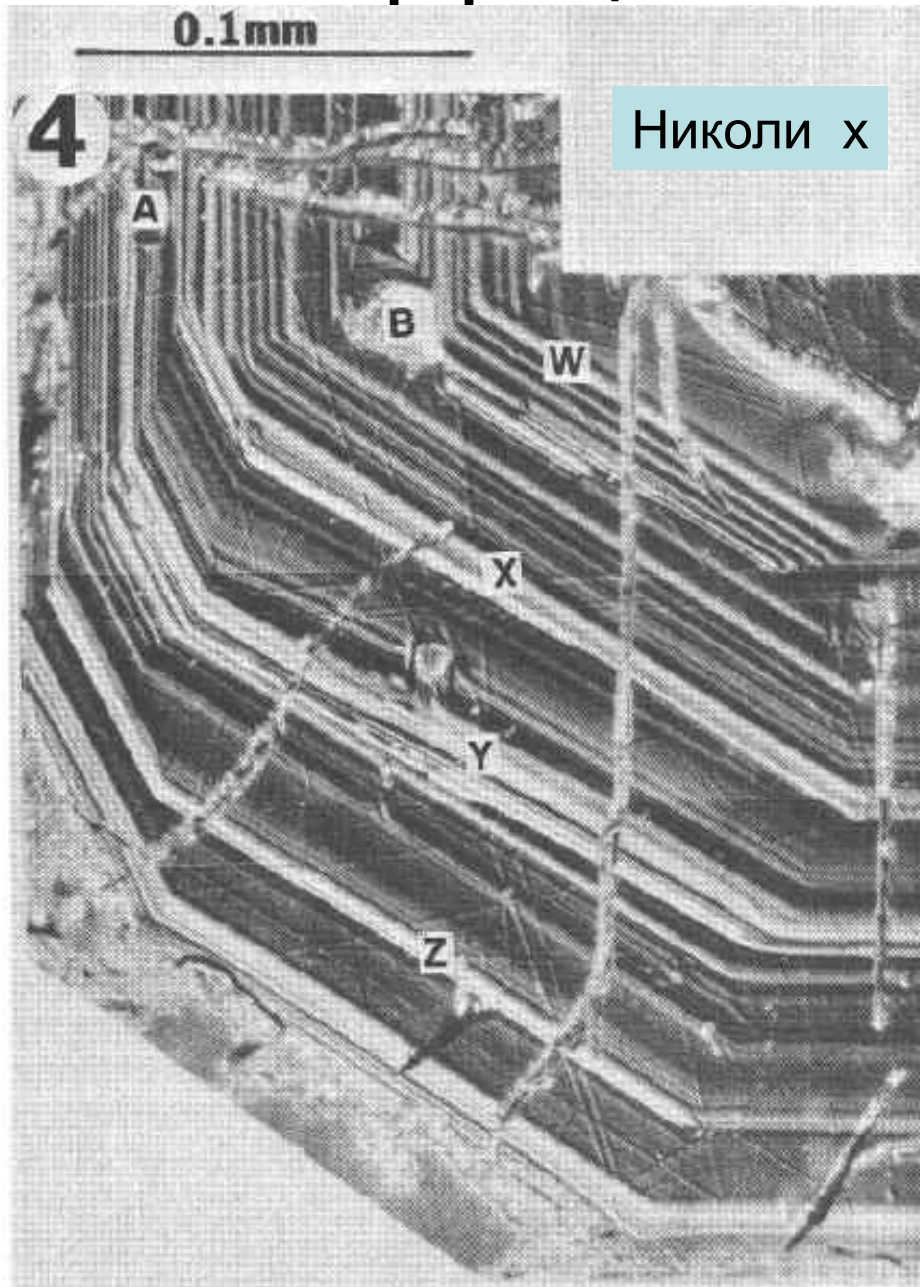
# Анатомия индивида - источник генетической информации. Зональность кристаллов

Николи x



Осцилляционно-зональный олигоклаз-андезин.  
Вкрапленник. Риодациты мела. Запад Горного Крыма

# Анатомия индивида - источник генетической информации. Зональность кристаллов



Осцилляционно-зональный  
анортит – битовнит  $An_{90-83}$   
с каймой битовнита  $An_{75-70}$ .

Вкрапленник в  
высокоAl базальтах.

Вулкан Фуего,

Гватемала.

Anderson A.T., 1984.

Amer. Mineral. Vol. 69. P. 660-676.

# Анатомия индивида - источник генетической информации. Зональность кристаллов

Явления осцилляционной зональности отчасти возможно обусловлены различной скоростью роста плагиоклаза различного состава

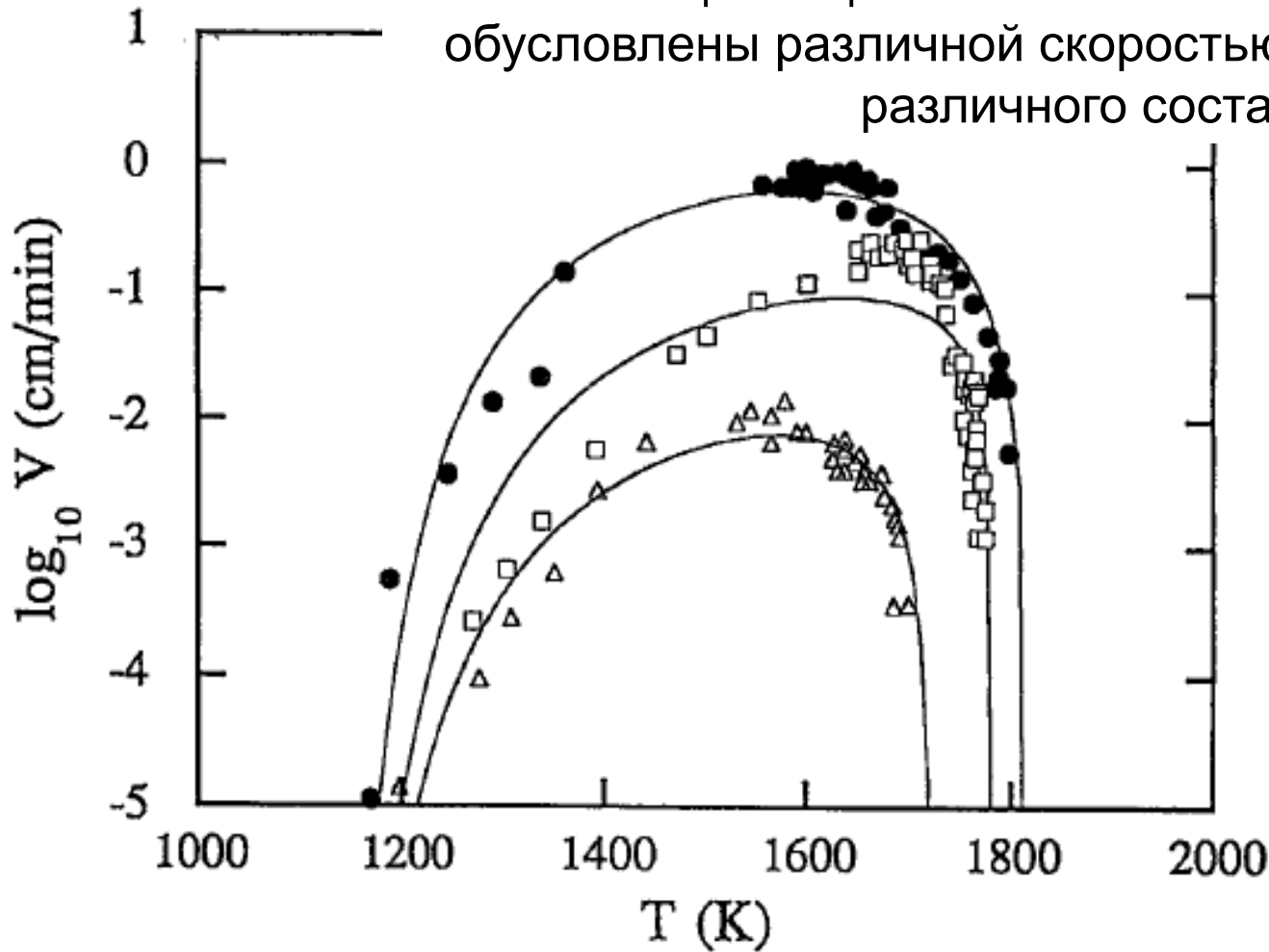
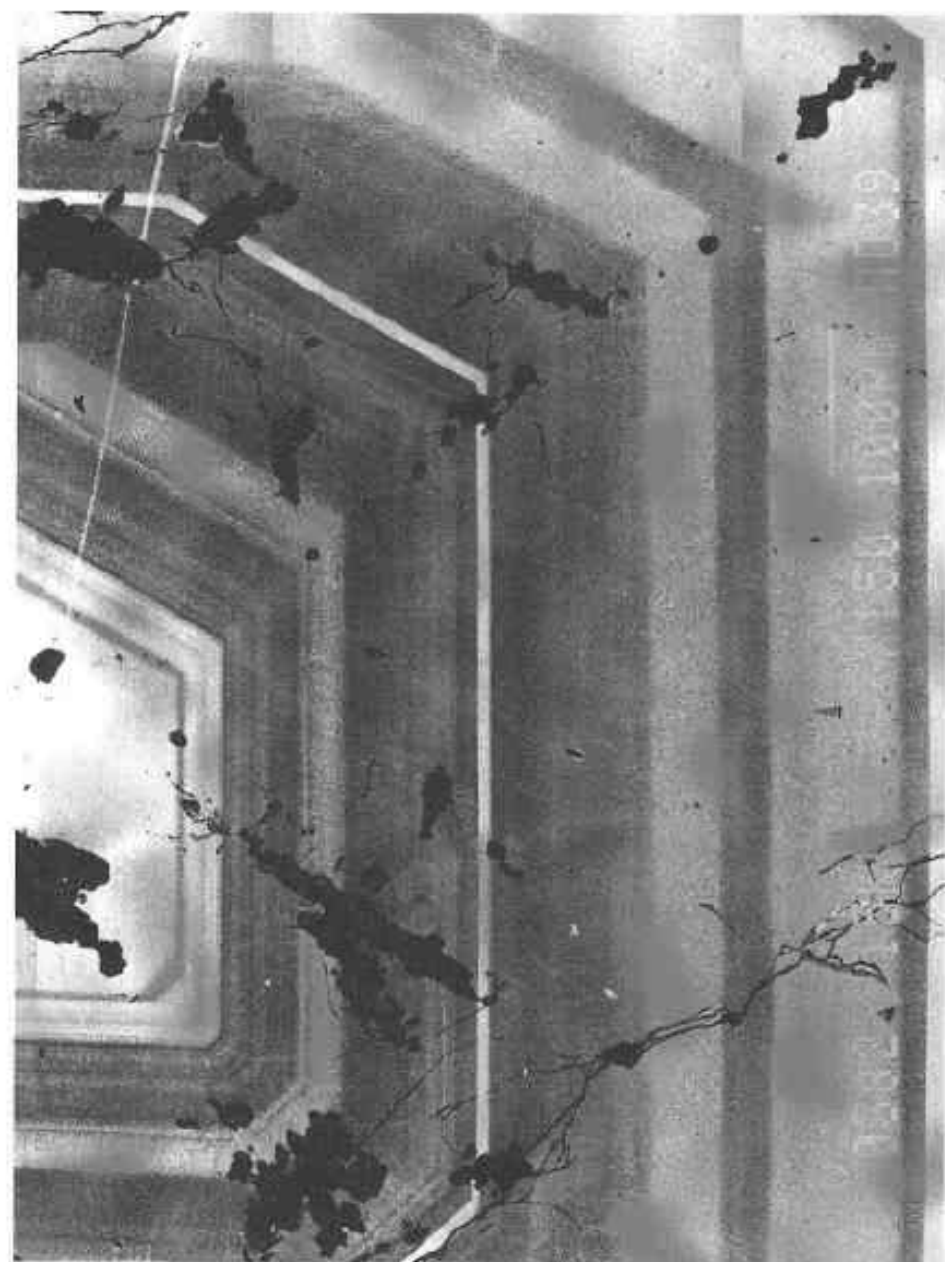


FIG. 1. Measurements of growth velocity in the synthetic Ab-An system (from Kirkpatrick *et al.* 1979) and calculated growth-velocity as a function of temperature for various An-concentrations: 100 mol.% (circles), 75 mol.% (squares), 50 mol.% (triangles).

Скорости роста кристаллов плагиоклаза различного состава:  $Ap_{100}$  – залитые кружки,  $Ap_{75}$  – квадраты,  $Ap_{50}$  - треугольники



# Анатомия индивида - источник генетической информации. Зональность кристаллов



Осцилляционно-зональный  
гранат  
гидроандрадит - гроссуляр.

Светлые зоны обогащены миналом  
андрадита, тёмные – миналом  
гроссуляра.

Фотография в  
отражённых электронах.

Рифт Осло,

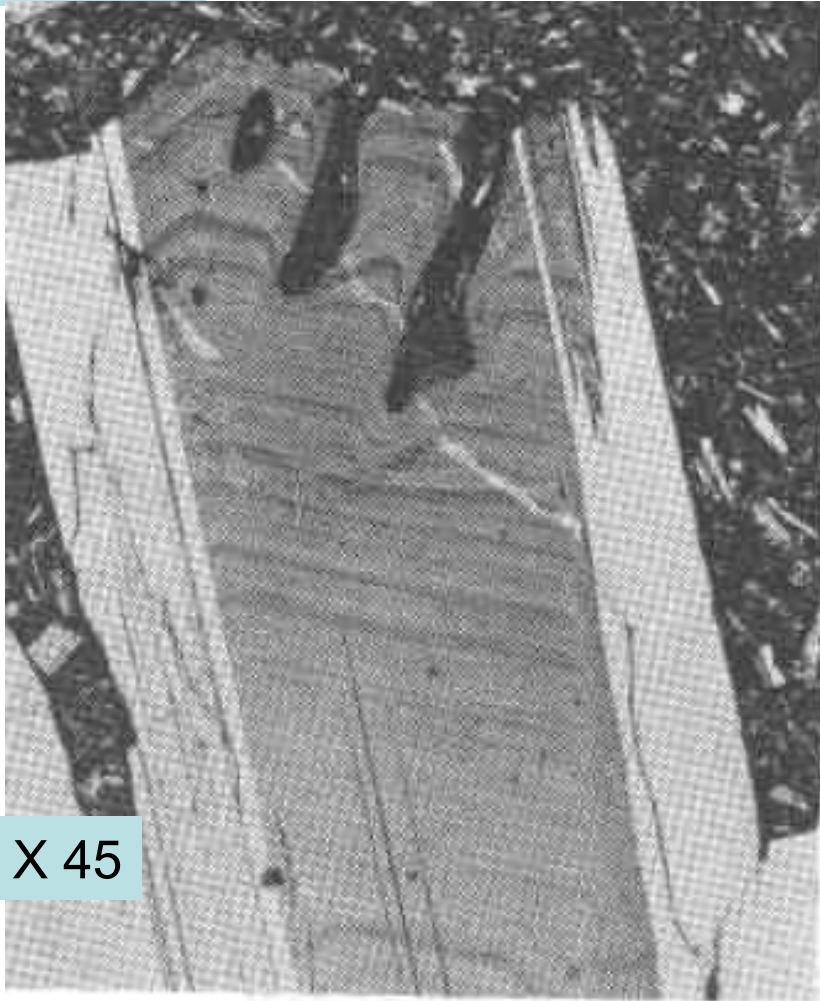
Южная Норвегия.

Holten T. et al., 1997.

Amer. Mineral. Vol. 82. P. 596-606.

# Анатомия индивида - источник генетической информации. Зональность кристаллов

Николи х



X 45



X 110

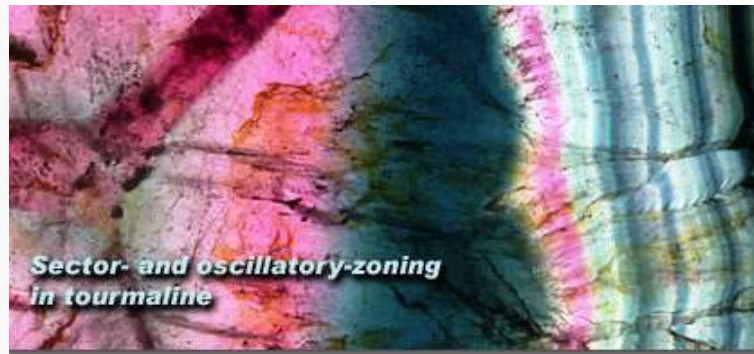
Осцилляционно-зональный андезин-лабрадор  $An_{54-44}$  с конволютными внешними зонами. Вкрапленник. Андезито-базальты. Калифорния. Blakerby B.A., 1968. Amer. Mineral. Vol. 53. P. 954-962.

# Анатомия индивида - источник генетической информации. Зональность кристаллов

Турмалин гранитных пегматитов. Осцилляционно-зональный



5 мм. Мадагаскар

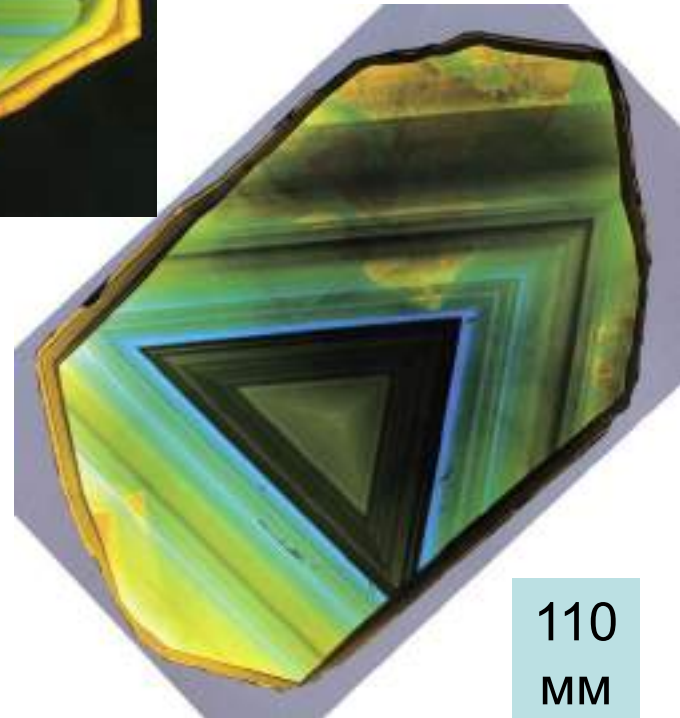
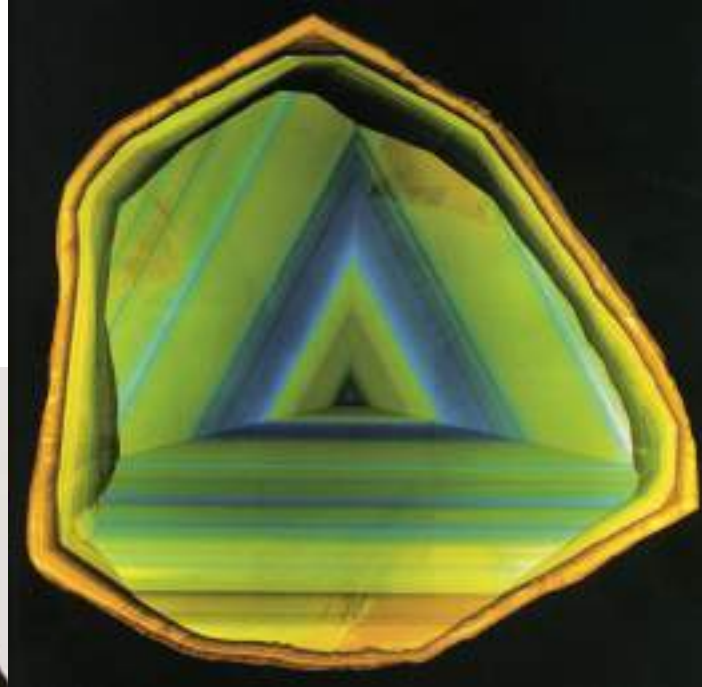




# Анатомия индивида - источник генетической информации. Зональность кристаллов

Турмалин гранитных пегматитов Мадагаскара

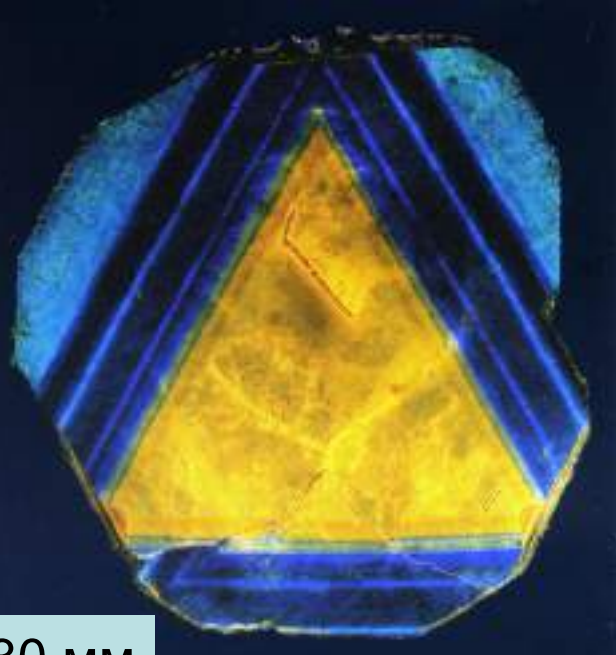
110 мм



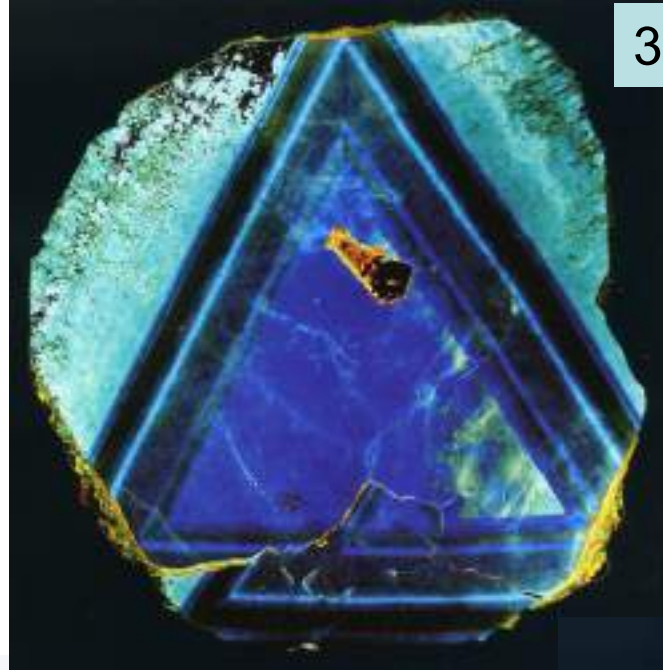
110  
мм

# Анатомия индивида - источник генетической информации. Зональность кристаллов

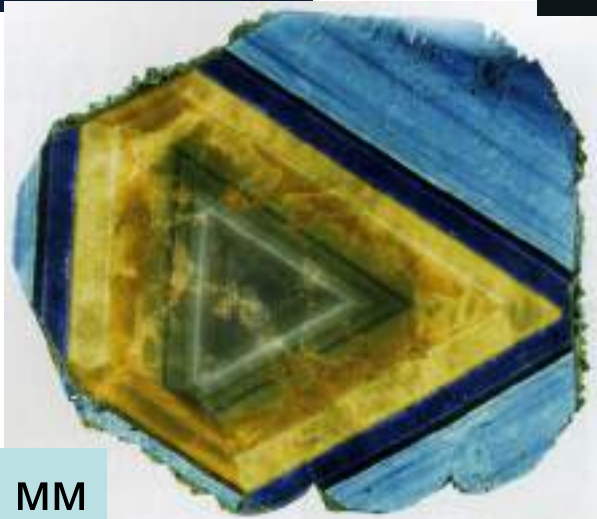
Турмалин гранитных пегматитов Erongo, Намибия



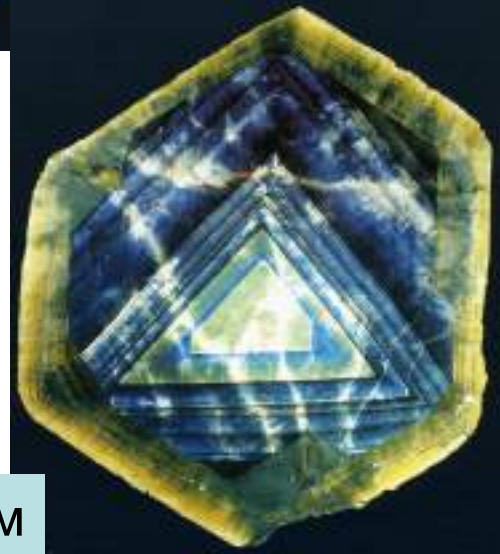
30 мм



30 мм



22 мм

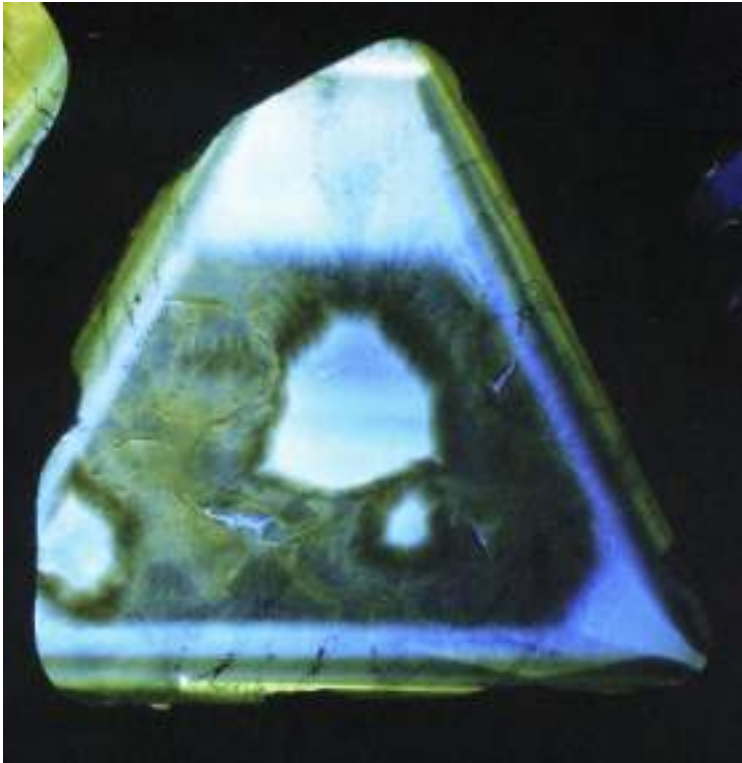


20 мм



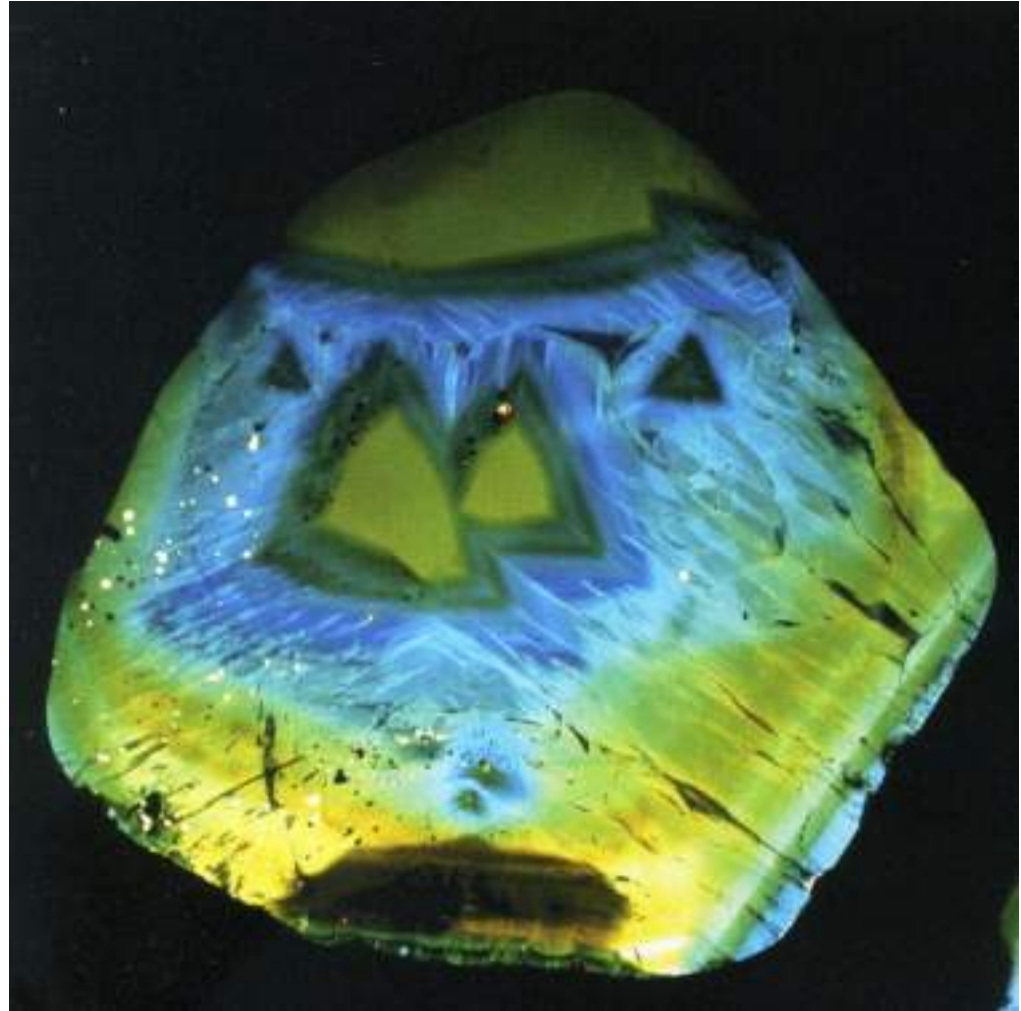
# Анатомия индивида - источник генетической информации. Зональность кристаллов

Турмалин гранитных пегматитов. Сложно зональный многоядерный



15 мм

Мадагаскар



25 мм



# Эволюция форм кристаллов минералов

В меняющихся условиях форма кристаллов обычно эволюционирует. Главный фактор - изменение химизма среды, степень пересыщения, присутствие поверхностно-активных веществ. В системе флюорит – галит– вода при уменьшении пересыщения октаэдры флюорита сменяются кубами; в системе флюорит - LiCl - вода при уменьшении пересыщения кубы флюорита сменяются его октаэдрами. В природных зональных кристаллах флюорита в большинстве случаев наблюдается смена октаэдров кубами, что согласуется с результатами по синтетической системе с NaCl. В целом, единой универсальной эволюции морфологии кристаллов как функции температуры, давления, пересыщения... не существует; т. к. прежде всего необходим учёт химизма среды.

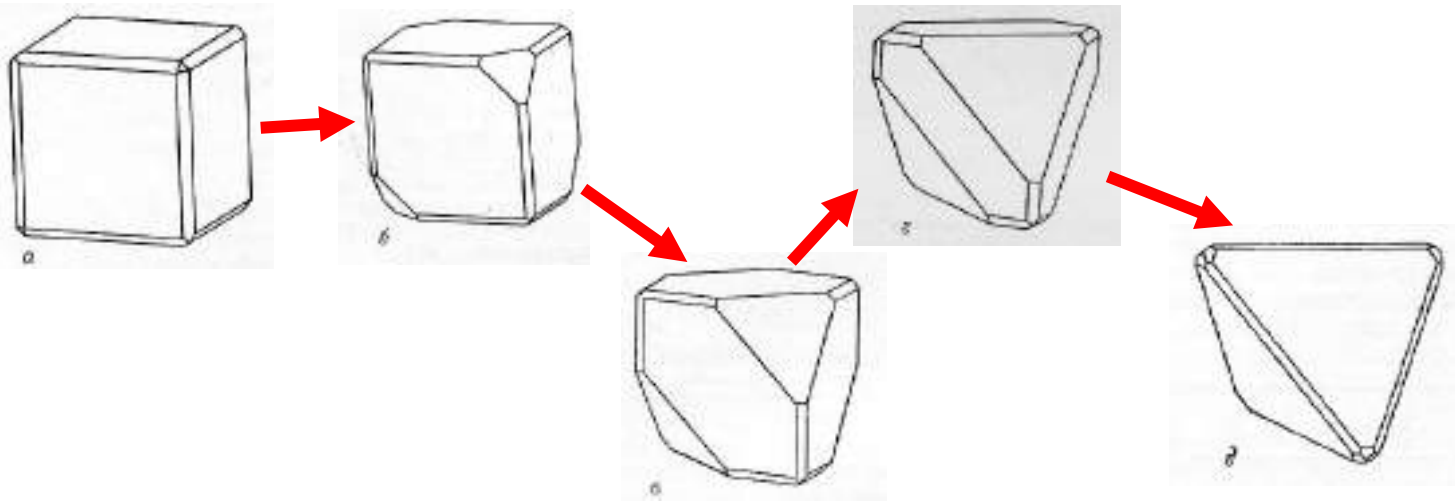
Важна в ряде случаев и форма кристалла-затравки, особенно если ее размер достаточно велик. Габитус и комбинация форм кристалла на данном этапе роста в значительной степени определяются габитусом и комбинацией форм, которые кристалл получил в ходе своего предшествующего развития. Чем крупнее уже выросший кристалл, тем труднее он приспособляется к новым изменившимся условиям роста. Многие наблюдаемые формы кристаллов минералов есть результат перехода от одной огранки к другой при изменении условий роста.

# Эволюция форм кристаллов минералов

Тем не менее, в природных условиях существуют некие более или менее общие тренды изменения габитусных форм кристаллов определенных минералов в различных их месторождениях. Для апатита характерен тренд от игольчатых кристаллов в высокотемпературных габбро, к длиннопризматическим в кварцевых диоритах, призматическим в гранитах и скарнах, уплощенным по оси  $c$  до пластинчатых в кварцевых жилах. Для кальцита характерен тренд от пластинчатых (папиршпат) относительно высокотемпературных к ромбоэдрическим, далее к призматическим и скаленоэдрическим. Для флюорита обычна эволюция форм от октаэдра  $[111]$  к кубу  $[100]$ , далее к ромбододекаэдру  $[110]$  и более редким формам. Для барита ранее других развивается комбинация пинакоида  $[001]$  и призмы  $[101]$ ; затем призма  $[210]$ , она заменяется призмой  $[203]$ ; затем появляется призма  $[102]$ , которая сменяется более острой призмой  $[103]$  и далее наиболее острой призмой  $[104]$ . Но ! Для многих минералов (диаспор, фенакит, турмалин, виллемит, алмаз...) характерен тренд от примерно изометричных форм кристаллов к уплощенным или вытянутым и далее к длиннопризматическим и палочковидным, по существу близким к скелетным. Причина - понижение температуры кристаллизации, рост степени пересыщения, а главное - диффузное голодание.

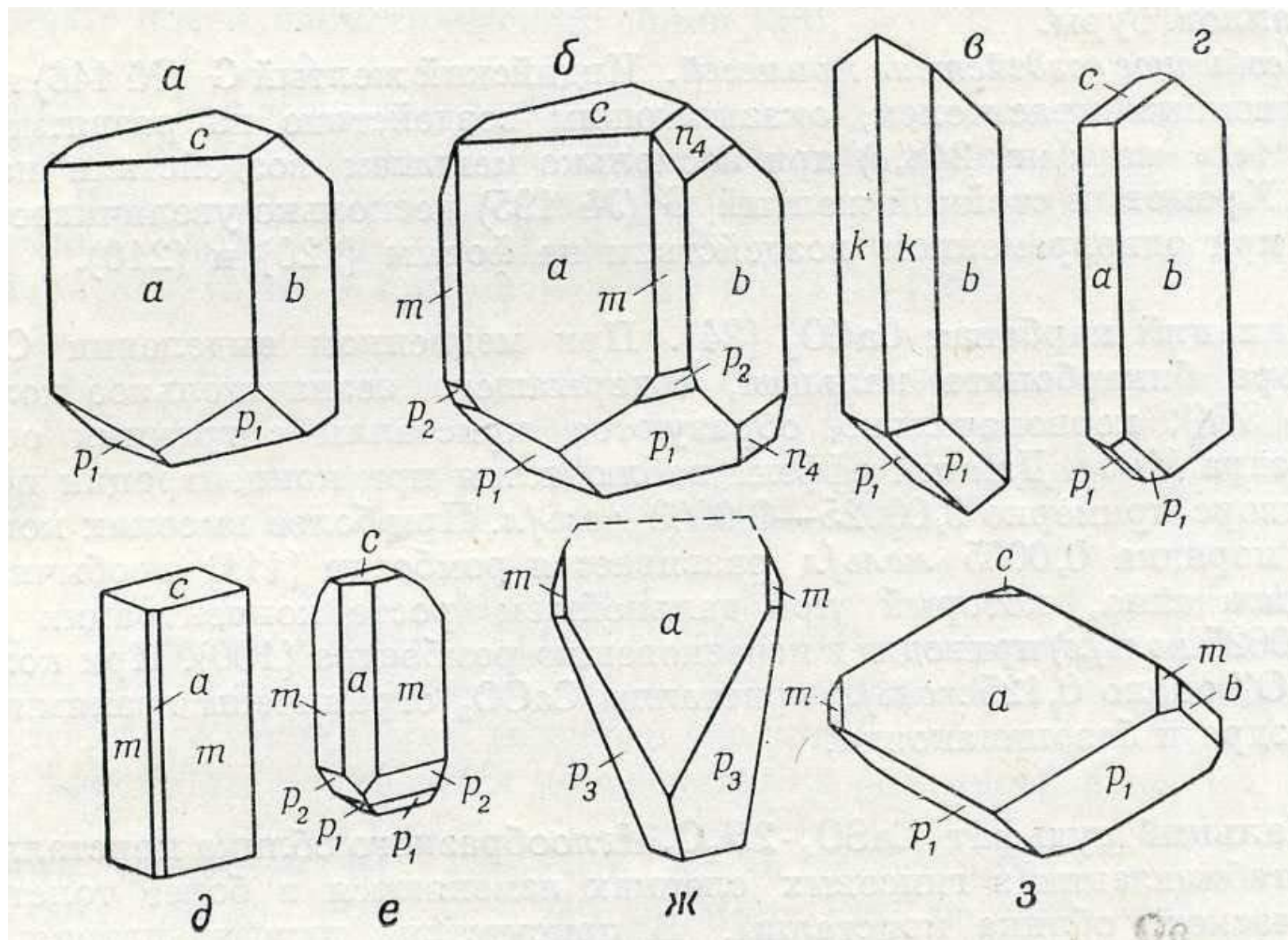
# Анатомия индивида - источник генетической информации. Эволюция форм кристаллов

Смена форм кристаллов  $\text{NaClO}_3$  с ростом количества примесей от куба к тетраэдру



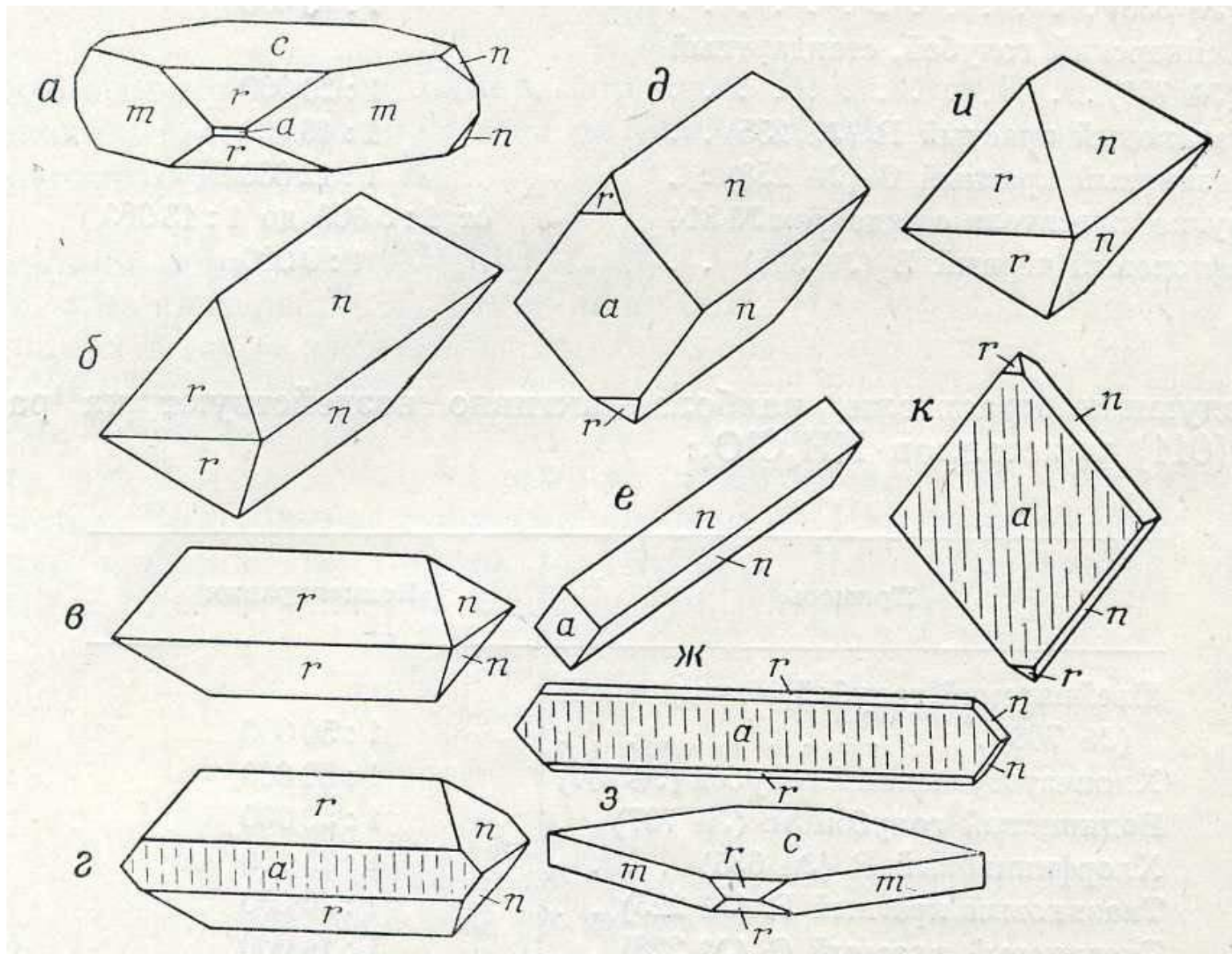


# Анатомия индивида - источник генетической информации. Эволюция форм кристаллов



Изменение форм кристаллов буры в растворах различного состава

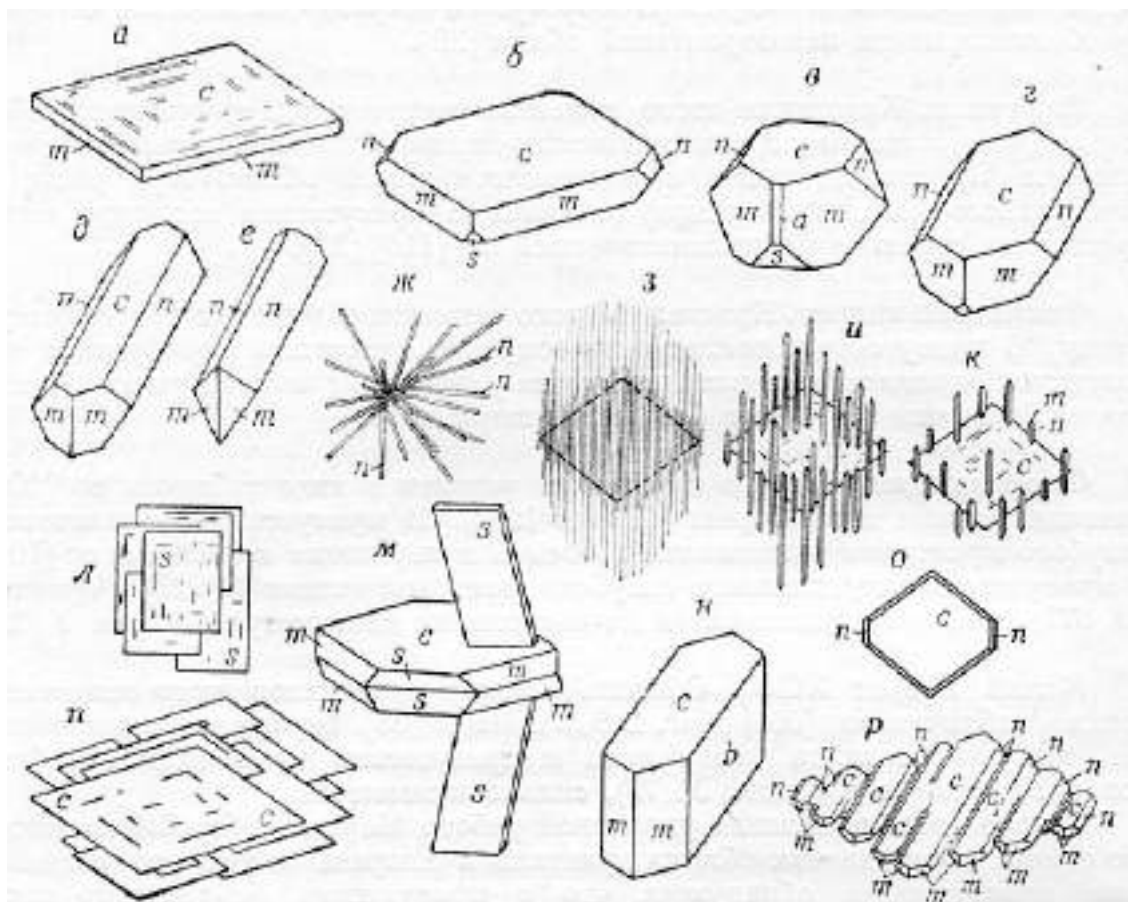
# Анатомия индивида - источник генетической информации. Эволюция форм кристаллов



Изменение форм кристаллов  $\text{KClO}_4$  в растворах различного состава



# Анатомия индивида - источник генетической информации. Эволюция форм кристаллов



Фиг. 249. Облик кристаллов  $KClO_3$ .

а—облик чистых кристаллов; б, в, г—кристаллы, с воздействием на {011}; д, е, ж—стандартное воздействие на {011} под влиянием неорганических примесей, в том числе и наиболее активного иона  $MoO_4^{2-}$ ; з, и, к—воздействие наиболее активных красителей в порядке уменьшения их концентраций (и—воздействие при стандартной концентрации, см. также фиг. 251); л, м—кристаллы таблечковые по {101}. (м—возникновение двойниковых кристаллов); н—воздействие иона  $Cr_2O_7^{2-}$  на {010}; о—облик кристалла  $KClO_3$  в присутствии той же примеси при концентрации ниже стандартной; п—воздействие на {001}; р—неравномерное воздействие на {011} и {001}.  
 (Обозначения граней простых форм: а—{100}, б—{010}, в—{001}, г—{110}, д—{011}, е—{101}).

Изменение форм кристаллов  $KClO_3$  в растворах различного состава



# Анатомия индивида - источник генетической информации. Эволюция форм кристаллов

## Флюорит

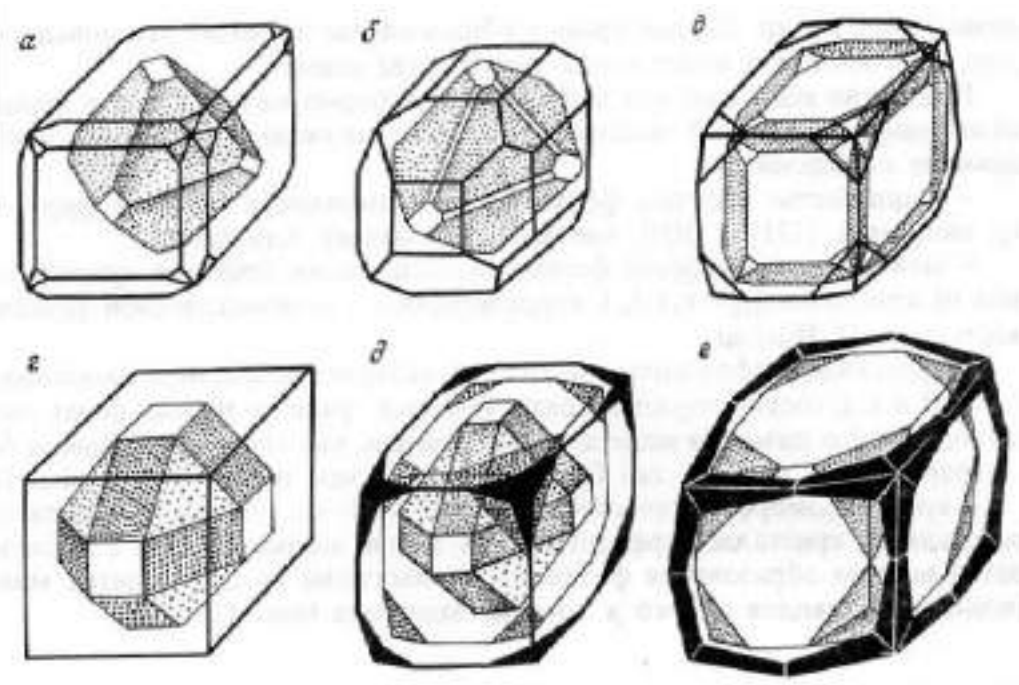
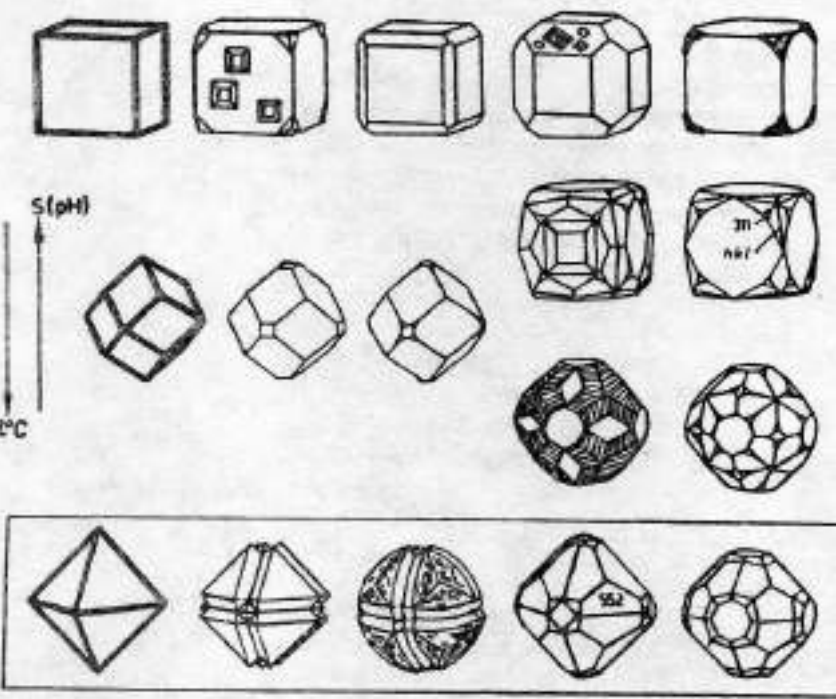


Рис. 13. Окрашенные фантомы в кристаллах флюорита - свидетельство направленного изменения формы кристаллов в процессе роста. Восточное Забайкалье-Бузука (а-ε) и Белуха (z-ε):  
 а - {111} + {100} → {100} + {110} + {411}; б - {111} + {100} + {110} → {100} + {110}; в - {100} + {110} + {411} → {100} + {411}; z - {111} + {100} + {110} → {100}; д - {111} + {100} + {110} → {100} + {411} → {100} + {421}; е - {100} + {411} → {100} + {421}

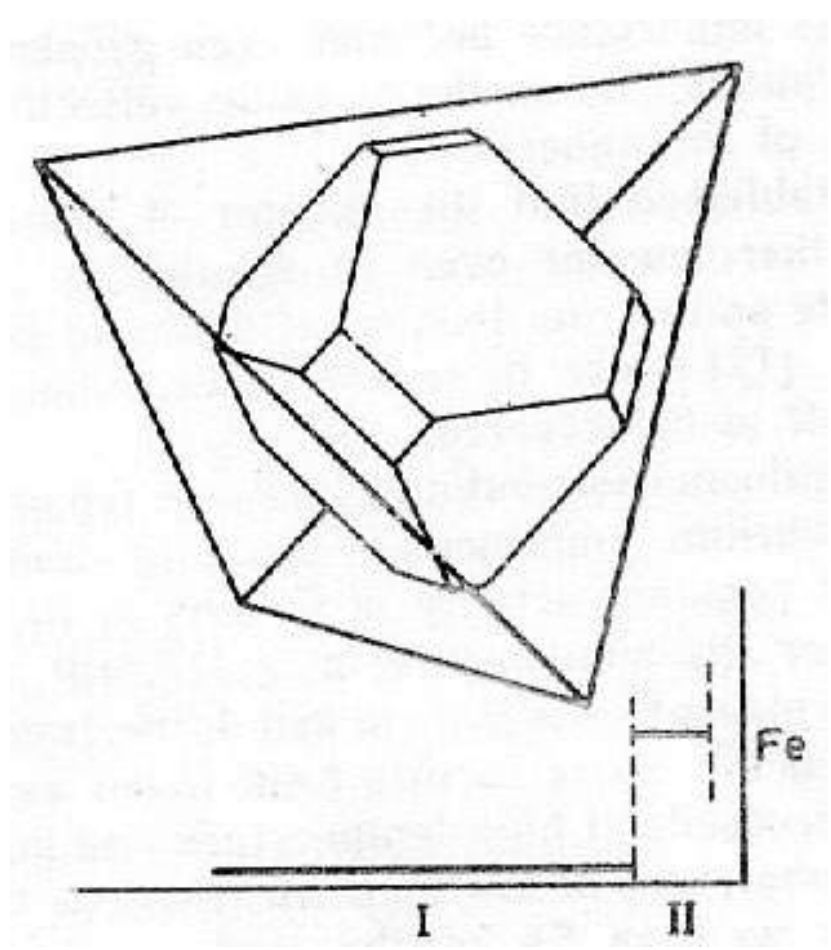
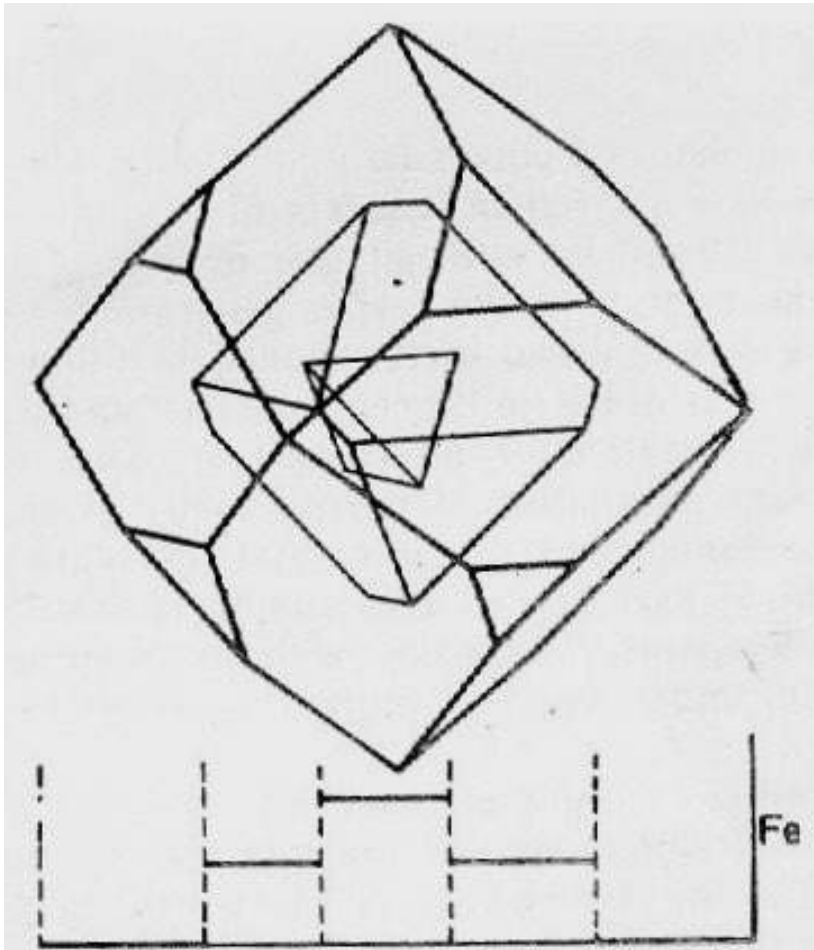
Фиг. 21. Формы кристаллов флюорита Михалковского месторождения с обозначением основных факторов, контролирующих изменения габитусов /Зидарова и др., 1978/

Смена форм кристаллов при изменении состава флюидов

Флюорит грейзеновых месторождений Забайкалья

# Анатомия индивида - источник генетической информации. Эволюция форм кристаллов

## Сфалерит

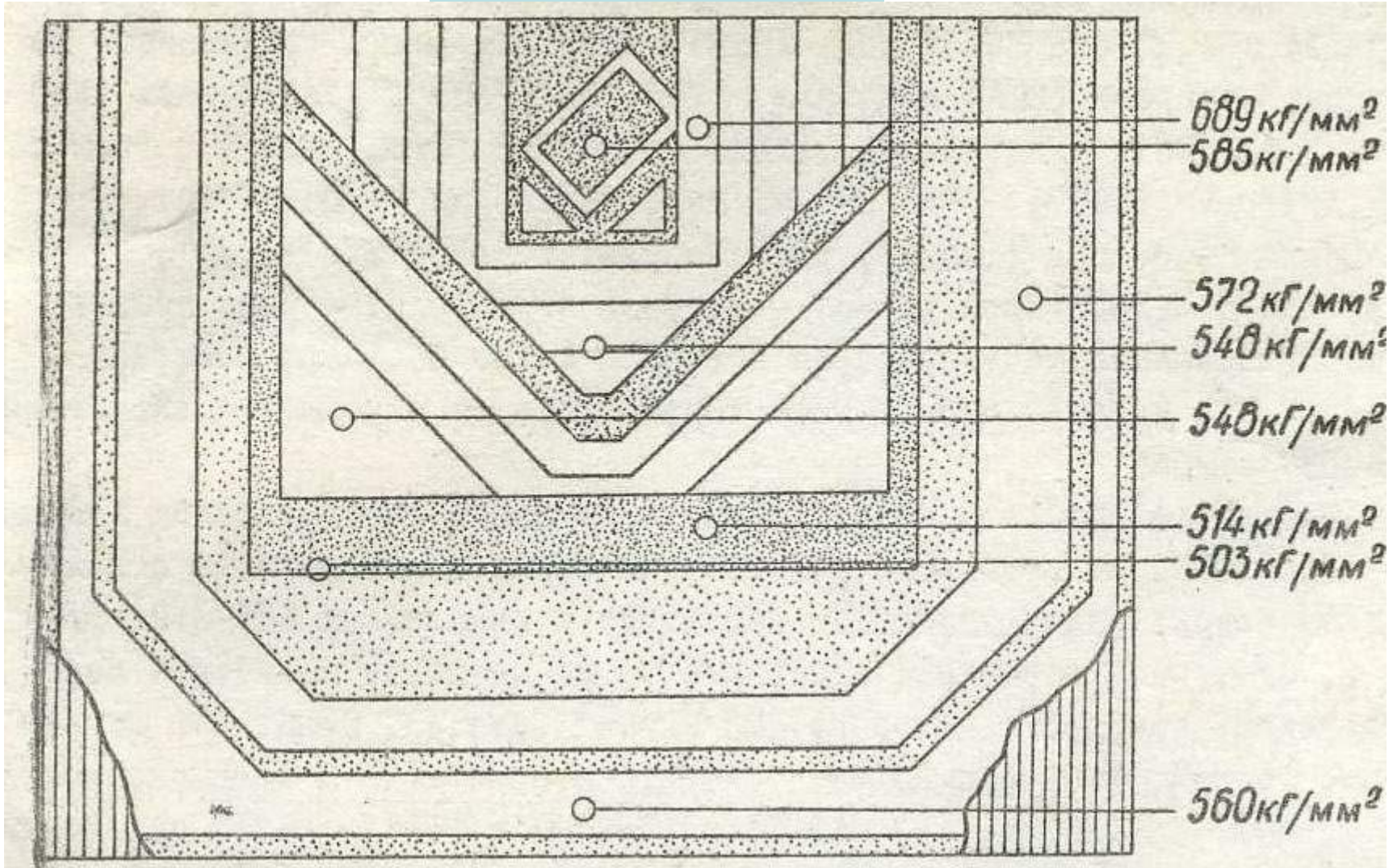


Смена форм кристаллов и их состава (железистости)



# Анатомия индивида - источник генетической информации. Эволюция форм кристаллов

## Магнетит скарновый



Смена форм кристалла и твёрдости по микровдавливанию

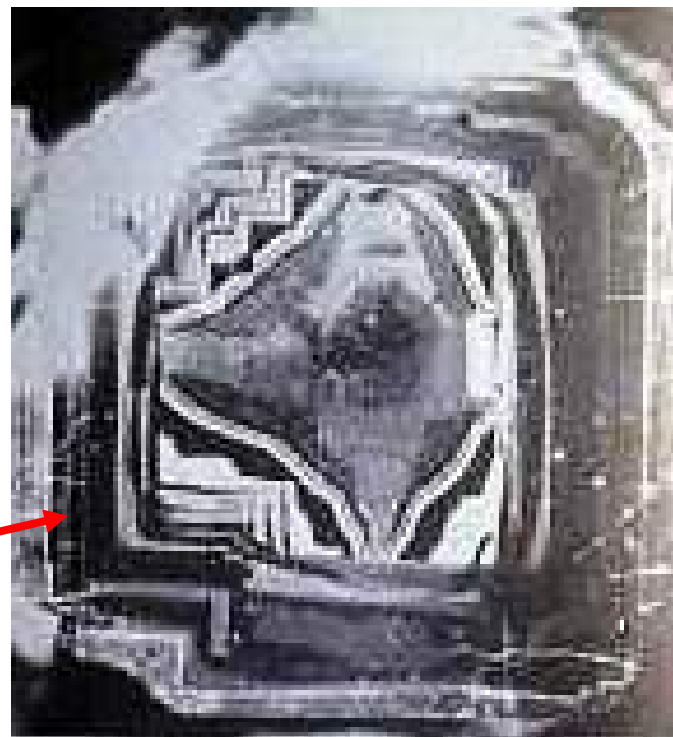
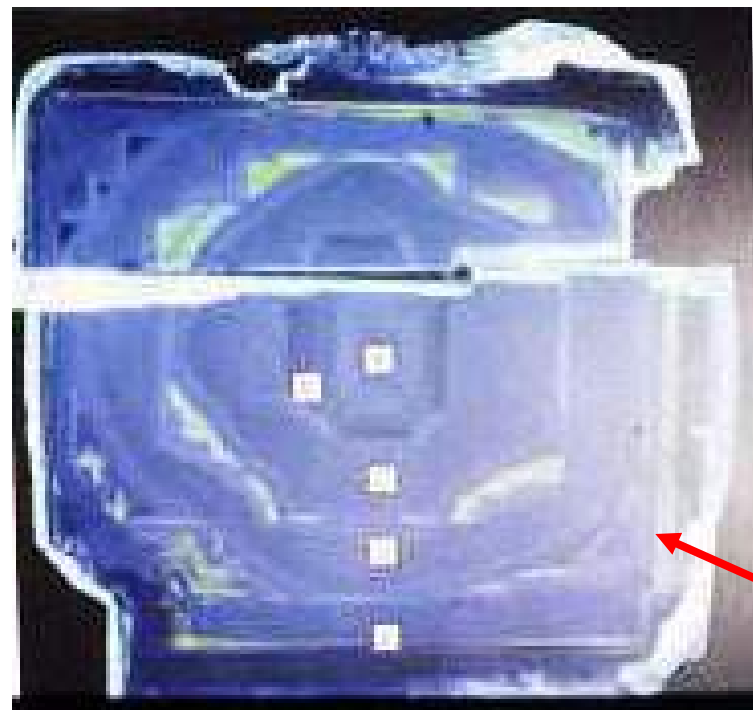


# Анатомия индивида - источник генетической информации. Эволюция форм кристаллов

Алмаз

Картины  
като-  
люминесценции

Алмаз в  
алмазе.  
Якутия



# Анатомия индивида - источник генетической информации. Эволюция форм кристаллов

## Касситерит кварц-турмалиновой формации

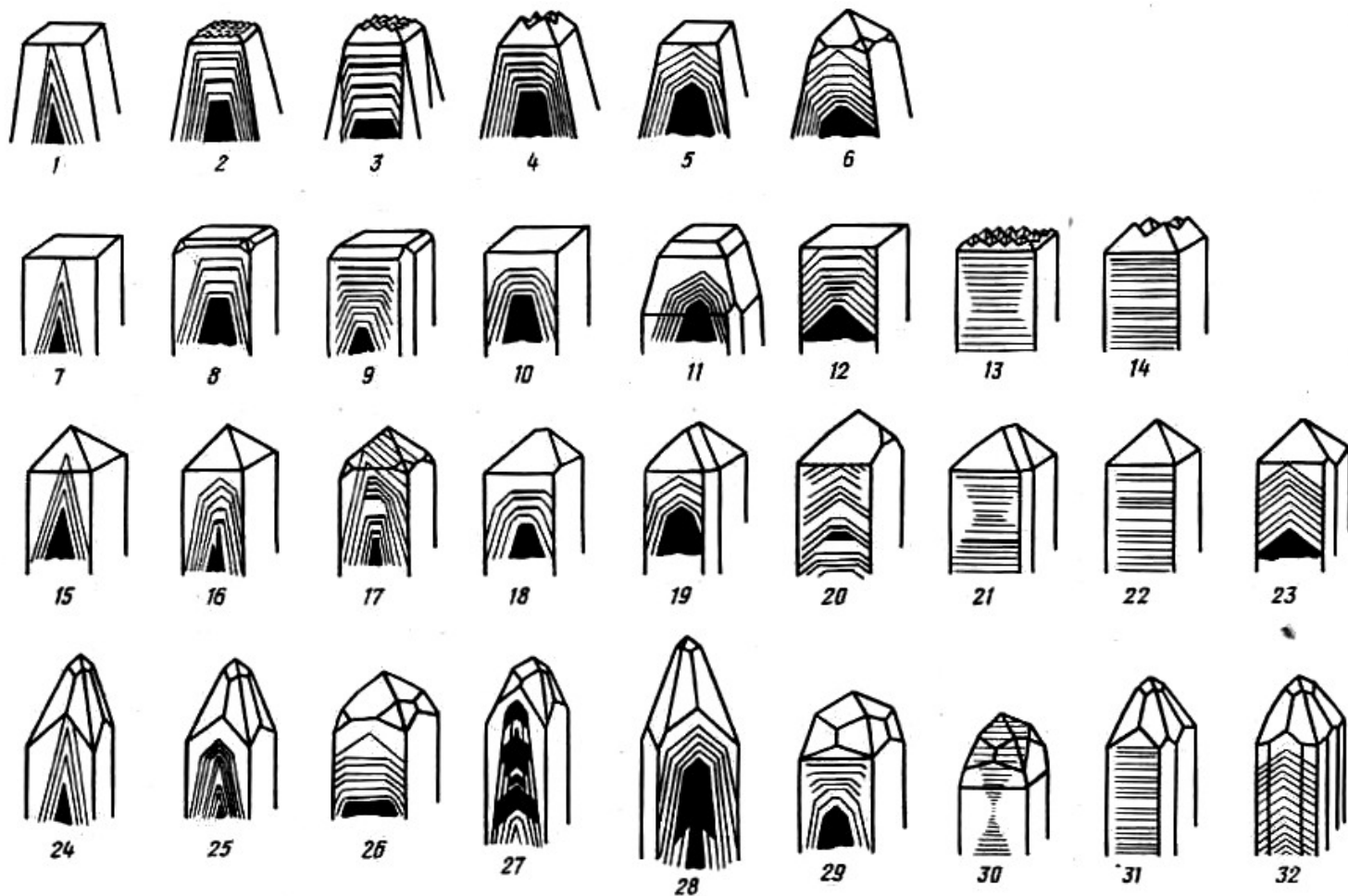


Рис. 36. Различные варианты пространственно-возрастного соотношения наружных и внутренних (заросших) граней у кристаллов касситерита: 1, 2, 3, 6, 16, 17, 20, 22, 26 и 31 – жила Северная (из штольни); 4, 5, 9, 11, 18, 19, 21 – жила Геофизическая (из скважины); 7, 23 и 8 – жила Северная (из скважины); 10 – жила Ягодная (из штольни); 12 и 29 – жила Главная (рудный концентрат); 14 – жила Придорожная (из штольни); 15, 27, 28 и 30 – жила Главная (рудный концентрат); 24 и 25, 32 – участки Букам и Сютюинга (шлихи), Комсомольский и Баджальский районы Хабаровского края. Кристаллы показаны в таком положении, в каком они лежат на столике микроскопа

# Анатомия индивида - источник генетической информации. Эволюция форм кристаллов

Касситерит и парагенный анатаз. Кварц-турмалиновая формация

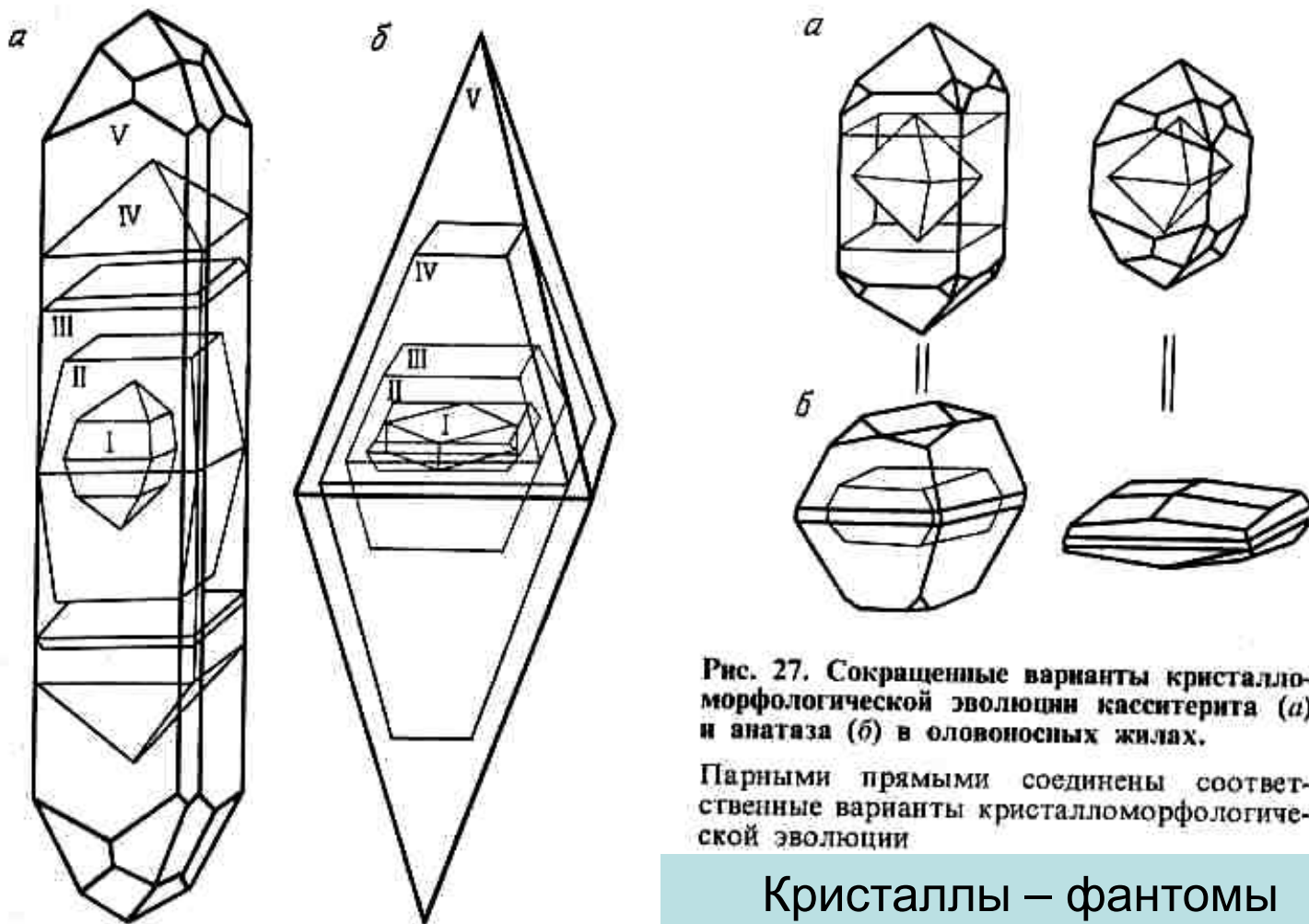


Рис. 26. Соответствие кристалломорфологических типов (I-V) в кристаллах касситерита (а) и анатаза (б)

Рис. 27. Сокращенные варианты кристалломорфологической эволюции касситерита (а) и анатаза (б) в оловоносных жилах.

Парными прямыми соединены соответственные варианты кристалломорфологической эволюции

Кристаллы – фантомы касситерита (слева) и анатаза



# Анатомия индивида - источник генетической информации. Эволюция форм кристаллов

Кристаллы –  
фантомы.  
Кальцит



53 мм.  
Sweetwater mine, Миссури,  
США

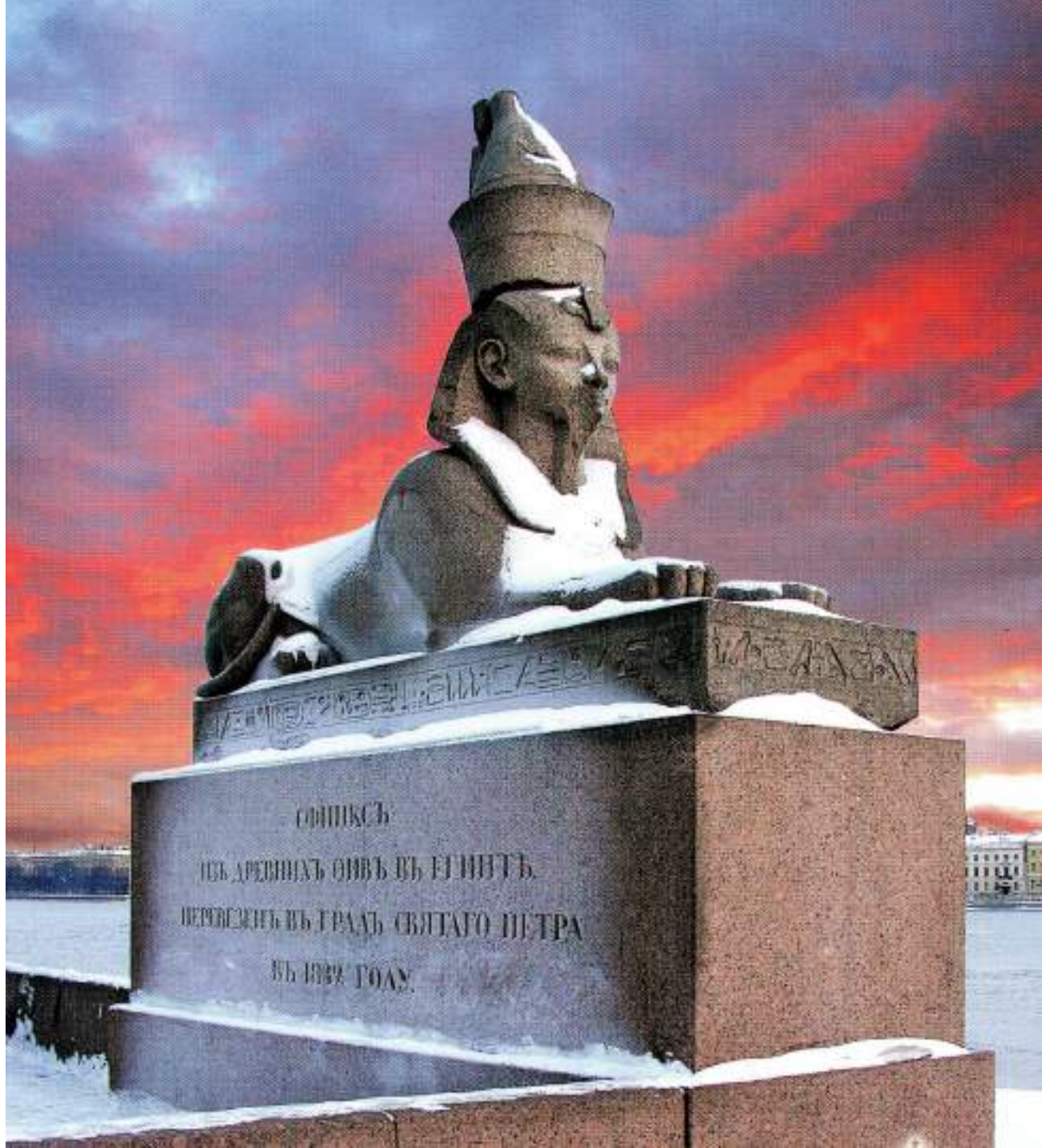
20 мм.  
Steinbruch Agatz, Германия

# Анатомия индивида - источник генетической информации. Эволюция форм кристаллов



Кристаллы –  
фантомы.  
Церуссит  
60 мм.  
Цумеб,  
Намибия









Улуг-Танзек, Тува

**Э.М. Спиридонов**

**Генетическая минералогия.**

**ГМ-1. Онтогенез. Индивиды**

**Рост кристаллов**

**007. Специфические  
формы кристаллов –  
трубчатые, двойники**



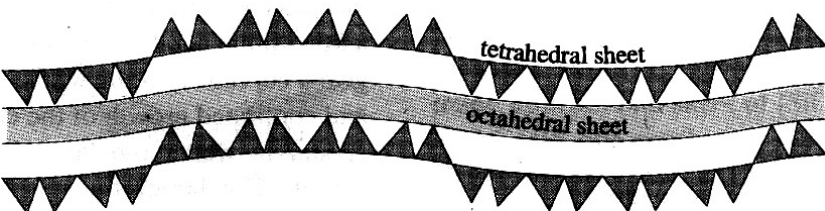
# Трубочатые кристаллы

Особый интерес представляет рост кристаллов хризотил-асбеста  $Mg_6[Si_4O_{10}](OH)_8$ . Рост, как и обычно, происходит слоями. Но! слоистая структура хризотила, состоящая из 1 пакета талька =  $Mg_3[Si_4O_{10}](OH)_2$  и трёх пакетов брусита =  $Mg_3(OH)_6$ , - структура несоразмерная и по этой причине нарастающий правильный по толщине слой кристалла не плоский, а изогнутый, загибающийся. В результате получаются правильные трубчатые кристаллы из вложенных одна в другую трубок - спирально закрученных в трубки слоёв, внутренний  $D = 130 \text{ \AA}$ , внешний  $D = 260 \text{ \AA}$ . Толщина трубок хризотил - асбеста по всей их длине до 200 мм постоянная, боковые стенки идеально гладкие.

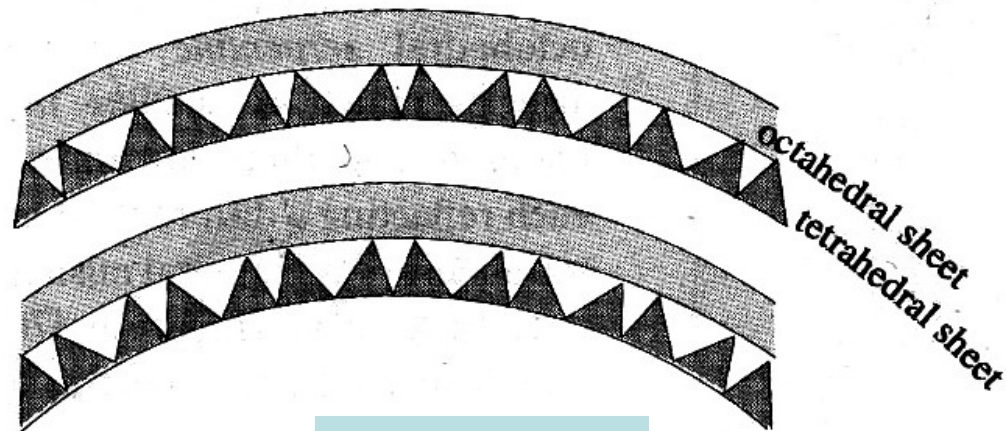
## Структура серпентинов



лизардит



антигорит



хризотил



# Трубчатые кристаллы – хризотил-асбест

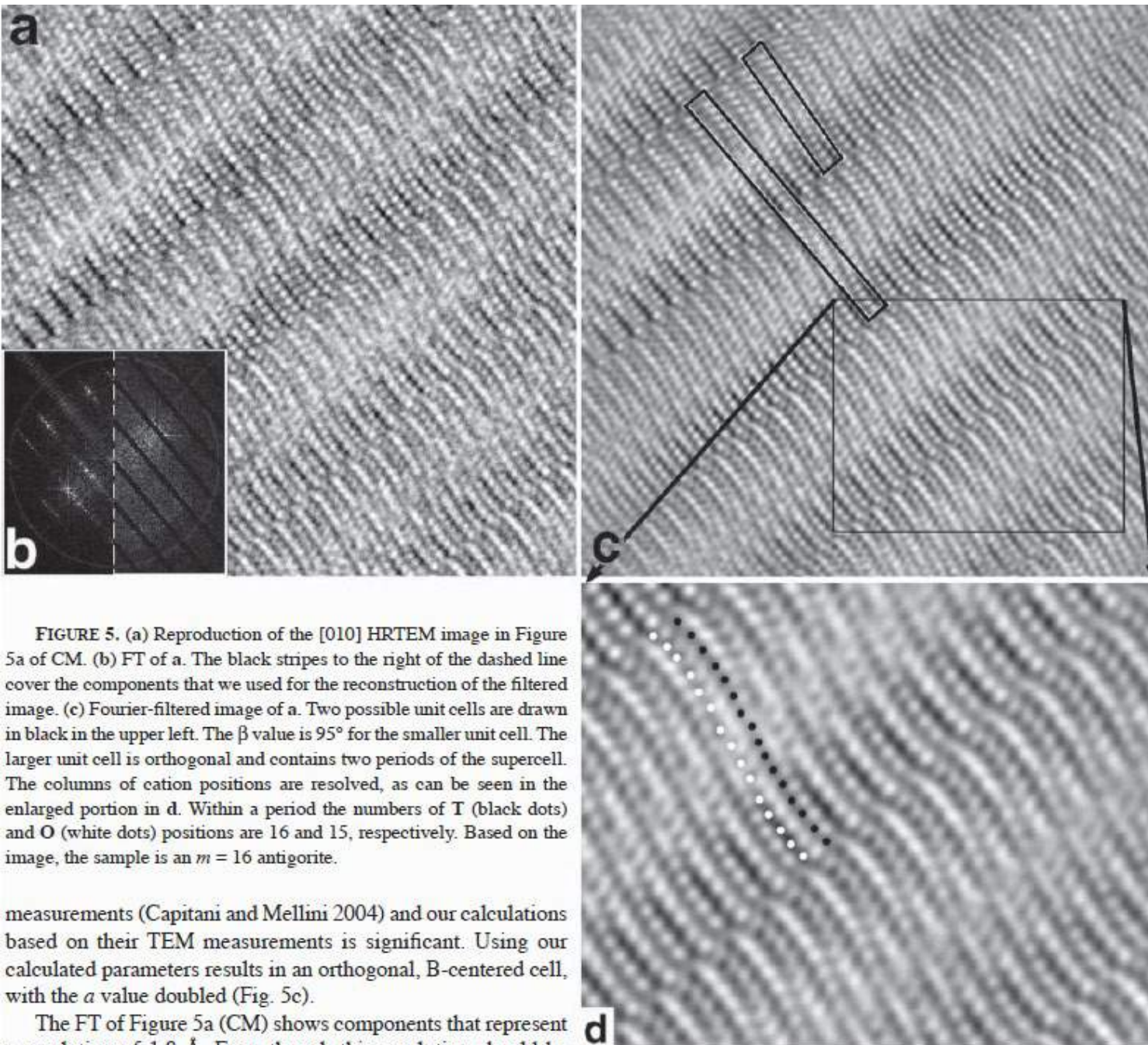


FIGURE 5. (a) Reproduction of the [010] HRTEM image in Figure 5a of CM. (b) FT of a. The black stripes to the right of the dashed line cover the components that we used for the reconstruction of the filtered image. (c) Fourier-filtered image of a. Two possible unit cells are drawn in black in the upper left. The  $\beta$  value is  $95^\circ$  for the smaller unit cell. The larger unit cell is orthogonal and contains two periods of the supercell. The columns of cation positions are resolved, as can be seen in the enlarged portion in d. Within a period the numbers of T (black dots) and O (white dots) positions are 16 and 15, respectively. Based on the image, the sample is an  $m = 16$  antigorite.

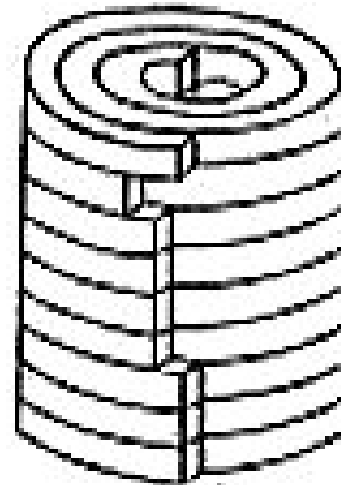
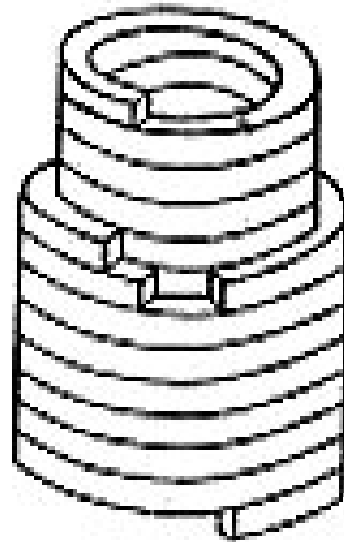
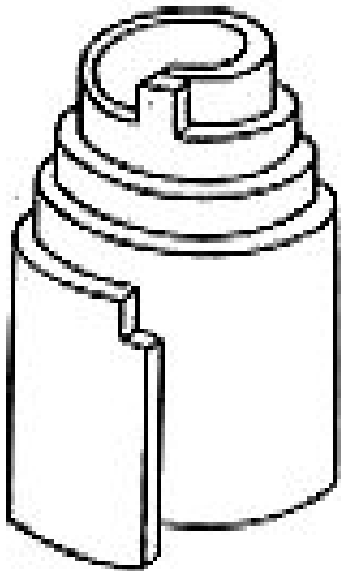
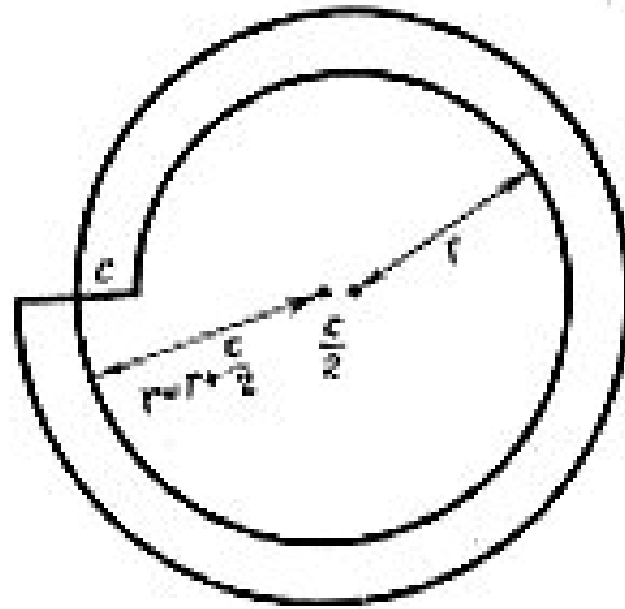
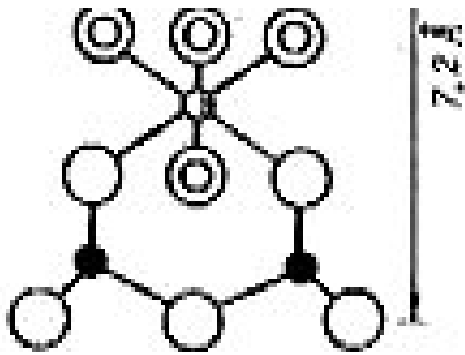
measurements (Capitani and Mellini 2004) and our calculations based on their TEM measurements is significant. Using our calculated parameters results in an orthogonal, B-centered cell, with the  $a$  value doubled (Fig. 5c).

The FT of Figure 5a (CM) shows components that represent a resolution of  $1.8 \text{ \AA}$ . Even though this resolution should be

Реальная  
не  
соразмерная  
структура  
антигорита.

Dódony I. et al.,  
2006.  
Amer. Mineral.  
Vol. 91.  
P. 1831-1838.

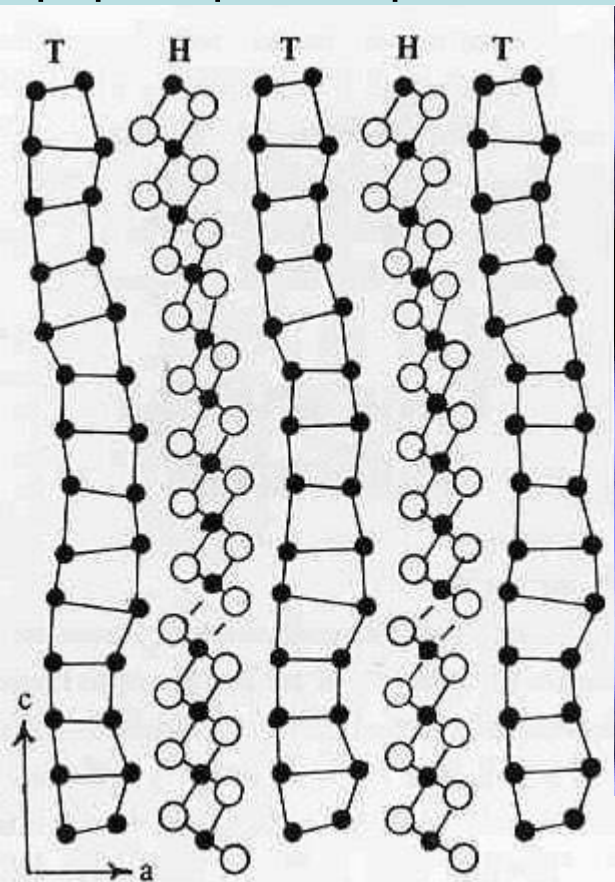
# Трубчатые кристаллы – хризотил-асбест



Способ образования нитей хризотил-асбеста по Ягодзинскому - Кунцу

# Трубчатые кристаллы - цилиндрит

Несоразмерные структуры встречаются не только у силикатов, но и у некоторых сульфидов. Таков цилиндрит. Соответственно, трубчатые формы роста кристаллов цилиндрита напоминают хризотил-асбест.



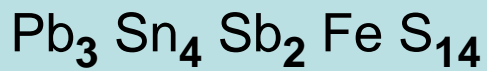
1 мм

Оруро, Боливия

1 мм



Несоразмерная структура  
цилиндрита





# Трубчатые кристаллы - цилиндрит

Несоразмерные структуры встречаются не только у силикатов, но и у некоторых сульфидов. Таков цилиндрит. Соответственно, трубчатые формы роста кристаллов цилиндрита напоминают хризотил - асбест.



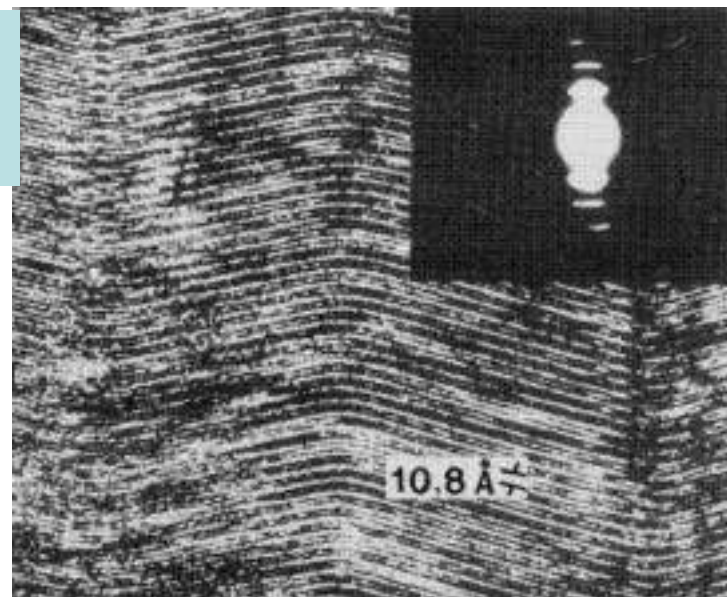
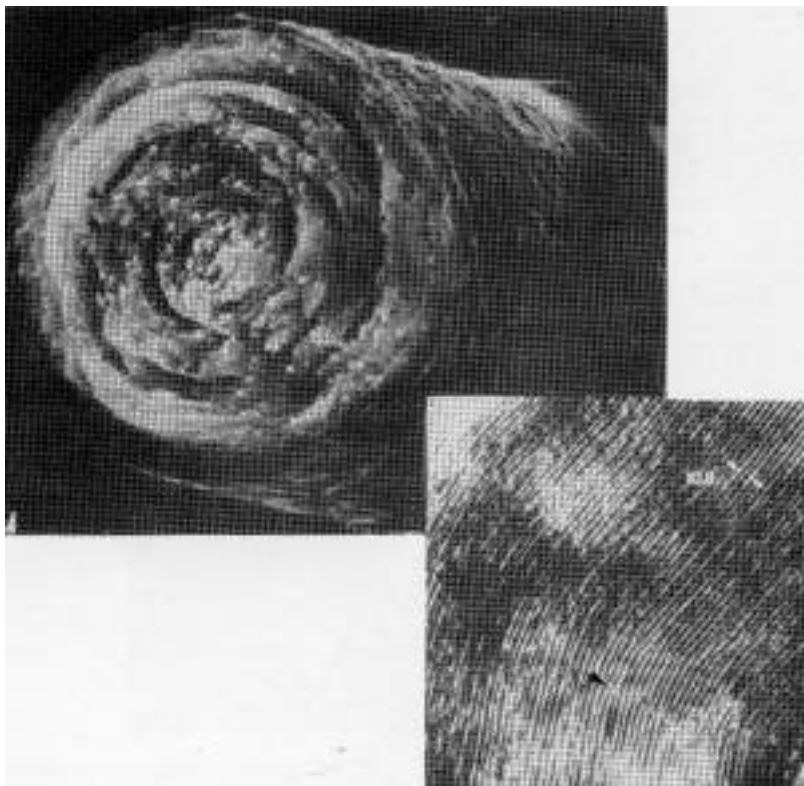
Oruro, Боливия



# Трубчатые кристаллы - точилинит

Несоразмерные структуры встречаются не только у некоторых силикатов и сульфидов, но и у смешанно-слоистых сульфид – гидроксидов. **Точилинит**  $2 \text{Fe}_{1-x}\text{S} \cdot 1.735 (\text{Mg,Al})(\text{OH})_{2-3}$

**Точилинит из метеорита**



**Точилинит.**  
**Пенсильвания, США.**  
Высокоразрешающая  
электронная микроскопия

# Кристаллы – двойники роста

Двойники - закономерные срастания двух или более кристаллов одного вещества по определённым законам симметрии. Двойники I рода (двойники отражения) - один индивид может быть выведен из другого путём отражения в двойниковой плоскости; двойниковая плоскость параллельна определенной кристаллографической сетке обеих кристаллов. Двойники II рода (двойники вращения) - один индивид может быть выведен из другого поворотом на  $180^\circ$  вокруг двойниковой оси; двойниковая ось параллельна определенному ряду узлов решётки обоих кристаллов. По облику - двойники срастания и двойники прорастания. По числу двойникующихся индивидов - двойники, тройники, четверники, шестерники, восьмерники и полисинтетические двойники. Двойниковая граница самая низкоэнергетичная в сравнении с другими, произвольными границами между индивидами. Двойники кристаллов могут образовываться в процессе роста, при фазовых превращениях, при механическом воздействии извне, в том числе под действием электрических разрядов.

Три наиболее важных фактора – предпосылки двойникования.

1). Фактор структуры – в данной кристаллической постройке найдётся одна или несколько кристаллографических плоскостей как правило с простыми индексами, которые могут с минимальными искажениями геометрии прилегающих к ней координационных полиэдров служить плоскостью



# Кристаллы – двойники роста

двойникования (пограничным слоем, двойниковым швом). Термины «пограничный слой» или «двойниковый шов» предпочтительнее, чем «плоскость двойникования», так как двойникование может осуществляться как с помощью плоскости, так и с помощью осей и центра инверсии.

2). Химический фактор – наличие в химической системе, в которой растёт данный кристалл, химических элементов, подходящих по своим кристаллохимическим параметрам (заряд, радиус, поляризуемость...) для специфических позиций вблизи и на плоскости пограничного слоя. Иногда эту роль играют химические элементы, входящие в структуру монокристалла, чаще – элементы-примеси. Роль примесных химических элементов в формировании пограничного слоя может быть решающей.

3). Фактор физико-химических параметров роста кристалла. Ростовые двойники обычно возникают при кинетическом режиме кристаллизации. Выявлена связь между ярко выраженной секториальностью и сильным ростовым двойникованием.

**Двойники роста** называются первичными двойниками.

Двойниковые пластинки у них обычно правильной формы, толстые, следуют через весь кристалл в отличие от двойников полиморфных превращений и двойников деформации.

# Кристаллы – двойники роста

## Флюорит – двойники прорастания по (111)



# Кристаллы – двойники роста

## Флюорит – двойники прорастания по (111)



«Гиганты» - двойники и «карлики» - монокристаллы



# Кристаллы – двойники роста

Алмаз – двойники прорастания по (111)

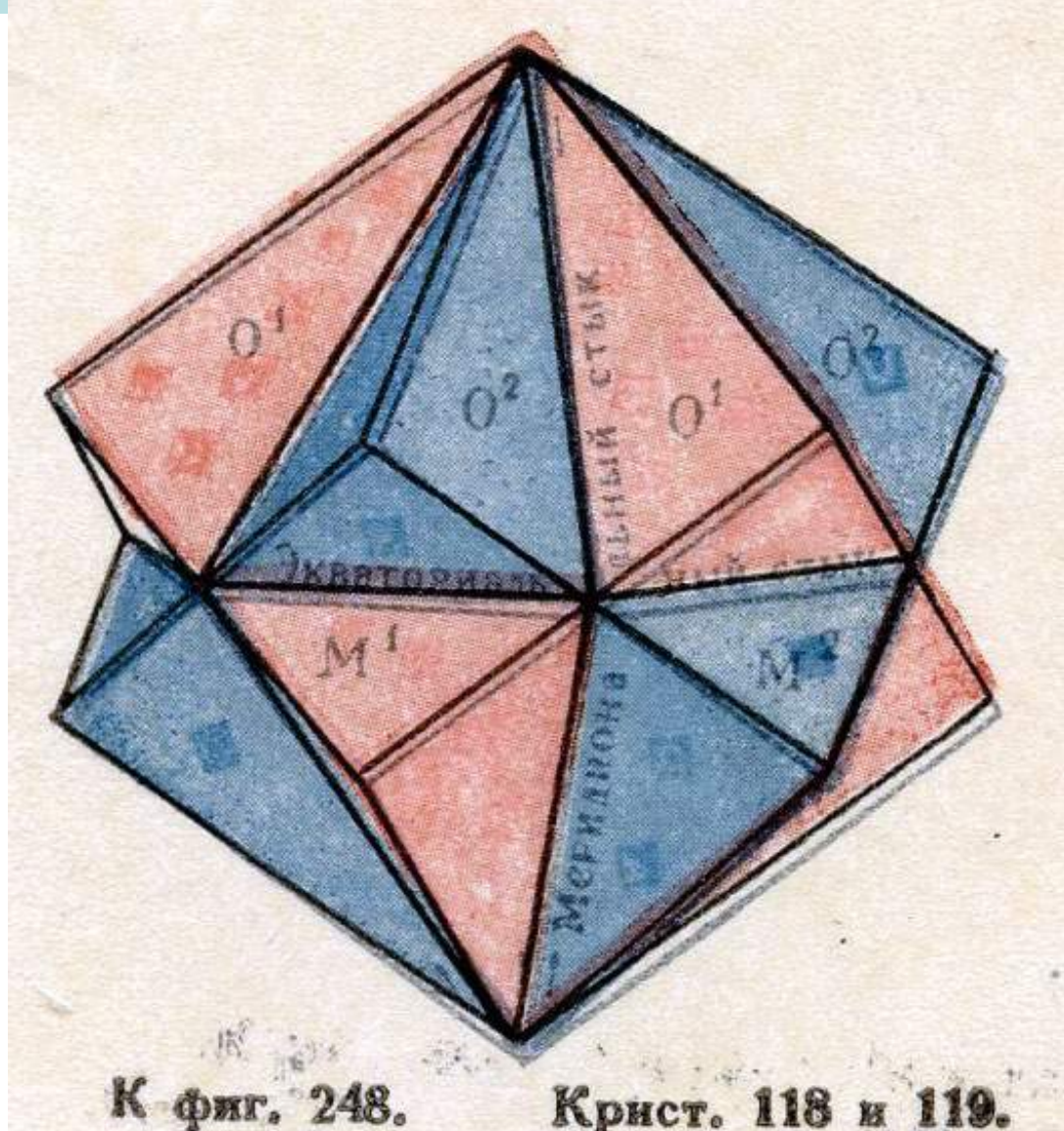


Рисунок А.Е. Ферсмана (Ферсман, 1955).

# Кристаллы – двойники роста

## Двойники прорастания по (111)



Торианит



Лопарит.  
Ньюорк-Пахк, Хибиньы



# Кристаллы – двойники роста. Ставролит

## Двойники прорастания по (031). Кейвы, Кольский п-ов





# Кристаллы – двойники роста

## Двойники прорастания по (031). Ставролит



Бретань, Франция



Морбиан, Франция

Zillertal,  
Австрийские  
Альпы



Pilar, New Mexico, США



# Кристаллы – двойники роста. Ставролит

## Двойники прорастания по (231). Кейвы, Кольский п-ов





# Кристаллы – двойники роста. Гипс

Двойники – срастания. Ласточкин хвост

148x51 мм.  
Керчь



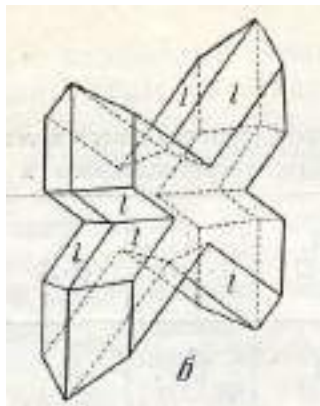
Монматр, Париж





# Кристаллы – двойники роста

Гипс



Двойник-  
проращение

Гипсовые розы –  
полисинтетические  
двойники. Chihuahua, Мексика



Двойник - проращение

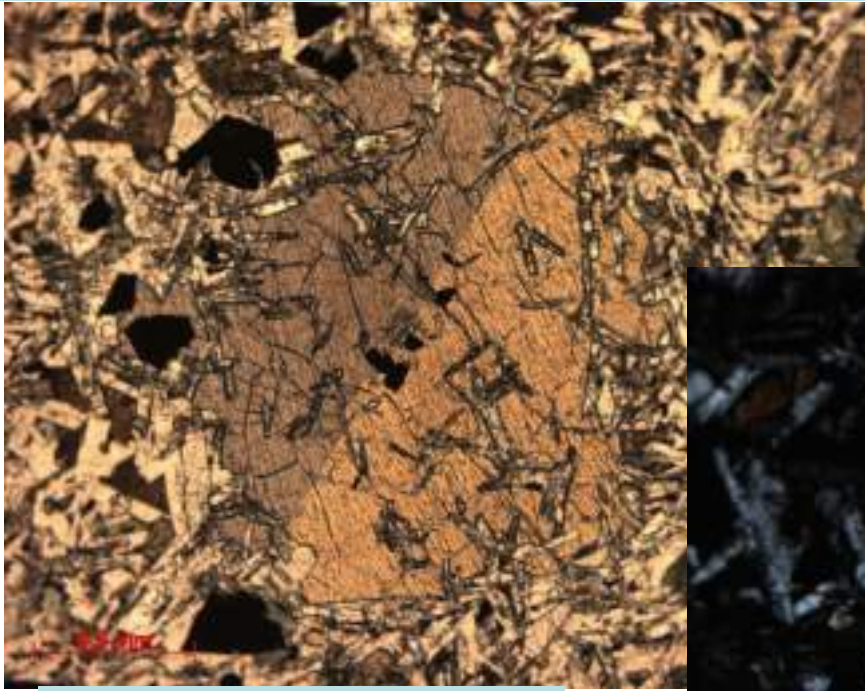


760x230x100 мм. Savnic, Румыния

# Кристаллы – двойники роста

## Авгит – двойник срастания

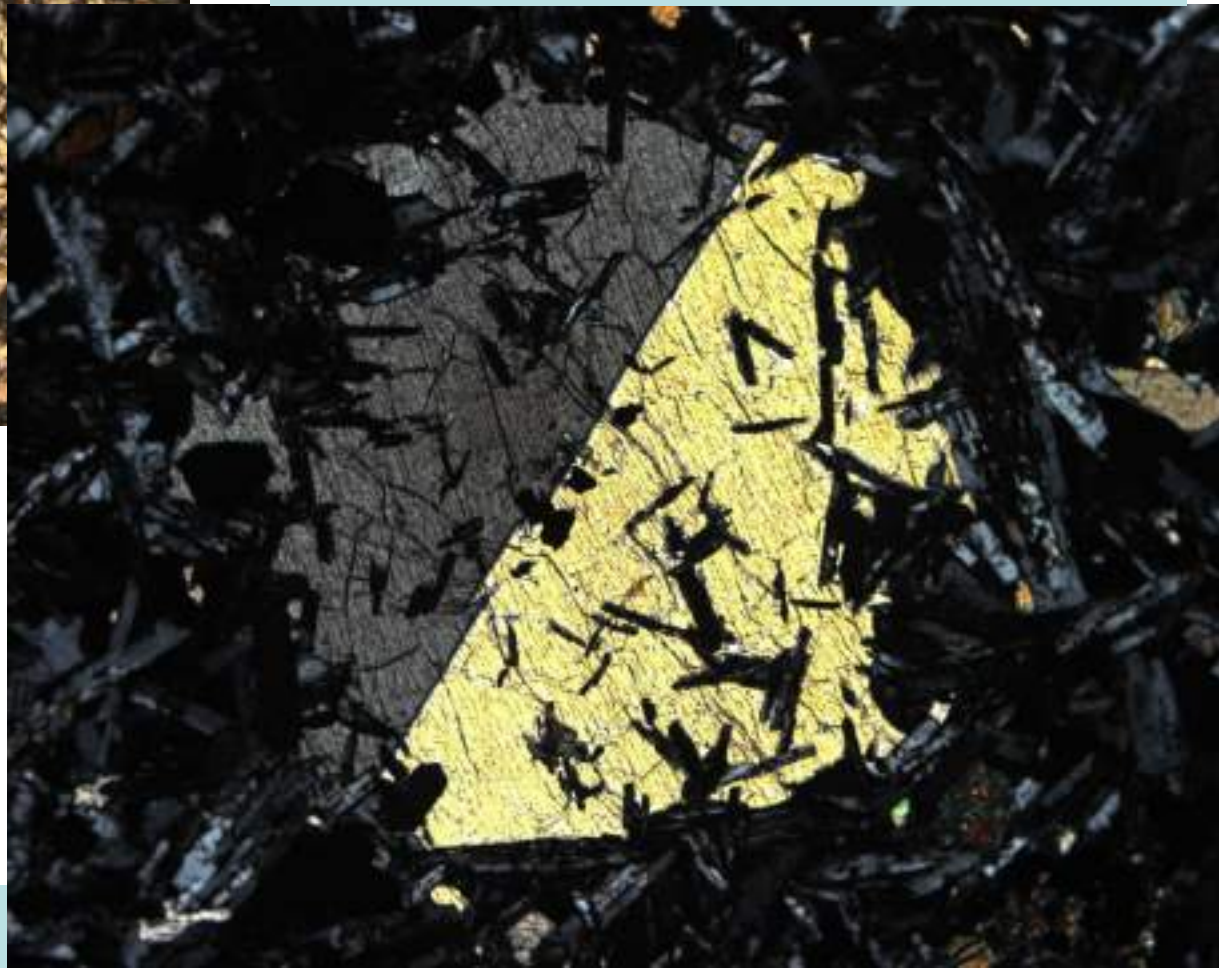
Габбро-долериты  
с пойкилоофитовой структурой.  
Норильское рудное поле,  
Таймырский интрузив.  
Скважина Св-26, глуб. 1630 м



Шлиф при 1 николе

Колл. и фото  
Э.М. Спиридонова

Шлиф, николи х

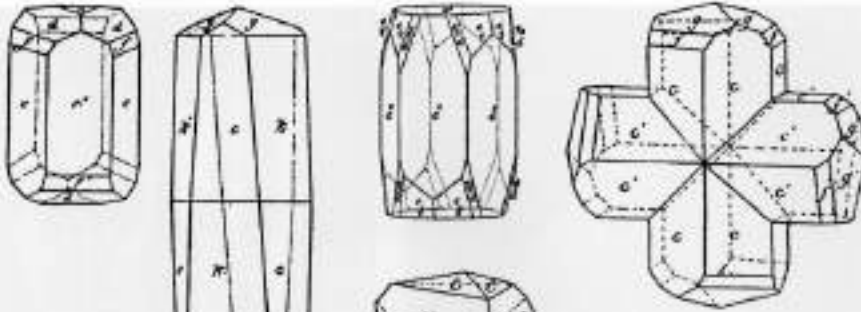




# Кристаллы – двойники роста

## Кальцит

Calche von Freiberg: die beiden Kristalle zeichnete Hauy (1823). Der rechte stammt von der Grube Himmelsfürst, Goldschmidt, Tafeln 42, 43.



Ein Zwilling von der Grube Himmelsfürst bei Freiberg, Goldschmidt, Tafel 46.

Drei Kristalle von Braunsdorf bei Freiberg, Goldschmidt, Tafeln 46, 47, 57.

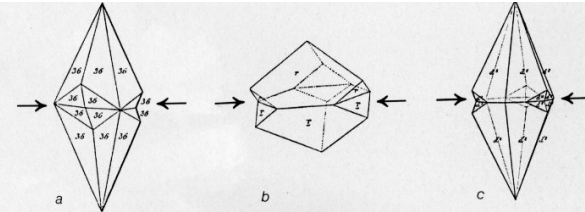


Fig. 13 a-c: Zwillings Ebene ist die Basis (0001); links und rechts Kristalle aus Derbyshire, der linke wurde von Bournon (1808) gezeichnet.

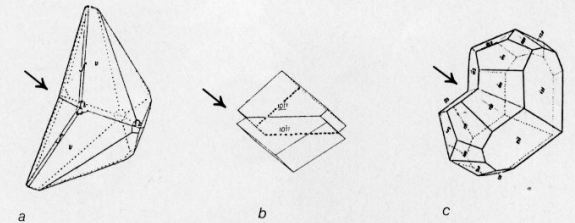


Fig. 14 a-c: Zwillinge nach dem "ersten stumpferen" Rhomboeder (0112) als Zwillings Ebene; links ein Kristall aus Joplin/Missouri nach Farrington 1900; Mitte: verzwilligtes Rhomboeder nach H. Strunz; rechts ein Kristall aus St. Andreasberg von Sella 1856.

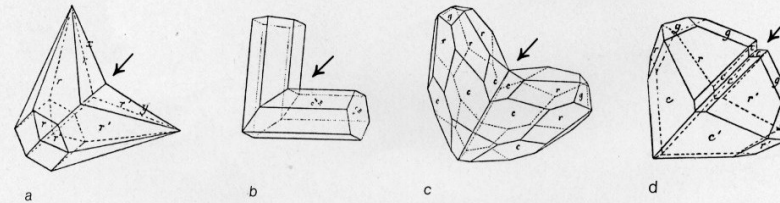
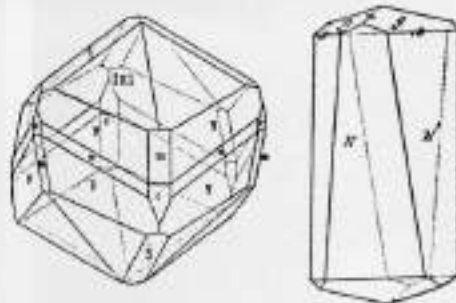
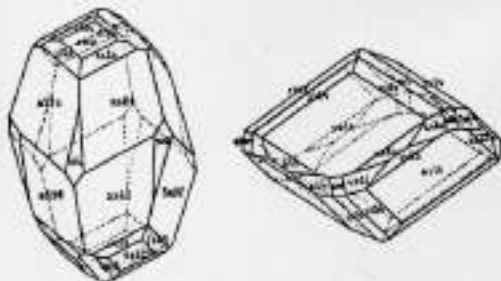
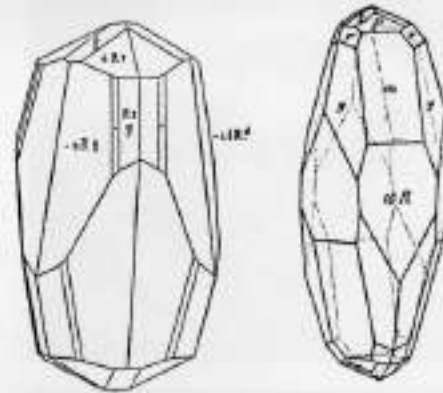
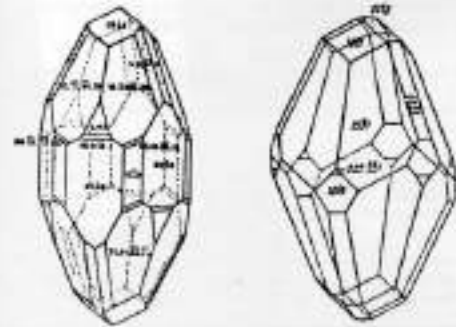
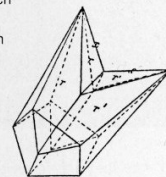


Fig. 15 a-d: Beispiele für Zwillinge nach dem positiven Haupt-Rhomboeder (1011): a und c sogenannte "herzförmige" Zwillinge von St. Andreasberg; ein "Schmetterlingszwilling", im englischen Sprachgebrauch "butterfly twin", aus Derbyshire, gezeichnet von Haidinger 1825. Alle Zeichnungen aus Goldschmidt.

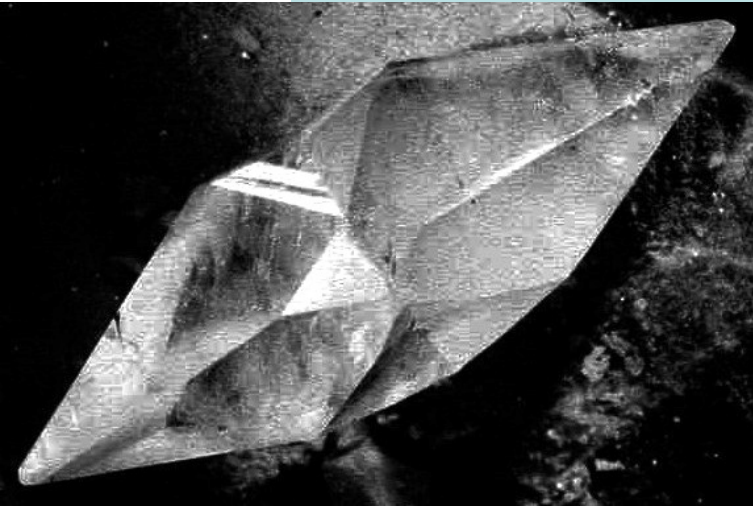
Fig. 16: Beispiel eines Zwillings nach (0221), einer Fläche des "nächst steileren" negativen Rhomboeders.





# Кристаллы – двойники роста

## Кальцит. Двойники срастания



108 мм.

55 мм.

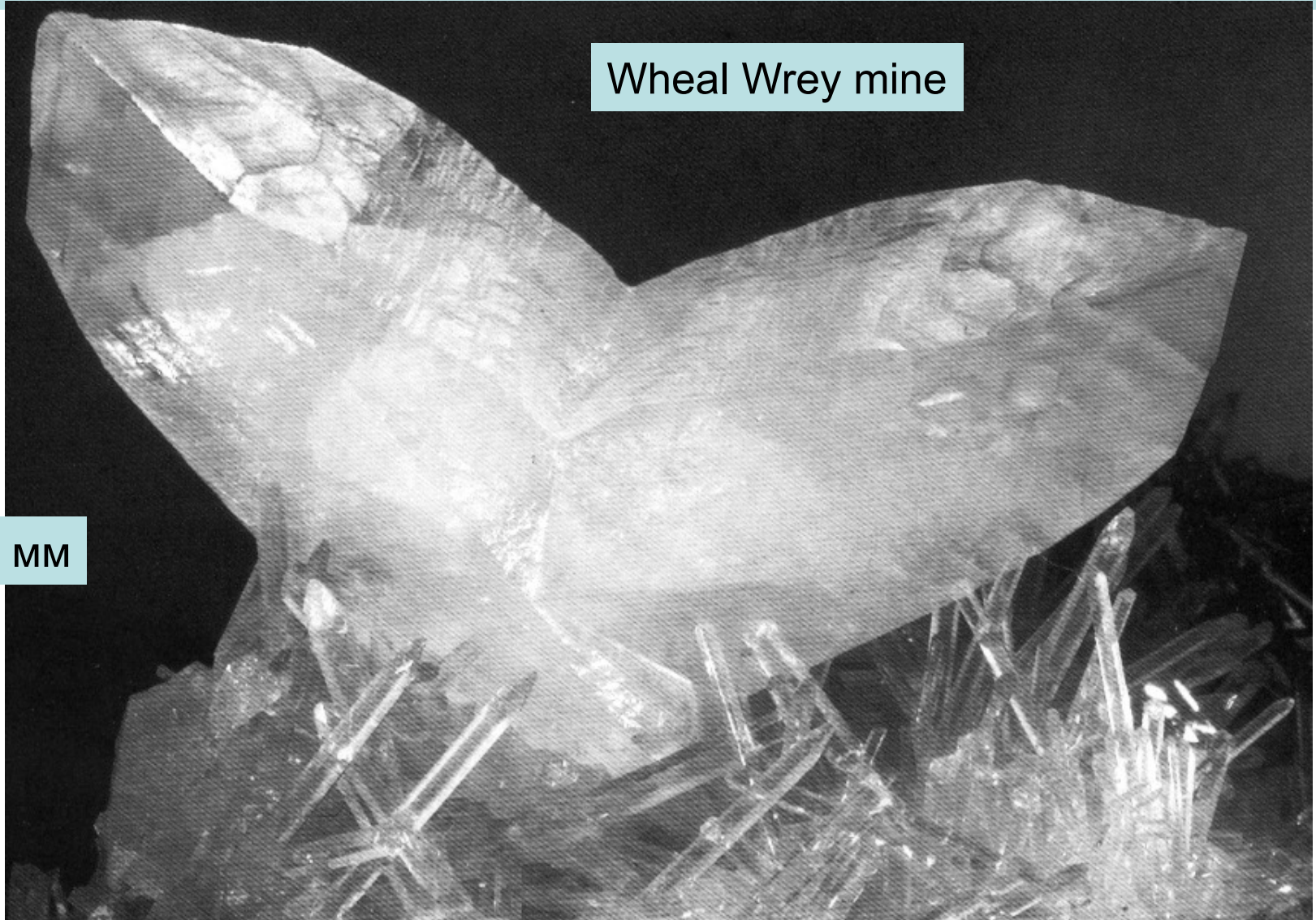
Brushy Creek mine,  
Миссури, США

# Кристаллы – двойники роста

## Кальцит. Двойники срастания и монокристаллы

Wheal Wrey mine

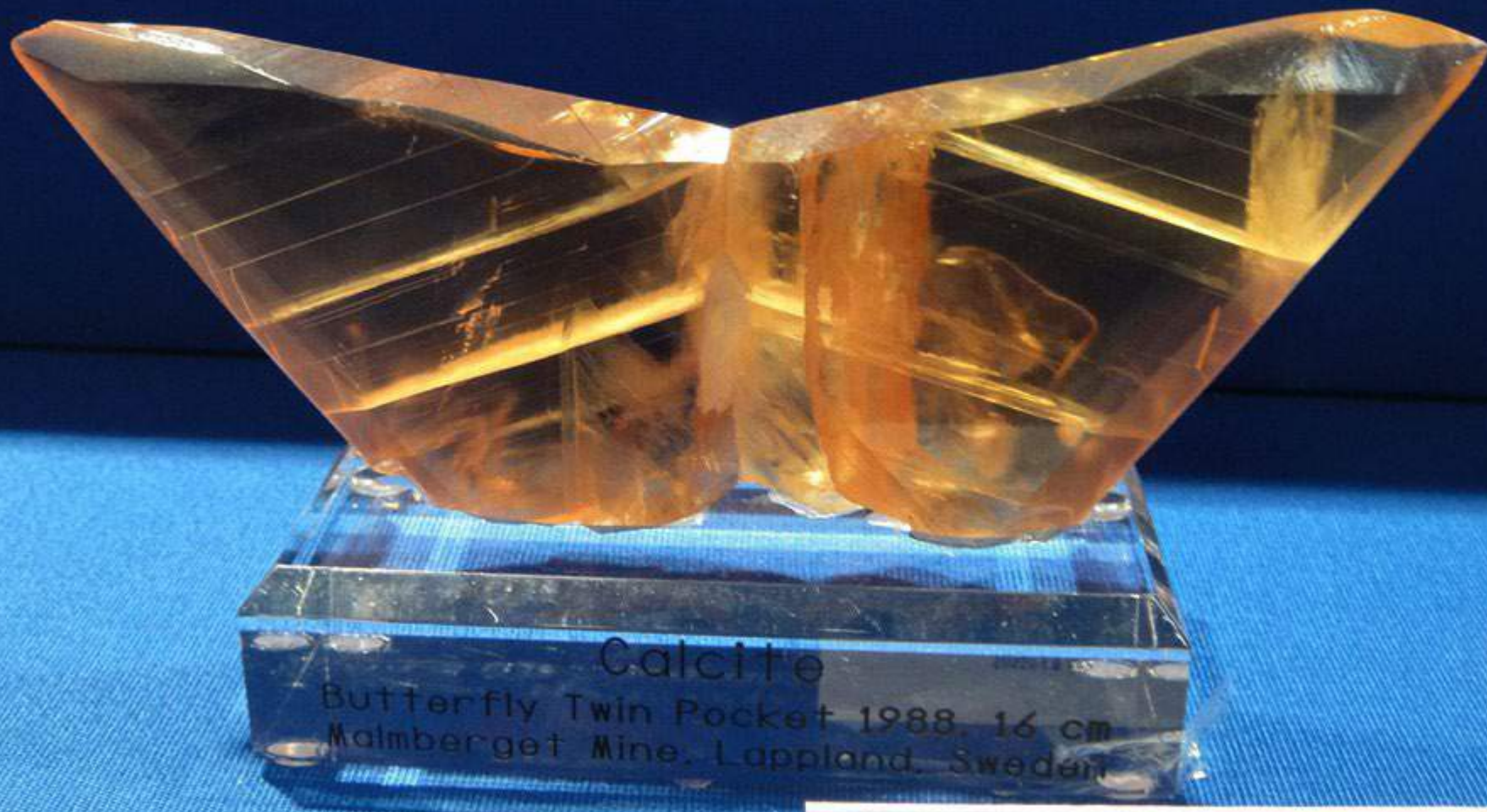
60 мм



Сравните размеры кристаллов – двойников и монокристаллов



# Кальцит. Двойник срастания – «бабочка»



Calcite  
Butterfly Twin Pocket 1988, 16 cm  
MalMBERGET Mine, Lappland, Sweden

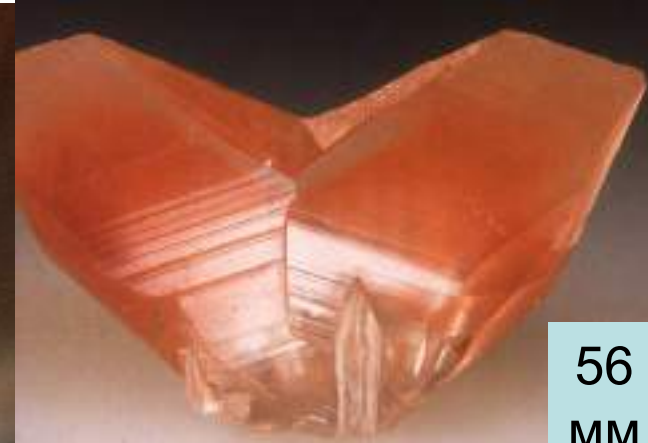
## Butterfly Twin Calcit

Fundort: MalMBERGET Mine, Gällivare,  
Lappland, Schweden, 1988



# Кристаллы – двойники роста

## Кальцит. Двойники срастания и монокристаллы



56  
мм

Лайпин, Хунань, Китай

Сравните размеры  
кристаллов – двойников  
и  
монокристаллов

# Кристаллы – двойники роста

## Кальцит. Двойники прорастания



400x200 мм

Джоплин, Миссури, США



Исландский шпат.  
Пудовый  
кристалл.  
Река Тура,  
Восточная  
Сибирь



Двойник  
типа  
baterfly.  
Egremont,  
Cumberland,  
Англия

Исландский  
шпат – гигант  
более 1500 мм.  
Вост. Сибирь





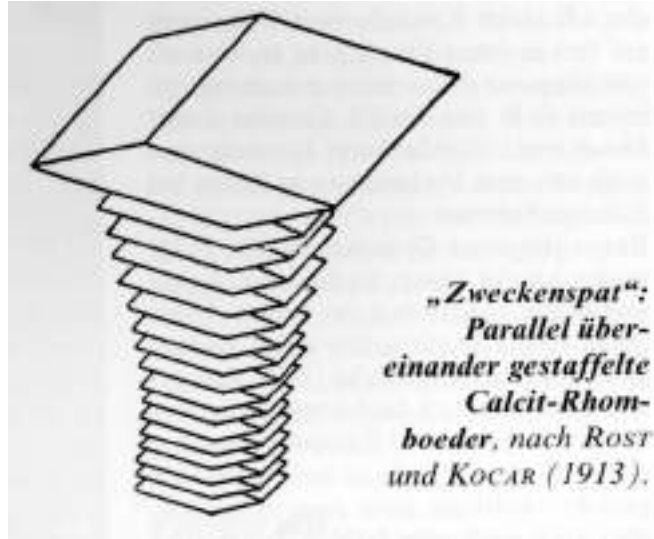
# Кристаллы – двойники роста

## Кальцит. Двойники срастания



53  
X  
36  
MM

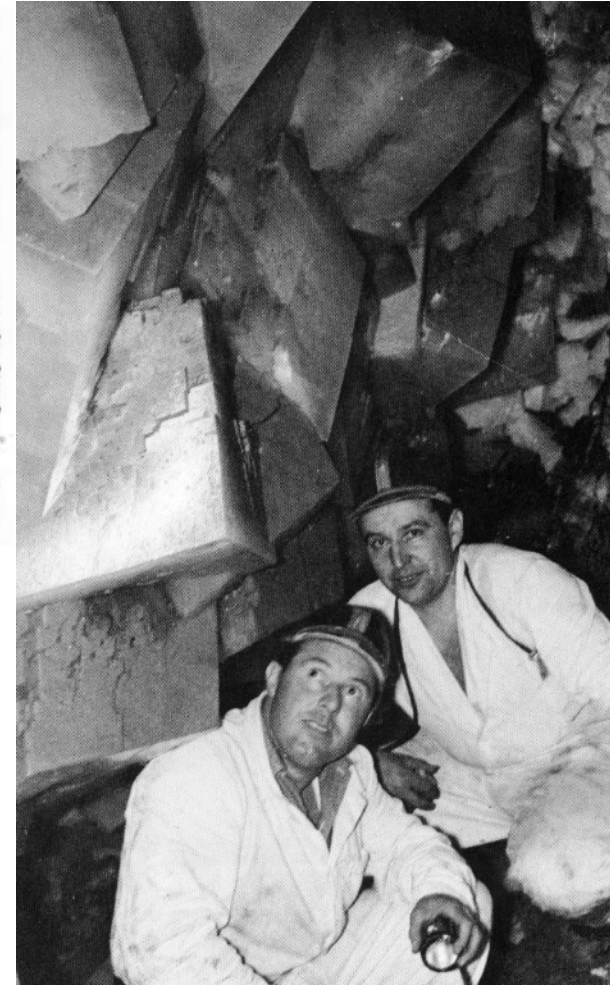
Charcas



Двойниковое срастание ромбоэдров типа «кошачий хвост». Пршибрам, Чехия



Zweckenspat-кальцит. Пршибрам, Чехия



Огромные двойники-срастания ромбоэдров

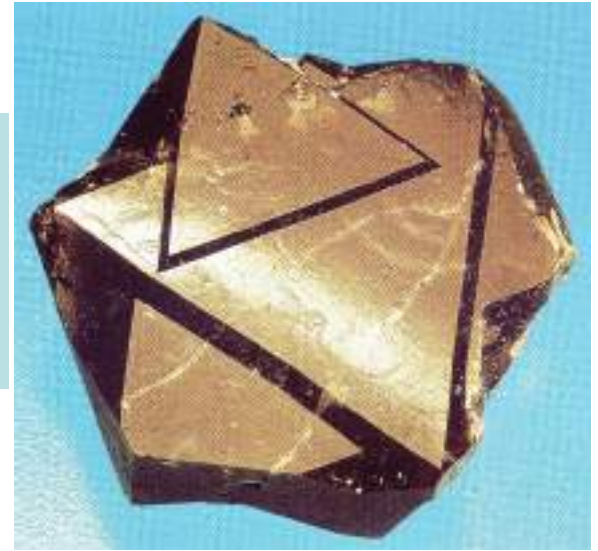


# Кристаллы – двойники роста

## Доломит. Двойники прорастания



Fe-доломит  
30x30 мм.  
Загрос,  
Иран



70x61 мм.  
Canterra Azkarate,  
Наварра, Испания



188 мм

Brumado,  
Bahia,  
Бразилия



150 мм

# Кристаллы – двойники роста



**Доломит.  
Двойник  
прорастания**

65 мм.  
Еуги,  
Наварра,  
Испания

# Кристаллы – двойники роста



Церуссит –  
двойники  
срастания.  
Цумеб

«Гигант» - двойник  
(75 мм) и  
«карлики» -  
монокристаллы



# Кристаллы – двойники роста

Церуссит – двойники срастания. Цумеб



# Кристаллы – двойники роста.

# Кварц

Двойникование в кварце. Хотя в шлифах двойники в кварце из кварц-содержащих пород не видны, тем не менее в кристаллах кварца двойникование весьма обычно и хорошо наблюдается. Двойникование происходит по нескольким законам; ниже перечислены наиболее обычные из них.

- 1) Двойниковая ось  $z$ , двойниковая плоскость  $\{10\bar{1}0\}$ ; дофнейский закон.
- 2) Двойниковая плоскость  $\{11\bar{2}0\}$ ; бразильский закон.
- 3) Двойниковая плоскость  $\{11\bar{2}\bar{2}\}$ ; японский закон.
- 4) Двойниковая плоскость  $\{10\bar{1}1\}$ ; эстерельский закон.
- 5) Двойниковая плоскость  $\{10\bar{1}2\}$ ; сардинский закон.
- 6) Двойниковая плоскость  $\{11\bar{2}1\}$ ; брейтгауптский закон.
- 7) Комбинированный дофнейско-бразильский закон.

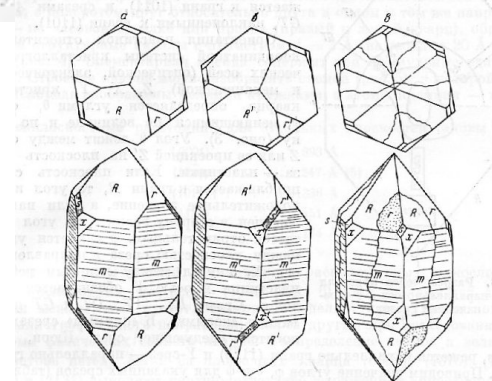


Рис. 2. Энантиоморфизм кристаллов кварца и символы простых форм  
 $a$  – левый кварц;  $b$  – правый кварц; симметрия обеих форм кристаллов кварца одинакова ( $C_2$ );  $a'$  – кристалл левого кварца, сплюснутый по дофнейскому закону;  $R$  – положительный, основной ромбодр  $\{10\bar{1}1\}$  или  $\{100\}$ ;  $r$  – отрицательный ромбодр  $\{1\bar{1}0\}$  или  $\{2\bar{1}2\}$ ;  $m$  – гексагональная призма  $\{10\bar{1}0\}$  или  $\{2\bar{1}\bar{1}\}$ ;  $a$  – левая тригональная призма  $\{2\bar{1}0\}$  или  $\{1\bar{1}0\}$ ;  $a'$  – правая тригональная призма  $\{210\}$  или  $\{110\}$ ;  $x$  – левый трипенодр  $\{0\bar{1}1\}$  или  $\{4\bar{2}\bar{1}\}$ ;  $x'$  – правый трипенодр  $\{011\}$  или  $\{42\bar{1}\}$ ;  $s$  – левая бипирамида  $\{21\bar{1}1\}$  или  $\{5\bar{2}\bar{1}\}$ ;  $s'$  – правая бипирамида  $\{1\bar{1}21\}$  или  $\{4\bar{1}2\}$ ;  $c$  – пинаккод или базис  $\{0001\}$  или  $\{111\}$

# Кристаллы – двойники роста

## Кварц

Бразильские  
двойники ростовые



Дофинейские  
двойники  
полиморфного  
превращения  
высокий кварц –  
низкий кварц

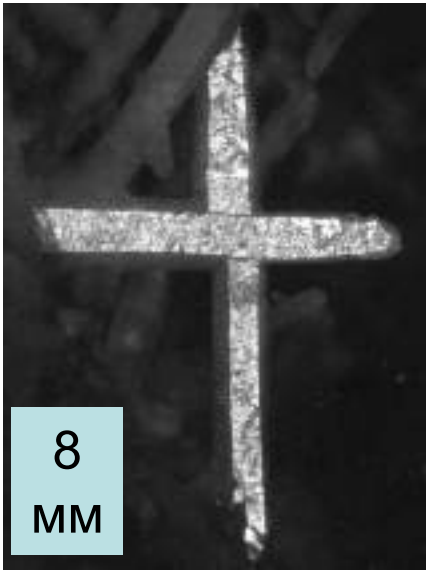
Рис. 10. Границы двойников, полученные травлением кварца на плоскости (0001)

*a* — по бразильскому закону; *b* — по дофинейскому закону



# Кристаллы – двойники роста

## Кварц. Двойники срастания. Японский закон



На агрегате  
рудных минералов

# Кристаллы – двойники роста

Кварц-аметист. Двойники срастания. Японский закон



30 мм. Сравните размер кристалла-двойника и монокристаллов



Piedra Prada, Las Vigas, Мексика



# Кристаллы – двойники роста

## Кварц. Двойники срастания. Японский закон



70 мм. Раух-кварц –  
двойник и монокристаллы



90 мм. Цитрин.  
Полярный  
Урал



Tiro Estrella mine,  
Lincoln County,  
New Mexico,  
США



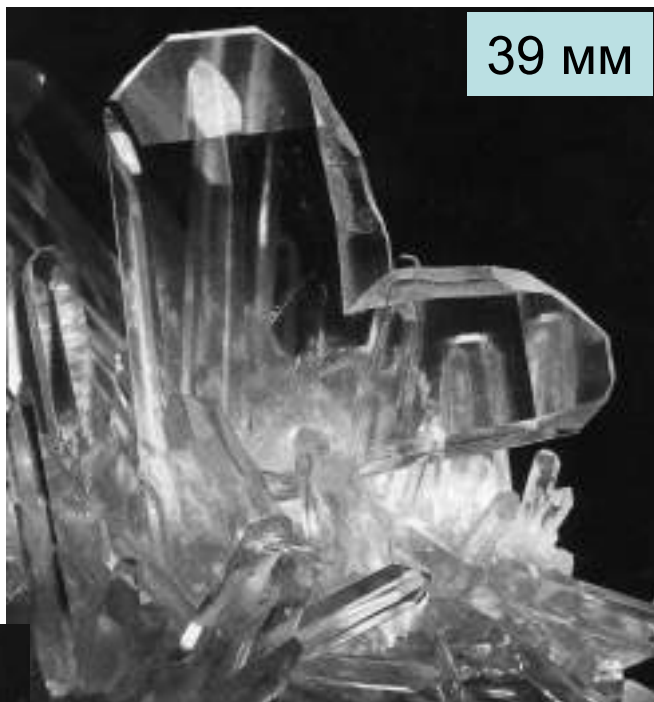
# Кристаллы – двойники роста

Кварц. Двойники срастания по японскому закону и монокристаллы



30 мм. Huaron, Перу

Mount Ida, Арканзас, США



39 мм

Rivoirands, Франция



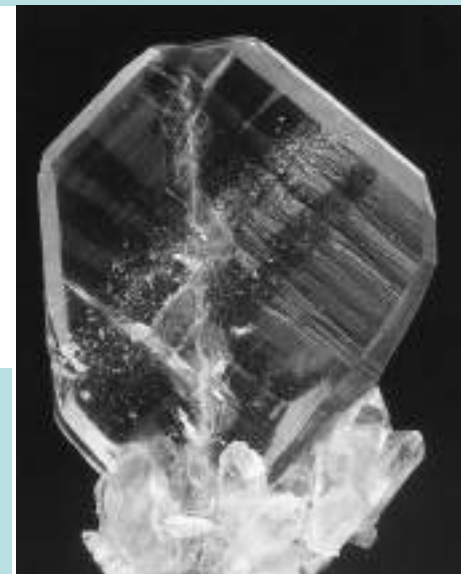
40 мм.

Montgomery County,  
Арканзас, США



50  
мм

49 мм.  
Jefferson County,  
New York, США



# Кристаллы – двойники роста



**Кварц - морион.**

**Сложный двойник  
прорастания**

Гранитные пегматиты  
Бразилии.

Колл. музея «Земля и люди»,  
София.

Фото Э.М. Спиридонова и  
Н.Н. Жукова



# Кристаллы – двойники роста



**Кварц - морион.**

**Сложный двойник  
прорастания**

Гранитные пегматиты  
Бразилии.

Колл. музея «Земля и люди»,  
София.

Фото Э.М. Спиридонова и  
Н.Н. Жукова



# Кристаллы – двойники роста

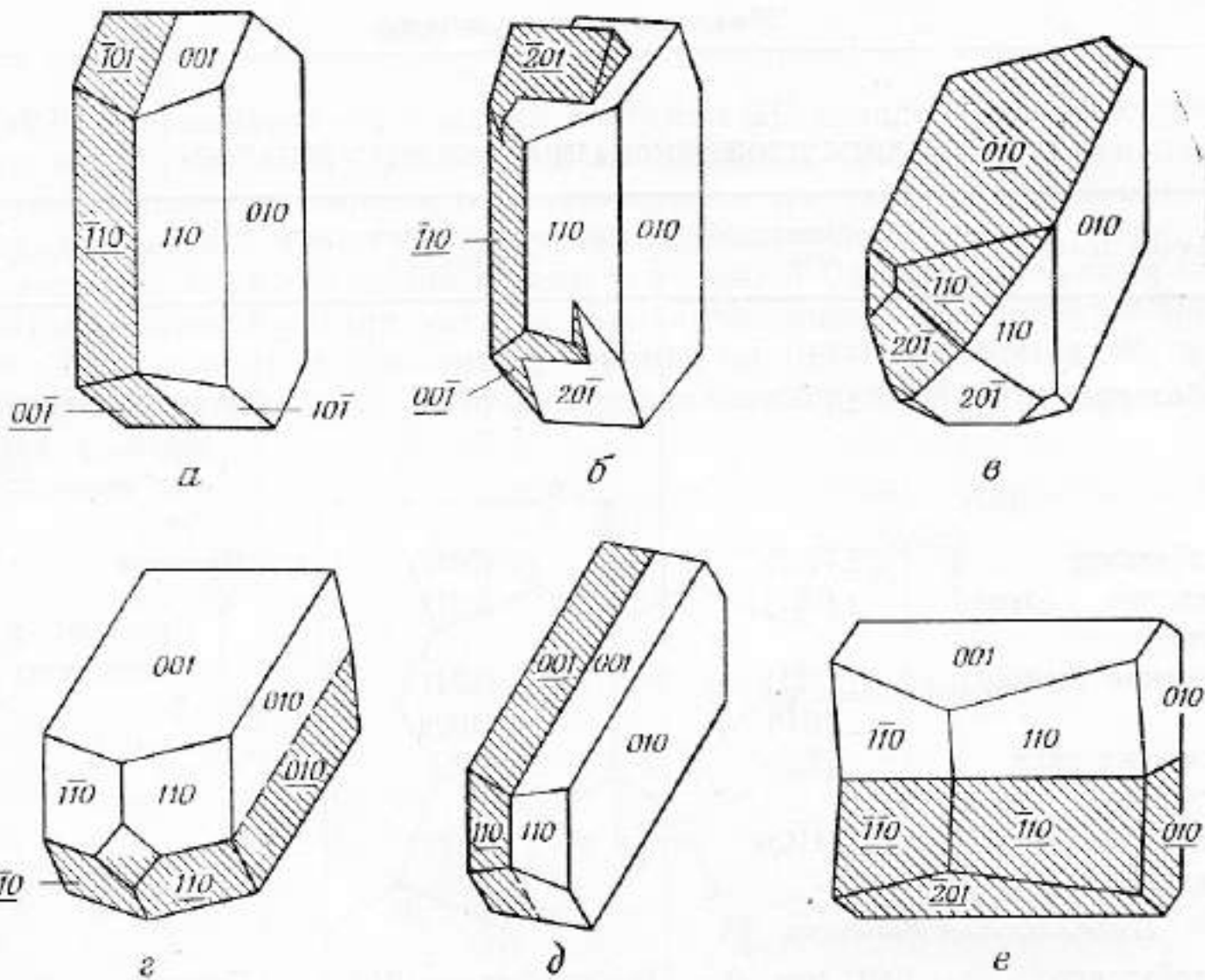
Кварц - аметист.

Полисинтетический двойник прорастания



Вес  
кристалла  
7 грамм

# Кристаллы – двойники роста полевых шпатов



Ф и Г. 10. Некоторые распространенные полевошпатовые двойники.  
 а — карлсбадский контактный двойник; б — карлсбадский двойник прорастания; в — бавенский двойник; г — манебахский двойник; д — альбитовый двойник; е — периклиновый двойник.



# Кристаллы – двойники роста

## Рутил. Двойники срастания коленчатые



До 16 мм.  
Kruzweiher,  
Fichtelgebirge



# Кристаллы – двойники роста

## Рутил. Двойники и восьмерники срастания

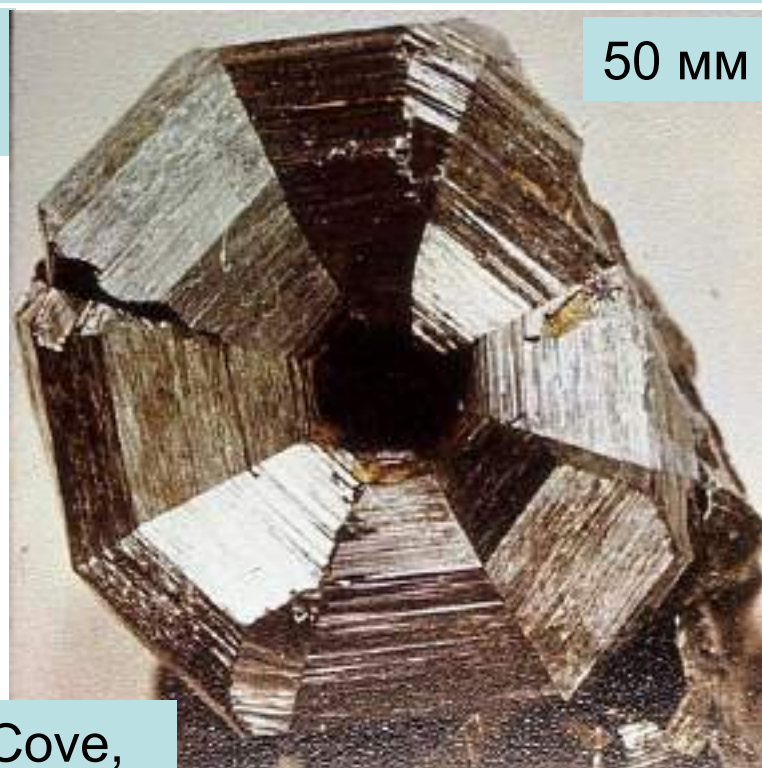


Альпийские жилы

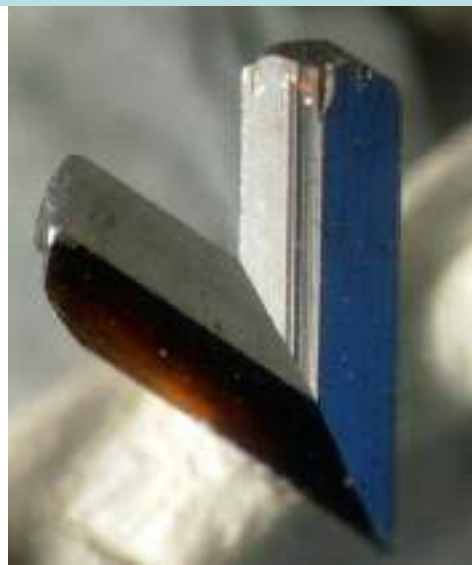


32  
мм

Magnet Cove,  
Арканзас, США



50 мм

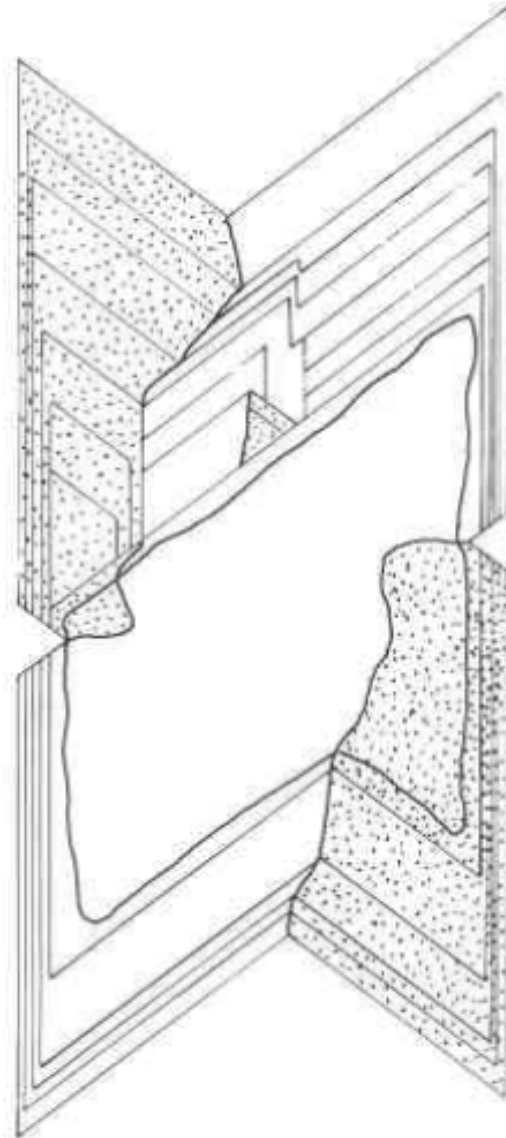
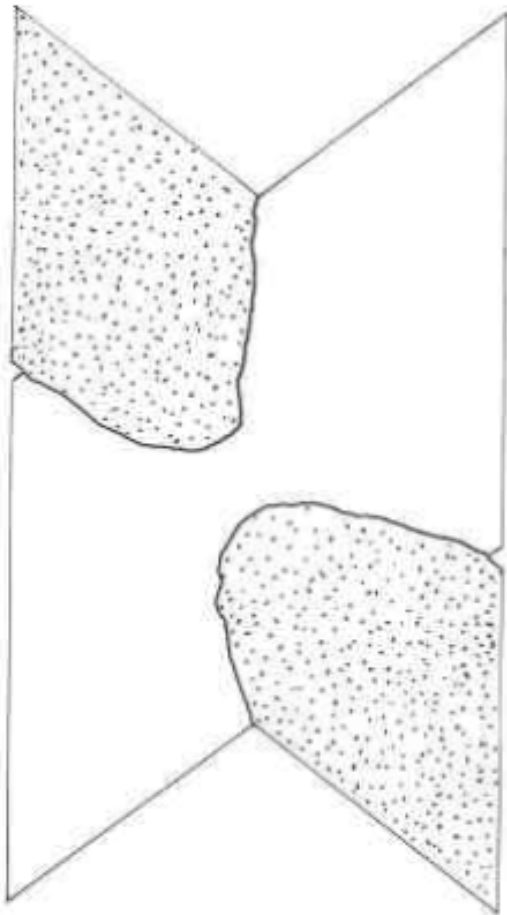


Кристалл – двойник 9 мм.  
Альпийские жилы.  
Биннталь.  
Швейцария



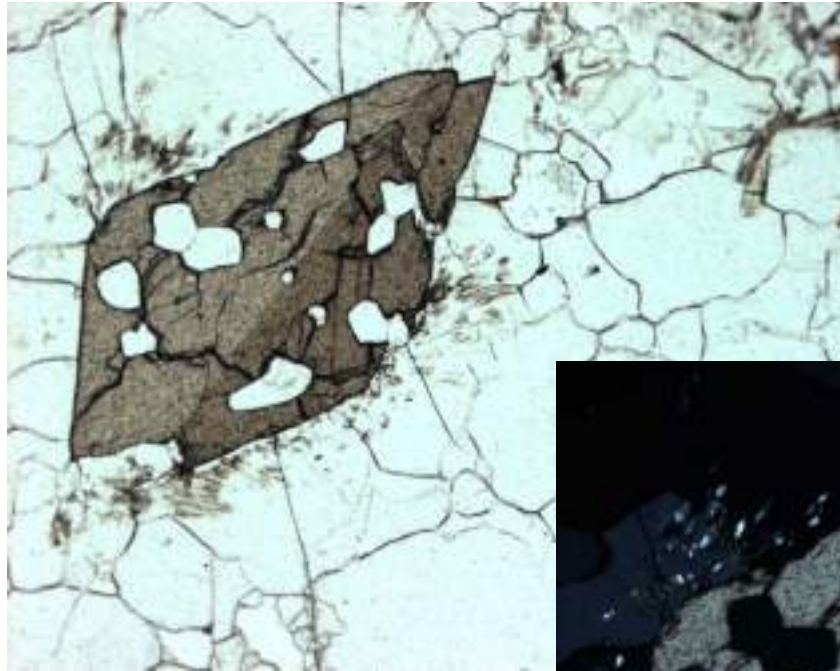
# Кристаллы – двойники роста

## Гипс. Двойники прорастания



# Кристаллы – двойники роста

## Титанит - сфен. Двойники срастания



При 1 николе

Николи х



Сфен-апатит-  
нефелиновые  
породы. Хибины



Альпийские жилы. Приполярный Урал

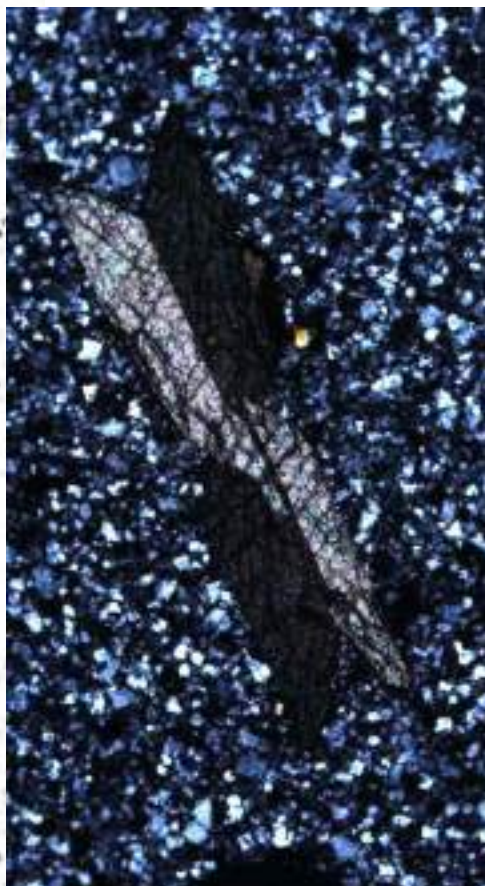


# Кристаллы – двойники роста

Титанит - сфен. Двойник прорастания.  
Сфен-апатит-нефелиновые породы. Хибины



При 1 николе



Николи х



При 1 николе

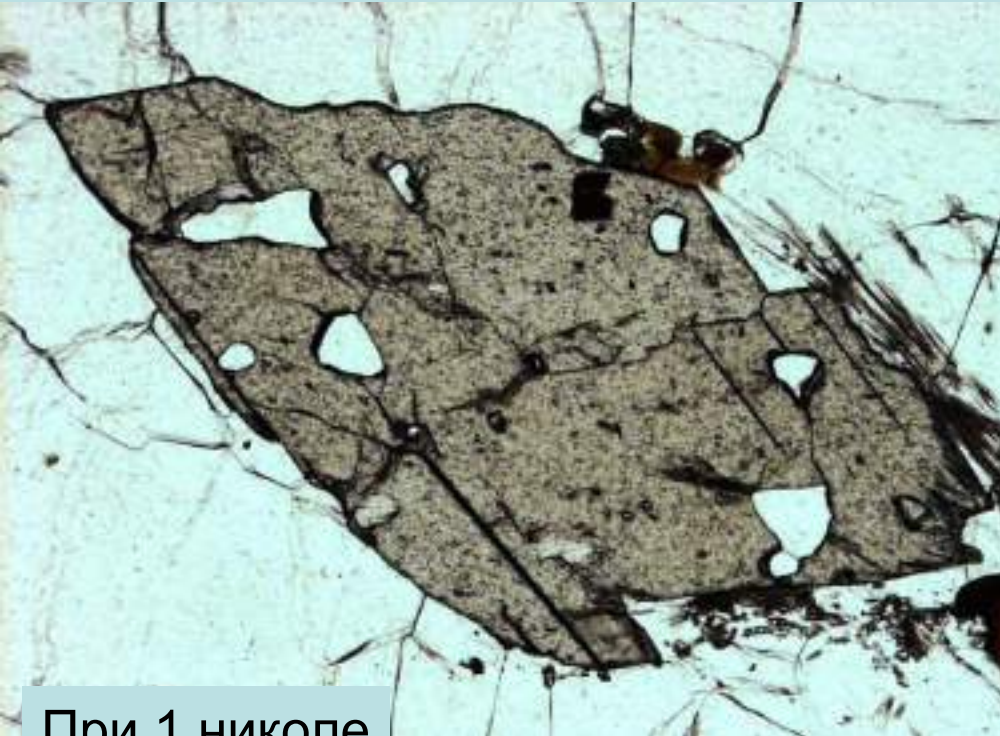


Николи х

Фото Э.М. Спиридонова

# Кристаллы – двойники роста

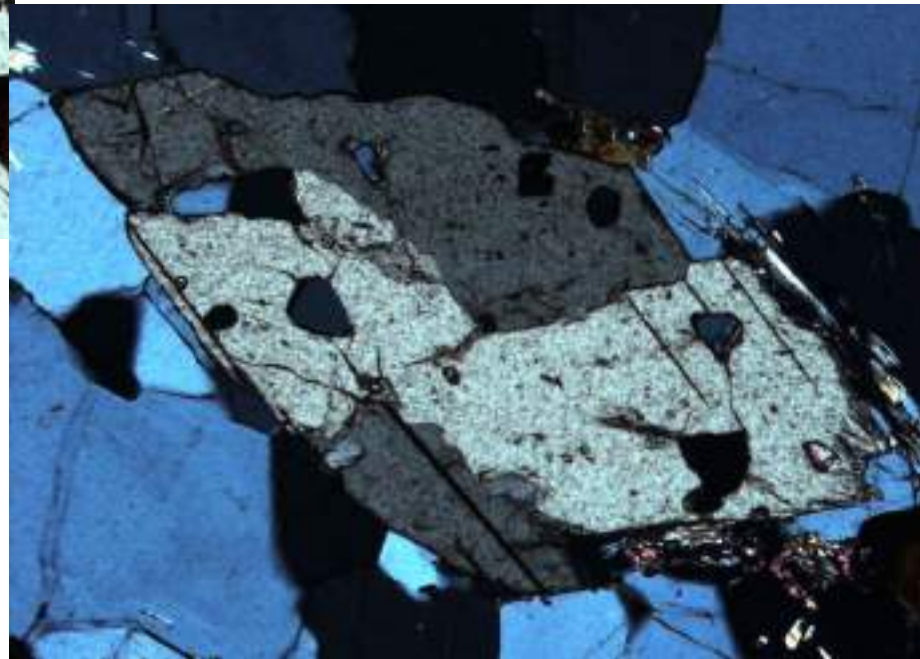
Титанит - сфен. Двойник прорастания.  
Сфен-апатит-нефелиновые породы. Хибины



При 1 николе

Фото ЭМС

Николи х

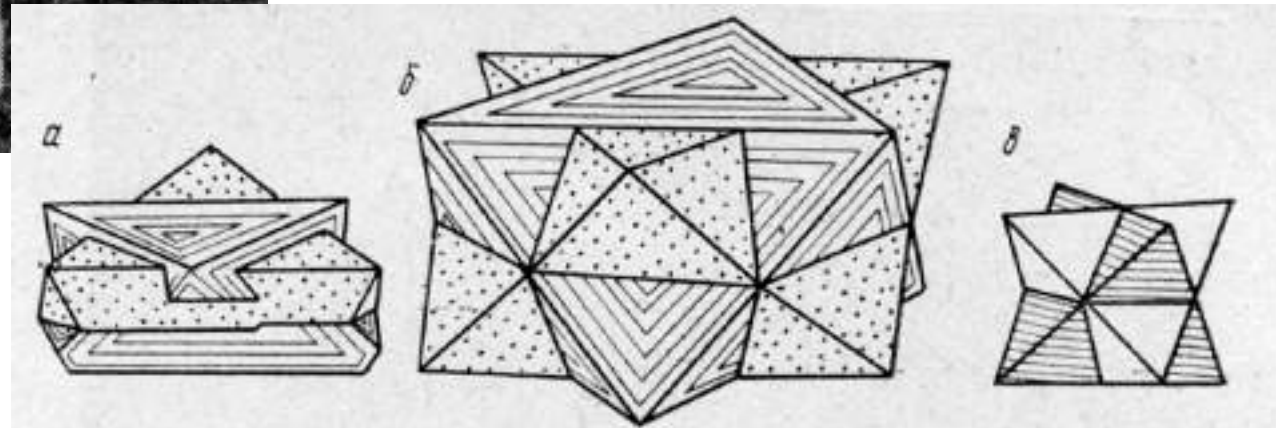
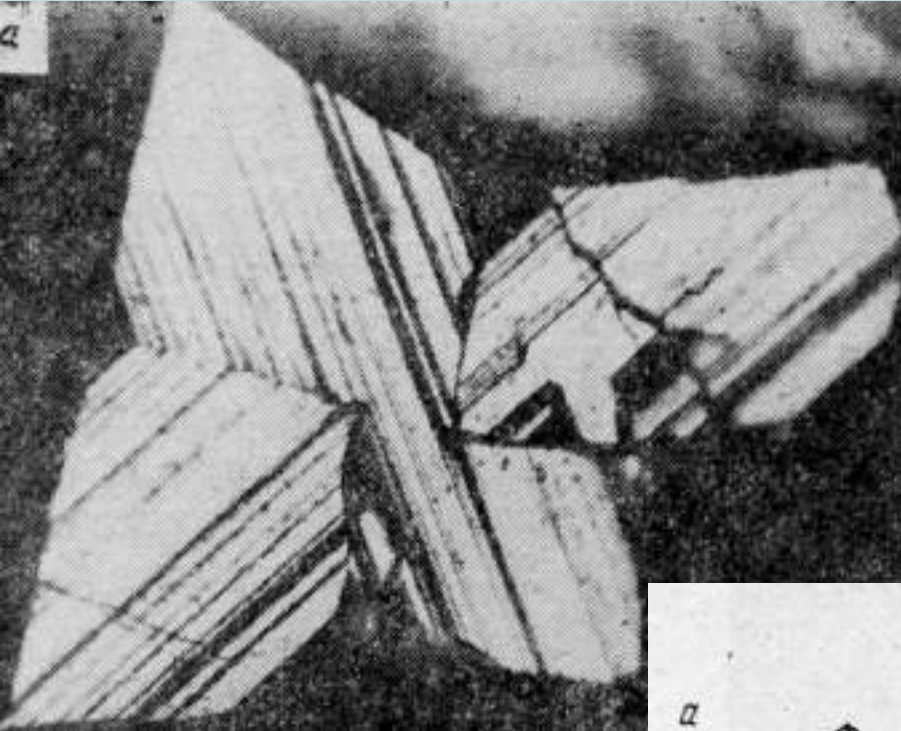




# Кристаллы – двойники роста

Магнетит - двойники прорастания.

Известковые скарны Тейского месторождения



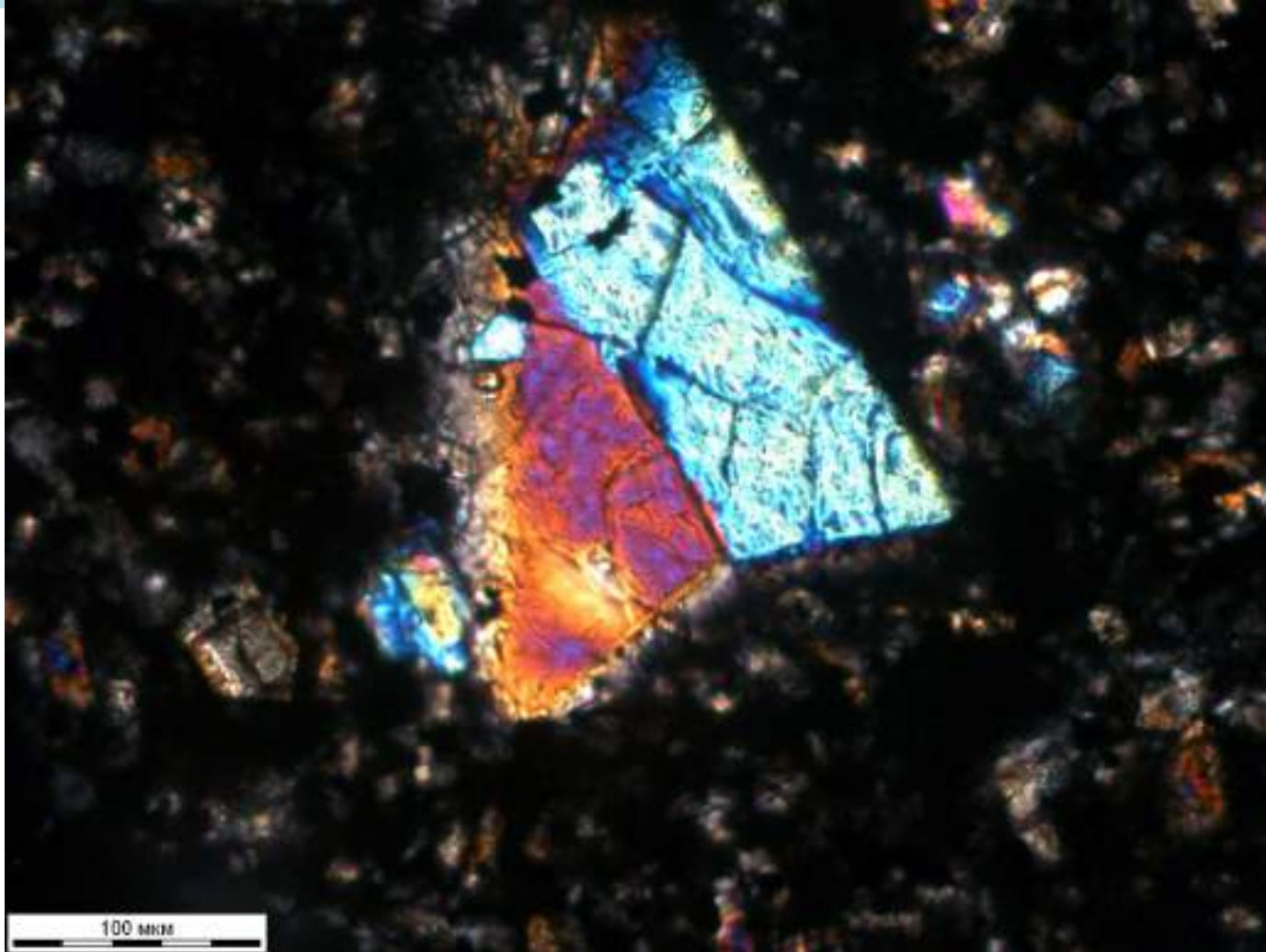
А.М. Дымкин, А.А. Пермяков «Онтогения магнетита»  
Свердловск: УНЦ АН СССР. 1984



# Кристаллы – двойники роста

Вкрапленник оливина - двойник срастания.

Щелочные меланобазальты. Озеро Далай-Нур, Монголия



Шлиф.  
Николи х

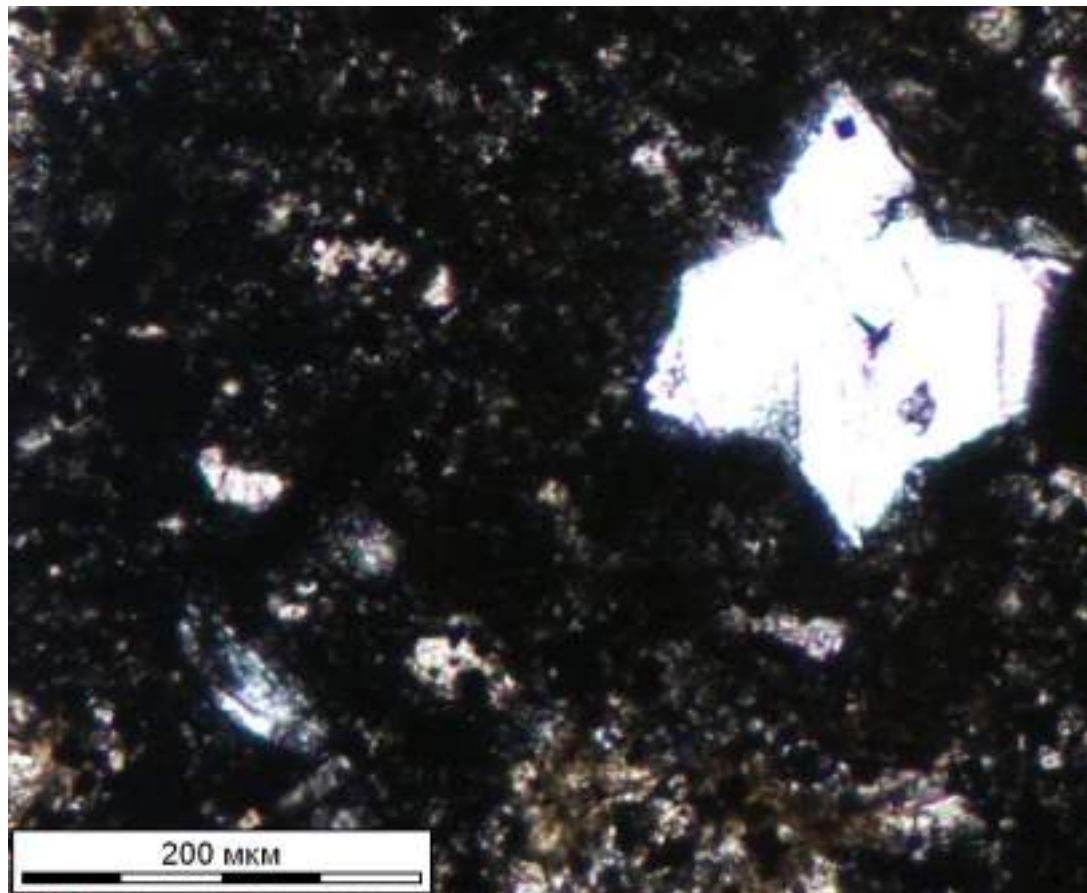
Колл. Н.М. Пржевальского на кафедре петрографии геолог. ф-та  
С-Петербургского ун-та. Фото ЭМС

# Кристаллы – двойники роста

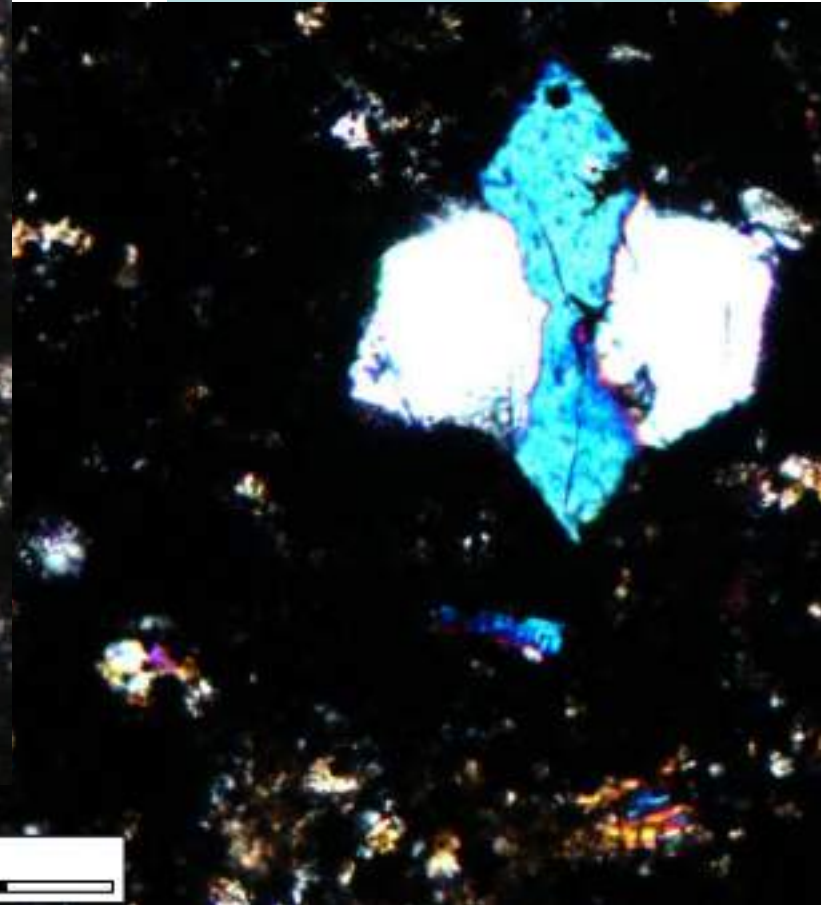
Вкрапленник оливина - двойник прорастания.

Щелочные меланобазальты. Озеро Далай-Нур, Монголия

Шлиф. Николи х



Шлиф при 1 николе



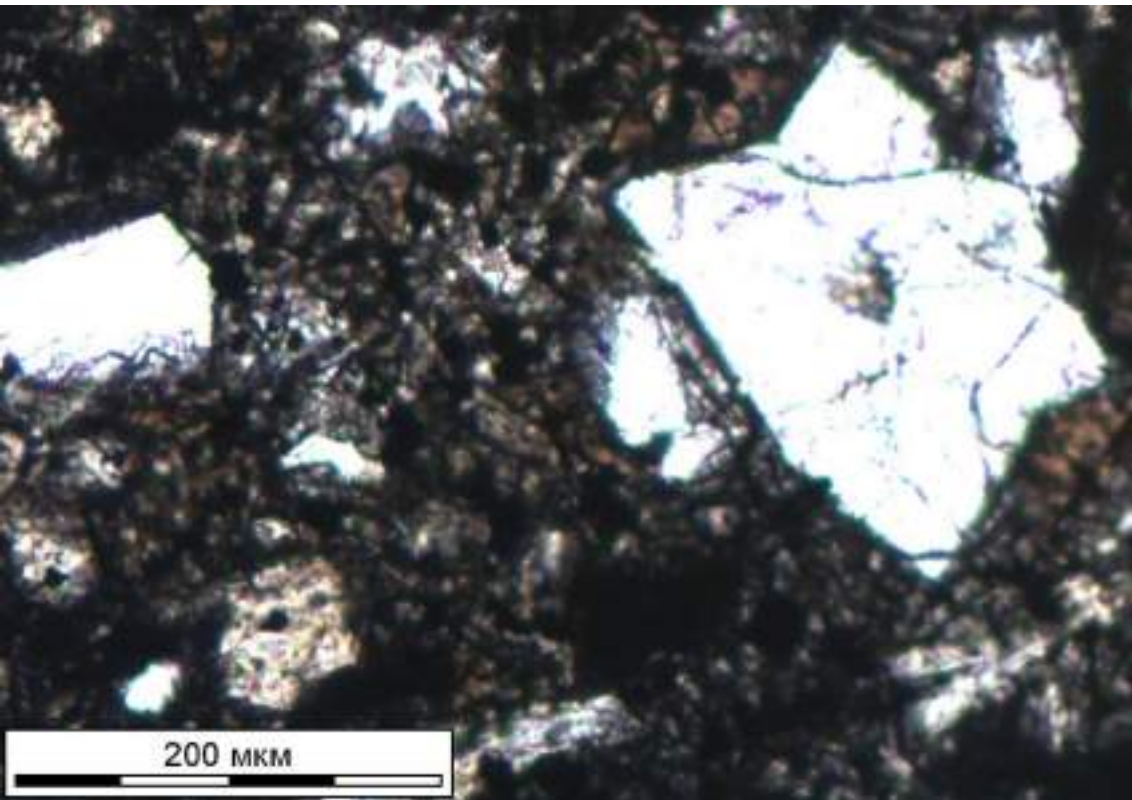
Колл. Н.М. Пржевальского на кафедре петрографии геолог. ф-та  
С-Петербургского ун-та. Фото ЭМС



# Кристаллы – двойники роста

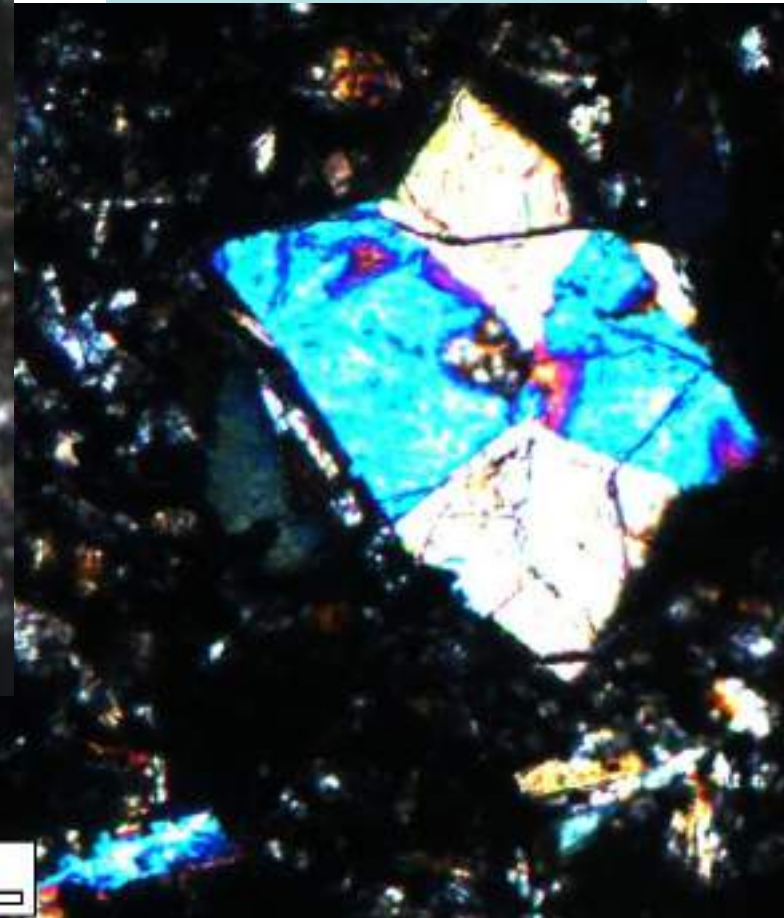
Вкрапленник оливина - двойник прорастания.

Щелочные меланобазальты. Озеро Далай-Нур, Монголия



Шлиф при 1 николе

Шлиф. Николи х



200 мкм

Колл. Н.М. Пржевальского на кафедре петрографии геолог. ф-та  
С-Петербургского ун-та. Фото ЭМС



# Кристаллы – двойники роста

Кристалл алмаза –  
двойник прорастания

Fig. 3.

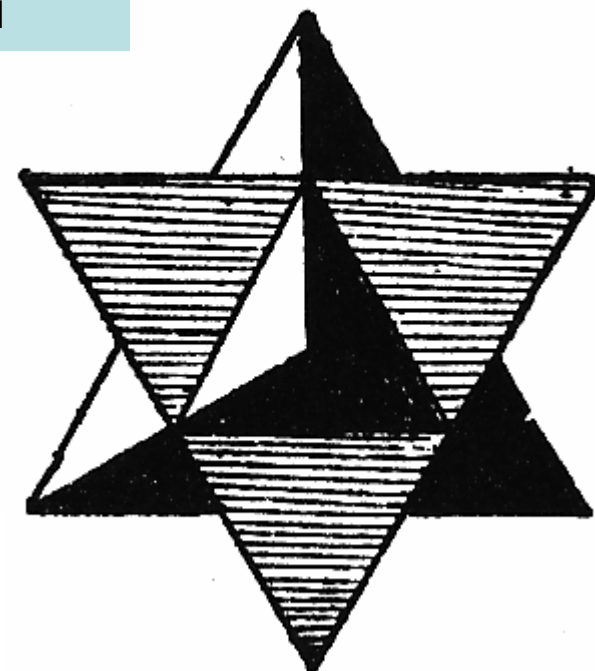
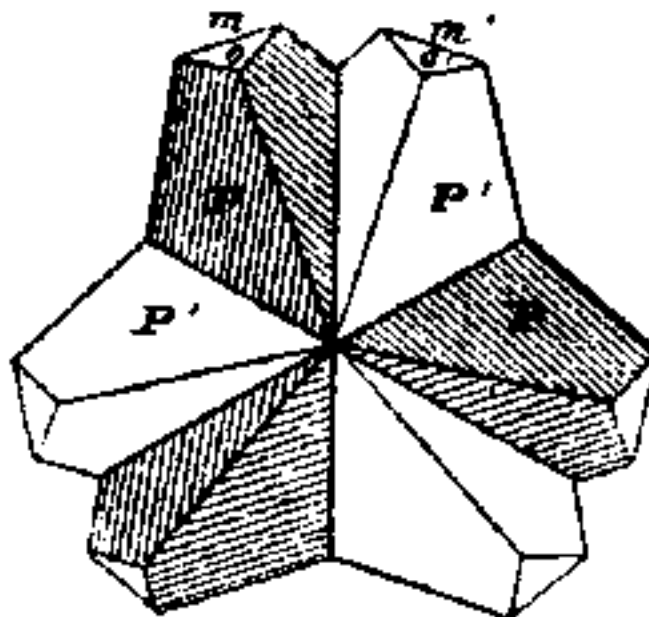


Fig. 10.

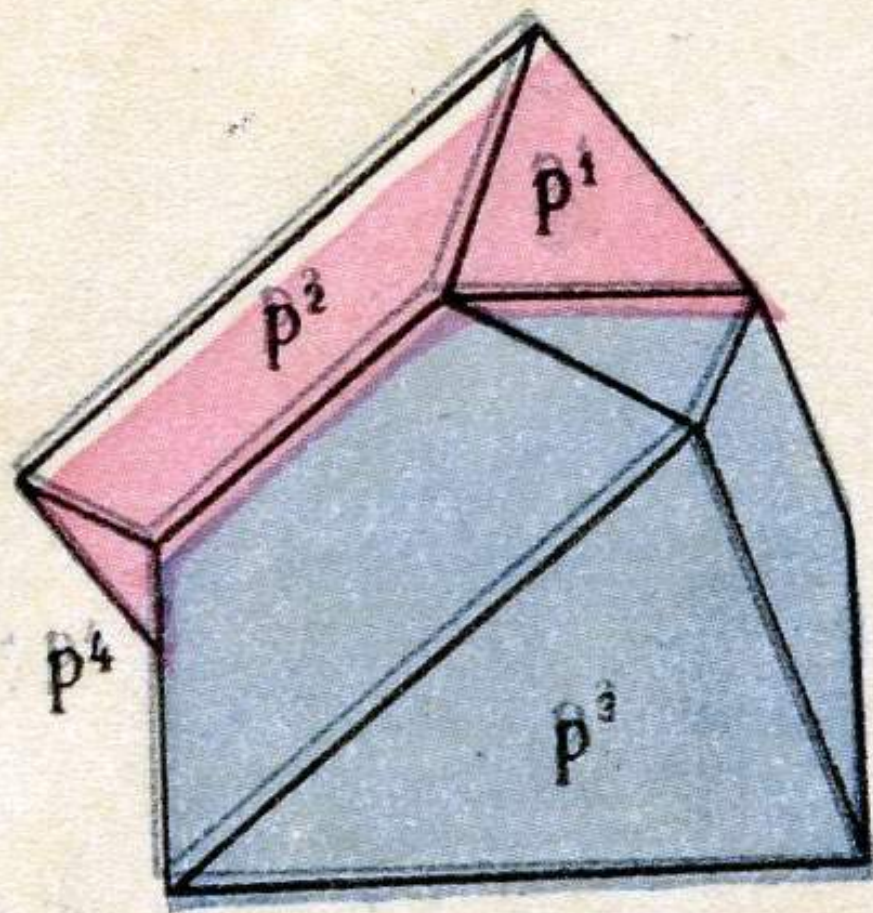


Двойник  
прорастания  
никельскуттерудита

Рисунки в книге  
V.M. Goldschmidt,  
1918 - 1923

# Кристаллы – двойники роста

Кристаллы алмаза – двойники срастания по шпинелевому закону



К Фиг. 230. Фиг. 230.

Кристалл 108. Крист. 108.

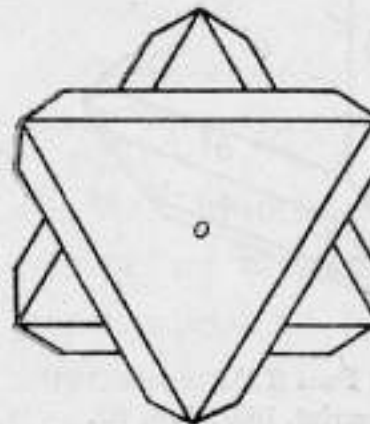
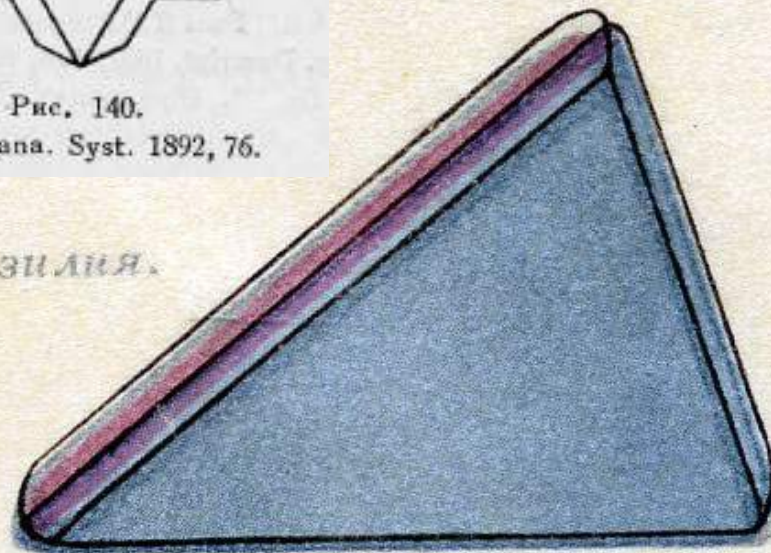


Рис. 140.  
E. S. Dana. Syst. 1892, 76.

*Бразилия.*



К Фиг. 233. Фиг. 233.

Кристалл 112. Крист. 112.



# Кристаллы – двойники роста

Кристалл алмаза – циклический двойник срастания

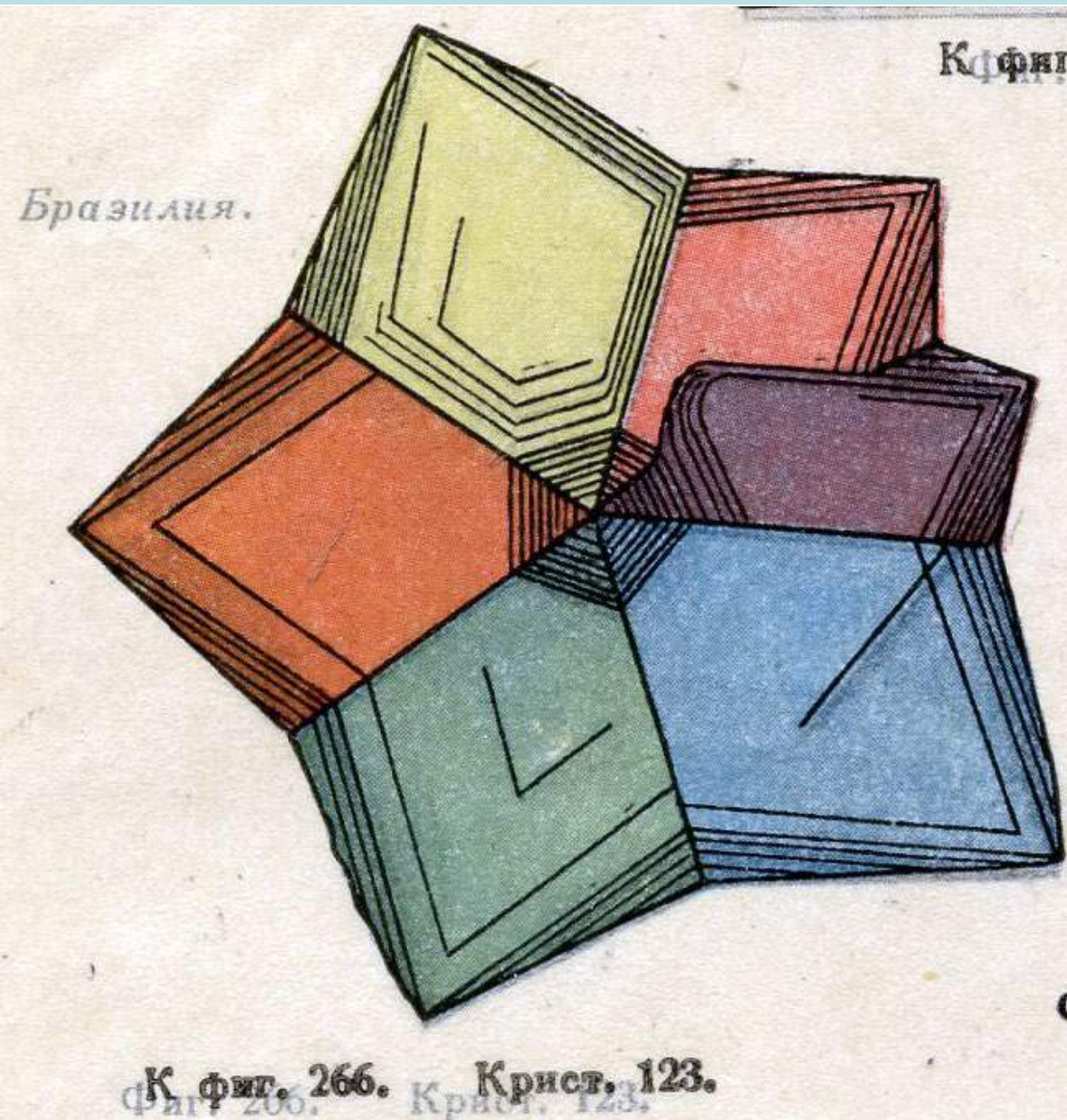


Рисунок  
А.Е. Ферсмана

А.Е. Ферсман  
Кристаллография  
алмаза.  
М.: изд. АН СССР.  
1955. 450 с.



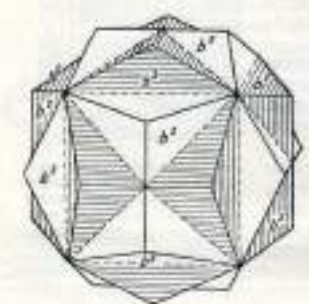
# Кристаллы – двойники роста

## Пирит. Двойники прорастания

La Riocha, Испания



50 мм

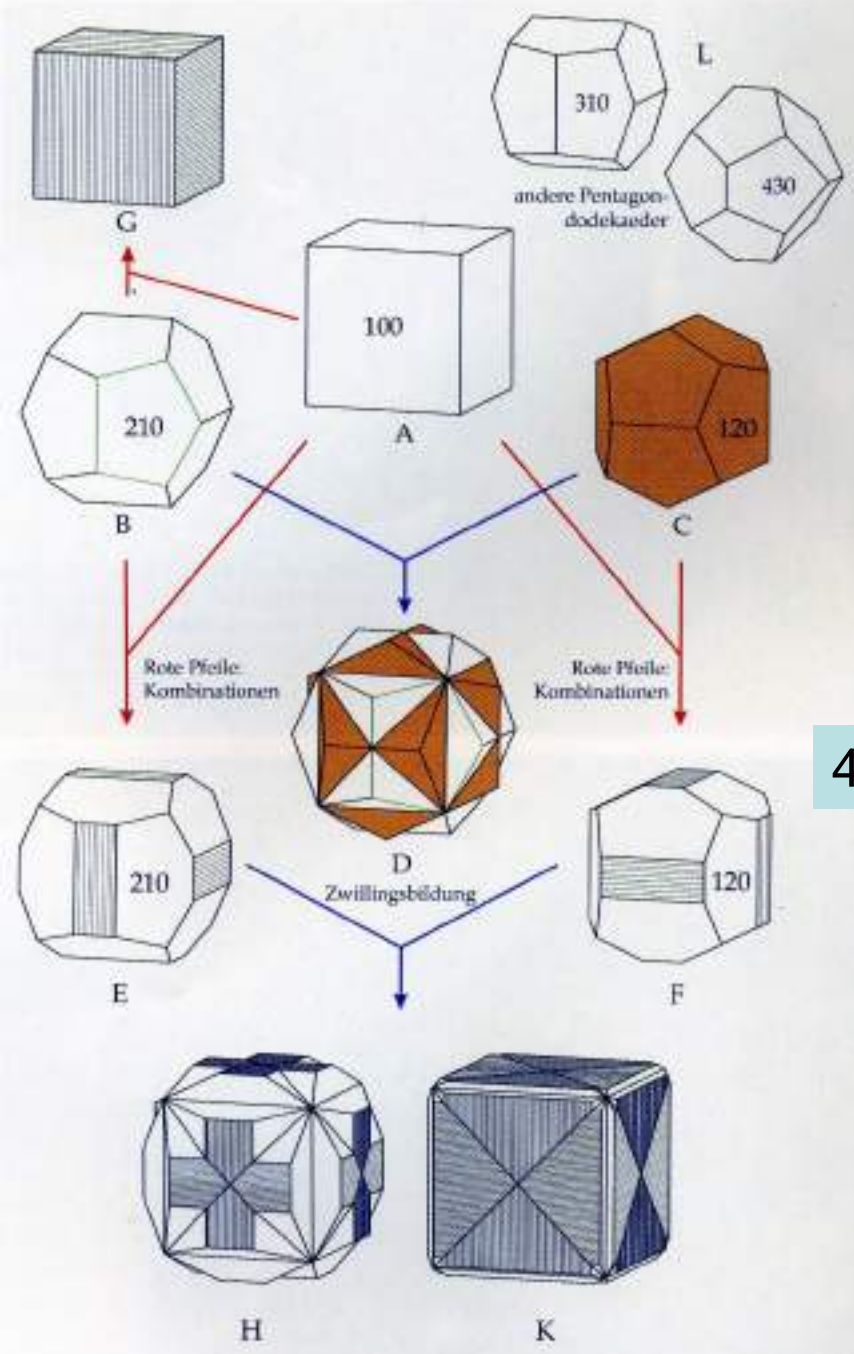


Дв. по (110)



40 мм

«Железный крест»



# Кристаллы – двойники роста

## Пирит. Двойник прорастания



25 мм. Соколово-Сарбайское месторождение. Северный Казахстан

# Кристаллы – двойники роста

Пирит. Двойники прорастания - «железный крест»

Fig. 50.

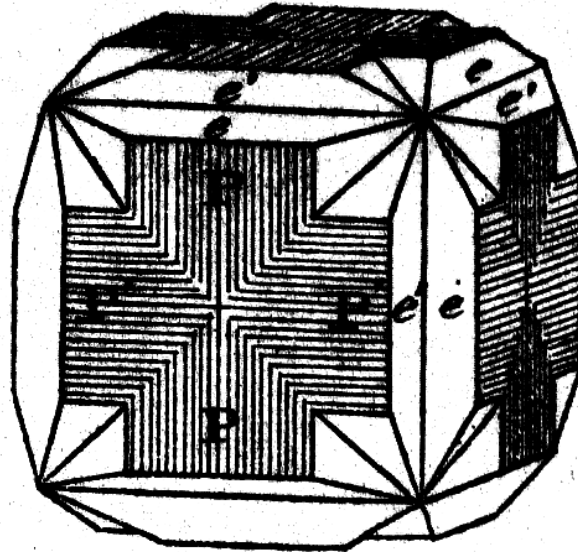


Fig. 14.

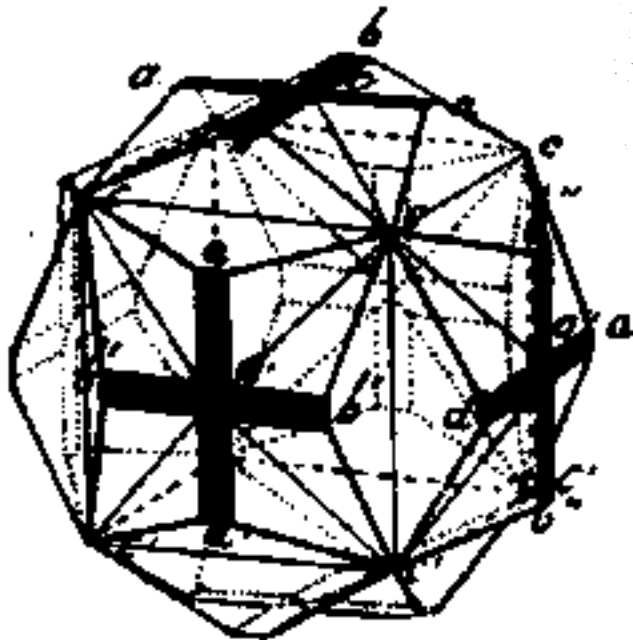
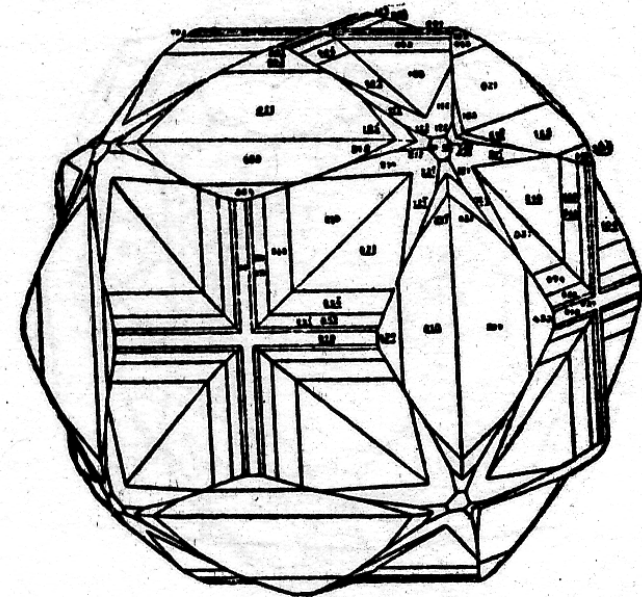


Fig. 457.



Рисунки в книге V.M. Goldschmidt, 1918 - 1923



# Кристаллы – двойники роста

## Пирит и марказит



Двойник прорастания пиритоэдров.  
18x13 мм. Загрос, южный Иран

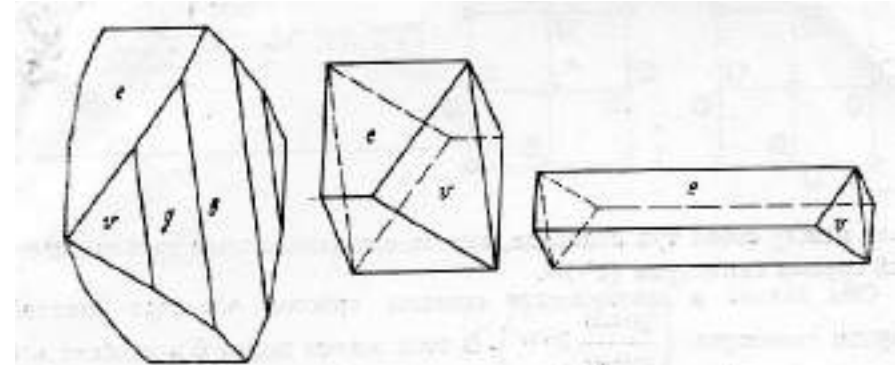


Рис. 1. Монокристаллы марказита (Внешние горы).  
Простые формы:  $e(100)$ ,  $v(100)$ ,  $g(100)$ ,  $b(100)$ ;

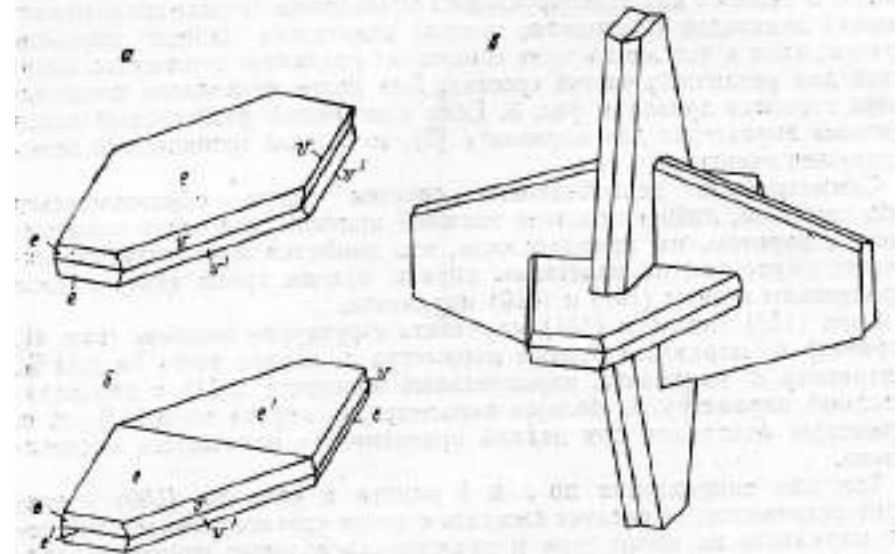


Рис. 2. Двойниковые сростки кристаллов марказита.  
а – двойник срастания; б – двойник прорастания; г – тройник двойников.

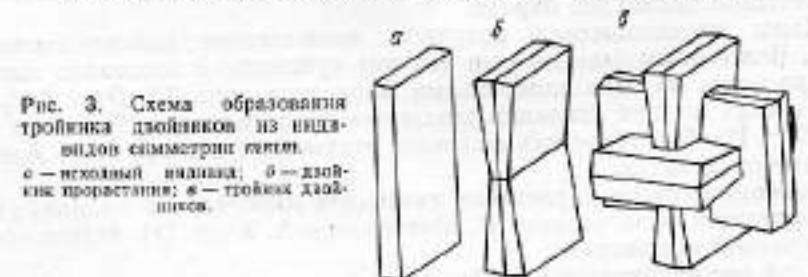


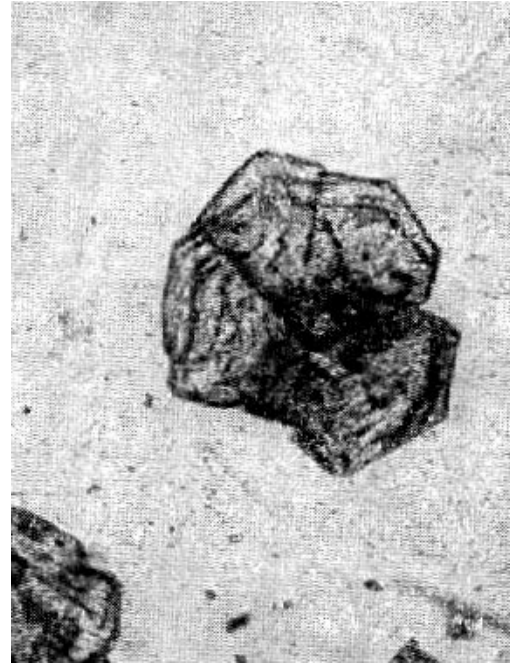
Рис. 3. Схема образования тройника двойников из индивидуальных симметричных тел.  
а – исходный идиоморф; б – двойник прорастания; г – тройник двойников.

# Кристаллы – двойники роста

## Касситерит. Двойники прорастания



50 мм.  
Горный Славков,  
Чехия



Шлиф. Слева при 1 николе,  
справа – николи х.  
В кварце. 0.5 мм.  
Шах-Шагайлы,  
Центральный Казахстан



# Кристаллы – двойники роста

## Киноварь



Никитовка,  
Донецкий кряж,  
Украина

15 мм. Сложный двойник.  
Альмаден, южная Испания



# Кристаллы – двойники роста

Киноварь. Tongren, пров. Guizhou, Южный Китай

15 мм



32  
мм



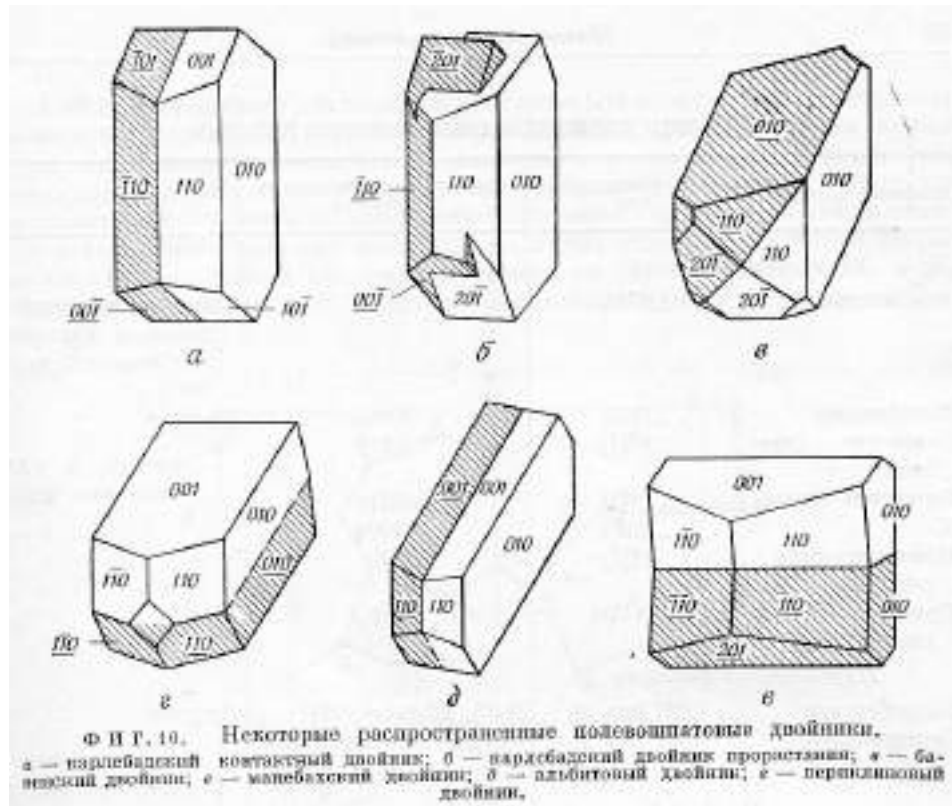
С доломитом



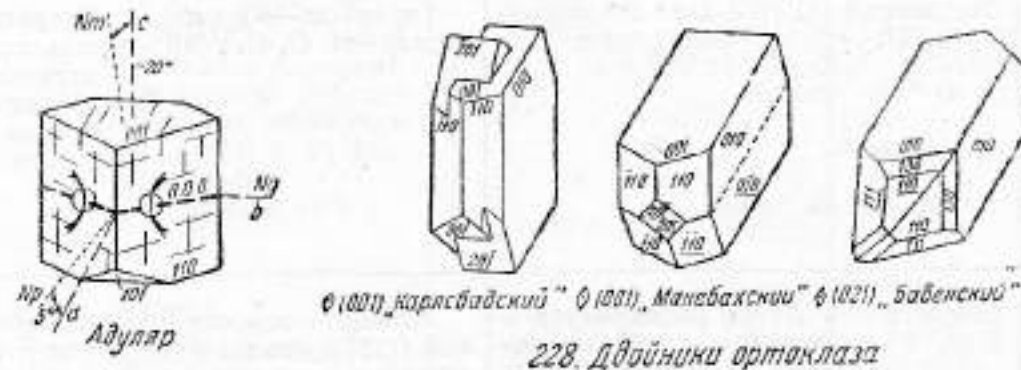
Двойники до 15 мм.  
С доломитом и кварцем

# Кристаллы – двойники роста

## К-На полевые шпаты



Два карлсбадских двойника ортоклаза.  
 Prospect-Mountain, Колорадо,  
 США





# Кристаллы – двойники роста

Двойник срастания К-На полевого шпата



Гранитные пегматиты.  
Бразилия.

Колл. музея “Земля и люди”,  
София

Фото Э.М. Спиридонова и  
Н.Н. Жукова



# Кристаллы – двойники роста

Кристаллы граната выросли  
на монокристалл  
ортоклаз – пертита.

Крупные кристаллы  
спессартина –  
двойники срастания.

Мелкие кристаллы  
спессартина –  
монокристаллы.

Гранитные  
пегматиты.

Гилгут,  
Пакистан



# Кристаллы – двойники роста

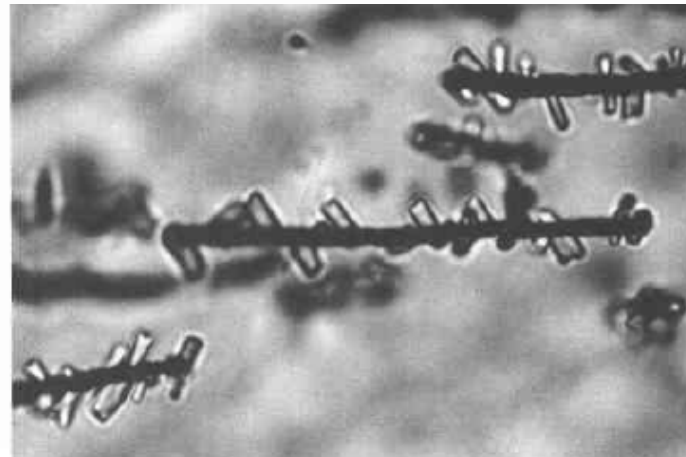
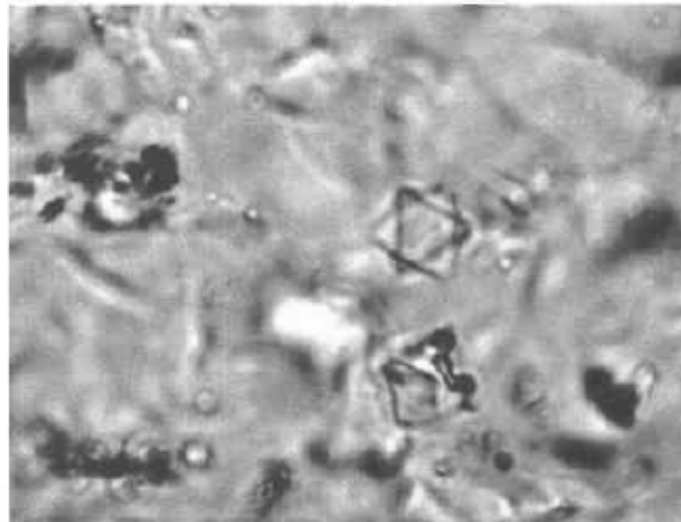
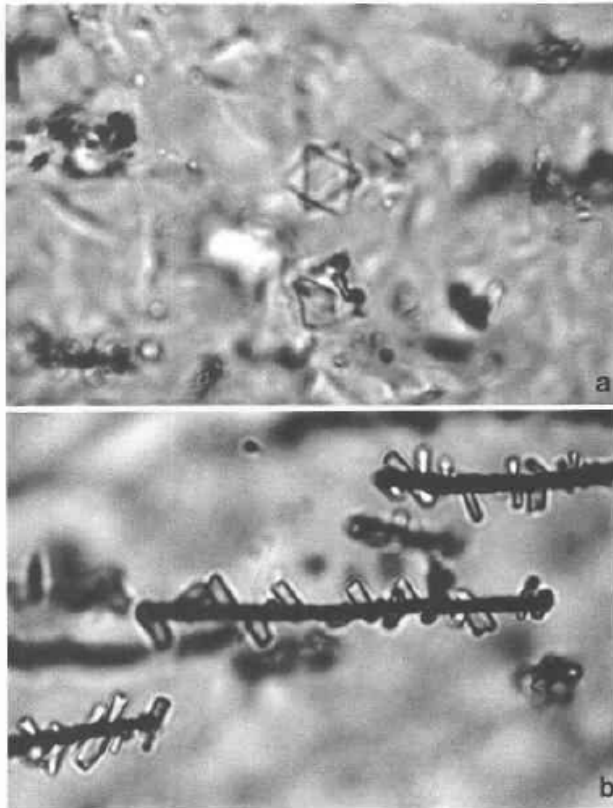
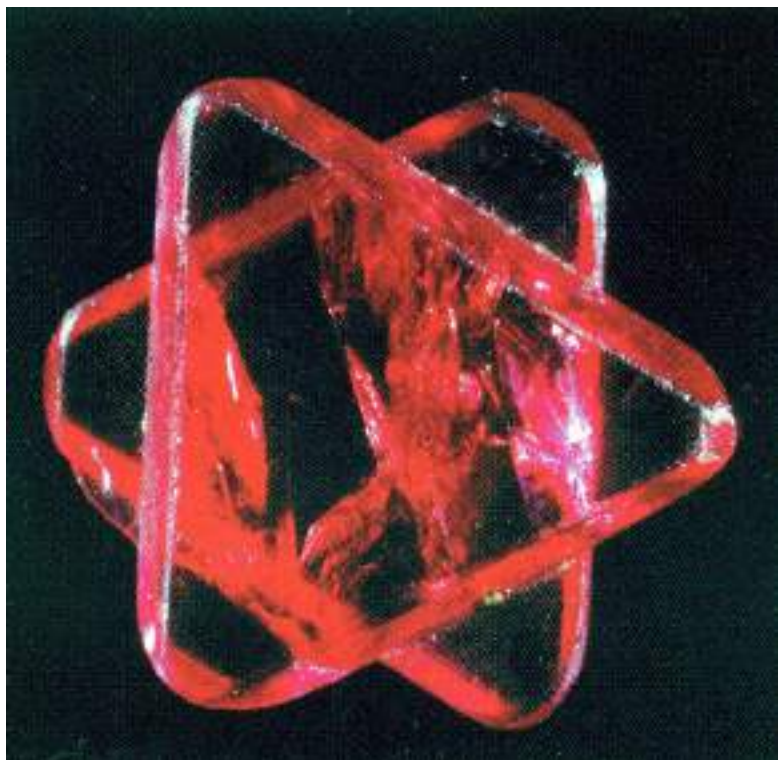


Fig. 2. Photomicrograph of (a) a fluorite microphenocryst and (b) fayalite microlite samples attached to iron oxide microlite samples in glass, sample J89-8. View in a is perpendicular to a (111) triangular face on a fluorite octahedron, with the underlying (111) face forming a six-pointed star in two dimensions. The edge of the octahedron is  $8\ \mu\text{m}$  long. These octahedral crystals do not occur in all samples of vitrophyre; they have been recognized from the southern, central, and northern outcrop areas (solid circles in Fig. 1). In b the central iron oxide rod is  $44\ \mu\text{m}$  long. In this sample, fayalite appears to have nucleated on magnetite. In some glass samples, fayalite occurs as independent microphenocrysts not attached to iron-oxide microlite. Both fluorite and fayalite were confirmed by energy dispersive analysis with a scanning electron microscope.

«Звезда Давида». Двойник срастания флюорита - микровкрапленник в фаялитовых риолитах



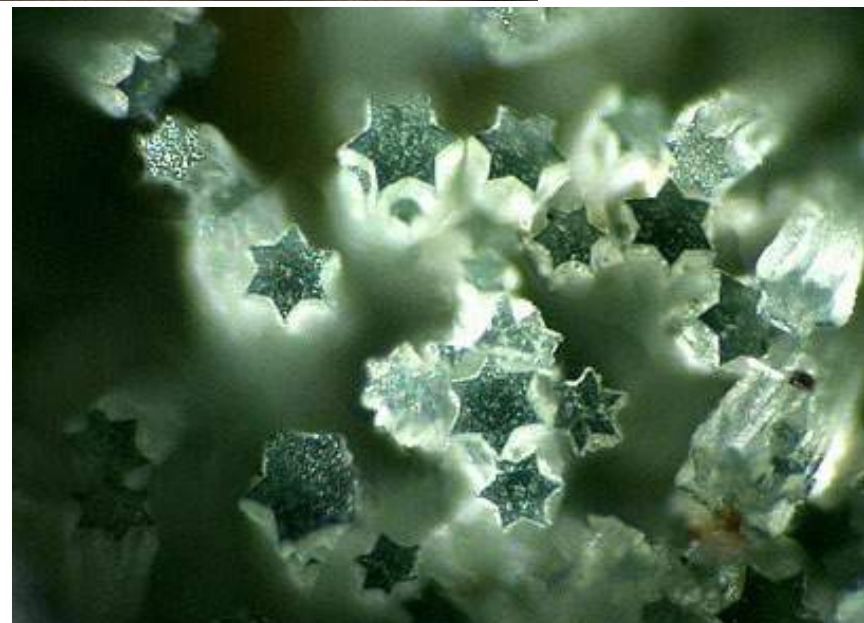
# Кристаллы – двойники роста



«Звезда Давида». 5 мм.  
Двойник срастания шпинели.  
Магнезиальные скарны.  
Могок, Бирма



Тройник  
прорастания  
тридимита  
3 мм.  
Bellerberg,  
Эйфель



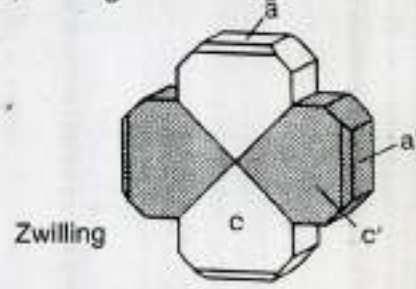
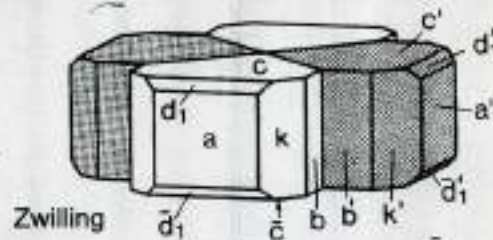
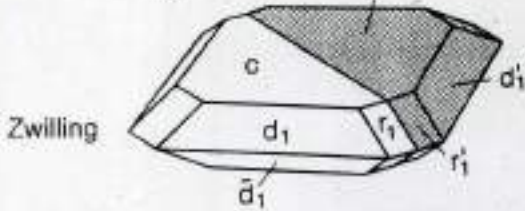
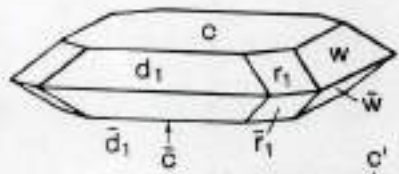
Тройники прорастания аметизита



# Кристаллы – двойники роста

## Бурнонит. Двойники срастания и прорастания

**BORNONIT: EINZELKRISTALL  
UND TYPISCHE ZWILLINGE**



Links: Idealisierte Bornonit-Kristalle. Wichtigste Flächenformen:  $a$   $\{100\}$ ,  $b$   $\{010\}$ ,  $c$   $\{001\}$ ;  $k$   $\{110\}$ ,  $d$ ,  $\{101\}$ ,  $w$ ,  $\{011\}$ ,  $r$ ,  $\{112\}$ . Kristallzeichnungen: Klaus RAPP (aus HOCHLEITNER, PHILIPSBORN, WEINER & RAPP "Minerale bestimmen nach äußeren Kennzeichen", 1996, Schweizerbart/Stuttgart).



Шахта Арол, Германия

# Кристаллы – двойники роста



**Сфалерит.**

**Двойники  
срастания  
полисинтетические**



# Кристаллы – двойники роста

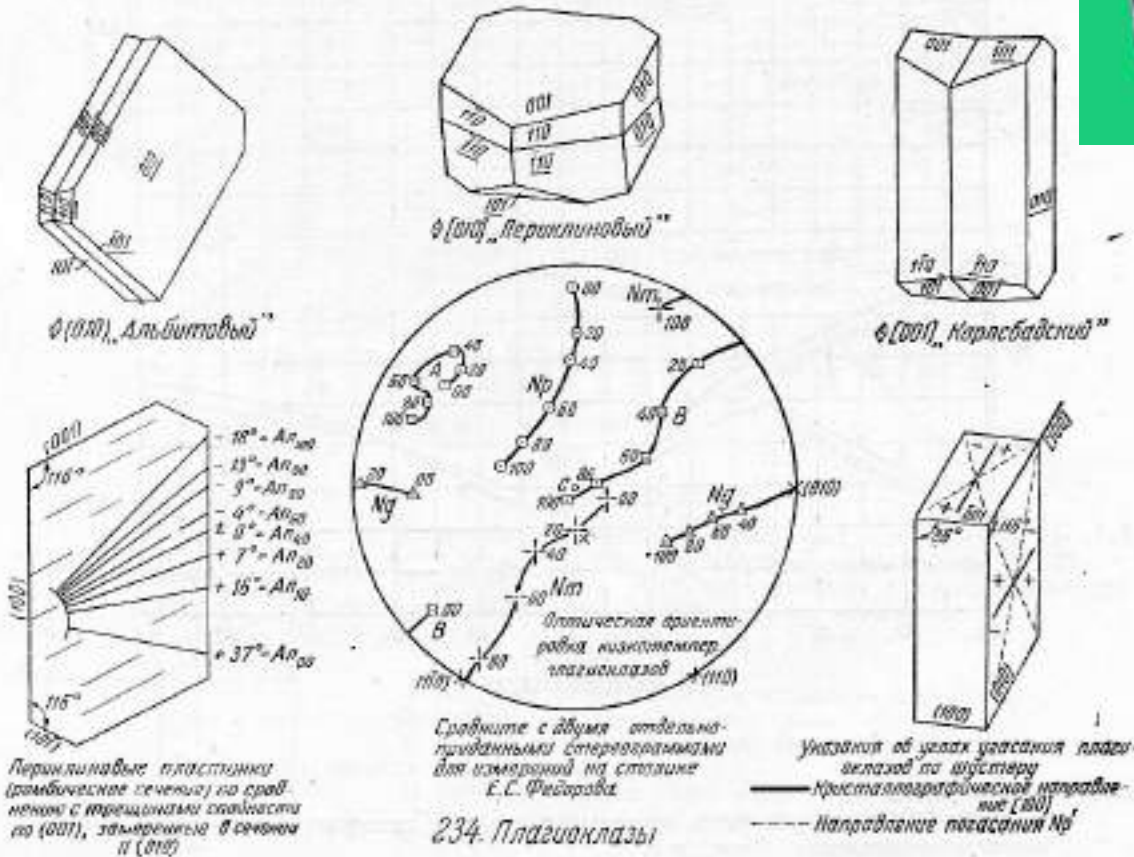
Полевые шпаты - плагиоклазы

До 17 мм



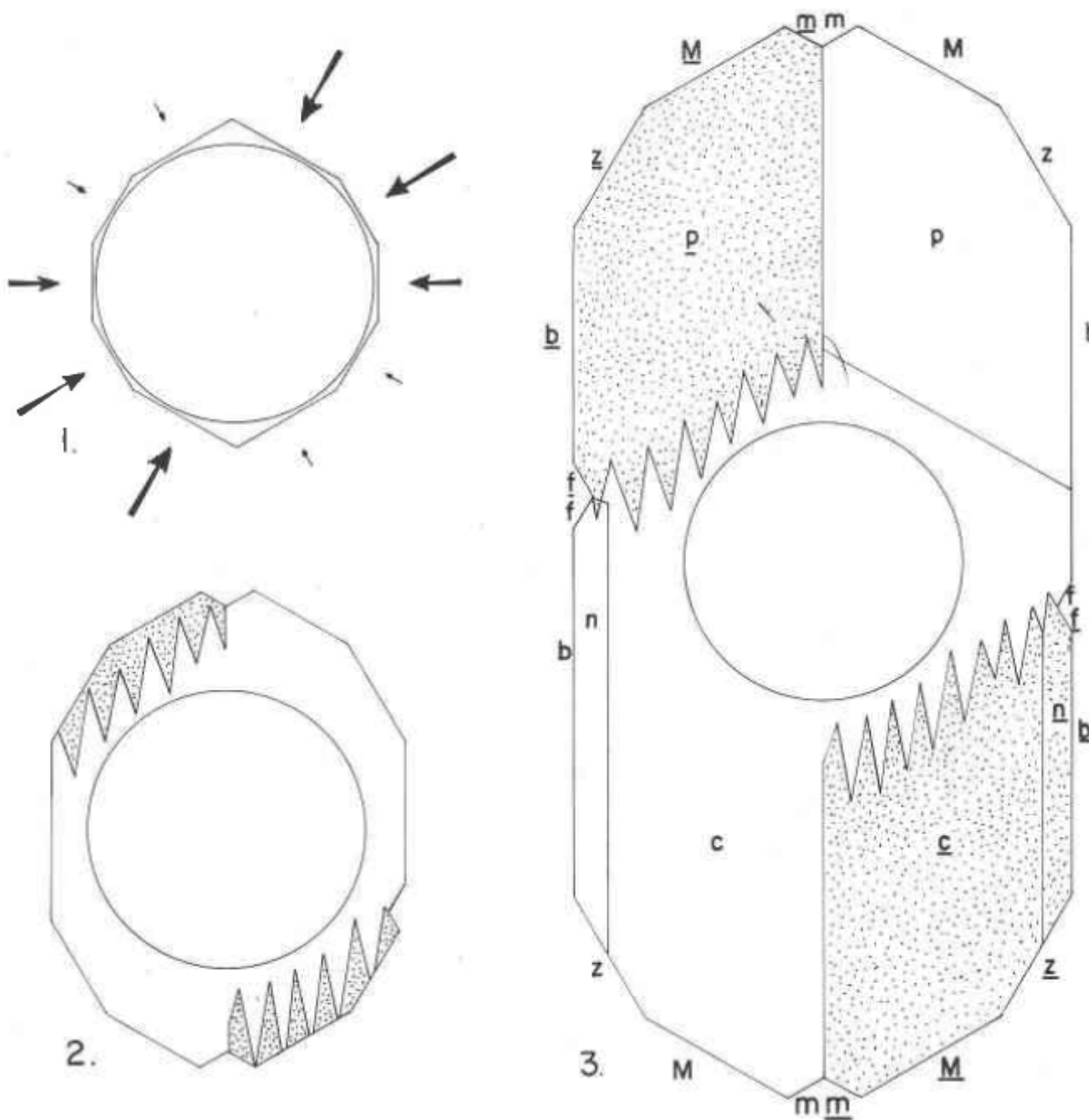
«Манчжурские орехи»

Полисинтетические двойники лабрадора. Вкрапленники в высокоглинозёмистых базальтах. Вулкан Толбачик, Камчатка





# Кристаллы – двойники роста



**Альбит  
аутигенный  
в известняках.  
Двойники  
срастания  
и  
прорастания**

Donnelly T.W.  
Amer. Mineral. 1967.  
Vol. 52. P. 1-12

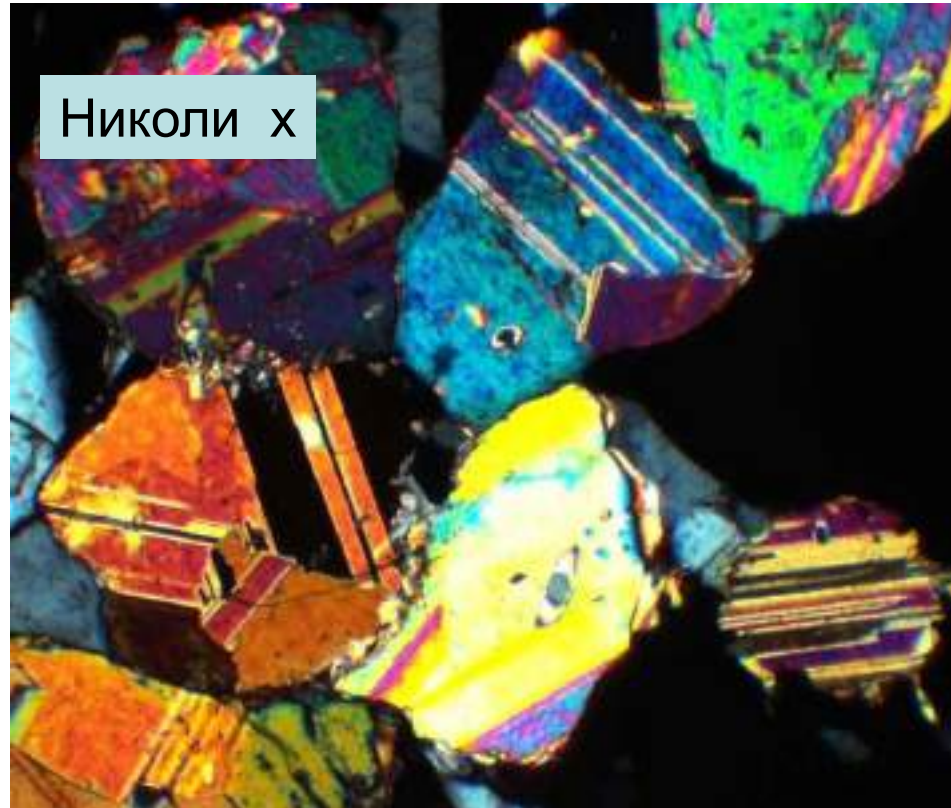
FIG. 2. Three stages in the development of a typical Paradox twin. Twinned portions stippled. Note that some of the facial boundaries are indefinite.

# Кристаллы – двойники роста

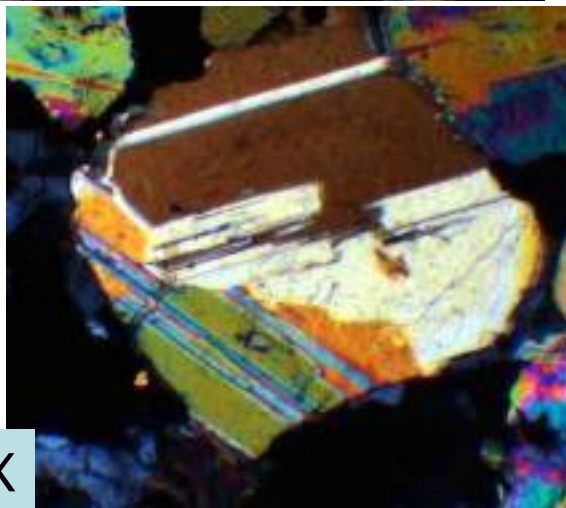
Титанистый хондродит. Полисинтетические двойники



При 1 николе



Николи х



Николи X

Камафориты.  
Ковдор. Кольский п-ов

Фото ЭМС

**ДВОЙНИКИ**

**ПОЛИМОРФНЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ**



# Механические двойники

**Двойники полиморфных превращений** обычно развиты в виде веретенообразных сетчатых срастаний, часто пересекающихся.

**Двойники деформации** развиты в виде пластинок примерно одинаковой ширины, которые часто пересекаются, выклиниваются, часто сопровождаются изгибами, катаклизмом 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.

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 - таковы японские двойники кварца... По этой же причине двойники роста кварца и кальцита нередко имеют уплощенную форму. Существенный интерес представляют сложные циклические двойниковые срастания плагиоклаза – лабрадора - битовнита в форме манчжурского ореха (“ёж”) из базальтов и лапиллиевых туфов высокоглинозёмистых базальтов Камчатки.

Двойник роста

Механические двойники

*Особенности облика двойниковых сростков*

1. При прочих равных условиях двойник имеет большие размеры, чем монокристалл (Bescke, 1911)
2. Двойники часто уплощены параллельно двойниковой плоскости (Bescke, 1911)
3. Двойники часто удлинены параллельно двойниковой оси (Bescke, 1911)

*Особенности ограничения двойников*

4. Двойники иногда имеют грани, не наблюдающиеся на монокристаллах. Обычно эти грани не лежат у границы двойника (Bescke, 1911)
5. Двойники в общем менее богаты гранями, чем монокристаллы (Hartman, 1956)

*Частота двойников*

6. Двойниковые пластинки часто отсутствуют в других зернах и шлифе\* (Рамдор, 1962)

- 6а. Почти повсеместное нахождение двойников в месторождении (Seifert, 1964)

*Распределение двойниковых пластинок*

7. Двойники обычно простые, а если полисинтетические, то двойниковые пластинки немногочисленны (Vance, 1961; Seifert, 1964)
8. Двойниковые пластинки часто не проходят через весь кристалл (Seifert, 1964)
9. Тонкие и толстые двойниковые пластинки располагаются и оканчиваются независимо друг от друга (Vance, 1961)

- 7а. Двойниковые пластинки многочисленные (Vance, 1961; Seifert, 1964)
- 7б. Процесс двойникования обычно охватывает весь кристалл (Vance, 1961)
- 8а. Двойниковые пластинки часто проходят через весь кристалл или зерно (Vance, 1961; Seifert, 1964)

*Форма двойниковых пластинок*

10. Простые двойники обычно имеют равные части (Seifert, 1964)
11. Двойниковые пластинки обычно толстые (Vance, 1961)
12. Толщина двойниковых пластинок в зерне колеблется в очень широких пределах (Vance, 1961; Рамдор, 1962)
13. Двойниковые пластинки часто резко меняют свои очертания, образуя ступенчатые границы (Hartman, 1956; Vance, 1961; Рамдор, 1962; Seifert, 1964)

- 11а. Двойниковые пластинки обычно тонкие (Харкер, 1937; Vance, 1961; Seifert, 1964)
- 12а. Толщина двойниковых пластинок примерно одинакова в пределах каждой системы их или в пределах зерна (Vance, 1961; Рамдор, 1962; Seifert, 1964)
- 13а. Двойниковые пластинки обычно четкие, правильные, без ступенек (Vance, 1961; Seifert, 1964)

*Отношение к деформациям*

14. Не обладают приуроченностью к участкам деформаций в минералах (Vance, 1961; Seifert, 1964)
15. При изгибе кристалла не меняют своей толщины (Vance, 1961)

- 14а. Приурочены к участкам деформации в минералах (Харкер, 1937; Vance, 1961; Рамдор, 1962; Seifert, 1964)
- 15а. При изгибе кристалла часто меняют свою толщину (Vance, 1961)
- 15б. Концы двойниковых пластинок иногда срезаны трещинками, представляющими конечный результат деформации (Харкер, 1937)

*Прочие признаки*

16. На границе двойников иногда имеются первичные включения (Барсанов, Гурьева, 1964)
17. Взаимоотношение границ двойников с локальностью кристалла такое же, как и с его внешним ограничением (Vance, 1961)

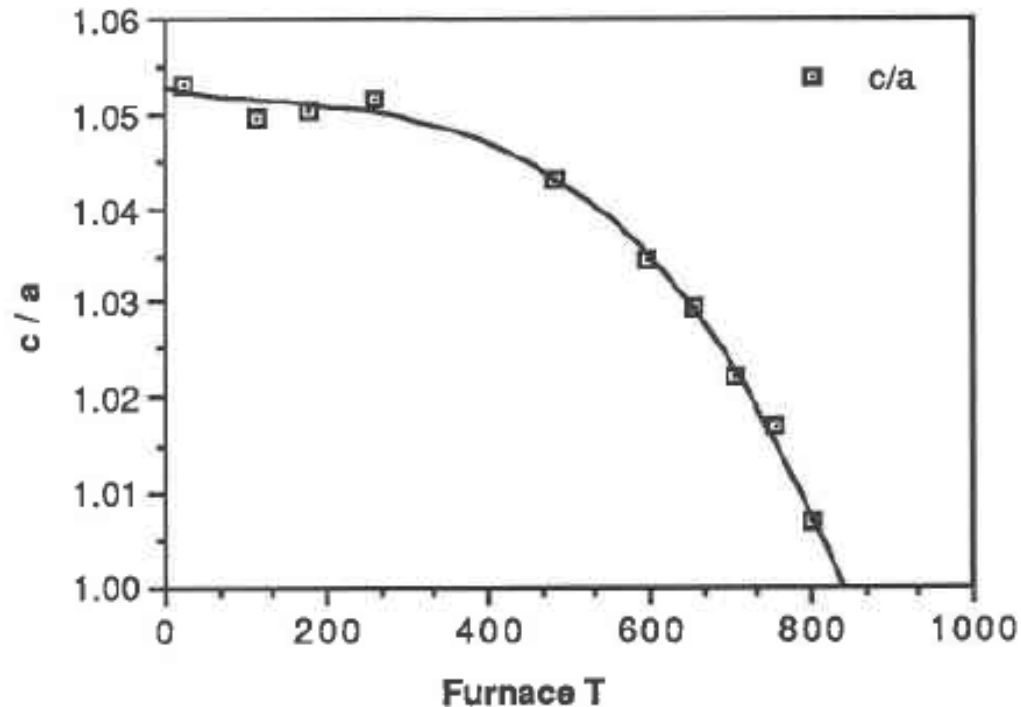
- 16а. Часто записит в своем расположении от первичных двойников роста (Seifert, 1964)
- 17а. Чем меньше размеры зерен, тем сложнее образование в них полисинтетических двойников (Классен-Неклюдова, 1960)

\* Если такая картина не получается при разрезе двойников параллельно плоскости двойникования,

Первичные двойники = ростовые  
 Механические двойники = деформационные

# Фазовые превращения в минералах

Переход высокий кубический лейцит → низкий тетрагональный лейцит  $\text{KAl}[\text{Si}_2\text{O}_6]$ . При этом превращении однородные кристаллы кубической фазы превращаются в кристаллы, состоящие из пластинчатых и сложной формы двойников полиморфных переходов.



Превращение  
кубический лейцит →  
тетрагональный лейцит.  
Heaney P.L. & Veblen D.R., 1990.  
Amer. Mineral. Vol. 75. P. 464-476

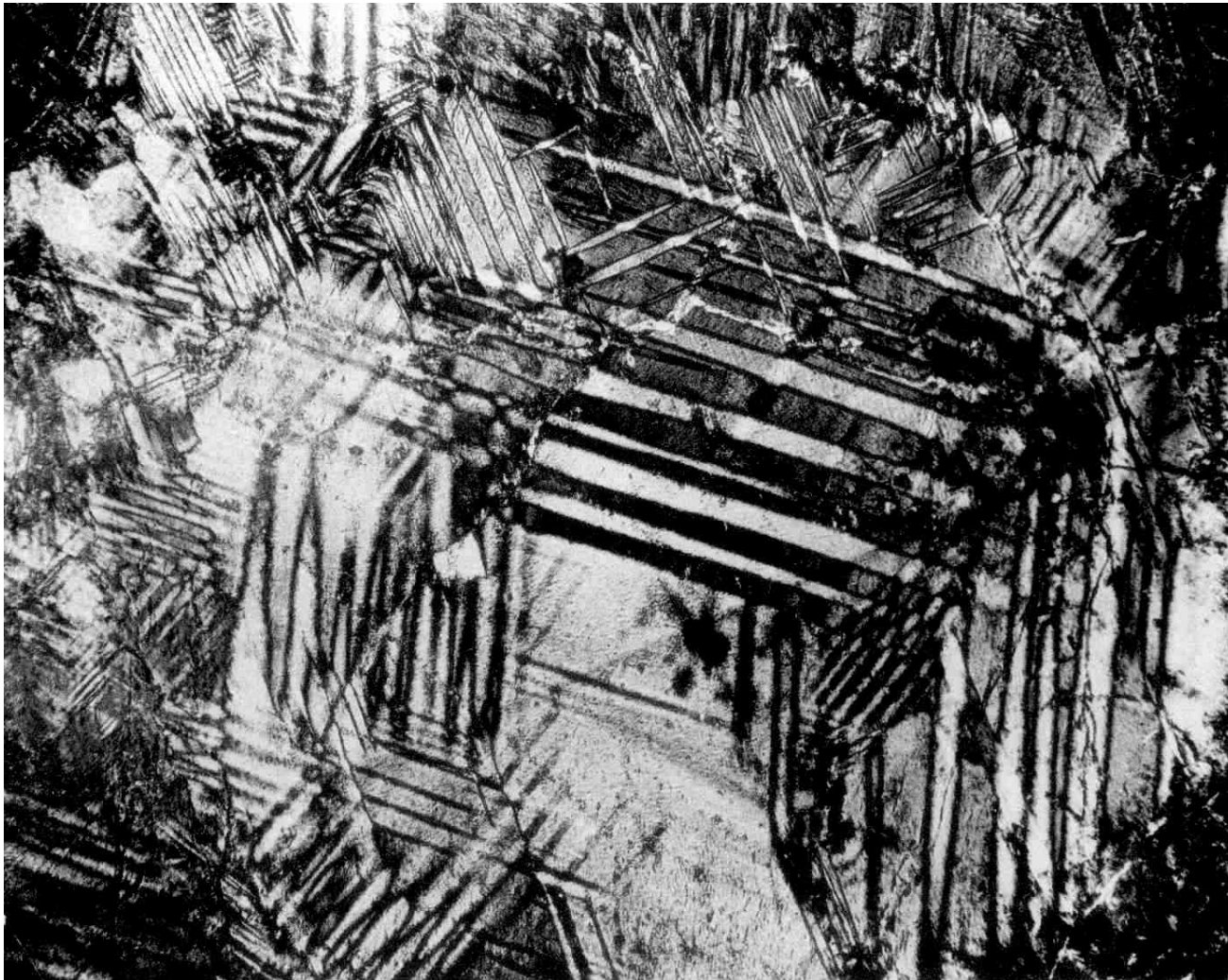
Fig. 6. A plot of the ratio of axial lengths  $c/a$  versus furnace temperature.  $T_c$  is defined as the point at which  $c/a = 1.00$ , about 850 °C in this experiment.



# Двойники полиморфных превращений

Переход кубический лейцит → тетрагональный лейцит  $\text{KAl}[\text{Si}_2\text{O}_6]$ .

При этом превращении однородные кристаллы кубической фазы превращаются в кристаллы, состоящие из пластинчатых и сложной формы двойников полиморфного перехода.

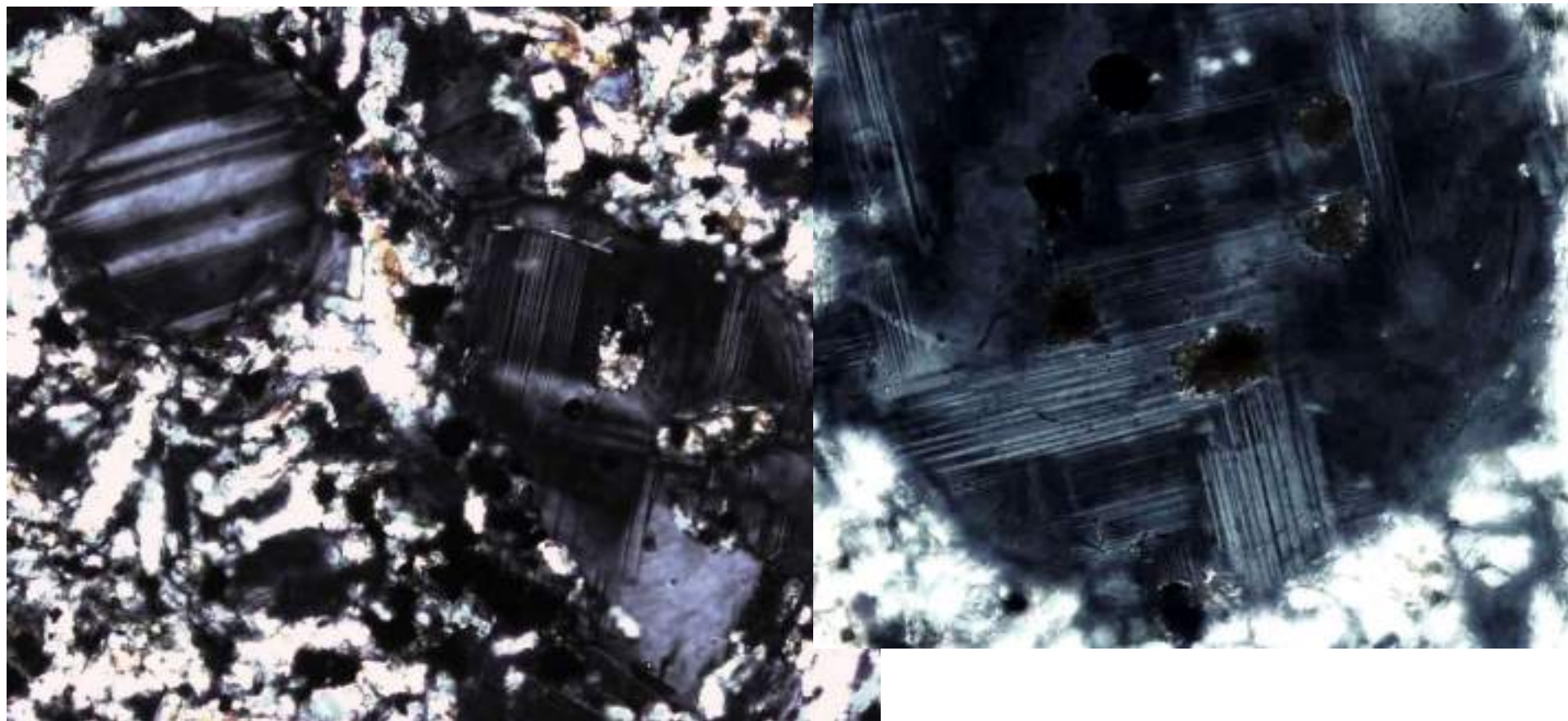


Агрегат  
двойников  
полиморфного  
перехода  
в крупном  
вкрапленнике  
лейцита.  
4 мм. Николи х.

Лейцит-Хиллс,  
Монтана,  
США

# Двойники полиморфных превращений

Переход высокий кубический лейцит → низкий тетрагональный лейцит  $\text{KAl}[\text{Si}_2\text{O}_6]$ . При этом превращении однородные кристаллы кубической фазы превращаются в кристаллы, состоящие из пластинчатых и сложной формы двойников полиморфного перехода.

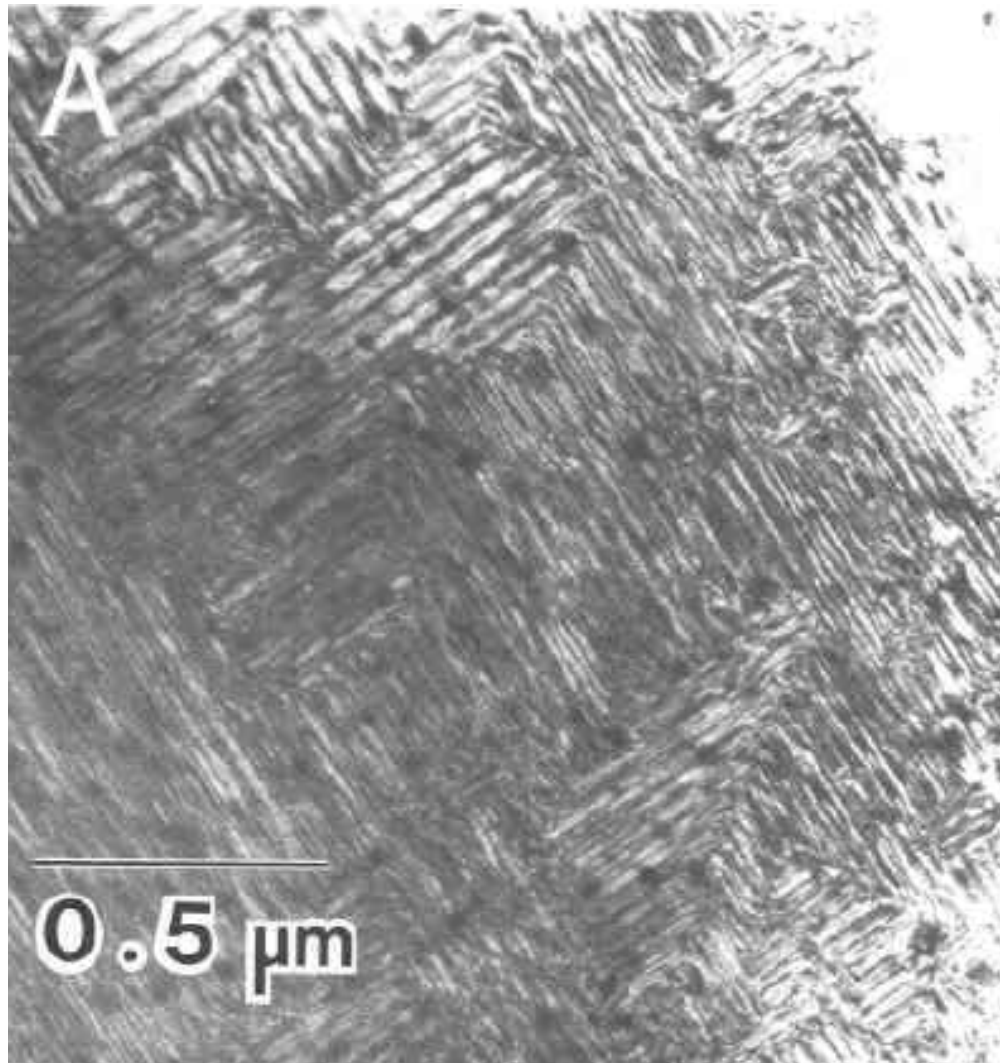


Микровкрапленники лейцита в лейцитовых базальтах Везувия.  
Николи х. Фотографии Э.М. Спиридонова

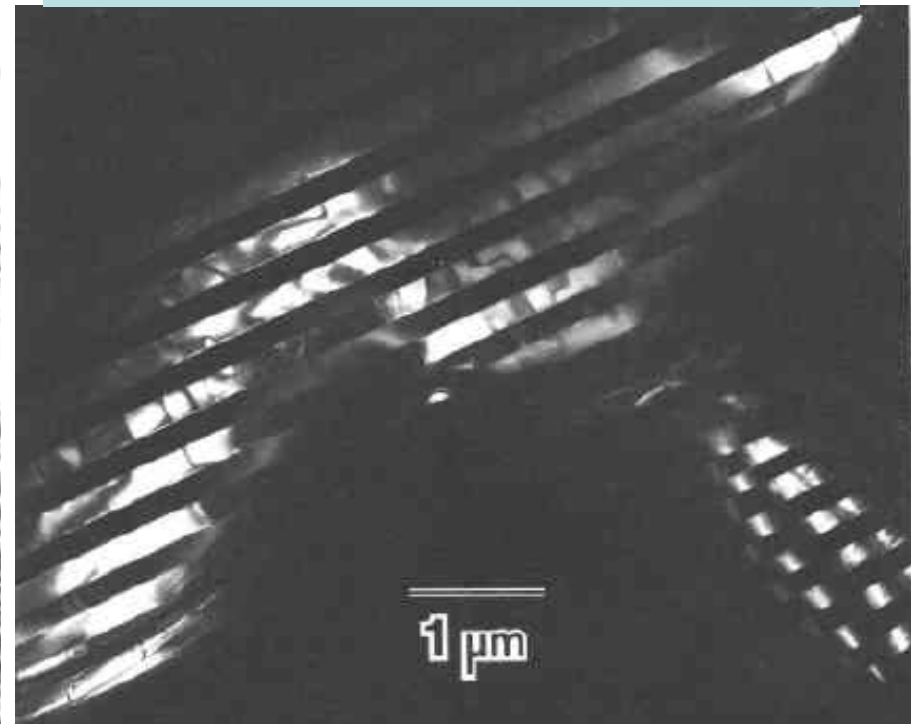


# Двойники полиморфных превращений

Переход высокий кубический лейцит → низкий тетрагональный лейцит  $\text{KAl}[\text{Si}_2\text{O}_6]$



Темнопольная  
электронная фотография

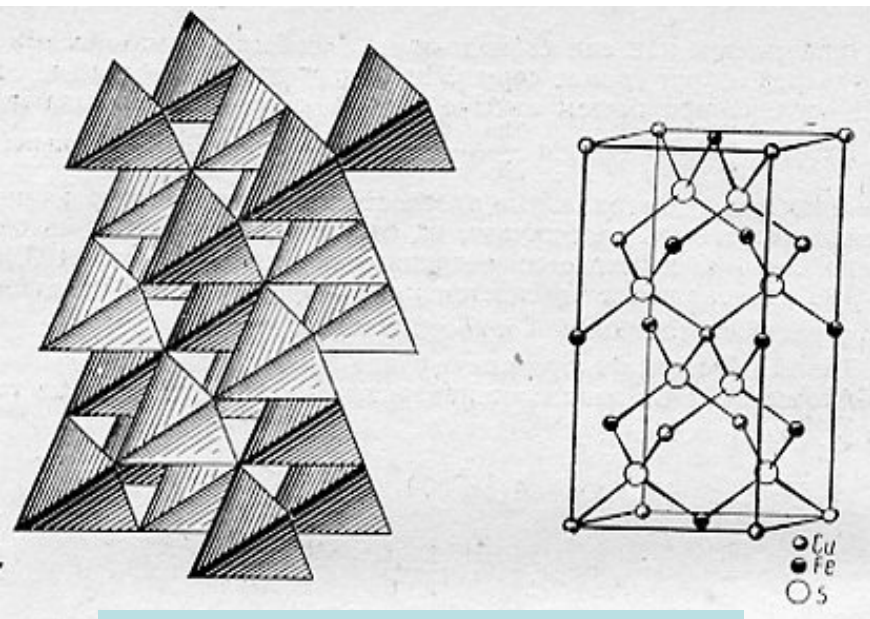


Микродвойники полиморфного  
перехода в лейците.  
Heaney P.L. & Veblen D.R., 1990.  
Amer. Mineral. Vol. 75. P. 464-476



# Двойники полиморфных превращений

Переход высокий кубический халькопирит → низкий тетрагональный халькопирит  $\text{CuFeS}_2$ . При этом превращении однородные кристаллы кубической фазы превращаются в кристаллы, состоящие из пластинчатых и сложной формы двойников полиморфного перехода.



Структура халькопирита



Abb. 378

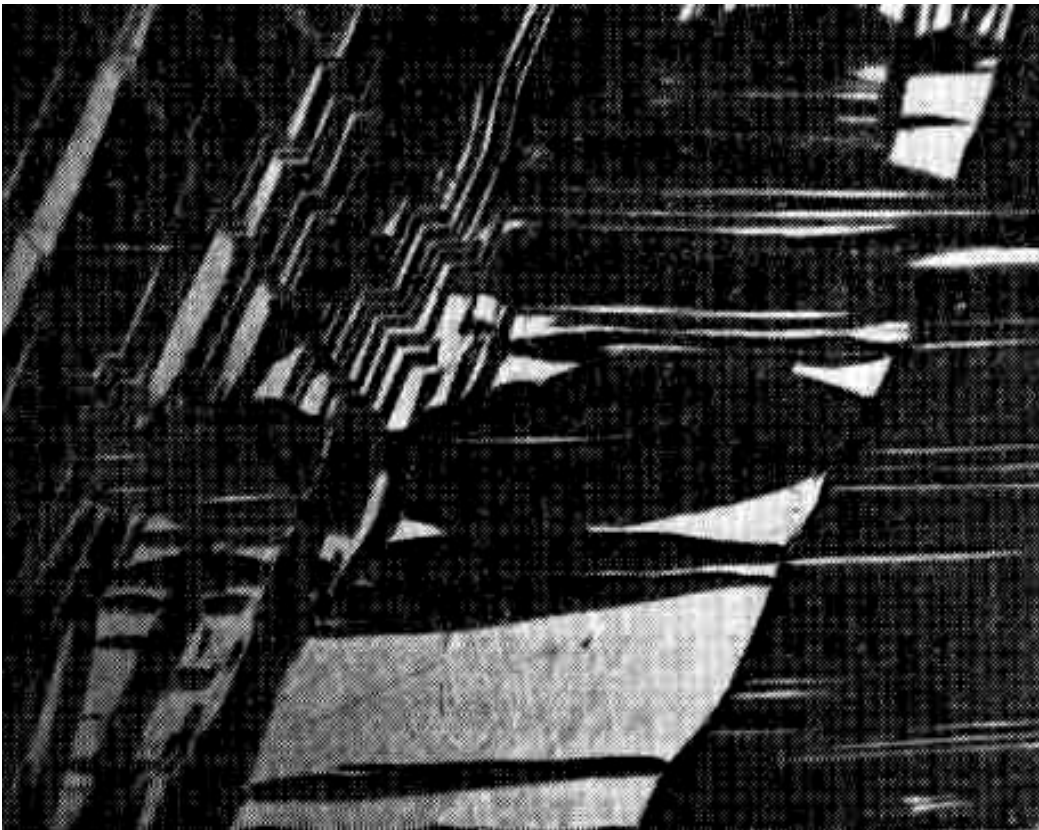
Vergr. 150mal  
China

RAMDOHR

Фотография в отражённом свете. Николи x

# Двойники полиморфных превращений

Переход высокий кубический халькопирит → низкий тетрагональный халькопирит  $\text{CuFeS}_2$ . При этом превращении однородные кристаллы кубической фазы превращаются в кристаллы, состоящие из пластинчатых и сложной формы двойников полиморфного перехода.



Waldbach, Германия



Фотографии в отраж. свете. Николи x

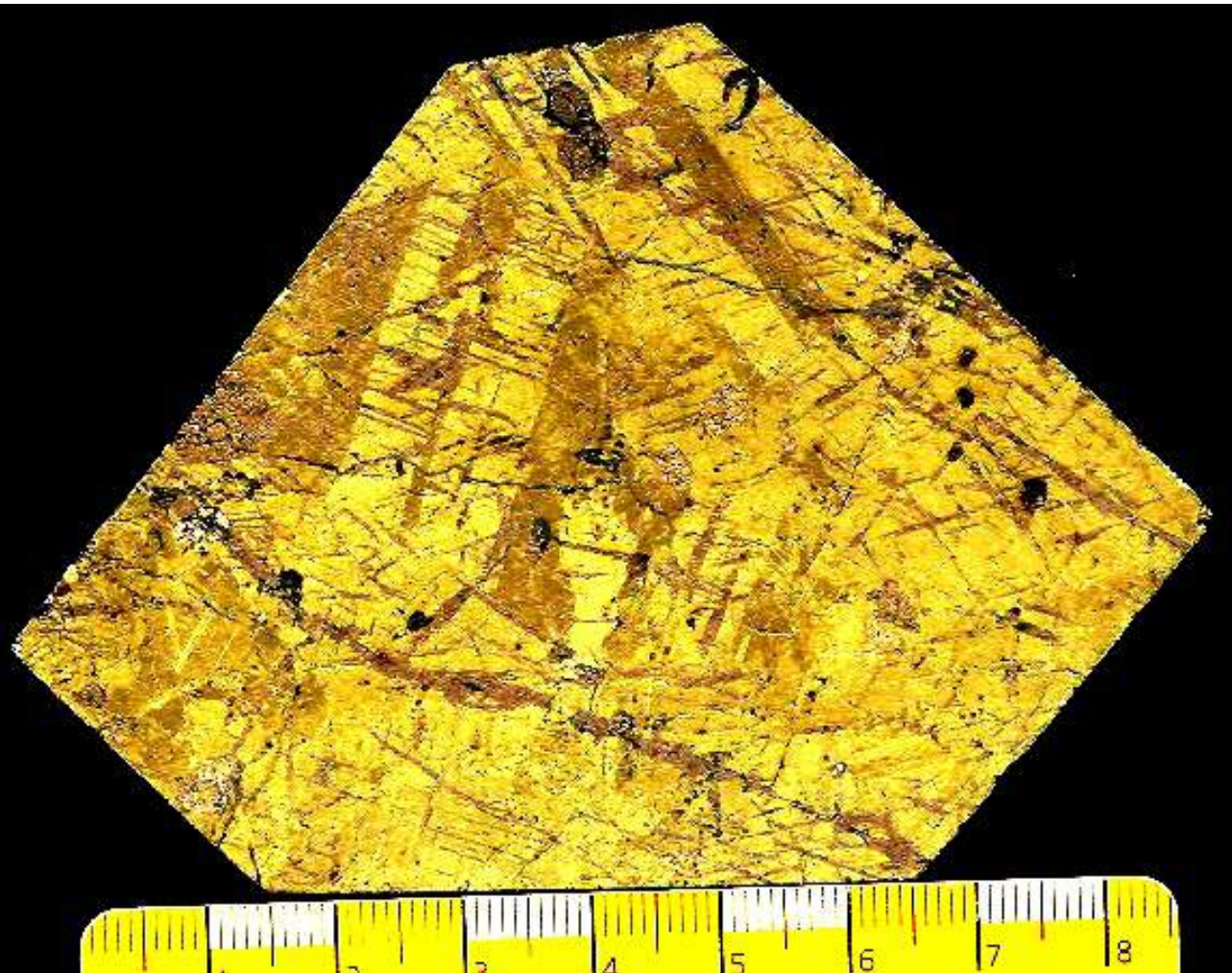
Vergr. 250mal, Nic. +  
Outukumpu, Finland

RAMDOHR



# Двойники полиморфных превращений

Переход высокий кубический халькопирит → низкий тетрагональный халькопирит  $\text{CuFeS}_2$ . При этом превращении однородные кристаллы кубической фазы превращаются в кристаллы, состоящие из пластинчатых и сложной формы двойников полиморфного перехода.



Сплошные  
магматические  
сульфидные руды.  
Главная  
Хараелахская  
сульфидная залежь.  
Норильское  
рудное поле



# Двойники полиморфных превращений

Переход высокий кубический станнин → низкий тетрагональный станнин  $\text{Cu}_2\text{FeSnS}_4$ . При этом превращении однородные кристаллы кубической фазы превращаются в кристаллы, состоящие из пластинчатых и сложной формы двойников полиморфных переходов.



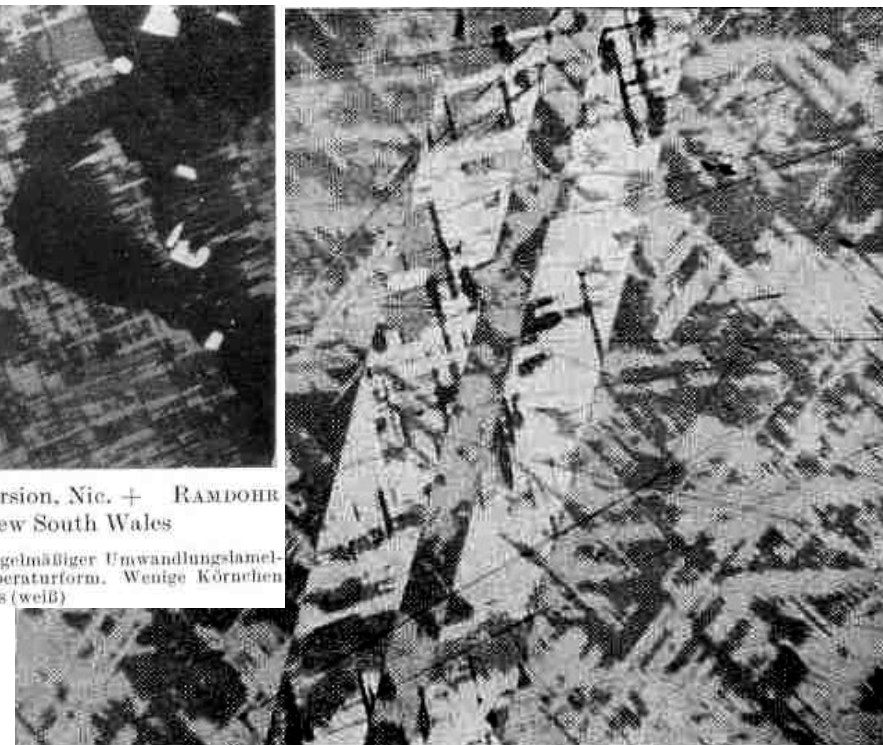
Abb. 391 RAMDOHR-ERHENBERG  
Vergr. 110mal, Ölimmersion, Nic. +  
Vila Apacheta, Bolivien

Zinnkies, zeigt bei gekreuzten Nicols hier eine eigentümliche, mikroklin-  
ähnliche Gitterzwillingslamellierung



Abb. 390 Vergr. 250mal, Immersion, Nic. + RAMDOHR  
Conrad Mine, Howell, New South Wales

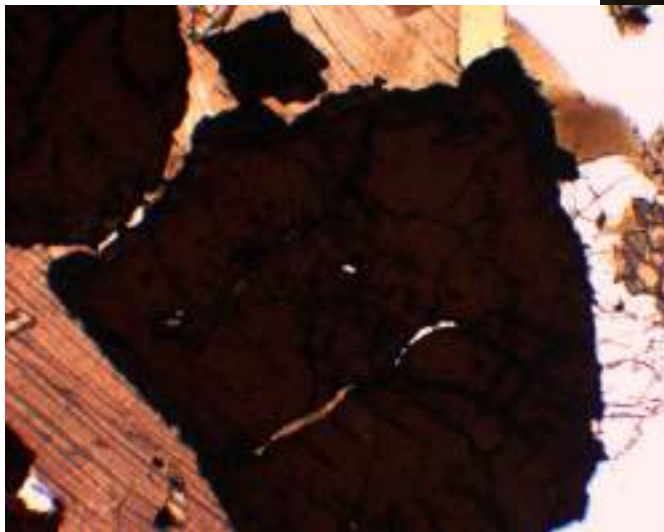
Zinnkies mit hervorragender und sehr regelmäßiger Umwandlungslamel-  
lierung nach dem Würfel der Hochtemperaturform. Wenige Körnchen  
von Kupferkies (weiß)



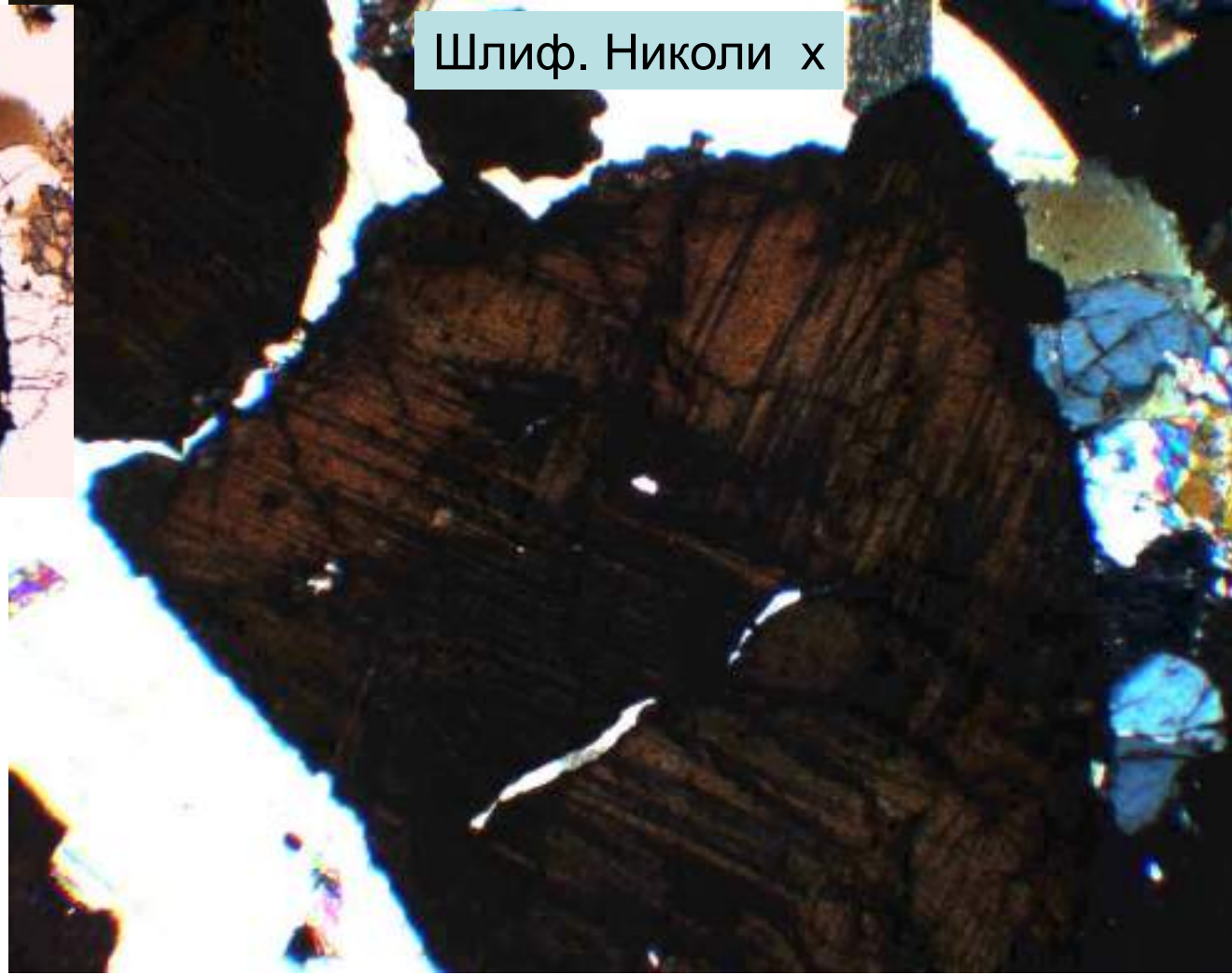
Фотографии в отражённом свете. Николи x

# Двойники полиморфных превращений

Переход высокий кубический перовскит → низкий тетрагональный перовскит  $\text{Ca}[\text{TiO}_3]$ . При этом превращении однородные кристаллы кубической фазы превращаются в кристаллы, состоящие из пластинчатых и сложной формы двойников полиморфных переходов.



Шлиф. При 1 николе



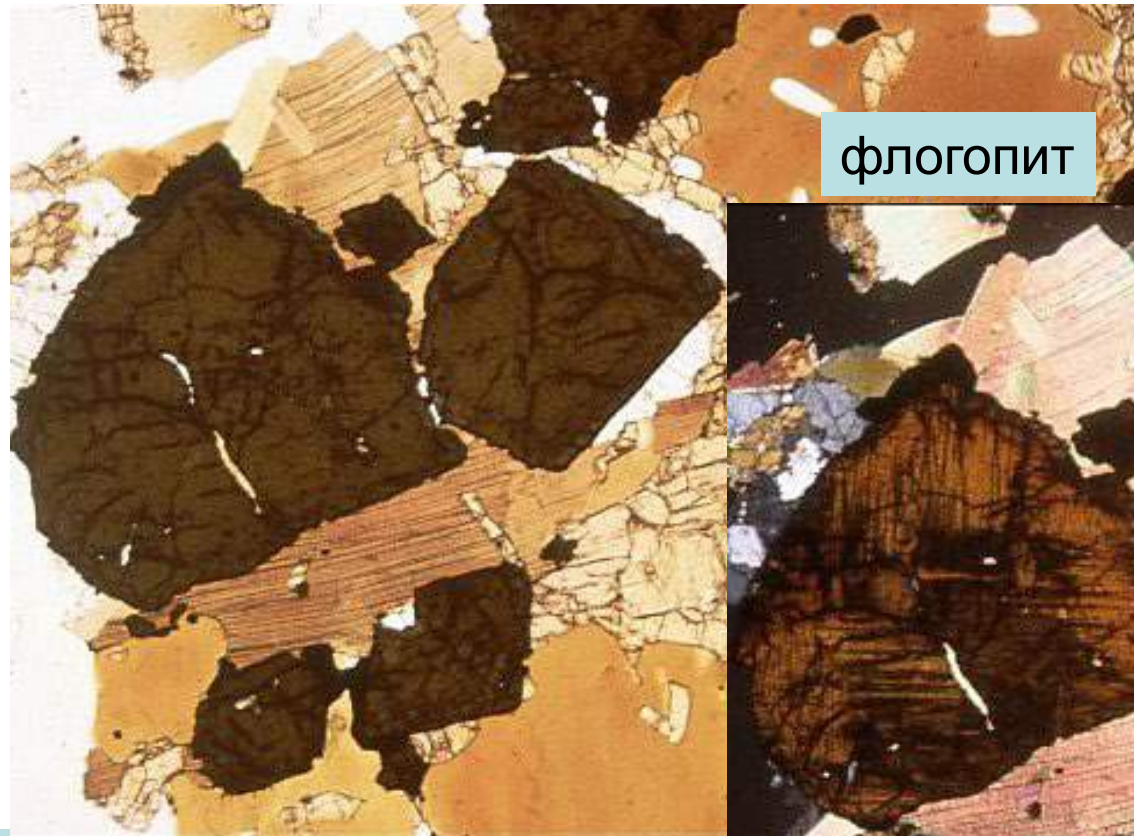
Шлиф. Николи x

Карбонатиты  
Вуориярви.  
Кольский  
полуостров



# Карбонатиты кальцитовые ранние

## Перовскит $(Ca, REE, Sr, Fe, Na)(Ti, Nb)O_3$

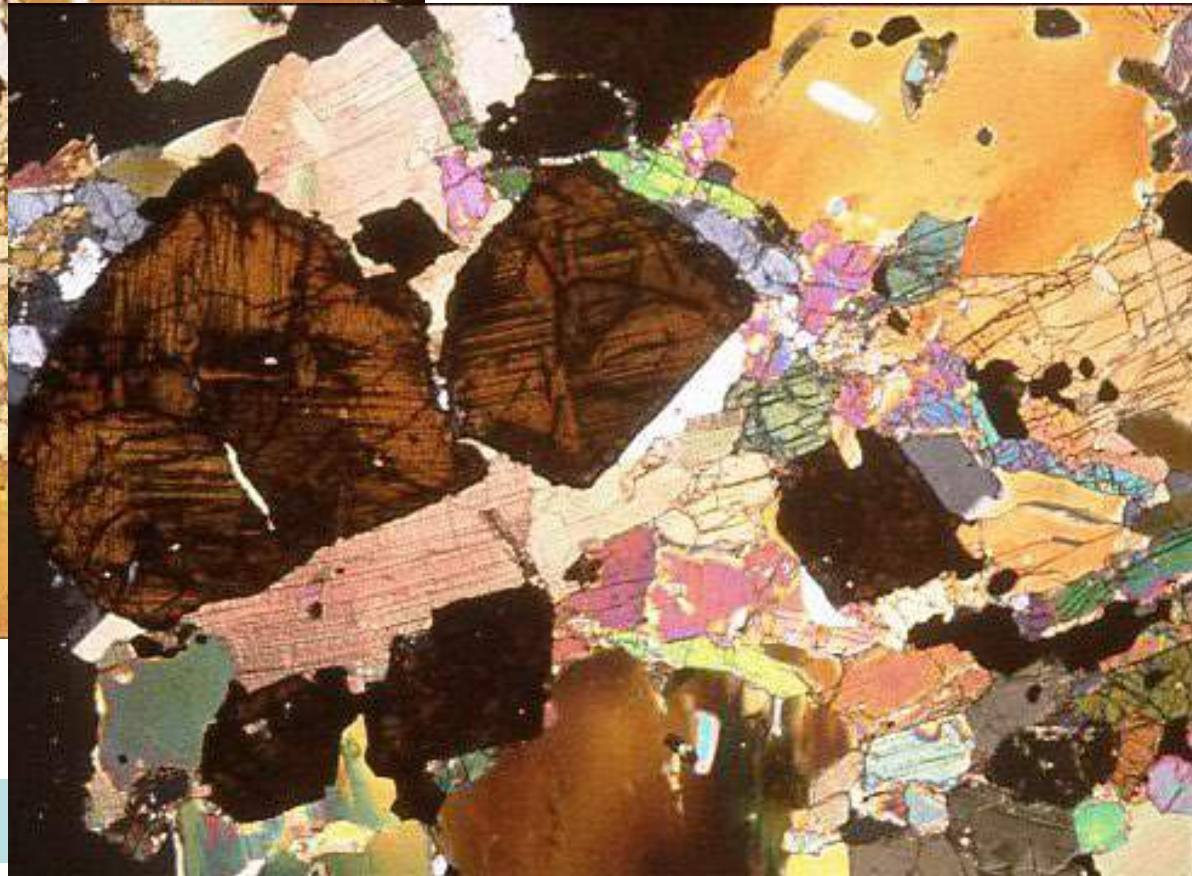


флогопит

Колл. и фото  
ЭМС

Шлиф. При 1 николе

Шлиф. Николи х



В перовските – несколько систем двойников полиморфного перехода кубический → тетрагональный. Вуориярви

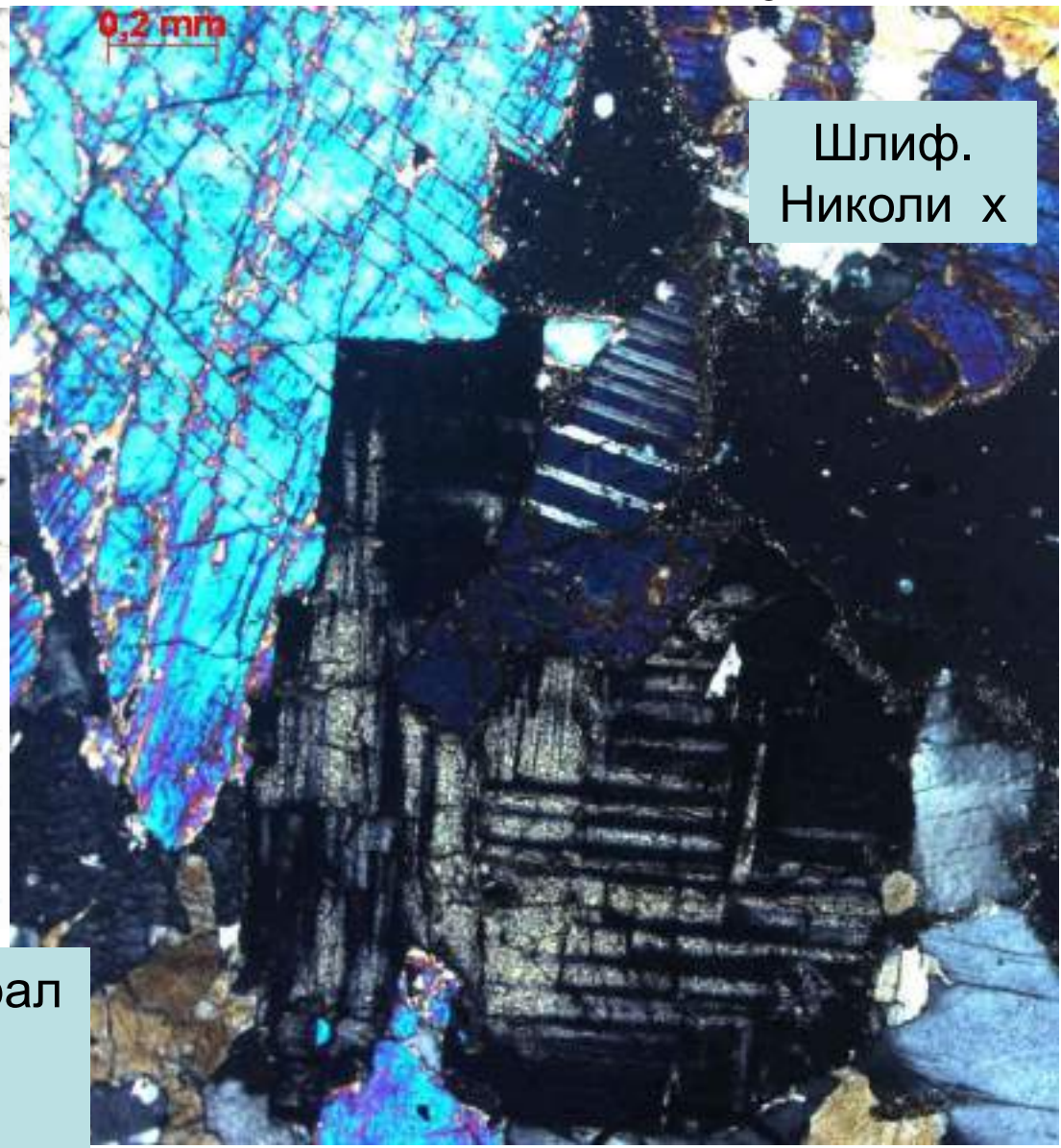


# Двойники полиморфных превращений

Переход высокий кубический перовскит →  
низкий тетрагональный перовскит  $\text{Ca}[\text{TiO}_3]$



Шлиф при  
1 николе

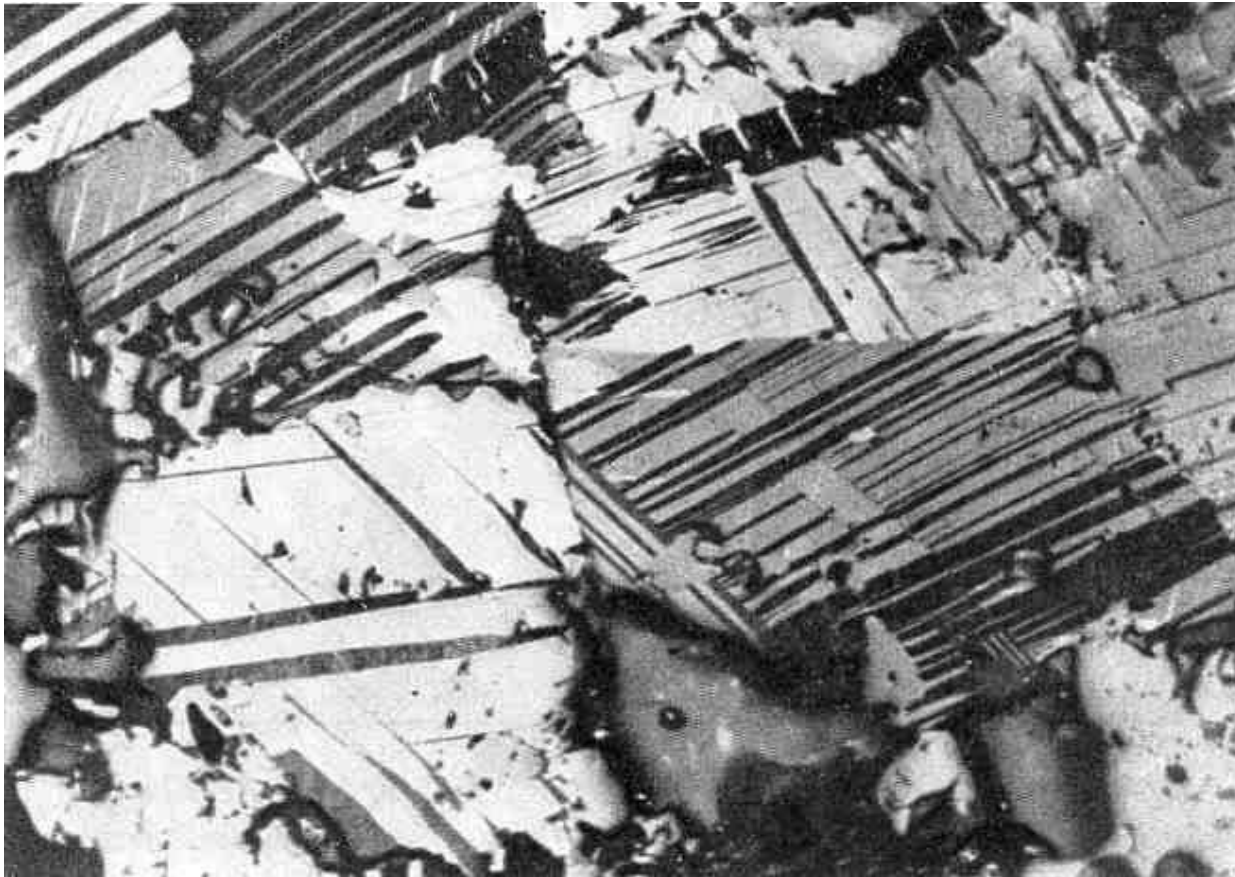


Шлиф.  
Николи x

Метаскарны Златоуста. Юж. Урал  
Колл. А.В. Тевелева.  
Фото Э.М. Спиридонова

# Двойники полиморфных превращений

Переход высокий кубический гауссманит → низкий тетрагональный гауссманит  $\text{MnMn}_2\text{O}_4$ . При этом превращении однородные кристаллы кубической фазы превращаются в кристаллы, состоящие из пластинчатых и сложной формы двойников полиморфного перехода.

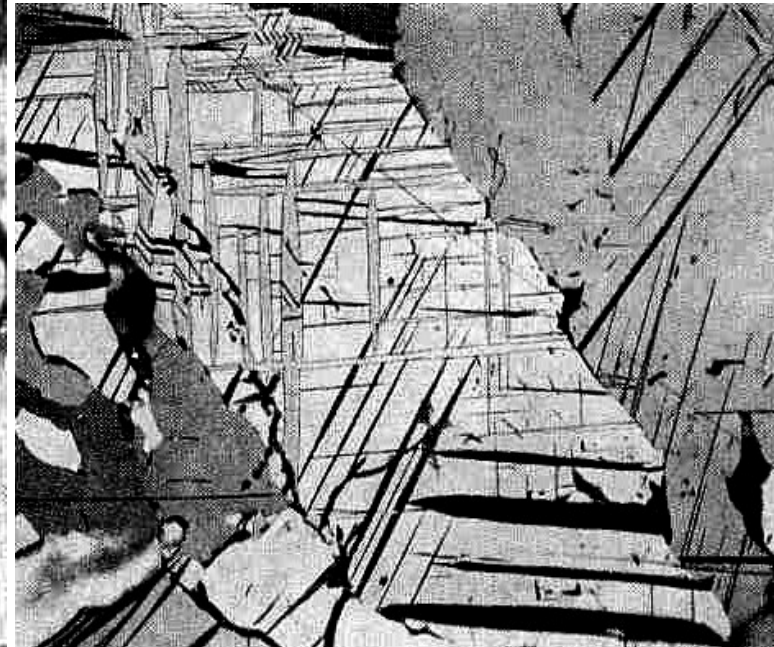
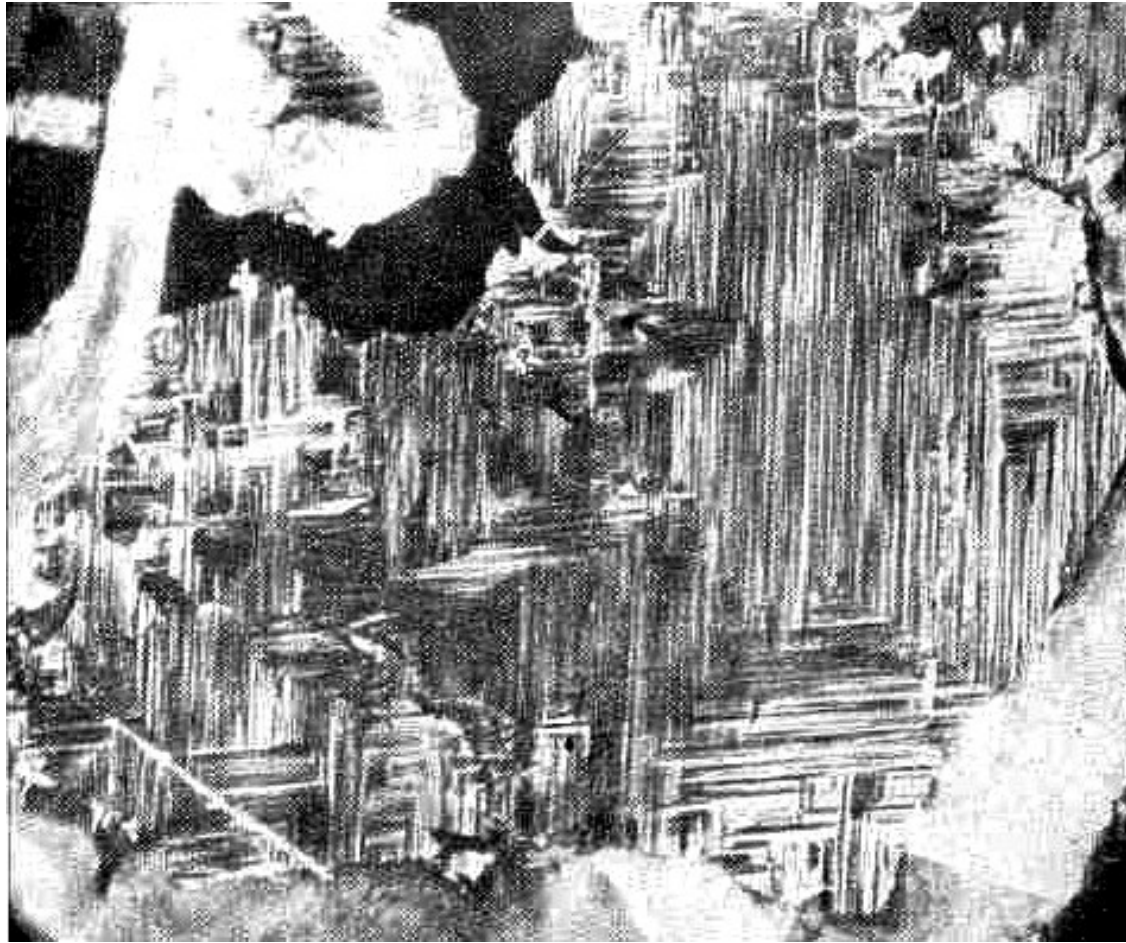


Фотография в отражённом свете. 1.4 мм. Николи х



# Двойники полиморфных превращений

Переход высокий кубический → низкий тетрагональный умангит  $\text{Cu}_3\text{Se}_2$ . При этом превращении однородные кристаллы кубической фазы превращаются в кристаллы, состоящие из пластинчатых и сложной формы двойников полиморфного перехода.

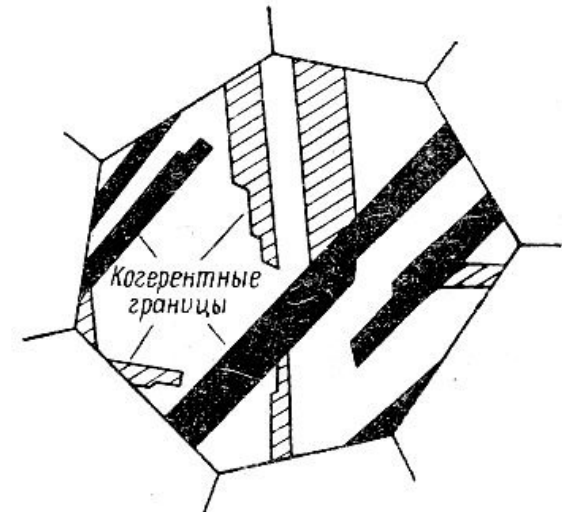


Фотографии в отражённом свете. Николи х. Serra de Pelada, Аргентина



# Двойники полиморфных превращений

Переход изотропный (расплавленный) висмут → тригональный висмут. При этом превращении возникают кристаллы, состоящие их пластинчатых и сложной формы двойников полиморфного перехода.



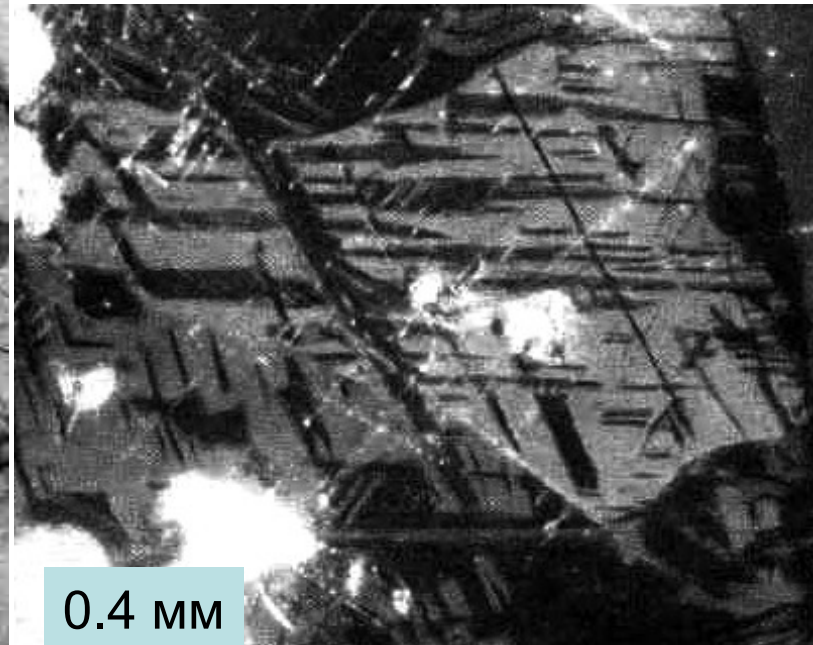
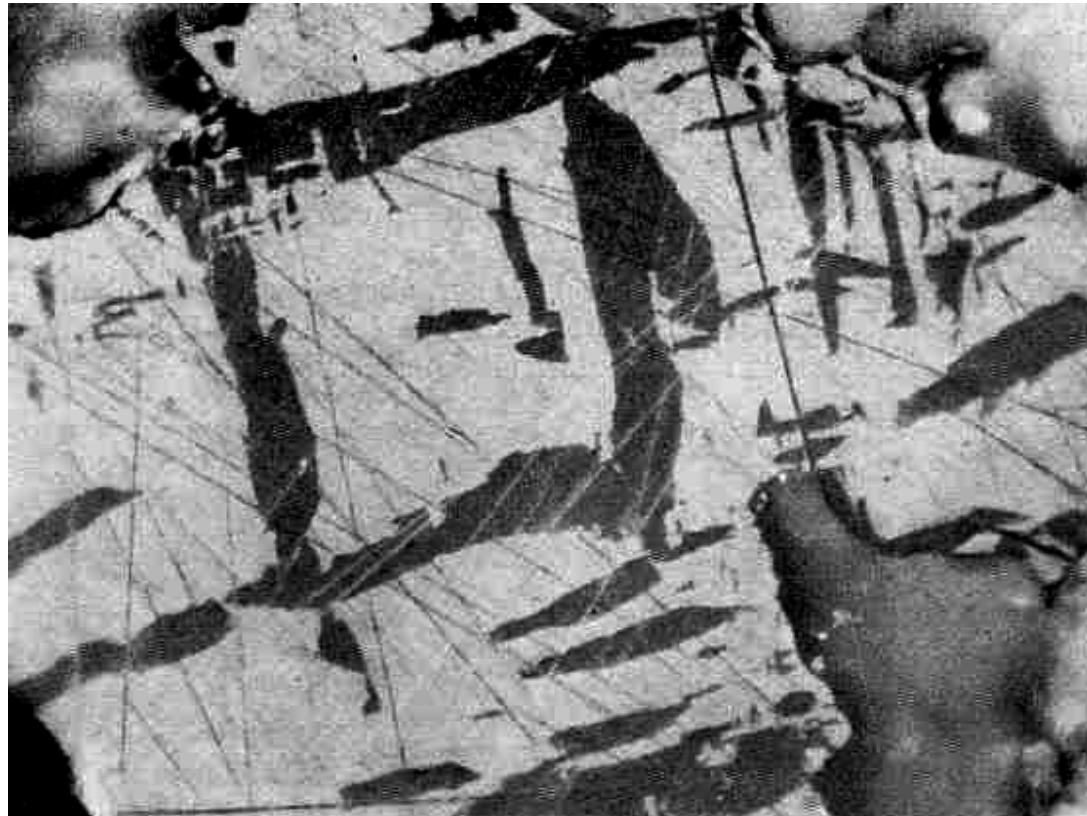
Двойники полиморфного перехода кубического купроаурида  $\text{AuCu}$  в тетрагональный тетрааурикуприд  $\text{AuCu}$

Vergr. 250mal Immersion, Nic. fast +  
Lancelot Tin-Mine Herberton. Queensland

RAMDOE

# Двойники полиморфных превращений

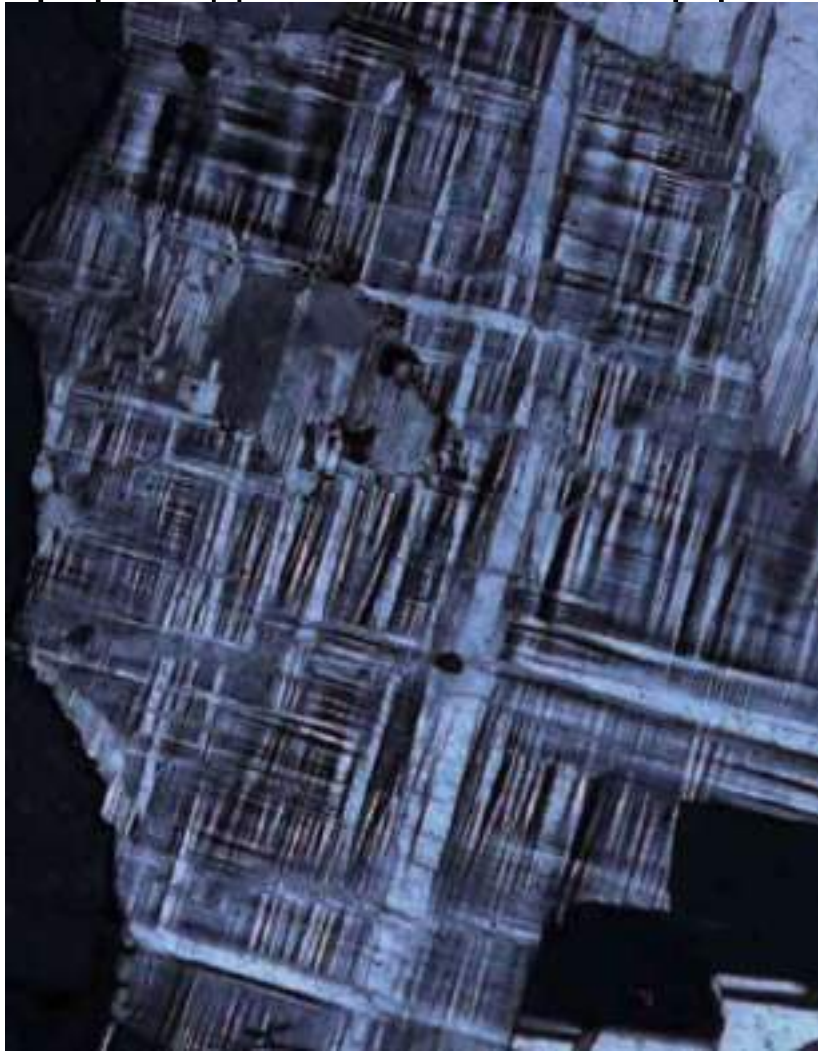
Переход высокий кубический → низкий моноклинный гессит  $\text{Ag}_2\text{Te}$ .  
При этом превращении однородные кристаллы кубической фазы превращаются в кристаллы, состоящие из пластинчатых и сложной формы двойников полиморфных переходов.





# Двойники полиморфных превращений

Переходы моноклинный санидин → низкий триклинный микроклин  $K[AlSi_3O_8]$ . При этих превращениях однородные кристаллы моноклинной фазы превращаются в кристаллы, состоящие их пластинчатых и сложной формы двойников полиморфного перехода.



Апограниты =  
кварц-альбит-санидиновые  
метасоматиты.  
При отжиге санидин  
превратился  
в микроклин.

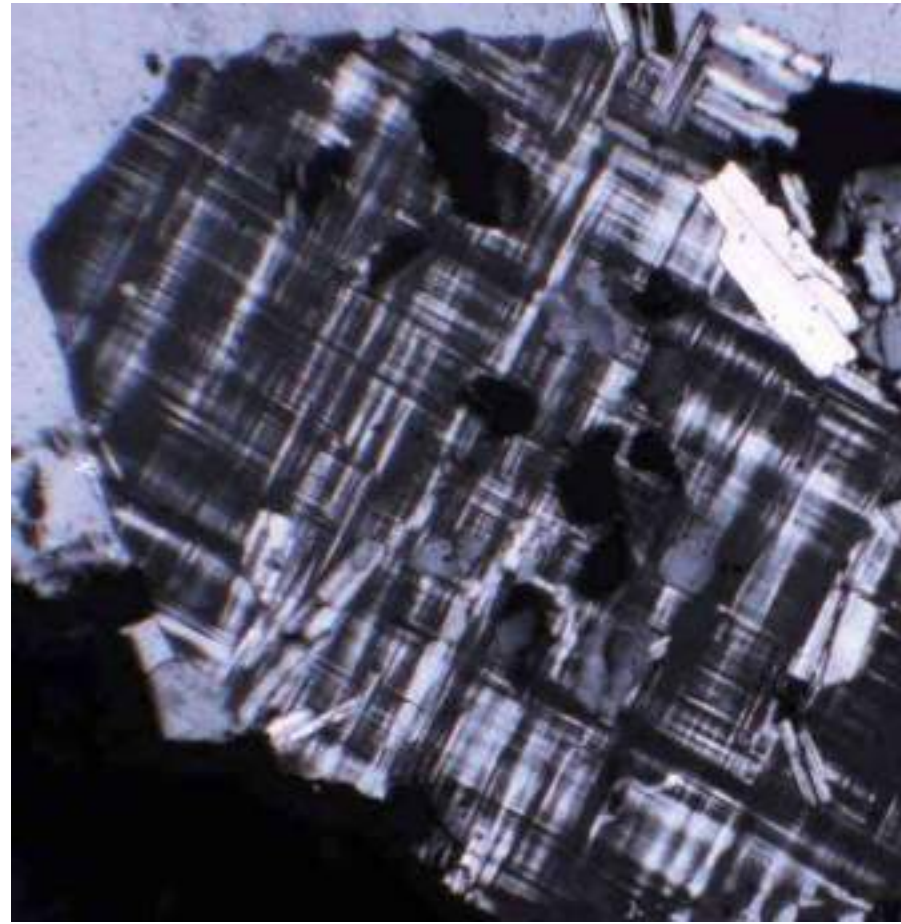
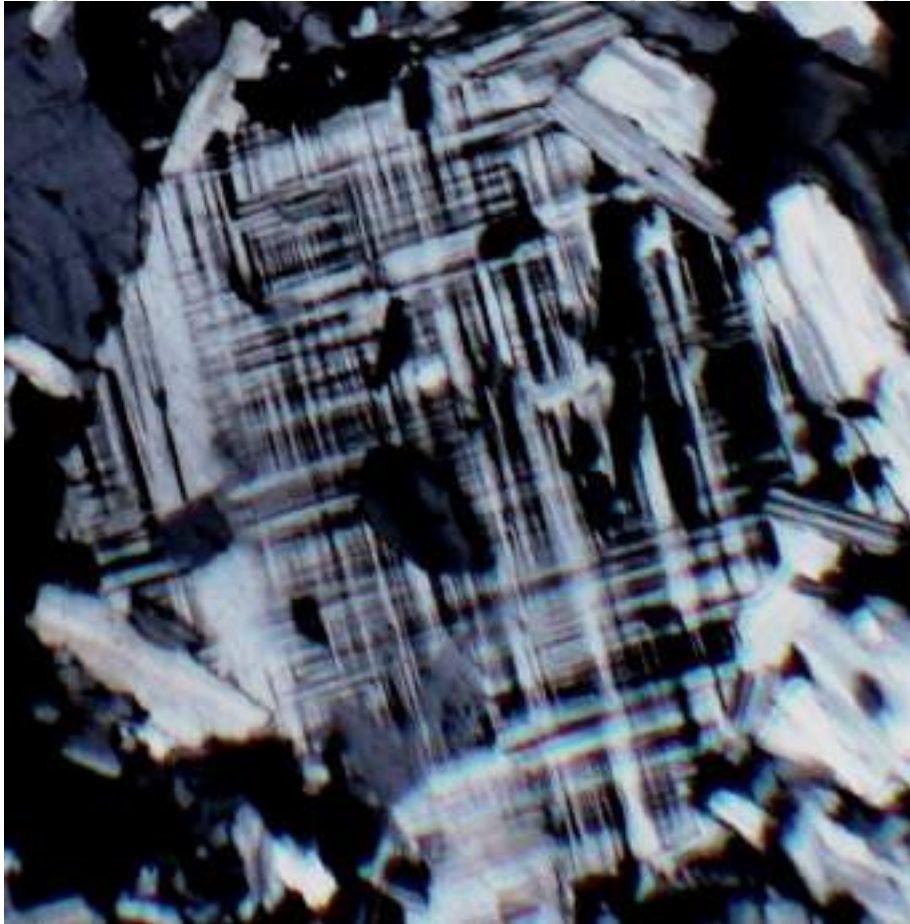
Катугино.

Шлиф. Николи х



# Двойники полиморфных превращений

Переходы моноклинный санидин → низкий триклинный микроклин  $K[AlSi_3O_8]$ . При этих превращениях однородные кристаллы моноклинной фазы превращаются в кристаллы, состоящие их пластинчатых и сложной формы двойников полиморфного перехода.

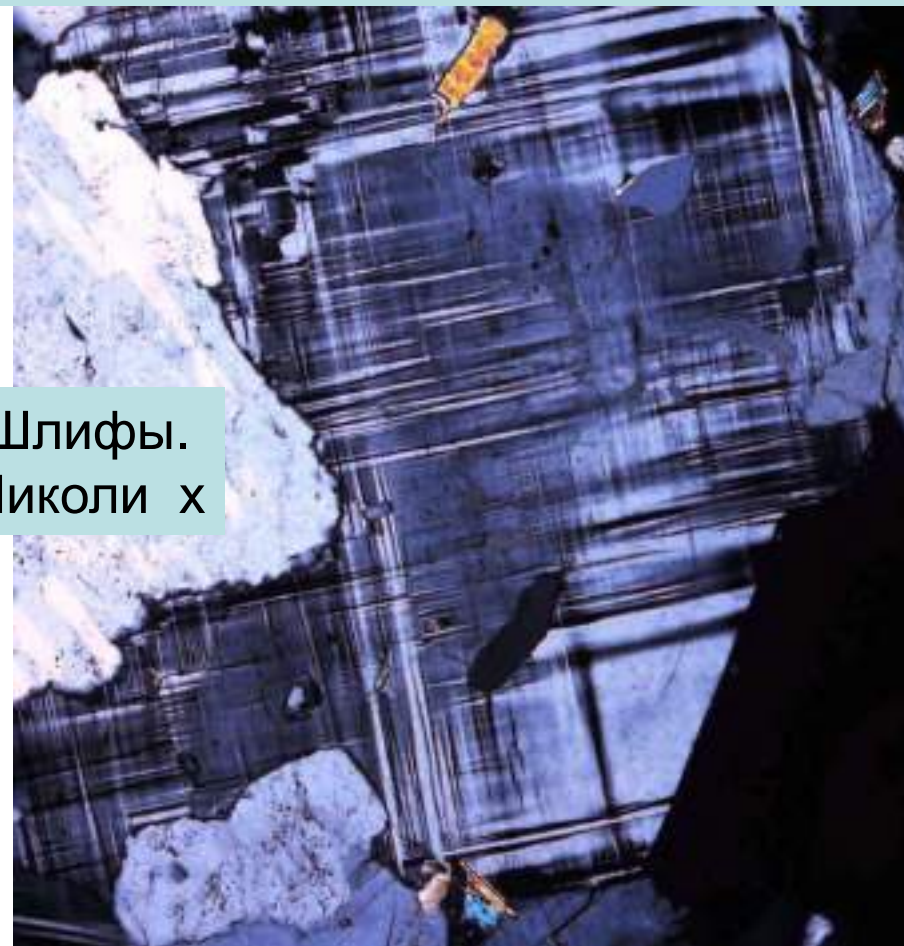
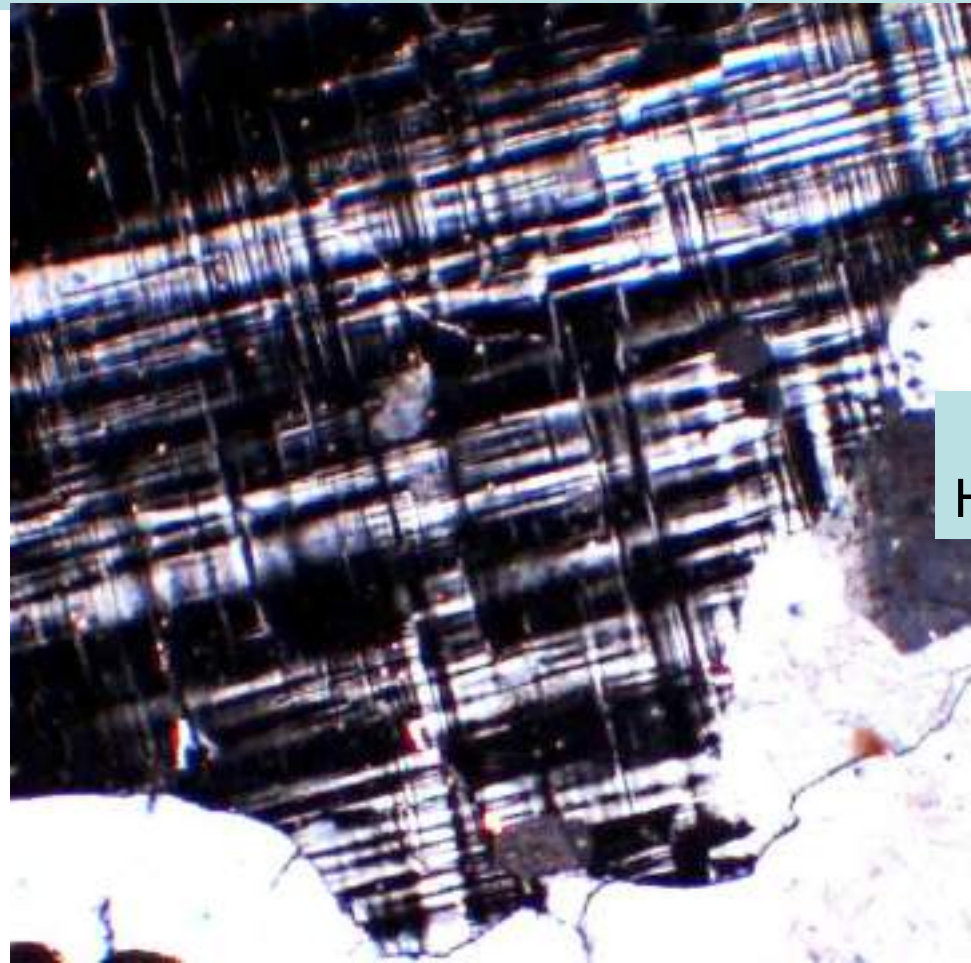


Апограниты. Этыка, Забайкалье. Шлифы. Николи х



# Двойники полиморфных превращений

Переходы моноклинный санидин  $\rightarrow$  низкий триклинный микроклин  $K[AlSi_3O_8]$ . При этих превращениях однородные кристаллы моноклинной фазы превращаются в кристаллы, состоящие их пластинчатых и сложной формы двойников полиморфного перехода.



Шлифы.  
Николи x

Граниты. Ермаковское, Забайкалье

Апограниты. Юго-Коневское, Урал





## РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Григорьев Д.П. Онтогения минералов. Львов: изд. Львов. ун-та. 1961. 284 с.
2. Григорьев Д.П., Жабин А.Г. Онтогения минералов. Индивиды. М.: Наука. 1975. 339 с.
3. Краснова Н.И., Петров Т.Г. Генезис минеральных индивидов и агрегатов. Спб.: Невский курьер. 1997. 228 с.
4. Хейман Р.Б. Растворение кристаллов. Л.: Недра. 1979. 272 с.
5. Дымков Ю.М. Парагенезис минералов ураноносных жил. М.: Недра. 1985. 207 с.
6. Бакли Г. Рост кристаллов. М.: ИЛ, 1954. 406 с.
7. Белов Н.В. Очерки структурной минералогии. М.: Недра. 1976. 323 с.
8. Пунин Ю.О., Штукенберг А.Г. Автодеформационные дефекты кристаллов. СПб.: 2008. 318 с.
9. Goldschmidt V.M. Atlas der Kristallformen. Heidelberg: Winter. 1913. В. 1, 248 s. В. 2, Tafeln 251. 1916. В. 3, Tafeln 247. 1923. В. 9, Tafeln 128.
10. Болдырев А.К., Бетехтин А.Г., Годлевский М.Н., Григорьев Д.П., Киселёв А.И., Левицкий О.Д., Разумовский Н.К., Смирнов А.А., Соболев В.С., Соловьёв С.П., Успенский Н.М., Черных В.В., Шаталов Е.Т., Шафрановский И.И. Курс минералогии. М.-Л.: ОНТИ. 1936.
11. Бетехтин А.Г., Генкин А.Д., Филимонова А.А., Шадлун Т.Н. Текстуры и структуры руд. М.: Госгеолтехиздат. 1958. 436 с.  
Бетехтин А.Г., Генкин А.Д., Филимонова А.А., Шадлун Т.Н. Структурно – текстурные особенности эндогенных руд. М.: Недра. 1964. 599 с.
12. Гегузин Я.Е. Живой кристалл. М.: Наука. 1987. 197 с.
13. Жабин А.Г. Онтогения минералов (агрегаты). М.: Наука. 1979. 275 с.
14. Костов И. Минералогия. М.: Мир. 1971. 584 с.
15. Костов И., Минчева-Стефанова И. Сульфидные минералы. Кристаллохимия, парагенезисы, систематика. М.: Мир. 1984. 290 с.
16. Леммлейн Г.Г. Морфология и генезис кристаллов. М.: Наука. 1973. 328 с.
17. Рамдор П. Рудные минералы и их сростания. М.: ИЛ. 1962. 1132 с.
18. Ребиндер П.А., Шукин Е.Д. Поверхностные явления в твёрдых телах в процессах их деформации и разрушения // Успехи физических наук. 1972. Т. 108. Вып. 1. С. 3-42.
19. Шафрановский И.И. Кристаллы минералов. Кривогранные, скелетные и зернистые формы. М.: Госгеолтехиздат. 1961. 332 с.
20. Юшкин Н.П. Теория и методы минералогии. Л.: Наука. 1977. 291 с.
21. Рид С.Дж.Б. Электронно-зондовый микроанализ и растровая электронная микроскопия в геологии. М.: Техносфера. 2008. 232 с.
22. Спиридонов Э.М. Учебное пособие. Генетическая минералогия. Часть 1. Онтогения и филогения. Место изд. Электр. версия сайта кафедры минералогии геолог. ф-та МГУ [http://www.geol.msu.ru/deps/mineral/index%20\(35\).htm](http://www.geol.msu.ru/deps/mineral/index%20(35).htm)

## Литература

- Алексеев Д.** О периодических явлениях при кристаллизации // Ж. Русского физ.-хим. об-ва. 1906. Т. 38. Вып. 7. С.1120-1123.
- Аншелес О.М.** О природе округлых форм алмаза. В кн.: Кристаллография и кристаллохимия. Л.: изд. АН СССР. 1954. С. 36-92.
- Аполлонов В.Н.** Механизм и условия роста ритмично построенных кристаллов // Докл. РАН. 1999. Т. 364. № 1. С. 94-96.
- Артемьев Д.Н.** Метод кристаллизации шаров и его применение при изучении формы и строения кристаллического вещества. Петроград. 1914. 247 с.
- Артюшков Е.В.** Основные формы конвективных структур в осадочных породах // Докл. АН СССР. 1963. Т. 153. С.412-415.
- Афанасьев В.П., Зинчук Н.Н., Похиленко Н.П.** Морфология и морфогенез индикаторных минералов кимберлитов. Новосибирск: Наука. 2001.
- Базаров И.П., Геворкян Э.В.** Статистическая теория твёрдых и жидких кристаллов. М.: изд. МГУ. 1983. 261 с.
- Бакуменко И.Т.** Закономерные кварц-полевошпатовые сростания в пегматитах и их генезис. М.: Наука. 1966. 172 с.
- Балыкин П.А., Кислов Е.В., Майорова О.Н. и др.** Орбикулярные породы из протерозойских ультрабазит-базитовых массивов Северного Прибайкалья // Геология и геофизика. 1987. С. 494-504.
- Барабанов В.Ф.** Минералогия вольфрамитовых месторождений Забайкалья. Т. 2. Л.: изд. ЛГУ. 1975. 360 с.
- Барабанов В.Ф.** Генетическая минералогия. Л.: Недра. 1977. 327 с.
- Барсанов Г.П.** К истории развития русской минералогии XVIII века // Тр. Минерал. музея АН СССР. 1950. Вып. 2. С. -
- Безруков В.А., Безруков Г.Н., Бутузов В.П. и др.** Морфология кристаллов алмаза, синтезированных в широком интервале температур и давлений // Зап. ВМО. 1966. Ч. 95. Вып. 1. С. 3-9.
- Бельков И.В.** Кианитовые сланцы свиты Кейв. М.-Л.: изд. АН СССР. 1963. 136 с.
- Берри Л., Мейсон Б., Дитрих Р.** Минералогия. М.: Мир. 1987. 592 с.
- Бескрованов В.В.** Онтогенез алмаза. М.: Наука. 1992. 166 с.
- Болдырев А.К.** Кристаллография. Ленинград-Москва-Грозный-Новосибирск: ОНТИ НКТП СССР. 1934. 432 с.
- Бонев И., Горова М.** Морфология и генезис на скелетниа галенит от оловно-цинкового находище Звездел - галенит // Тр. Геолог. ин-та Болгар. АН. Серия геохимия, минералогия, петрография. 1972. Кн. XXI. С. 63-76.
- Бочвар А.А.** Механизм и кинетика кристаллизации сплавов эвтектического типа. М.: ОНТИ. 1935. 82с.
- Бродин Б.В., Дымкова Г.А.** Структуры усадки гюбнерита, замещающего шеелит // Зап. ВМО. 1966. Вып. 5. С. 570-572.
- Бродская Р.Л.** Онтогенический анализ магматических горных пород // Минерал. ж. 1989. Вып. 5. С. 3-10.
- Бродская Р.Л., Бильская Л.И., Ляхницкая В.Д., Марковский Б.А., Сидоров Е.Г.** Границы сростания минеральных индивидов – зона вторичного минералогенезиса в агрегате // Зап. ВМО. 2007. Ч. 136. Вып. 3. С. 1-18.
- Брюшкова Л.П.** Геологические коллекции и их место в системе науки и культуры // Тр. Минерал. музея АН СССР. 1986. Вып. 36. С. 187-193.
- Васильев В.И., Лаврентьев Ю.Г., Бердичевский Г.В.** О псевдоморфозах швацита по антимониту, халькостибиту и цинкентиту. В кн.: Минералы и парагенезисы минералов эндогенных месторождений. Л.: Наука. 1975. С. 112-117.

- Васильева А.И.** Морфологические особенности ритмических текстур и их роль в выяснении условий рудообразования. М.: Наука. 1970. 128 с.
- Васильева А.И., Лаврентьев Ю.Г., Поспелова Л.Н.** Распределение Mg и Mn в ритмических агрегатах и некоторые вопросы их генезиса. В кн.: Минералого-геохим. особенности скарновых месторождений. М.: Наука. 1974. С. 131-137.
- Вертушков Г.Н.** Разлистованный кварц с горы Хрустальной // Зап. ВМО. 1946. Ч. 75. Вып. 4.
- Вертушков Г.Н.** Сталактиты кварца в жеоде лимонита со Среднего Урала // Зап. ВМО. 1954. Ч. 83. Вып. 3.
- Вертушков Г.Н.** Гумёшевское месторождение малахита на Урале. В кн.: Минералогия и петрография Урала. Свердловск: 1975. С. 3-26.
- Вертушков Г.Н., Борисков Ф.Ф., Емлин Э.Ф.** Жильный кварц восточного склона Урала. Свердловск: 1970. 103 с.
- Вильке К.Т.** Методы выращивания кристаллов. М.: Недра. 1977. 600 с.
- Винчелл А.Н., Винчелл Г.** Оптическая минералогия. М.: ИЛ. 1953. 564 с.
- Вишняков С.Г.** Кремнистые образования в карбонатных породах нижнего и среднего карбона СЗ крыла Подмосковского бассейна // Изв. АН СССР. Сер. геол. 1953. № 4. С. 80-90.
- Владимиров В.И., Романов А.Е.** Дисклинации в кристаллах. Л.: Наука. 1986. 224 с.
- Волостных Г.Т., Рундквист Д.В.** К изучению структур метасоматических пород // Тр. ВСЕГЕИ. 1979. Т. 287. С. 56-66.
- Вотяков С.Л., Щапова Ю.В., Хиллер В.В.** Кристаллохимия и физика радиационно-термических эффектов в ряде U-Th-содержащих минералов как основа для их химического микрозондового датирования. Екатеринбург: ИГиГ УрО РАН. 2011. 336 с.
- Гегузин Я.Е.** Очерки о диффузии в кристаллах. М.: Наука. 1974. 252 с.
- Гегузин Я.Е.** Механизмы и кинетика преобразований формы включений в кристаллах. В кн.: Проблемы современной кристаллографии. М.: Наука. 1975. С. 110-127.
- Генделев С.Ш.** Морфологическая классификация штриховки роста на кристаллах // Зап. ВМО. 1961. Ч. 90. Вып. 6. С. 629-636.
- Генезис минеральных индивидов и агрегатов. Онтогенез минералов (ред. Д.П. Григорьев). М.: Наука. 1966. 302 с.
- Гениш Г.** Выращивание кристаллов в гелях. М.: Мир. 1973. 112 с.
- Георгиевская О.Г.** К вопросу о генезисе ритмично-витиевато-полосчатой текстуры рудных тел некоторых контактово-метасоматических месторождений // Докл. АН СССР. 1955. Т. 101. № 5.
- Гиваргизов Е.И.** Рост нитевидных и пластинчатых кристаллов из пара. М.: Наука. 1977. 303 с.
- Гликин А.Э.** Полиминерально-метасоматический кристаллогенез. СПб.: Нева. 2004. 320 с.
- Гликин А.Э.** К генетической природе изоморфного механизма отбора компонентов при образовании кристаллов // Зап. РМО. 2007. Ч. 136. Вып. 2. С. 1-6.
- Гневушев М.А.** Следы травления и растворения на якутских алмазах // Минерал. сб. Львов. геол. об-ва. 1957. № 11.
- Годлевский М.Н., Немилова А.В.** Очерки по истории минералогии в России в XVIII в. // Тр. Минерал. музея АН СССР. 1991. Вып. 37. С. 3-32.
- Годовиков А.А.** Минералогия. М.: Недра. 1983. 648 с.
- Годовиков А.А., Рипинен О.И., Степанов В.И.** Сферолиты, сферокристаллы, сфероидолиты, ядросферолиты // Тр. Минерал. музея РАН им. А.Е. Ферсмана. 1989. Вып. 36. С. 24-36.
- Горобец Б.С.** Спектры люминесценции минералов. М.: изд. ВИМС. 1981. 153 с.
- Горская М.Г., Пунин Ю.О., Соколов П.Б., Крецер Ю.А.** Неоднородность состава и гетерометрия в кристаллах полихромных турмалинов // Минерал. журнал. 1992. Т. 14. № 3. С. 8-20.
- Готтштайн Г.** Физико-химические основы материаловедения. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний. 2009. 400 с.
- Григорьев Д.П.** Закономерные срастания самарскита и колумбита с Ильменских гор // Зап. ВМО. 1945. Вып. 1. С. 57-61.



- Григорьев Д.П.** Минералогические отвесы и уровни // Природа. 1948. № 3. С. 47-49.
- Григорьев Д.П.** Генерации и зарождения минералов // Минерал. сб. Львов. геолог. об-ва. 1949. № 3. С. 13-22.
- Григорьев Д.П.** О генезисе натёчных или метаколлоидных колломорфных агрегатов минералов // Зап. ВМО. 1953. Ч. 82. Вып. 1. С. 7-21.
- Григорьев Д.П.** О проявлении спайности кварца в природе // Зап. ВМО. 1958. Ч. 87. Вып. 4. С. 418-422.
- Григорьев Д.П.** Естественные объекты минералогии: минеральные индивиды и минеральные виды // Зап. ВМО. 1975. Ч. 104. Вып. 4. С. 513-514.
- Григорьев Д.П.** Морфология скелетных кристаллов во фрагменте шпинелевого троктолита, доставленного автоматической станцией «Луна-20» // Докл. АН СССР. 1975. Т. 225. № 2. С. 403-405.
- Григорьев Д.П.** Сравнительно-исторический анализ при изучении генезиса минералов и минеральных месторождений // Зап. ВМО. 1982. Ч. 116. Вып. 4. С. 422-431.
- Григорьев Д.П.** Рассуждения о минералогии. Сыктывкар: Геопринт. 1998. 88 с.
- Григорьев Д.П., Буканов В.В., Маркова Г.А.** Синхронизация процессов кристаллизации по зональности кристаллов // Докл. АН СССР. 1969. Т. 185. № 5. С. 1129-1132.
- Григорьев Д.П., Карякина Т.А.** О кристаллизации кварца в халцедоновых жеодах // Минерал. сб. Львов. Геол. Об-ва. 1962. № 16. С. 106-112.
- Григорьев Д.П., Маркова Г.А.** Фотометрическое исследование зонального и секториального строения мусковита. В кн.: Проблемы кристаллологии. М.: изд. МГУ. 1971. С. 171-178.
- Григорьев Д.П., Шафрановский И.И.** Эпитаксическое нарастание кварца на полевой шпат // Зап. ВМО. 1946. Вып. 4. С. 265-272.
- Григорьев И.Ф.** Структуры минеральных сростаний в рудах // Зап. ВМО. 1928. Ч. 57. Вып. 1. С. 11-60.
- Грицаенко Г.С., Звягин Б.Б., Боярская Р.В.** Методы электронной микроскопии минералов. М.: Наука. 1969. 312 с.
- Грот П.** Физическая кристаллография. СПб.: изд. К.Л. Риккера. 1896. 850 с.
- Гуревич Ю.Я.** Твёрдые электролиты. М.: Наука. 1986. 174 с.
- де Бур Я.Х.** Динамический характер адсорбции. М.: ИЛ. 1962. 290 с.
- Делоне Н.Б.** Основы физики конденсированного вещества. М.: Физматлит. 2011. 236 с.
- Дёмина Т.В., Михайлов М.А., Белозёрова О.Ю.** Синтетические минералы группы берилла: связь симметрии и упорядоченности структуры с химическим составом и анатомией кристаллов // Зап. ВМО. 2003. Ч. 132. Вып. 5. С. 1-21.
- Джексон К.** Основные представления о росте кристаллов. В кн.: Проблемы роста кристаллов. М.: Мир. 1968. С. 13-26.
- Дистлер Г.И.** Кристаллизация как матричный репликационный процесс // Рост кристаллов. Т. 11. Ереван: изд. Ереванского ун-та. 1975. С. 47-62.
- Дорфман М.Д.** Сростки кристаллов ильменита типа розы в Хибинском щелочном массиве // Тр. Минерал. музея АН СССР. 1973. Вып. 22. С. 195-198.
- Дымкин А.М., Пермьяков А.А.** Онтогенез магнетита. Свердловск: УНЦ АН СССР. 1984. 189 с.
- Дымков Ю.М.** Графическое изображение минерального состава сложных пегматитовых жил // Тр. Минерал. музея АН СССР. 1951. Вып. 3. С. 135-138.
- Дымков Ю.М.** Одновременный совместный рост кристаллов и сферолитов // Тр. Минерал. музея АН СССР. 1957. Вып. 8. С. 150-154.
- Дымков Ю.М.** Урановая минерализация Рудных гор. М.: Атомиздат. 1960. 100 с.
- Дымков Ю.М.** Одновременный совместный рост выделений настурана и сопровождающих его минералов // Зап. ВМО. 1962. Ч. 91. Вып. 3. С. 299-306.
- Дымков Ю.М.** Природа урановой смоляной руды. Вопросы генетической минералогии. М.: Атомиздат. 1973. 240 с.

- Дымков Ю.М.** Гравитационные текстуры минеральных агрегатов. В кн.: Онтогенез минералов в практике геолог. работ. Свердловск: УНЦ АН СССР. 1984. С. 13-23.
- Дымков Ю.М., Дымкова Г.А.** Признаки многократного растворения кристаллов берилла. В кн.: Онтогенезические методы изучения минералов. М.: Наука. 1970. С. 109-123.
- Дымков Ю.М., Дымкова Г.А., Федорова И.Ю.** Периодические гравитационные текстуры в никелин-раммельсбергитовых отстойниках баритовых жил Рудных Гор // Минерал. ж. 1991. Т. 13. № 1. С. 87-94.
- Дымков Ю.М., Казанцев В.В., Любченко В.А.** Крустификационные карбонатные жилы уран-арсенидного месторождения. В кн.: Месторождения урана: зональность и парагенезисы. М.: Атомиздат. 1970. С. 205-243.
- Дымков Ю.М., Слётов В.А.** Совместное образование кристаллов и зернистых агрегатов в гидротермальных отстойниках // Тр. Минерал. музея СССР. 1981. Вып. 29. С. 54-59.
- Еремеев П.В.** О двойниках алмаза из Бразилии // Зап. МО. 1871. Ч. 6. С. 408-410.
- Ермаков Н.П.** Исследования минералообразующих растворов. Харьков: изд. Харьков. университета. 1960. 460 с.
- Ермаков Н.П.** Геохимические системы включений в минералах. М.: Недра. 1972. 376 с.
- Жабин А.Г.** Метакристаллы и критерий относительного идиоморфизма минералов. В кн.: Генезис минеральных индивидов и агрегатов. М.: Наука. 1966. С. 34-50.
- Жабин А.Г.** Гравитационные текстуры рудоотложения в свинцово-цинковом месторождении Квайса (Центральный Кавказ) // Докл. АН СССР. 1980. Т. 251. С. 674-676.
- Жабин А.Г.** Сфалеритовые сталактиты в эндогенных свинцово-цинковых рудах Квайсинского поля (Центральный Кавказ) // Геология рудных месторождений. 1983. Т. 25. № 4. С. 115-118.
- Жабин А.Г.** Топоминералогия рудного месторождения // Зап. ВМО. 1992. Ч. 121. Вып. 2. С. 117-118.
- Жабин А.Г., Оттеман И.** Онтогенез хромито-оливиновой эвтектики в дунитах. В кн.: Очерки по генетической минералогии. М.: Наука. 1976. С. 111-125.
- Жабин А.Г., Русинов В.Л.** Классификация и генезис псевдоморфоз // Зап. ВМО. 1973. Вып. 3. С. 241-253.
- Захарова Г.С., Волков В.Л., Ивановская В.В. и др.** Нанотрубки и родственные наноструктуры оксидов металлов: синтез и моделирование // Успехи химии. 2005. Т. 74. С. 651-685.
- Заячковский А.А., Надеждина Е.Д.** Морфология алмазов из тектонитов в метаморфических породах (Казахстан, месторождение Кумды-Куль). Алма-Ата. 1997. 100 с.
- Земятченский П.А.** Этюды по кристаллогенезису: I // Зап. Императ. АН по физ-мат. отд. СПб. 1909. Т. 24. № 8. С. 1-37.
- Земятченский П.А.** Этюды по кристаллогенезису: II // Зап. Императ. АН по физ-мат. отд. СПб. 1911. Т. 30. № 3. С. 1-19.
- Земятченский П.А.** Этюды по кристаллогенезису: III // Зап. Императ. АН по физ-мат. отд. Петроград. 1914. Т. 33. № 4. С. 1-72.
- Земятченский П.А.** Этюды по кристаллогенезису: IV // Зап. Императ. АН по физ-мат. отд. Петроград. 1914. Т. 33. № 5. С. 1-13.
- Инденбом В.Л.** Дислокационное описание простейших явлений пластической деформации. В кн.: Итоги науки. Физико-математические науки. Т. 3. М.: изд. АН СССР. 1960. С. 117-158.
- Инденбом В.Л.** К теории образования напряжений и дислокаций при росте кристаллов // Кристаллография. 1964. Т. 9. № 1. С. 74-83.
- Инденбом В.Л.** Роль упругого взаимодействия в явлениях эпитаксии // Рост кристаллов. Т. XI. Ереван: изд. ЕГУ. 1975. С. 62-64.
- Инденбом В.Л., Томиловский Г.Е.** Внутренние напряжения вокруг единичных дислокаций // Докл. АН СССР. 1957. Т. 115. № 4. С. 723-726.

- Инденбом В.Л., Томиловский Г.Е.** Макроскопические краевые дислокации в кристалле корунда // Кристаллография. 1957. Т. 2. № 1. С. 190-192.
- Иоффе А.Ф.** Упругие и электрические свойства кварца // Изв. Петроград. Политехнич. ин-та. 1915. Т. 24. Вып. 1. С. 1-126.
- Исаенко М.П.** Определитель текстур и структур руд. М.: Недра. 1983. 261 с.
- Кан Р.У.** Возврат и рекристаллизация. В кн.: Физическое металловедение. М.: ИЛ. 1968. Вып. 3. С. 371-442.
- Кантор Б.З.** К проблеме генезиса агатов (новые данные) // Тр. Минерал. музея РАН им. А.Е. Ферсмана. 2006. Вып. 41. С. 145-153.
- Карножицкий А.Н.** Об оптических аномалиях берилла // Зап. Имп. СПб. Минерал. об-ва. 1891. Ч. 27. С. 1-14.
- Кизильштейн Л.Я., Минаева Л.Г.** Происхождение фрамбоидальных форм пирита // Докл. АН СССР. 1972. Т. 206. С. 1187-1189.
- Киттель Ч.** Введение в физику твёрдого тела. М.: Наука. 1978. 792 с.
- Китайгородский А.И.** Молекулярные кристаллы. М.: Наука. 1971. 424 с.
- Классен-Неклюдова М.В.** Механическое двойникование кристаллов. М.: изд. АН СССР. 1960. 262 с.
- Ковтуненко П.В.** Физическая химия твёрдого тела (кристаллы с дефектами). М.: Высшая школа. 1993. 352 с.
- Козлова О.Г.** Рост и морфология кристаллов. М.: изд. МГУ. 1980. 368 с.
- Козлова О.Г.** Морфолого-генетический анализ кристаллов. М.: МГУ. 1991. 224 с.
- Козлова О.Г., Харитонов Ю.А., Белов Н.В.** Гипоморфия и гиперморфия // Докл АН СССР. 1979. Т. 247. С. 100-106.
- Козловский М.И.** Спиральный рост и растворение кристаллов // Рост кристаллов. 1960. Т. 3. С. 101-106.
- Колонг Р.** Нестехиометрия. М.: Мир. 1974. 288 с.
- Кораго А.А.** Использование кристалломорфологии кварца из развалов для определения залегания хрусталеносных гнёзд // Зап. ВМО. 1968. Ч. 97. Вып. 5. С. 637-640.
- Кораго А.А., Козлов А.В.** Текстуры и структуры жильного кварца хрусталеносных областей. Л.: Недра. 1988. 160 с.
- Кормилицын В.С.** Рудные формации и процессы рудообразования. Л.: Недра. 1973. 247 с.
- Корнетова В.А.** Атлас текстур и структур гранитных пегматитов. М.: Наука. 1983. 124 с.
- Корнилова В.П., Никишов К.Н., Ковальский В.В., Никишова Л.В. и др.** Атлас текстур и структур кимберлитовых пород. М.: Наука. 1983. 158 с.
- Краснова Н.И., Петров Т.Г., Золотарёва Н.Ю.** Экспериментальное изучение собирательной перекристаллизации // Минерал. журнал. 1985. Т. 6. № 4. С. 66-73.
- Крейг Дж., Воган Д.** Рудная микроскопия и рудная петрография. М.: Мир. 1983. 424 с.
- Кротов Б.П.** О псевдоморфозах по каменной соли // Зап. ВМО. 1925. Вып. 1. С. 25-31.
- Кузнецов В.И., Харин Г.Г.** К вопросу о механизме роста полых кристаллов сульфида цинка // Минерал. сб. Львов. ун-та. 1969. № 23. Вып. 2. С. 188-192.
- Кузнецов Е.А., Чжао-Лин Ли** Дисперсия двупреломления, химический состав и структура берилла // Вестник МГУ. Серия геол. 1960. № 6. С. 46-58.
- Кузьмина М.А., Пунин Ю.О., Каменцев И.Е.** Особенности внешней и внутренней морфологии скрученных кристаллов кварца // Зап. ВМО. 1987. Ч. 116. Вып. 4. С. 445-453.
- Кузьмина М.А., Пунин Ю.О., Мошкин С.В., Карякина Т.А.** Гетерометрия и дефектность кристаллов кварца из гидротермальных жил Урала // Зап. ВМО. 1997. Ч. 126. Вып. 4. С. 30-43.
- Кунц А.Ф.** Типоморфные особенности природных и искусственных кристаллов СаF<sub>2</sub>. В кн.: Геология и полезные ископаемые Северо-Востока Европейской части СССР. Сыктывкар: Коми Филиал АН СССР. 1974. С. 156-162.
- Кухаренко А.А.** Об округлых кристаллах алмаза // Уч. зап. Ленинград. ун-та. 1954. № 173. С. 96-136.



**Кухаренко А.А.** Алмазы Урала. М.: Госгеолтехиздат. 1955. 555 с.

**Кюри П.О.** О симметрии в физических явлениях. Избр. тр. М.-Л.: Наука. 1966. 399 с.

**Лазаренко Е.К.** Опыт генетической классификации минералов. Киев: Наукова Думка. 1979. 312 с.

**Лазаренко Е.К., Павлишин В.И., Латыш В.Г.** Минералогия и генезис камерных пегматитов Вольни. Львов: изд. Львов. ун-та. 1973. 360 с.

**Ланда Э.А.** К вопросу об условиях образования метакристаллов и бластокристаллов // Тр. ВСЕГЕИ. 1979. Вып. 287. С. 43-56.

**Лапин А.В., Жабин А.Г.** Нодулярные текстуры хромита в дуните как результат неравновесной эвтектической кристаллизации // Докл. АН СССР. 1965. Т. 163. С. 1240-1243.

**Левинсон-Лессинг Ф.Ю., Воробьева О.А.** К изучению орбикулярных структур в изверженных породах // Докл. АН СССР. 1929. С. 351-356.

**Леммлейн Г.Г.** Искажение облика кристаллов кварца, обусловленное их положением во время роста // Докл. АН СССР. 1941. Т. 33. С. 415-418.

**Леммлейн Г.Г.** Процесс геометрического отбора в растущем агрегате кристаллов // Докл. АН СССР. 1945. Т. 48. № 3. С. 177-180.

**Леммлейн Г.Г.** О нарастании кварца на халцедон. В кн.: Акад. Д.С. Белянкину к 70-летию со дня рождения и 45-летия научной деятельности. М.: изд. АН СССР. 1946. С. 130-139.

**Леммлейн Г.Г.** Секториальное строение кристаллов. М.-Л.: изд. АН СССР. 1948. 40 с.

**Леммлейн Г.Г.** Процесс залечивания трещин в кристалле и преобразование формы полостей вторичных жидких включений // Докл. АН СССР. 1951. Т. 78. № 4. С. -.

**Леммлейн Г.Г.** Перемещение жидкого включения в кристалле в направлении источника тепла // Докл. АН СССР. 1952. Т. 85. С. 325-328.

**Леммлейн Г.Г.** Морфология и генезис кристаллов. М.: Наука. 1973. 327 с.

**Леммлейн Г.Г., Осадчев Б.Я.** Вертикальное распределение в жиле бесцветных и дымчатых кристаллов кварца // Докл. АН СССР. 1945. Т. 50. С. 441-442.

**Леонтьева А.А.** Кристаллизация двух оливиновых базальтов // Зап. ВМО. 1947. Ч. 76. Вып. 3. С. 202-210.

**Леонюк Н.И., Копорулина Е.В., Волкова Е.А., Мальцев В.В.** Зарождение, рост и морфология кристаллов. М.: МАКСПресс. 2010. 143 с.

**Линдгрэн В.** Минеральные месторождения. Вып. 1, 2, 3. М.-Л.: ОНТИ. 1932-1934.

**Лодиз Р., Паркер Р.** Рост монокристаллов. М.: Мир. 1974. 540 с.

**Льюис Р., Райфа Г.** Игры и решения. М.: ИЛ. 1961. 642 с.

**Ляхов Ю.В.** О соотношении линейных скоростей роста двух совместно кристаллизующихся минералов. В кн.: Исследования минералообразующих растворов. М.: Недра. 1966. С. 202-211.

**Мак Лин Д.** Границы зёрен в металлах. М.: Metallurgizdat. 1960. 321 с.

**Малеев М.Н.** Свойства и генезис природных нитевидных кристаллов и их агрегатов. М.: Наука. 1971. 199 с.

**Малеев М.** Вискеры спайности кварца // Годишник Софийского ун-та. 1979. Т. 71. Кн. 1. С. 21-36.

**Малеев М.Н.** Электрическая неоднородность и онтогенез минералов // Неоднородность минералов и рост кристаллов. М.: Наука. 1980. С. 19-27.

**Малеев М.Н., Филипов А.Ф.** Нитевидные кристаллы кальцита из пещеры "Водопада", округ Ловеча // Годишник Софий. ун-та. 1974. Т. 66. № 1. С. 151-172.

**Масалович А.М., Овчинников Л.Н.** Модель полиморфизма воды при 0-370<sup>0</sup> С. Расчёт плотности и энтальпии. В кн.: Экспериментальные исследования эндогенного рудообразования. М.: Наука. 1983. С. 142-155.

**Мокиевский В.А.** Классификация двойников // Зап. ВМО. 1968. Ч. 97. Вып. 5. С. 556-564.

**Мясников В.С.** Некоторые особенности месторождений титаномагнетитовых руд Южного Урала и проявление в них метаморфизма // Геология рудных месторождений. 1959. Т. 1. № 2. С. 49-62.

**Нагата Т.** Магнетизм горных пород. М.: Мир. 1965. 346 с.

- Най Дж.** Физические свойства кристаллов. М.: Мир. 1967. 385 с.
- Наковник Н.И.** О метасоматическом минералообразовании и законе равных объёмов // Зап. ВМО. 1949. Вып. 4. С. 270-272.
- Нарасимхамурти Т.** Фотоупругие и электрооптические свойства кристаллов. М.: Мир. 1984. 622 с.
- Немец Д.** Взаимное ориентированное обрастание различных полевых шпатов в изверженных горных породах. В кн.: Онтогенетические методы изучения минералов. М.: Наука. 1970. С. 162-177.
- Низамутдинов Н.М., Булка Г.Р., Гайнуллина Н.М., Винокуров В.М.** Симметрия распределения дефектов в правильных системах точек и свойства направлений спектров ЭПР в кристаллах. В кн.: Физические свойства минералов и горных пород. Казань: изд. Казан. ун-та. 1976. С. 3-48.
- Никитенко В.И., Осипьян Ю.А.** Влияние дислокаций на оптические, электрические и магнитные свойства кристаллов. В кн.: Проблемы современной кристаллографии. М.: Наука. 1975. С. 239-261.
- Никонова В.В., Рахманова Э.П.** Морфология эвтектических колоний. В кн.: Рост кристаллов. Т. 9. М.: Наука. 1972. С. 176-181.
- Овчинников Л.Н., Масалович А.М.** Полиморфизм воды и его роль в гидротермальном минералообразовании // Зап. ВМО. 1977. Ч. 106. Вып. 1. С. 179-191.
- Органова Н.И.** Кристаллохимия несоизмерных и модулированных смешанно-слоистых минералов. М.: Наука. 1989. 142 с.
- Орлов Ю.Л.** Минералогия алмаза. М.: Наука. 1984. 263 с.
- Орлов Ю.Л., Татьяна Н.А.** Узоры двупреломления и их происхождение в кристаллах алмаза // Тр. Минерал. музея АН СССР. 1973. С. 108-118.
- Осадчев Б.Я.** Гигантский кристалл кварца на Волыни // Зап. ВМО. 1946. Ч. 75. Вып. 3. С. 238-239.
- Павлишин В.И., Юшкин Н.П., Попов В.А.** Онтогенетический метод в минералогии. Киев: Наукова Думка. 1988. 119 с.
- Палатник Л.С., Папилов И.И.** Ориентированная кристаллизация. М.: Metallurgy. 1964. 408 с.
- Палатник Л.С., Папилов И.И.** Эптаксиальные плёнки. М.: Наука. 1971. 480 с.
- Пальянов Ю.Н., Хохряков А.Ф., Борздов Ю.М., Сокол А.Г., Гусев В.А., Рылов Г.М., Соболев Н.В.** Условия роста и реальная структура кристаллов синтетического алмаза // Геология и геофизика. 1997. Т. 38. С. 882-906.
- Петров Т.Г.** О невозможности определения последовательности кристаллизации по индивидуальным характеристикам минералов // Зап. ВМО. 1977. Ч. 106. Вып. 4. С. 499-502.
- Петров Т.Г., Мошкин С.В., Жоголева В.Ю.** Сравнительное изучение морфологических и физико-химических характеристик природного и синтетического малахита // Тр. Ленинград. об-ва естествоиспыт. 1980. Т. 79. Вып. 1. С. 142-151.
- Петров Т.Г., Трейвус Е.Б., Пунин Ю.О., Касаткин А.П.** Выращивание кристаллов из растворов. Л.: Недра. 1983. 200 с.
- Петровская Н.В.** О понятии «парагенетическая минеральная ассоциация» // Геология рудных месторождений. 1967. Т. 9. № 2. С. 69-78.
- Петровская Н.В.** Закономерные сообщества минералов, в частности парагенетические (понятия, термины). В кн.: Основные понятия минералогии. Киев: Наукова Думка. 1978. С. 116-126.
- Петровский В.А.** Рост кристаллов в гетерогенных растворах. Л.: Наука. 1983. 144 с.
- Печерская С.Г., Михайлов М.А., Дёмина Т.В., Богданова Л.А., Белозёрова О.Ю.** Симметрия и упорядочение соединений со структурой берилла в обогащённой магнием части системы бериллиево-индиалит - кордиерит - берилл // Кристаллография. 2003. Т. 48. С. 407-413.
- Плотников М.А., Татарский Б.В.** Псевдоморфоза кальцита по гейлюсситу из татарского яруса реки Мезени // Зап. ВМО. 1946. Вып. 3. С. 234-236.
- Попов В.А.** Практическая генетическая минералогия. Екатеринбург: Уро РАН. 2011. 167 с.
- Попов Г.М., Шафрановский И.И.** Кристаллография. М.: изд. Высшая Школа. 1972. 352 с.

- Попова В.И.** Эволюция форм роста кристаллов пирита из Берёзовского золоторудного месторождения на Урале // Тр. Свердлов. горн. ин-та. 1972. Вып. 86. С. 109-111.
- Попова В.И.** Синхронизация кристаллов пирита в жилах и березитах Берёзовского месторождения. В кн.: Минералогические исследования гидротермалитов Урала. Свердловск: 1980. С. 11-30.
- Пополитов В.И., Литвин Б.Н.** Выращивание монокристаллов в гидротермальных условиях. М.: Наука. 1986. 192 с.
- Предводителев А.А., Тяпунина Н.А., Зиненкова Г.М., Бушуев Г.В.** Физика кристаллов с дефектами. М.: изд. МГУ. 1986. 240 с.
- Пуарье Ж.-П.** Ползучесть кристаллов. М.: Мир. 1988. 288 с.
- Пунин Ю.О.** К вопросу о механизме перекристаллизации // Зап. ВМО. 1965. Ч. 94. Вып. 4. С. 459-462.
- Пунин Ю.О.** Расщепление кристаллов // Зап. ВМО. 1981. Ч. 110. Вып. 6. С. 666-686.
- Пунин Ю.О.** Образование автодеформационных дефектов при росте кристаллов из растворов // Рост кристаллов. Т. 14. М.: Наука. 1983. С. 108-116.
- Пунин Ю.О.** О подобии процессов первичного расщепления и ростового двойникования // Тр. Ленинград. об-ва естествоисп. 1986. № 2. С. 109-116.
- Пунин Ю.О.** Патология минеральных индивидов // Минерал. журнал. 1989. Т. 11. № 1. С. 92-98.
- Пунин Ю.О.** Роль габитуса кристаллов в образовании автодеформационных дефектов // Зап. ВМО. 2000. Ч. 129. Вып. 6. С. 1-11.
- Пунин Ю.О.** Неустойчивость монокристаллического роста и принцип максимума производства энтропии // Зап. ВМО. 2002. Ч. 131. Вып. 3. С. 51-61.
- Пунин Ю.О., Иванова Т.Я., Артамонова О.И.** Об аномальном влиянии примесей на расщепление кристаллов // Вестник СПбГУ. 1996. С. 61-65.
- Пунин Ю.О., Котельникова Е.Н.** Политипия и генетическая информация. В кн.: Новые идеи в генетической минералогии. Л.: Наука. 1983. С. 54-60.
- Пунин Ю.О., Котельникова Е.Н., Макагонова Ю.Е., Соколов Б.П.** Гетерометрия и автодеформации в литиево-глинозёмистых слюдах // Зап. ВМО. 1997. Ч. 126. Вып. 2. С. 23-36.
- Пунин Ю.О., Котельникова Е.Н., Соколов Б.П.** Природа политипных сростаний литиево-глинозёмистых слюд // Зап. ВМО. 1989. Ч. 118. Вып. 5. С. 1-12.
- Пунин Ю.О., Петров Т.Г., Трейвус Е.Б.** Низкотемпературное моделирование процессов минералообразования // Зап. ВМО. 1980. Ч. 109. Вып. 5. С. 517-529.
- Пунин Ю.О., Сметанникова О.Г., Чуракова И.В.** Реальное строение кристаллолапильей плагиоклаза из вулканитов Камчатки. В кн.: Мат. 12 совещания по рентгенографии минер. сырья. М.: 1992. С. 69.
- Путинцева Е.В.** Опыт количественной характеристики структуры кимберлитов с целью их прогнозной оценки // Зап. ВМО. 1991. Ч. 120. Вып. 1. С. 116-122.
- Ракчеев А.Д.** К методике выделения равновесных ассоциаций рудных минералов // Геология рудных месторождений. 1976. № 3. С. 66-75.
- Ракчеев А.Д.** Новые физико-химические методы исследования горных пород и руд. М.: Недра. 1989. 230 с.
- Рафальский Р.П., Дымков Ю.М.** О трубчатых псевдоморфозах аргентита по самородному проволочному серебру и температуре их образования // Докл. АН СССР. 1957. Т. 112. С. 746-748.
- Рашкович Л.Н.** Скоростное выращивание из раствора крупных кристаллов для нелинейной оптики // Вестник АН СССР. 1984. № 9. С. 15-19.
- Рибиндер П.А.** Поверхностные явления в дисперсных системах. Физико-химическая механика. М.: Наука. 1978. 384 с.
- Рибиндер П.А., Шукин Е.Д.** Поверхностные явления в твёрдых телах в процессах их деформации и разрушения // Успехи физич. наук. 1972. Т. 108. Вып. 1. С. 1-42.
- Рёддер Э.** Флюидные включения в минералах. М.: Мир. 1987. Т. 1. 560 с. Т. 2. 632 с.



- Римская-Корсакова О.М.** К вопросу о закономерностях сростания шпинели с магнетитом // Зап. ВМО. 1950. Ч. 79. Вып. 3. С. 178-190.
- Римская-Корсакова О.М., Краснова Н.И., Петров Т.Г., Поликарпова В.Н.** Природа узоров, наблюдаемых на плоскости спайности некоторых флогопитов // Зап. ВМО. 1967. Ч. 96. Вып. 2. С. 141-154.
- Рожкова Е.В., Соловьев Н.В.** К вопросу образования оолитовых и сферолитовых структур // Бюлл. МОИП. Отд. геол. 1937. Т. 15. Вып. 4. С. 348-364.
- Руденко С.А.** Скелетный рост кристаллов в породах и рудах // Зап. ВМО. 1966. Ч. 95. Вып. 2. С. 158-168.
- Руденко С.А., Руденко С.С., Иванов М.А.** Опыт генетико-геометрической классификации минеральных агрегатов // Зап. ВМО. 1975. Ч. 104. Вып. 2. С. 129-144.
- Рундквист Д.В.** О некоторых особенностях морфологии и внутреннего строения минеральных агрегатов оловорудных близповерхностных месторождений // Зап. ВМО. 1958. Ч. 87. Вып. 4. С. 423-439.
- Русинов В.Л., Кудря П.Ф., Зотов А.В., Лапутина И.П.** Самоорганизация в системе кристалл - раствор на примере возникновения осцилляционной зональности в марганцовистом кальците // Докл. РАН. 1995. Т. 337. С. 511-513.
- Русинов В.Л., Кудря П.Ф., Лапутина И.П., Кузьмина О.В.** Периодическая метасоматическая зональность в пироксен-волластонитовых скарнах // Петрология. 1994. Т. 7. С. 570-586.
- Руссо Г.В.** Расщепление кристаллов гипса // Зап. ВМО. 1981. Ч. 110. Вып. 2. С. 167-171.
- Салова Т.П., Симакин А.Г., Эпельбаум М.Б.** Об условиях образования сферолитов в обсидиане на примере месторождения Кечелдаг (Армения) // Зап. ВМО. 1990. Т. 119. Вып. 4. С. 12-17.
- Самойлович М.И., Сергеева Н.С., Белянин А.Ф. и др.** Трёхмерные матрицы на основе кубических упаковок наносфер SiO<sub>2</sub> как основа биосовместимых материалов для клеточных структур. В кн.: Высокие технологии в промышленности России. М.: Техномаш. 2005. С. 99-107.
- Самойлович М.И., Цинобер Л.И., Хаджи В.Е., Лелекова М.В.** Определение энергии активации образования центров дымчатой окраски в синтетическом кварце с примесью алюминия // Кристаллография. 1968. Т. 13. С. 850-853.
- Самотоин Н.Д.** Изучение накриты методом декорирования под вакуумом // Изв. АН СССР. Серия геол. 1971. № 10. С. 114-126.
- Севергин В.М.** Первые основания минералогии или естественной истории ископаемых тел. В двух книгах. СПб.: Типогр. Импер. АН. 1798. 800 с.
- Севергин В.М.** Опыт минералогического землеописания Российского государства. СПб.: Типогр. Импер. АН. 1809. 502 с.
- Сенешаль М.** Проблема зарождения двойников роста в кристаллах // Кристаллография. 1980. Т. 25. С. 908-915.
- Сергеев В.Н., Кузьмин А.М.** О дислокациях в кристаллах магнетита из Дашкесанского месторождения и их роль в мартитизации // Изв. Томского политехн. ин-та. 1965. Т. 135. С. 96-105.
- Симакин А.Г.** Простая количественная модель для ритмичной зональности в кристаллах // Геохимия. 1983. № 12. С. 1720-1729.
- Симановский А.А.** Механизм эпитаксиального нарастания на ориентирующей и неориентирующей подложках // Рост кристаллов. Т. VI. М.: Наука. 1965. С. 374-384.
- Синай М.Ю., Гликин А.Э.** Образование футляровидных и отрицательных псевдоморфоз // Изв. ВУЗов. Геология и разведка. 1989. Вып. 4. С. 31-35.
- Скропышев А.В.** О перекристаллизации и распределении механических примесей в кристаллах // Зап. ВМО. 1961. Вып. 5. С. 521-534.
- Слётов В.А.** К онтогении кристаллитовых и геликтитовых агрегатов кальцита и арагонита из карстовых пещер Южной Ферганы // Тр. Минерал. музея АН СССР. 1985. Вып. 32. С. 119-128.
- Сливко М.М.** Об отталкивании и захвате твёрдых частиц растущими кристаллами турмалина. В кн.: Генезис минеральных индивидов и агрегатов. М.: Наука. 1966. С. 116-121.
- Слодкевич В.В.** Параморфозы графита по алмазу // Зап. ВМО. 1982. Вып. 1. С. 13-33.

**Соболев Н.В., Шацкий В.С., Вавилов М.А., Горяйнов С.В.** Циркон высокобарических пород складчатых областей как уникальный контейнер включений алмаза, коэсита и сопут. минералов // Докл. РАН. 1994. Т. С. 488-492.

**Соколов П.Б., Пунин Ю.О., Котельникова Е.Н., Крецер Ю.Л., Предтеченский Н.Н.** Литий-глинозёмистые слюды редкометальных пегматитов (Об образовании скорлуповатых агрегатов литиевых слюд «барботов глаз») // Минералогический журнал. 1987. Т. 9. № 1. С. 55-63.

**Сонин В.М., Багрянцев Д.Г., Фёдоров И.И., Чепуров А.И.** К вопросу об образовании коррозионных фигур на кристаллах алмаза // Геология и геофизика. 1994. Т. 35. № 6. С. 467-492.

**Спиридонов Э.М.** Генетические типы месторождений драгоценных и поделочных камней. М.: изд. МГУ. 2000. 61 с.

**Спиридонов Э.М.** О механизме образования овоидов полевых шпатов в гранитах-рапакиви, нодулей хромшпинелидов и орбикул оливина в перидотитах. О роли подвижности минералообразующей среды в реализации нормального механизма роста кристаллов // 200 лет РМО. СПб: 2017. Т. 1. С. 126-128.

**Спиридонов Э.М.** Явления расщепления кристаллов при их росте – результат совместного действия эффектов А.А. Штернберга – Ю.О. Пунина и П.А. Ребиндера // Докл. РАН. 2019. Т. 485. № 5. С. 426-427.

**Спиридонов Э.М., Гриценко Ю.Д.** Низкоградный метаморфизм и Co-Ni-Sb-As минерализация в Норильском рудном поле. М.: Научный Мир. 2009. 218 с.

**Спиридонов Э.М., Ладыгин В.М., Степанов В.К. и др.** Метавулканиты цеолитовой и пренит-пумпеллиитовой фаций траптовой формации Норильского района Сибирской платформы. М.: изд. МГУ. 2000. 212 с.

**Спиридонов Э.М., Плетнёв П.А.** Месторождение медистого золота Золотая Гора (о "золотородингитовой формации"). М.: Научный Мир. 2002. 220 с.

**Станкеев Е.К.** Генетическая минералогия. М.: Недра. 1986. 272 с.

**Старк Дж.П.** Диффузия в твёрдых телах. М.: Энергия. 1980. 239 с.

**Старков Н.П.** Оптически аномальные гранаты горы Саробы на Южном Урале // Зап. ВМО. 1950. Вып. 4. С. 283-290.

**Старостин В.И.** Ксенолиты колчеданной руды в дайках диабазовых порфиритов на Гайском месторождении // Геология рудных месторождений. 1964. № 3. С. 24-31.

**Степанов В.И.** О происхождении так называемых “колломорфных” агрегатов минералов. В кн.: Онтогенетические методы изучения минералов. М.: Наука. 1970. С. 198-206.

**Степанов В.И.** Периодичность кристаллизации в карстовых пещерах // Тр. Минерал. музея АН СССР им. А.Е. Ферсмана. 1971. Вып. 20. С. 161-171.

**Степанов В.И.** О целях и методах при исследовании последовательности кристаллизации в минеральных агрегатах руд. В кн.: Исследования в области прикладной минералогии и кристаллохимии. М.: Наука. 1973. С. 3-10.

**Степанов В.И.** Структуры и текстуры минеральных агрегатов, образующихся в свободных пространствах пустот // Спелеология в России. 1998. Вып. 1. С. 70-91.

**Степанов П.И.** История развития и современное состояние геолого-минералогических музеев Европы и Америки // Природа. 1919. № 10/12. С. 431-456.

**Строителев С.А.** О причинах образования комбинационной штриховки кристаллов // Зап. ВМО. 1961. Ч. 90. С. 79-713.

**Таран Ю.Н., Мазур В.И.** Структура эвтектических сплавов. М.: Metallurgia. 1978. 312 с.

**Татарский В.Б.** Кристаллы аурипигмента месторождения Лухумис-Цхали // Зап. ВМО. 1935. Ч. 64. № 1. С. 207-215.

Термодинамика и материаловедение полупроводников (ред. В.М.Глазов). М.: Metallurgia. 1992. 391 с.

**Тимофеева В.А.** Рост кристаллов из растворов - расплавов. М.: Наука. 1978. 268 с.

- Тимофеев-Рессовский Н.В., Воронцов Н.Н., Яблоков А.В.** Краткий очерк теории эволюции. М.: Наука. 1969. 408 с.
- Трейвус Е.Б.** Кинетика роста и растворения кристаллов. Л.: изд. ЛГУ. 1979. 248 с.
- Трейвус Е.Б.** Словарь английских терминов по кристаллогенезису. Л.: изд. ЛГУ. 1999. 165 с.
- Ульянова Т.П., Пунин Ю.О., Петров Т.Г.** Основные закономерности расщепления кристаллов при росте // Рост кристаллов. Т. 12. М.: Наука. 1977. С. 133-138.
- Уманский Я.С.** Рентгенография металлов и полупроводников. М.: Металлургия. 1989. 496 с.
- Фёдоров Е.С.** Попытка объяснения некоторых аномальных кристаллов изменениями их частичного строения // Зап. Император.МО. 1891. Ч. 27. С. 465-468.
- Федоровский Н.М.** Генетическая минералогия. Петроград: 1920. 152 с.
- Фекличев В.Г.** Мембранно-гелевое минералообразование в природе. В кн.: Конденсированное некристаллическое состояние вещества в земной коре. Спб.: Наука. 1995. С. 177-187.
- Ферсман А.Е.** К вопросу о генезисе минералов и их взаимных отношениях // Тр. СПб Об-ва естествоисп. 1912. Т. 43. Вып. 1. С. 255-279.
- Ферсман А.** Письменная структура пегматитов и причины её возникновения // Тр. Импер. АН. СПб. 6 серия. 1915. Т. 9. № 12. С. 1211-1228.
- Ферсман А.Е.** Элементы разграничения двух одновременно кристаллизующихся веществ // Докл. РАН. 1922. Сер. А. С. 7-8.
- Ферсман А.Е.** Геохимия. Т. 1. Л.: Госхимтехиздат. 1933. 328 с.
- Ферсман А.Е.** Пегматиты, их научное и практическое значение. Т. 1. Гранитные пегматиты. Л.-М.: изд. АН СССР. 1936. 665 с.
- Ферсман А.Е.** Кристаллография алмаза. М.: изд. АН СССР. 1955. 450 с.
- Фистуль В.И.** Физика и химия твёрдого тела. М.: Металлургия. 1995. Т. 1. 480 с. Т. 2. 320 с.
- Франке В.Д., Пунин Ю.О., Сметанникова О.Г., Кенунен Д.С.** Адсорбционный механизм неравновесного захвата примесей при кристаллизации // Зап. РМО. 2007. Ч. 136. Вып. 2. С. 90-104.
- Францессон Е.В.** Природа скульптурированных поверхностей на минералах кимберлитов // Вестн. МГУ. Сер. геол. 1964. № 5. С. - .
- Фрондел Д.** Минералогия Луны. М.: Мир. 1978. 334 с.
- Харт Дж., Лоте И.** Теория дислокаций. М.: Атомиздат. 1972. 600 с.
- Харькив А.Д., Афанасьев В.П., Квасница В.Н.** Признаки каталитического окисления при высокотемпературном воздействии кимберлитового расплава на алмазы // Докл. АН СССР. 1980. Т. 250. № 4. С. 949-952.
- Хомяков А.П., Юшкин Н.П.** Принцип наследования в кристаллогенезисе // Докл. АН СССР. 1981. Т. 256. С. 1229-1233.
- Хонигман Б.** Рост и форма кристаллов. М.: ИЛ. 1961. 224 с.
- Цветков Е.Г., Кидяров Б.И.** Наноразмерные стадии кристаллогенезиса из жидкой фазы // Зап. РМО. 2007. Спец. выпуск – Кристаллогенезис и минералогия. С. 66-90.
- Цинзерлинг Е.В.** Искусственное двойникование кварца. М.: изд. АН СССР. 1961. 160 с.
- Цинобер Л.И., Самойлович М.И.** Распределение структурных дефектов и аномальная оптическая симметрия в кристаллах кварца. В кн.: Проблемы современной кристаллографии. М.: Наука. 1975. С. 207-218.
- Цинобер Л.И., Самойлович М.И., Гордиенко Л.А., Ченцова Л.Г.** Исследование аномального плеохроизма кристаллов синтетического кварца с дымчатой окраской // Кристаллография. 1967. Т. 12. № 1. С. 65-69.
- Чалмерс Б.** Теория затвердевания. М.: Металлургия. 1968. 288 с.



- Чвилёва Т.Н., Безсмертная М.С., Спиридонов Э.М. и др.** Справочник-определитель рудных минералов в отражённом свете. М.: Недра. 1988. 505 с.
- Чеботин В.Н.** Физическая химия твёрдого тела. М.: Химия. 1982. 319 с.
- 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.
- Челищев Н.Ф.** Ионообменные свойства минералов. М.: Наука. 1973. 203 с.
- Ченцова Л.Г.** К вопросу о природе красящих центров дымчатого кварца // Кристаллография. 1956. № 1. Вып. 4.
- Ченцова Л.Г., Веденева Н.В.** Исследование природы окраски центров дымчатого кварца на основе явлений термического выцветания // Тр. Ин-та кристаллографии АН СССР. 1952. Вып. 7. С. 159-190.
- Чепижный К.И.** Новое в минералогии. В кн.: Теория минералогии. 1988. С. 42-47.
- Черепанов В.А.** Некоторые закономерности морфологии, строения и замещений в агрегатах малахита из уральских месторождений // Зап. ВМО. 1951. Ч. 80. Вып. 3. С. 214-219.
- Чермак Г.** Учебник минералогии. СПб.: Типогр. Импер. АН. 1884. 262 с.
- Чернов А.А.** Слоисто-спиральный рост кристаллов // Успехи физ. наук. 1961. Т. 73. С. 277-332.
- Чернов А.А., Гиваргизов Е.И., Багдасаров Х.С. и др.** Процессы кристаллизации // Современная кристаллография. Т. 3. Образование кристаллов. М.: Наука. 1980. С. 7-232.
- Чермак Г.** Учебник минералогии. СПб.: Типогр. Импер. АН. 1884. 262 с.
- Чесноков Б.В.** К вопросу об отличии первичных и механических полисинтетических двойников. В кн.: Онтогенические методы изучения минералов. М.: Наука. 1970. С. 177-183.
- Чесноков Б.В.** Морфология зёрен кальцита в агрегатах, претерпевших собирательную перекристаллизацию // Минерал. сб. Львов. гос. ун-та. Львов. 1972. № 26. Вып. 2. С. 220-223.
- Чесноков Б.В.** Относительный возраст минеральных индивидов и агрегатов. М.: Недра. 1974. 104 с.
- Чесноков Б.В., Якшин В.И.** Теневые псевдоморфозы по гранату в амфиболитах Среднего Урала // Зап. ВМО. 1969. Ч. 98. Вып. 1. С. 85-89.
- Четвериков С.Д.** Методика кристаллооптических исследований шлифов. М.: МГУ. 1949. 158 с.
- Чистяков Ю.Д., Лайнер Б.Д.** Ориентированное нарастание кристаллических веществ (эпитаксия). В кн.: Рост кристаллов. Т. 4. М.: 1964. С. 209-221.
- Чухров Ф.В.** Коллоиды в Земной коре. М.: изд. АН СССР. 1955. 671 с.
- 
- Шаскольская М.П.** Очерки о свойствах кристаллов. М.: Наука. 1978. 191 с.
- Шафрановский И.И.** Природные формы растворения топаза // Зап. ВМО. 1950. Ч. 79. Вып. 1.
- Шафрановский И.И.** Внешняя симметрия реальных кристаллов и симметрия питающей среды // Зап. ВМО. 1954. Ч. 83. Вып. 3. С. 198-211.
- Шафрановский И.И.** Кристаллы минералов. Плоскогранные формы. Л.: изд. ЛГУ. 1957. 222 с.
- Шафрановский И.И.** Лекции по кристалломорфологии. М.: изд. Высшая школа. 1968. 172 с.
- Шафрановский И.И.** Очерки по минералогической кристаллографии. Л.: Недра. 1974. 152 с.
- Шафрановский И.И.** Симметрия в природе. Л.: Недра. 1985. 168 с.
- Шафрановский И.И., Алявдин В.Ф.** Анатолий Капитонович Болдырев (1883-1946). Л.: Наука. 1978. 256 с.
- Шафрановский И.И., Григорьев Д.П.** О поверхностях соприкосновения кристаллических индивидов // Зап. ВМО. 1948. Ч. 71. Вып. 32. С. 185-193.
- Шафрановский И.И., Мокиевский В.А.** Условия роста, геометрия и симметрия скелетных кристаллов // Зап. ВМО. 1956. Ч. 85. Вып. 2. С. 172-186.
- Шафрановский И.И., Плотников Л.М.** Симметрия в геологии. Л.: Недра. 1975. 144 с.
- Шахов Ф.Н.** Текстуры руд. М.: изд. АН СССР. 1961. с.
- Шергин И.В.** Процессы возникновения, роста и изменения силлиманита. В кн.: Онтогенические методы изучения минералов. М.: Наука. 1970. С. 104-109.

- Шефталъ Н.Н.** Ритмичность в процессе роста кристаллов // Вестник МГУ. Серия геология. 1966. № 6. С. 28-38.
- Шефталъ Н.Н.** Нормальный механизм роста. В кн.: Процессы реального кристаллообразования. М.: Наука. 1977. С. 22-30.
- Шефталъ Н.Н.** Формы свободного и вынужденного роста. В кн.: Процессы реального кристаллообразования. М.: Наука. 1977. С. 31-51.
- Штейнберг С.С.** Металловедение. Свердловск: Metallurgizdat. 1961. 598 с.
- Штернберг А.А.** О связи трещиноватости и морфологии кристаллов с примесями (гетерометрия) // Кристаллография. 1962. Т. 7. Вып. 1. С. 114-120.
- Штукенберг А.Г., Пунин Ю.О.** Оптические аномалии в кристаллах. СПб.: Наука. 2004. 263 с.
- Штукенберг А.Г., Пунин Ю.О., Азимов П.Я.** Феноменологический анализ процессов взаимодействия кристалла и среды в системах «твёрдый раствор – водный раствор глаз» // Зап. РМО. 2007. Спец. выпуск – Кристаллогенезис и минералогия. С. 36-52.
- Штукенберг А.Г., Пунин Ю.О., Котельникова Е.Н.** Железистые мусковиты «барботов глаз» из Ильменских гор // Зап. ВМО. 1993. Ч. 122. Вып. 5. С. 53-63.
- Шубников А.В.** Как растут кристаллы. М.-Л.: изд. АН СССР. 1935. 130 с.
- Шубников А.В.** Кварц и его применение. М.-Л.: изд. АН СССР. 1940.
- Шубников А.В.** Оптическая кристаллография. М.-Л.: изд. АН СССР. 1950. 276 с.
- Шубников А.В.** Симметрия и антисимметрия конечных фигур. М.: изд. АН СССР. 1951. 172 с.
- Шубников А.В.** Симметрия и физические свойства пирамид роста // Кристаллография. 1961. Т. 6. № 3. С. 319-322.
- Шубников А.В., Копчик В.А.** Симметрия в науке и искусстве. М.: Наука. 1972. 340 с.
- Шубников А.В., Леммлейн Г.Г.** Об ортотропизме роста кристаллов // Докл. АН СССР. 1927. Сер. А. № 4. С. 61-4.
- Шубников А.В., Парвов В.Ф.** Зарождение и рост кристаллов. М.: Наука. 1969. 72 с.
- Шубников А.В., Цинзерлинг Е.В.** О фигурах удара, давления и о механических двойниках кварца // Тр. Ломоносовского ин-та АН СССР. 1933. Вып. 3. С. -.
- Шубников А., Шубникова О.** Статистическое исследование вициналей октаэдра квасцов // Тр. Минерал. музея АН СССР. 1926. Вып. 1. С. 1-34.
- Шувалов Л.А., Урусовская А.А., Желудев И.С., Залесский А.В., Семилетов С.А., Гречушников Б.Н., Чистяков И.Г., Пикин С.А.** Современная кристаллография. Т. 4. М.: Наука. 1981. 496 с.
- Шустов А.В.** Секториальное строение кристаллов исландского шпата из эвенкийских месторождений // Зап. ВМО. 1969. Вып. 1. С. 83-85.
- Юшкин Н.П.** Минералогия и парагенез самородной серы в экзогенных месторождениях. Л.: Наука. 1968. 187 с.
- Юшкин Н.П.** Онтогенез и филогения карбонатов из некоторых месторождений серы. В кн.: Онтогенические методы изучения минералов. М.: Наука. 1970. С. 50-64.
- Юшкин Н.П.** Теория микроблочного роста кристаллов в природных гетерогенных растворах. Сыктывкар: изд. ИГ Коми НЦ АН СССР. 1971. 52 с.
- Юшкин Н.П.** Кальцитовые псевдоморфозы по кристаллам гейлюссита // Зап. ВМО. 1990. Вып. 2. С. 75-81.
- Юшкин Н.П., Шафрановский И.И., Янулов К.П.** Законы симметрии в минералогии. Л.: Наука. 1987. 334 с.
- Ярош П.Я., Царицын Е.П.** Признаки перекристаллизации в оливинах из гипербазитов. В кн.: Закономерности размещения полезных ископаемых. М.: Наука. 1976. Т. 12. С. 221-230.
- Ярошевский А.А.** К вопросу о связи формы кристаллов граната с условиями минералообразования // Тр. Минерал. музея АН СССР. 1959. Вып. 10. С. 137-141.

- Akizuki M.** Origin of optical variations in grossular-andradite garnet // *Amer. Mineral.* 1984. Vol. 69. P. 328-338.
- Akizuki M.** The origin of sector twinning in harmotome // *Amer. Mineral.* 1985. Vol. 70. P. 822-828.
- Akizuki M. & Konno H.** Growth twinning in phacolite // *Mineral. Mag.* 1987. Vol. 51. P. 427-430.
- Akizuki M., Nisidon H., Kudon Y., Watanabe T. & Kurata K.** Sector growth and symmetry of (F,OH)apatite from the Asio mine, Japan // *Mineral. Mag.* 1994. Vol. 58. P. 307-314.
- Aldushin K., Jordan G., Rammensee W., Schmahl W.W. & Becker H.-W.** Apophyllite (001) surface alteration in aqueous solutions studied by HAFM // *Geochim. Cosmochim. Acta.* 2004. Vol. 68. P. 217-.
- Amelinckx S.** Mechanism for the growth of whiskers from solution on an impervious substrate // *J. Chem. Phys.* 1959. Vol. 31. P. 1687-1688.
- Anderson A.T.** Probably relations between plagioclase zoning and magma dynamics, Fuego Volcano, Guatemala // *Amer. Mineral.* 1984. Vol. 69. P. 660-676.
- Applin K.R. & Hicks B.D.** Fibers of dumortierite in quartz // *Amer. Mineral.* 1987. Vol. 72. P. 170-172.
- Arndt N.T. & Fleet M.E.** Stable and metastable pyroxene crystallization in layered komatiite lava flows // *Amer. Mineral.* 1979. Vol. 64. P. 856-864.
- Augustithus S.S.** Atlas of the sphaeroidal textures and structure and their genetic significance. Theophrastus Publ.: Athens. 1982. 329 p.
- Baker D. & Freda C.** Using models of undercooled binary system crystallization: comparison with experimental and pegmatite textures // *Amer. Mineral.* 1999. Vol. 84. P. 725-732.
- Banfield J.F. & Bailey S.W.** Formation of regularly interstratification of serpentine and chlorite // *Amer. Mineral.* 1996. Vol. 81. P. 79-91.
- Barton P.B.** Ore texture: Problems and opportunitites // *Mineral. Mag.* 1991. Vol. 55. P. 303-315.
- Basaltic volcanism on the terrestrial Planets. New York: Pergamon Press. 1981. 1286 p.
- Bastin E.L., Graton L.G., Lindgren W., Newhouse W.H., Schwartz G.M. & Short M.N.** Criteria of age relations of minerals. With special reference to polished section of ores // *Econ. Geol.* 1931. Vol. 26. P. 561-610.
- Bell T.H., Rubenach M.J. & Fleming P.D.** Porphyroblast nucleation, growth, and dissolution in regional metamorphic rocks as a function of deformation partitioning during foliation development // *J. Metamorphic Geol.* 1986. Vol. 4. P. 37-67.
- Bideaux R.A.** Mineral rings and cylinders // *Mineral. Record.* 1970. № 1. P. 105-112.
- Billows E.** Associazioni regolari di cristalli della stessa specie. Associazion elicoidale del quarzo // *Rivista Mineral. Ital.* 1909. Vol. 37. P. 3-112.
- Blackerby B.A.** Convolute zoning of plagioclase phenocrysts in Miocene volcanics from the Western Santa Monica Mountains, California // *Amer. Mineral.* 1968. Vol. 53. P. 954-962.
- Blüm J.R.** Die Pseudomorphosen des Mineralreichs. Stuttgart: 1843. 378 s.
- Bournon de J.L.** Catalog de la collection minéralogique particulière du roi. Paris. 1817. P. 149-156.
- Brandeis G., Jaupart C. & Allègre C.J.** Nucleation, crystal growth and the thermal regime of cooling magmas // *J. Geophys. Res.* 1984. Vol. 89. P. 10161-10177.
- Brock K.J. & Slater L.D.** Epitaxial marcasite on pyrite from Kensselaer, Indiana // *Amer. Mineral.* 1978. Vol. 63. P. 210-212.
- Brophy J.G., Whittington C.S. & Park Y.-R.** Sector-zoned augite megacrystals in Aleutian high alumina basalts: implication for the condition of basalt crystallization and the generation of calc-alkaline series magmas // *Contrib. Mineral. Petrol.* 1999. Vol. 135. P. 277-290.
- Brown C.S., Kell R.C., Thomas L.A., Wooster N. & Wooster W.A.** The growth and properties of large crystals of synthetic quartz // *Mineral. Mag.* 1952. Vol. 29. P. 858-874.
- Brugger J., Bettiol A.A., Costa S., Lahaye Y., Bateman R., Lambert D.D. & Jamieson D.N.** Mapping REE distribution in scheelite using liminescence // *Mineral. Mag.* 2000. Vol. 64. P. 891-903.
- Bryan W.B.** Morphology of quench crystals in submarine basalts // *J. Geophys. Res.* 1972. Vol. 77. P. 5812-5819.
- Buckley H.E.** On the mosaic structure in crystals // *Zeitschr. Kristallogr.* 1934. Bd. 89. S. 221-.
- Buerger M.J.** The genesis of twin crystals // *Amer. Mineral.* 1945. Vol. 30. P. 469-482.



- Buerger M.J.** Role of temperature in mineralogy // Amer. Mineral. 1948. Vol. 33. P. 101-122.
- Burns R.G.** On the occurrence and stability of divalent chromium in olivines included in diamond // Contrib. Mineral. Petrol. 1975. Vol. 51. P. 213-221.
- Campbell K.A., Rodgers K.A., Brogheridge J.M.A. & Browne P.R.L.** An unusual modern silica-carbonate sinter from Pavlova spring, Ngatamarki, New Zealand // Sedimentology. 2002. Vol. 49. P. 835-854.
- Carpenter A.B.** Mineralogy and petrology of the system CaO-MgO-CO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O at Crestmore, California // Amer. Mineral. 1967. Vol. 52. P. 1341-1363.
- Cashman K.V. & Marsh B.D.** Crystal size distribution (CSD) in rocks and the kinetics and dynamics of crystallization: II. Makaopuhi lava lake // Contrib. Mineral. Petrol. 1988. Vol. 99. P. 292-305.
- Clark A.H., Pearce T.H., Roeder P.L. & Wolfsin I.** Oscillatory zoning and other microstructures in magmatic olivine and augite: Nomarski interference contrast observation etched polished surfaces // Amer. Mineral. 1986. Vol. 71. P. 734-741.
- Clark D.B. & Bogutyn P.A.** Oscillatory epitactic-growth zoning in biotite and muscovite from the Lake Lewis leucogranite, South Mountain batholite, Nova Scotia, Canada // Canad. Mineral. 2003. Vol. 41. P. 1027-1047.
- Cornejo C. & Bartorelli A.** Minerals and precious stones of Brazil. Sao Paulo: Solaris Cultural Publications. 2009. 704 p.
- Cottrell A.H.** Theoretical structural metallurgy. London: Edward Arnold Ltd. 1955.
- Craig J.R., Vokes F.M. & Simpson C.** Rotational fabrics in pyrite from Ducktown, Tennessee // Econ. Geol. 1991. Vol. 86. P. 1737-1746.
- Crank J.** The Mathematics of Diffusion (2nd ed). London: Oxford University Press. 1975.
- Cressey G., Wall F. & Cressey B.A.** Differential REE uptake by sector growth of monazite // Miner. Mag. 1999. Vol. 63. P. 813-828.
- Dante S.L. & Marvin K.** A color atlas of meteorites in thin section. Payson, Arizona: Golden Retriever Public., Tuscon, Arizona and Southwest Meteorite Press. 2005. 301 p.
- Davis M. J. & Ihinger P.D.** Heterogeneous crystal nucleation on bubbles in silicate melt // Amer. Mineral. 1998. Vol. 83. P. 1008-1015.
- Dempster T.J., Jenkin G.R.T. & Rogers G.** The origin of rapakivi texture // J. Petrol. 1994. Vol. 35. P. 963-981.
- Dobson M.H.** Closure temperature in cooling geochronological and petrological systems // Contrib. Mineral. Petrol. 1973. Vol. 40. P. 259-274.
- Donaldson C.H.** An experimental investigation of olivine morphology // Contrib. Mineral. Petrol. 1976. Vol. 57. P. 187-213.
- Donnelly T.W.** Kinetic considerations in the genesis of growth twinning // Amer. Mineral. 1967. Vol. 52. P. 1-12.
- Donney J.D.H. & Harker D.** A new law of crystal morphology extending the law of Bravais // Amer. Mineral. 1937. Vol. 22. P. 446-467.
- Dowty E.** Crystal structure and crystal growth. I. The influence of internal structure on morphology // Amer. Mineral. 1976. Vol. 61. P. 448-459.
- Dowty E.** Crystal structure and crystal growth. II. Sector zoning in minerals // Amer. Mineral. 1976. Vol. 61. P. 460-469.
- Dowty E. & Clark I.R.** Crystal structure refinement and optical properties of a Ti<sup>3+</sup> fassaite from the Allende meteorite // Amer. Mineral. 1973. Vol. 58. P. 230.
- Dunbar N.W., Jacobs G.K. & Naney M.T.** Crystallization processes in an artificial magma: Variations in crystal shape, growth rate and composition with melt cooling history // Contrib. Mineral. Petrol. 1995. Vol. 129. P. 412-425.
- Endo Y. & Sunagawa I.** Positive and negative striation in pyrite // Amer. Mineral. 1973. Vol. 58. P. 930-935.

- Fairbairn H.W.** Structural petrology of deformed rocks. Cambridge University Press: Mass. 1942. 143 p.
- Ferraris G., Makovicky E. & Merlino S.** Crystallography of modular materials. IUCr Monographs on Crystallography. Oxford University Press. 2004. 400 p.
- Fersmann A. & Goldsmidt V.** Der Diamant. Atlas. Carl Winter: Heidelberg. 1911. 274 s.
- Fettes D. & Desmond J.** Metamorphic rocks. Classification and glossary of terms. Cambridge. Cambridge University Press. 2008. 244 p.
- Fleet M.E.** Structural aspects of the marcasite – pyrite transformation // *Canad. Mineral.* 1970. Vol. 10. P. 225-231.
- Fleet M.E.** Growth habits of clinopyroxene // *Canad. Mineral.* 1975. Vol. 13. P. 336-341.
- Fouke B.W. & Reeder R.J.** Surface structural controls on dolomite composition: Evidence from sector zoning // *Geochim. Cosmochim. Acta.* 1992. Vol. 56. P. 4015-4024.
- Frank F.C.** The growth of carborundum: Dislocations and polytypism // *Phyl. Mag.* 1951. Vol. 42. P. 1014-1021.
- Frank F.C.** On tin whiskers // *Phyl. Mag.* 1953. Vol. 44. P. 854-860.
- Frederickson S.F.** Mosaic structure in quartz // *Amer. Mineral.* 1955. Vol. 40. P. 1-10.
- Frindt S. & Haapala I.** Anorogenic Gross Spitzkoppe granite stock in central western Namibia: Part II. Structures and textures indicating crystallization from undercooled melt // *Amer. Mineral.* 2004. Vol. 89. P. 857-866.
- Frondele C.** The size of crystals // *Amer. Mineral.* 1935. Vol. 20. P. 469-473.
- Frondele C.** Structural hydroxyl in chalcedony (type B quartz) // *Amer. Mineral.* 1982. Vol. 67. P. 1248-1257.
- Froese E.** Point defects in pyrrhotite // *Canad. Mineral.* 2003. Vol. 41. P. 1061-1067.
- Gagnevin D., Daly J.S., Poli G. & Morgan D.** Microchemical and Sr isotopic investigation of zoned K-feldspar megacrysts: insights into the petrogenesis of a granite system and disequilibrium crystal growth // *J. Petrol.* 2005. Vol. 46. P. 1689-1724.
- Giardini A.A. & Melton C.E.** The nature of cloud-like inclusions in two Arkansas diamonds // *Amer. Mineral.* 1975. Vol. 60. P. 931-933.
- Glicksman M.E.** Diffusion in solid state principles. New York: Wiley Interscience. 2000.
- Goldsmith J.R. & Graf D.L.** Structural and compositional variation in some natural dolomites // *J. Geol.* 1958. Vol. 66. P. 678-693.
- Gorai M.** Petrological studies of plagioclase twins // *Amer. Mineral.* 1951. Vol. 36. P. 884-902.
- Gordon S.G.** The inspection and grading of quartz // *Amer. Mineral.* 1945. Vol. 30. P. 269-290.
- Graf D.L. & Goldsmith J.R.** Dolomite – magnesian calcite relations at elevated temperatures and CO<sub>2</sub> pressures // *Geochim. Cosmochim. Acta.* 1955. Vol. 7. P. 109-128.
- Gray N.H.** A parabolic hourglass structure in titanite // *Amer. Mineral.* 1971. Vol. 56. P. 952-956.
- Gübelin E.J. & Koivula J.I.** Bildatlas der Einschlüsse in Edelsteinen. ABC Verlag. Zurich: 1986. 532 s.
- Gumowska-Wdowiak Z.** Twin intergrowth of plagioclases in glomerophytic andesites of the Pieniny in Poland // *Mineral. Polonica.* 1974. Vol. 5. P. 21-36.
- Halden N.M.** Determination of Lyapunov exponent to characterize the oscillatory distribution of trace elements in minerals // *Canad. Mineral.* 1996. Vol. 34. P. 1127-1135.
- Halden N.M. & Hawthorne F.C.** The fractal geometry of oscillatory zoning in crystal application to zircon // *Amer. Mineral.* 1993. Vol. 78. P. 1113-1116.
- Halden N.M., Hawthorne F.C., Campbell J.L., Teesdale W.J., Maxwell J.A. & Higuchi D.** Chemical characterization of oscillatory zoning and overgrowth in zircon using 3 MeV MPIXE // *Canad. Mineral.* 1993. Vol. 31. P. 637-647.
- Halford L.B.** Chloritoid: its composition, X-ray and optical properties, stability, and occurrences // *J. Petrol.* 1961. Vol. 2. P. 49-135.
- Hartman P. & Perdok W.G.** On the relation between structure and morphology of crystals // *Acta crystal.* 1955. Vol. 8. Part 49. P. 521-525.

- Hirth J.P. & Lothe J.** Theory of dislocations. Malabar, FL: Krieger Publishing Company. 1992.
- Höchleiter R., von Philipsborn H. & Weiner K.L.** Minerale. Bestimmen nach ausseren kennzeichen. E. Schweizerbartsche Verlagsbuchhandlung (Nagele und Obermiller). Stuttgart: 1996. 390 s.
- Holden E.F.** The cause of colour in smoky quartz and amethyst // Amer. Mineral. 1925. Vol. 10. P. 203-.
- Hollister L.S.** Origin, mechanism and consequences of compositional sector zoning in staurolite // Amer. Mineral. 1970. Vol. 55. P. 742-766.
- Hollister L.S. & Gancarz A.J.** Compositional sector-zoning in clinopyroxene from the Narce area, Italia // Amer. Mineral. 1971. Vol. 56. P. 959-979.
- Holten T., Jamtveit B. & Meakin P.** Noise and oscillatory zoning of minerals // Geochim. Cosmochim. Acta. 2000. Vol. 64. P. 1893-1904.
- Holten T., Jamtveit B., Meakin P., Cortini M., Blundy J. & Austrheim H.** Statistical characteristics and origin of oscillatory zoning of crystals // Amer. Mineral. 1997. Vol. 82. P. 596-606.
- Hossain A.** The occurrence of polyframboidal pyrite in a Beach Sand deposit, Cox's Bazar, Bangladesh // Amer. Mineral. 1975. Vol. 60. P. 157-158.
- Hutchinson R.** Meteorites: a petrology, chemical and isotopic synthesis. Cambridge University Press: 2004. 506 p.
- Ioffé A.** Elastische nachwirkung im kristallinen quatz // Ann. Phys. 1906. Bd. 20. S. 919-981.
- Jamtveit B.** Oscillatory zonation in hydrothermal grossular – andradite garnet: Nonlinear dynamics in region of immiscibility // Amer. Mineral. 1991. Vol. 76. P. 1319-1327.
- Johnson S.E.** Porphyroblast microstructures. A review of current and future trends // Amer. Mineral. 1999. Vol. 84. P. 1711-1726.
- Jones F.T.** Iris agate // Amer. Mineral. 1952. Vol. 37. P. 578-587.
- Jordan G., Higgins S.R., Eggleston C.M., Knauss K.G. & Schmahl W.W.** Dissolution kinetics of magnesite in acidic aqueous solution, a hydrothermal atomic force microscopy (HAFM) study: Step orientation and kink dynamics // Geochim. Cosmochim. Acta. 2001. Vol. 65. P. 4257-.
- Jordan G. & Rammensee W.** Dissolution rates of calcite (10-14) obtained by scanning force microscopy: Microtopography-based dissolution kinetics on surface with anisotropic step velocities // Geochim. Cosmochim. Acta. 1998. Vol. 62. P. 941-.
- Judd I.W.** Lamellar structure in quartz crystals // Mineral. Mag. 1888. Vol. 8. P. 1-.
- Judd I.W.** Additional note on the lamellar structure of quartzs and the method by which it is developed // Mineral. Mag. 1892. Vol. 10. P. 123-.
- Juld A.** A theoretical study of the absorbtion spectra of  $Pb^+$  and  $Pb^{3+}$  in the  $K^+$  site of microcline: applications to the colour of amazonite // Phys. Chem. Mineral. 1998. Vol. 25. N 3. S. 229-233.
- Keith H.D. & Padden F.J.** A phenomenological theory of spherulite crystallization // J. Appl. Phys. 1963. Vol. 34. P. 2404-2421.
- Keith M.D.** Lattice spacings in clear crystalline quartz and their variability // Amer. Mineral. 1955. Vol. 40. P. 530-534.
- Kirkpatrick R.J.** Crystal growth from the melt: a review // Amer. Mineral. 1975. Vol. 60. P. 798-814.
- Kirkpatrick R.J., Klein L., Uhlmann D.B. & Hays J.F.** Rates and processes of crystal growth in the system anorthite - albite // J. Geophys. Res. 1979. Vol. 84. P. 3671-3776.
- Kirov G.N. & Atanasov V.A.** Cuprite whiskers and thin plates from the occurrence Bartzeto, Malko Tyrnovo, Bulgaria // Ann. Univ. Sofie. Ser. 1. Geology. 1970. Vol. 62. P. 191-198.
- Kittel C.** Introduction to solid state physics. New York: Wiley. 2004.
- Kobel F.** Geschichte der Mineralogie von 1650-1860. München. 1864.
- Kozai Y. & Akima M.** Experimental study on diamond dissolution in kimberlitic and lamproitic melts at 1300-1420<sup>0</sup> C and 1 GPa with controlled oxygen partial pressure // Amer. Mineral. 2005. Vol. 90. P. 1759-1766.
- Kretz R.** Kinetics of the cristallization of garnet at two localities near Yellowknife // Canad. Mineral.



1973.

Vol. 12. P. 1-20.

**Kretz R.** Dendritic magnetite and ilmenite in 590 Ma Grenville dykes near Otter Lake, Quebec, Canada // *Canad. Mineral.* 2003. Vol. 41. P. 1049-1059.

**Kunz G.F.** The diamond and moissanite – natural, meteoritic and artificial // *Trans. Amer. Electrochem. Soc.* 1907. Vol. 12. P. 39-63.

**Kwak T.A.P.** Sector-zoned annite<sub>85</sub> – phlogopite<sub>15</sub> micas from the Mt. Lindsay Sn – W- F (Be) deposit, Tasmania, Australia // *Canad. Mineral.* 1981. Vol. 19. P. 643-650.

**Leblanc M., Morales J.A., Borreco J. & Elbaz-Poulichet F.** 4500-year-old mining pollution in Southwestern Spain: long-term implications for modern mining pollution // *Econ. Geol.* 2000. Vol. 95. P. 655-662.

**Leech M.L. & Ernst W.G.** Graphite pseudomorphs after diamond? A carbon isotope and spectroscopic study of graphite cuboids from the Maksyutov Complex, South Ural Mountains, Russia // *Geochim. Cosmochim. Acta.* 1998. Vol. 62. P. 2143-2154.

**Leung I.S.** Sector-zoning titanite: morphology, crystal chemistry, and growth // *Amer. Mineral.* 1974. Vol. 59. P. 127-138.

**L'Heureux I. & Powler A.D.** A nonlinear dynamical model of oscillatory zoning in plagioclase // *Amer. Mineral.* 1994. Vol. 79. P. 885-894.

**L'Heureux I. & Powler A.D.** Isothermal constitutive undercooling as a model for oscillatory zoning in plagioclase // *Canad. Mineral.* 1996. Vol. 34. P. 1137-1147.

(диффузионно- контролируемая кинетика роста приводит к...)

**Liesegang R.E.** Achat-Theorien // *Chem. Erde.* 1931. Bd. 6. Hf. 2. S. 143-152.

**Lofgren G.** An experimental study of plagioclase crystal morphology: isothermal crystallization // *Amer. J. Sci.* 1974. Vol. 274. P. 243-273.

**Lofgren G.** Effect of heterogeneous nucleation on basaltic textures: A dynamic crystallization study // *J. Petrol.* 1983. Vol. 24. P. 229-255.

**Lofgren G.E., Huss G.R. & Wasserburg G.J.** An experimental study of trace element partitioning between Ti-Al-clinopyroxene and melt: Equilibrium and kinetic effects including sector zoning // *Amer. Mineral.* 2006. Vol. 91. P. 1596-1606.

**Lyll K.D.** The origin of mechanical twinning in galena // *Amer. Mineral.* 1966. Vol. 51. P. 243-247.

**Mallard E.** Sur les clivages in quartz // *Bull. Soc. franç. Minéral.* 1890. Vol. 13. P. 61-62.

**Martaud A.** Les concrétions des grottes // *Le Règne Minéral.* 1997. № 16. P. 4-49.

**Masing G.** Lehrbuch der allgemeinen metallkunde. Berlin: Springer-Verlag. 1950. 290 s.

*Monographs on Crystallography.* Oxford University Press. 2004. 400 p.

**Mayers M.A. & Chawla K.K.** Mechanical behavior of materials. New York: Cambridge University Press. 2009. 856 p.

**McClay K.R. & Ellis P.G.** Deformation and recrystallization in pyrite // *Mineral. Mag.* 1983. Vol. 47. P. 527-538.

**McKague H.L.** Trapiche emerald from Colombia // *Gem. Gemmol.* 1964. Vol. 11. P. 20-213, 223.

**Milke R.** Spiral growth of grossular under hydrothermal conditions // *Amer. Mineral.* 2004. Vol. 89. S. 211-218.

**Morimoto N., Gyobu A., Tsukumo K. & Kato K.** Superstructure and nonstoichiometry of the intermediate pyrrotite // *Amer. Mineral.* 1975. Vol. 60. P. 240-258.

**Mügge O.** Zwillingsbau und flächenzeichnung von bergkristallartigen quartzen mit rücksicht auf ihre entstehungstemperatur // *Zeitschr. Kristallogr.* 1932. Bd. 82. S. 451-467.

**Mügge O.** Zwillingsbau magmatischer quartzen mit rücksicht auf ihre entstehungstemperatur // *Zeitschr. Kristallogr.* 1932. Bd. 84. S. 97-108.

**Müller A., Wiedenbeck M., van den Kerkhof A.M., Kronz A. & Simon K.** Trace elements in quartz – a combined electron microprobe, secondary ion mass spectrometry, laser-ablation ICP-MS, and cathodoluminescence study // *Eur. J. Mineral.* 2003. Vol. 15. P. 747-763.

- Muncill G.E. & Lasaga A.C.** Crystal growth kinetics of plagioclase in igneous systems // Amer. Mineral. 1987. Vol. 72. P. 299-311.
- Muncill G.E. & Lasaga A.C.** Crystal growth kinetics of plagioclase in igneous systems // Amer. Mineral. 1988. Vol. 73. P. 982-992.
- Murowchick J.B. & Barnes H.L.** Effect of temperature and degree supersaturation on pyrite morphology // Amer. Mineral. 1987 Vol. 72 P. 1241-1250.
- Nadeau P.H.** Fundamental particles and advancement of geoscience: response to “implications of the data for the concept of fundamental particles” // Canad. Mineral. 1998. Vol. 36. P. 1409-1414.
- Nakamura Y.** Origin of sector-zoning of igneous clinopyroxenes // Amer. Mineral. 1973. Vol. 58. P. 986-990.
- Nassau K. & Jackson K.A.** Trapiche emeralds from Chivor and Muzo, Colombia // Amer. Mineral. 1970. Vol. 55. P. 416-427.
- Newhouse W.H.** The direction of flow of mineralizing solutions // Econ. Geol. 1941. Vol. 36. P. 612-617.
- Nicholls J. & Stout M.Z.** Epitactic overgrowths and intergrowths of clinopyroxene on orthopyroxene: implication for paths of crystallization 1881 lava flow, Mauna Loa volcano, Hawaii // Canad. Mineral. 1997. Vol. 35. P. 909-922.
- Nixon P.H. et al.** Graphite pseudomorphs after diamond in the eclogite-peridotite massif of Beni Bousera, Morocco, and a review of anomalous diamond occurrences // Proc. 4<sup>th</sup> Intern. Kimberlite Conf. Perth: 1986. P. 412-414.
- Ohfuji H., Boyle A.P., Prior D.J. & Rickard D.** Structure of framboidal pyrite: An electron back scatter diffraction study // Amer. Mineral. 2005. Vol. 90. P. 1693-1704.
- Ortoleva P., Chen Y. & Chen W.** Agates, geodes, concretions and orbicules: Self-organized zoning and morphology. In: J.H. Kruhl (ed.) – Fractals and dynamic systems in geoscience. Berlin: Springer.1994. 421 p.
- Osterberg H. & Cooksen J.W.** Some piezoelectric and elastischen properties of  $\beta$ -quartz // J. Franklin Inst. 1935. Vol. 220. P. 361-371.
- Ostwald J. & England B.M.** The relationship between eugedral and framboidal pyrite in base-metal sulphide ores // Mineral. Mag. 1979. Vol. 43. P. 297-300.
- Pabst A.** A metamict state // Amer. Mineral. 1952. Vol. 37. P. 137-157.
- Pabst A.** Pyrite of unusual habit simulating twinning from the Gren River Formation of Wyoming // Amer. Mineral. 1971. Vol. 56. P. 133-145.
- Palache C.** The largest crystals // Amer. Mineral. 1923. Vol. 8. P. 342-363.
- Palenik C.S., Nasdala L. & Ewing R.C.** Radiation damage in zircon // Amer. Mineral. 2003. Vol. 88. P. 770-781.
- Patel A.R. & Agarwal M.J.** Microstructure on Panna diamond surfaces // Amer. Mineral. 1965. Vol. 50. P. 124-131.
- Petersen J.S.** Columnar-dendritic feldspars in the Lardalite intrusion, Oslo region, Norway. 1. Implications for unilateral solidification of a stagnant boundary layer // J. Petrol. 1985. Vol. 26. P. 223-252.
- Petersen J.S. & Lofgren G.E.** Lamellar and patchy intergrowth in feldspars: Experimental crystallization of eutectic silicates // Amer. Mineral. 1986. Vol. 71. P. 343-355.
- Petreus I.** The divided structure of crystals I. Lineage and sector structure in pyrite and beryl // Amer. Mineral. 1978. Vol. 63. P. 725-731.
- Philpotts A.R.** Principles of igneous and metamorphic petrology. New Jersey: Prentice Hall. 1990. 498 p.
- Pierce L. & Buseck P.R.** Superstructuring in the bornite – digenite series: a high-resolution electron microscopy // Amer. Mineral. 1978. Vol. 63. P. 1-16.
- Pirauo C., Frouchini-Angela M. & Boistelle K.** Curvature of gypsum crystals induced by growth in the presence of impurities // Mineral. Mag. 1989. Vol. 53. P. 479-482.
- Progress in metal physics (ed. B. Ghalmlers). Oxford: Pergamon Press. 1952. 175 p.

**Puga E., Fanning C.M., Nieto J.M. & de Federico A.D.** Recrystallization textures in zircon generated by ocean-floor and eclogite-facies metamorphism: a cathodoluminescence and U-Pb shrimp study, with constraints from REE elements // *Canad Mineral.* 2005. Vol. 43. P. 183-202.

**Putnis A.** Introduction to mineral sciens. Cambridge, UK: Cambridge University Press. 1992. 457 p.

**Putnis A.** Mineral replacement reactions: from macroscopic observations to microscopic mechanisms // *Mineral. Mag.* 2002. Vol. 66. P. 689-708.

**Putnis A. & Holland T.J.B.** Sector trilling in cordierite and equilibrium overstepping in metamorphism // *Contrib. Mineral. Petrol.* 1986. Vol. 93. P. 265-272.

**Putnis C.V., Tsukamoto K. & Nishimura Y.** Direct observation of pseudomorphism: compositional and textural evolution of a fluid-solid interface // *Amer. Mineral.* 2005. Vol. 90. P. 1909-1912.

**Rakovan J. & Jaszczak J.A.** Multiple length scale growth spirals on metamorphic graphite (001) surfaces studied by atomic force microscopy // *Amer. Mineral.* 2002. Vol. 87. P. 17-24.

**Rakovan J. & Waychunas G.** Differential incorporation of trace elements and dissymmetrization in apatite: The role of surface structure during growth // *Amer. Mineral.* 1994. Vol. 79. P. 892-903.

**Raman C.V. & Jayaraman A.** The structure and optical behavior of iridescent agate // *Proc. Indian Acad. Sci.* 1953. Vol. 384. P. 199-206.

**Raman C.V. & Jayaraman A.** On the optical behavior of cryptocrystalline quartz // *Proc. Indian Acad. Sci.* 1955. Vol. 41A. P. 1-6.

**Ramdohr P.** The ore minerals and their intergrowths. Toronto: Pergamon. 1980. 2 vol. 1205 p.

**Reeder R.J. & Paquette J.** Sector zoning in natural and synthetic calcite // *Sediment. Geol.* 1989. Vol. 65. P. 239-247.

**Reeder R.J. & Prosky J.L.** Compositional sector zoning in dolomite // *J. Sediment. Petrol.* 1986. Vol. 56. P. 237-247.

**Rice A.H.N. & Mitchell J.I.** Porphyroblast textural sector-zoning and matrix displacement // *Mineral. Mag.* 1991. Vol. 55. P. 379-396.

**Richter K. & Carmichael I.S.E.** Mega-xenocrysts in alkali olivine basalts: Fragments of disrupted mantle assemblages // *Amer. Mineral.* 1993. Vol. 78. P. 1230-1245.

**Rickwood P.C.** The largest crystals // *Amer. Mineral.* 1981. Vol. 66. P. 885-907.

**Rinne F. & Kohl R.** Optisches zur modificationsänderung von  $\alpha$  in  $\beta$  quartz sowie von  $\alpha$  to  $\beta$  leucit // *Neues Jahrb. Mineral., Geol., Pal.* 1910. Bd. 11. S. 138-158.

**Roedder E.** Fluid in salt // *Amer. Mineral.* 1984. Vol. 69. P. 413-439.

**Rose G., Sadebeck A.** Über die kristallisation des diamanten // *Abh. Ak. Berlin.* 1876 (1877). 2. Abt. S. 85-148.

**Ross C.S.** Origin and geometric form of chalcedone-filled spherulites from Oregon // *Amer. Mineral.* 1941. Vol. 26. P. 727-732.

**Rubin A.E.** Aluminian low-Ca pyroxene in a Ca-Al-rich chondrite from the Sematkona meteorite // *Amer. Mineral.* 2004. Vol. 89. P. 867-872.

**Salje E.K.H., Chrosch J. & Ewing R.C.** Is «metamictization» of zircon a phase transition? // *Amer. Mineral.* 1999. Vol. 84. P. 1107-1116.

**Sarbadhikari T.R.** On the difference in twinning between phenocryst and groundmass plagioclase of basalts // *Amer. Mineral.* 1965. Vol. 50. P. 1466.

**Schoneveld C.** A study of some typical inclusion patterns in strongly paracrystalline rotated garnets // *Tectonophysics.* 1977. Vol. 39. P. 453-471.

**Schwarz G.M.** Intergrowths of bornite and chalcopyrite // *Econ. Geol.* 1931. Vol. 26. P. 186-201.

**Schwarz G.M.** Classification and definition of textures and mineral structures in ores // *Econ. Geol.* 1951. Vol. 46. N 6.

**Seal M.** Structure in diamonds as revealed by etching // *Amer. Mineral.* 1965. Vol. 50. P. 105-123.

**Searl A.** Saddle dolomite: a new view on its nature and origin // *Mineral. Mag.* 1989. Vol. 53. P. 547-555.



- Searl A.** Complex sector zonation in ankerite: geochemical controls on crystal morphology and intersector element partitioning // *Mineral. Mag.* 1990. Vol. 54. P. 501-507.
- Seydoux-Guillaume A.M., Wirth R. & Ingrin J.** Contrasting response ThSiO<sub>4</sub> and monazite to natural irradiation // *Eur. J. Mineral.* 2007. Vol. 19. P. 7-140.
- Shaw S., Pepper S.E., Bryan N.D. & Livens F.R.** The kinetics and mechanisms of goethite and hematite crystallization under alkaline conditions, and in the presence of phosphates // *Amer. Mineral.* 2005. Vol. 90. P. 1852-1860.
- Shearer C.K. & Larsen L.M.** Sector-zoned aegirine from the Ilimaussaq alkaline intrusion, South Greenland: Implications for trace-element behavior in pyroxene // *Amer. Mineral.* 1994. Vol. 79. P. 340-352.
- Shore M. & Fowler A.D.** Oscillatory zoning in minerals: a common phenomenon // *Canad. Mineral.* 1996. Vol. 34. P. 1111-1126.
- Sibley D.F., Vogel T.A., Walker B. M. & Byerly G.** The origin of oscillatory zoning in plagioclase: a diffusion and growth controlled model // *Amer. J. Sci.* 1976. Vol. 276. P. 275-284.
- Sloan E.D.** Introductory overview: hydrate knowledge development // *Amer. Mineral.* 2004. Vol. 89. P. 1155-1161.
- Spear F.S. & Selverstone J.** Quantitative P-T paths from zoned minerals: theory and tectonic applications // *Contrib. Mineral. Petrol.* 1983. Vol. 83. P. 348-357.
- Spear F.S., Selverstone J., Hickmott D. et al.** P-T paths from garnet zoning: a new technique for deciphering tectonic processes in crystalline terranes // *Geology.* 1984. Vol. 12. P. 87-90.
- Spry A.** *Metamorphic Textures.* Oxford: Pergamon Press Ltd. 1969. 350 p.
- Steele I.M.** Oscillatory zoning in meteoritic forsterite // *Amer. Mineral.* 1995. Vol. 80. P. 823-830.
- Strunz H. & Nickel E.H.** *Strunz mineralogical tables.* Stuttgart: 2001. 870 s.
- Sunagawa I. & Koshino Y.** Growth spirals on kaolin group minerals // *Amer. Mineral.* 1975. Vol. 60. P. 407-412.
- Swanson S.E.** Relation of nucleation and crystal-growth rate to the development of granitic textures // *Amer. Mineral.* 1977. Vol. 62. P. 966-978.
- Swanson S.E. & Fenn P.M.** Quartz crystallization in igneous rocks // *Amer. Mineral.* 1986. Vol. 71. P. 331-342.
- Tanaka T., Akizuki M. & Kudoh Y.** Optical properties and crystal structure of triclinic growth sectors in vesuvianite // *Mineral. Mag.* 2002. Vol. 66. P. 261-274.
- Tanaka T., Kimura N., Akizuki M. & Kudoh Y.** Origin of low-symmetry growth sectors in edingtonite and yugawaralite, and crystal structure of the  $k\{110\}$  and  $v\{120\}$  sectors of yugawaralite // *Mineral. Mag.* 2002. Vol. 66. P. 409-420.
- Tarney J.** Epitaxial relations between coexisting pyroxenes // *Mineral. Mag.* 1969. Vol. 37. P. 115-122.
- Taylor G.R.** A mechanism for fiamoid formation as illustrated by a volcanic exhalative sediment // *Mineral. Deposita.* 1982. Vol. 17. P. 23-36.
- Theriault R.D. & Fowler A.D.** Harrisitic textures in the Centre Hill complex, Munro Township, Ontario: products of diffusion limited growth // *Mineral. Petrol.* 1995. Vol. 54. P. 35-44.
- Thompson R.N.** Oscillatory and sector zoning in augite from a Vesuvian lava // *Carnegie Inst. Washington. Yearbook-72.* 1973. P. 463-470.
- Thornber C.R. & Huebner J.S.** Dissolution of olivine in basaltic liquids: experimental observations and applications // *Amer. Mineral.* 1985. Vol. 70. P. 934-945.
- Turner F.I.** Observation on twinning of plagioclase in metamorphic rocks // *Amer. Mineral.* 1951. Vol. 36. P. 581-589.
- Vavelidis M.** Framboidal pyrite from the Kuroko-type barite mineralization of the Katsimouti area, Milos Island, Greece // *Chem. Erde.* 1995. Vol. 55. P. 281-294.
- Veblen D.R. & Post J.E.** A TEM study of fibrous cuprite (chalcotrichite): microstructure and growth mechanisms // *Amer. Mineral.* 1983. Vol. 68. P. 790-803.
- Venables J.D.** Cleavage viskers // *J. Appl. Phys.* 1960. Vol. 31. P. 1501-1504.

**Vergilov Z. & Kostova B.** Composition, anatomy and growth mechanism of tourmalines from Vitosha pegmatites // *Годиш. Софийского ун-та «Св. К. Орхидски»*. 2000. Сер. геол. и географ. Т. 92. С. 105-119

**Vernon R.H.** Deformation and recrystallization of a plagioclase grains // *Amer. Mineral.* 1975. Vol. 60. P. 884-888.

**Wang Y. & Merino E.** Self-organizational model origin of agates: banding, fiber twisting, composition, and dynamic crystallization model // *Geochim. Cosmochim. Acta.* 1990. Vol. 54. P. 1627-1638.

**Ward C.M.** Titanium and the colour of staurolite // *Amer. Mineral.* 1984. Vol. 69. P. 541-545.

**Wass S.J.** The origin and petrogenetic significance of hour-glass zoning in titaniferous clinopyroxenes // *Mineral. Mag.* 1973. Vol. 39. № 302. P. 133-144.

**Watson E.B. & Liang Y.** A simple model for sector zoning in slowly grown crystals: Implications for growth rate and lattice diffusion, with emphasis on accessory minerals in crustal rocks // *Amer. Mineral.* 1995. Vol. 80. P. 1179-1187.

**Webb W.W., Dragsdorf B.D. & Forgang W.D.** Dislocation in whiskers // *Phys. Rev.* 1987. Vol. 108. P. 498-499.

**Webber K.L., Simmons W.B., Falster A.U. & Foord E.E.** Cooling rates and crystallization dynamics of shallow level pegmatite – aplite dikes, San Diego County, California // *Amer. Mineral.* 1999. Vol. 84. P. 708-717.

**Woodhead J.A., Rossman G.R. & Silver L.T.** The metamictization of zircon: radiation dose-dependant structural characteristics // *Amer. Mineral.* 1991. Vol. 76. P. 74-82.

**Wooster W.A.** A text- book on crystal physics. Cambridge University Press. 1938. 295 p.

**Yardley B.W.D., Rochelle C.A., Bancroft A.C. & Lloyd G.E.** Oscillatory zoning in metamorphic minerals an indicator of infiltration metamorphism // *Mineral. Mag.* 1991. Vol. 55. P. 357-365.

**Zaiser M. & Hähner P.** The flow stress of fractal dislocation arrangements // *Material Science and Engineering A.* 1999. Vol. 270. P. 299-307.

Zircon (eds. Hancler J.M., Hoskin P.W.O.) // *Rev. Mineral. Geochem.* 2004. Vol. 53. 500 p.

Zolensky M.E., Mackinnon J.D. Microstructures of cylindrical tochilinites // *Amer/Mineral.* 1986. Vol. 71. P. 1201-1209/

**Вопросы**  
**по разделу курса Генетическая минералогия –**  
**«Онтогенез и филогенез минералов»**

1. Элементы строения кристаллов минералов.
2. Движущая сила процессов кристаллизации. Процессы зарождения кристаллов.
3. Эпитаксия и автоэпитаксия. Кристаллы - скипетры.
4. Присыпки на поверхности кристаллов. Явления отравления поверхности кристаллов.
5. Ступени, вицинали, спирали и террасы роста на поверхности кристаллов.
6. Штриховки роста на гранях кристаллов. Как они ориентированы на кристаллах кварца, турмалина, пирита.
7. Формула де Бура. Следствия из этой формулы.
8. Рост кристаллов и процессы адсорбции. Типы массопереноса при росте кристаллов.
9. Механизмы роста кристаллов: нормальный рост. Что такое овоиды, нодули, орбикулы?
10. Механизмы роста кристаллов: дислокационный рост. Особенности кристаллов свободного роста.
11. Симметрия среды кристаллизации и огранка (форма) кристаллов. Принцип Пьера Кюри.
12. Протогенетические, сингенетические, эпигенетические включения в кристаллах.
13. Типы зональности кристаллов минералов.
14. Реальные скорости роста кристаллов и методы их определения.
15. Двойники роста. Почему их размер значительно больше, чем у сингенетических монокристаллов.
16. Типы скелетных кристаллов, причины их возникновения.



17. Нитевидные кристаллы. Механизмы их образования.
18. Мозаичные, блокованные, расщеплённые кристаллы. Причины их образования. Что такое железные розы?
19. Гетерометрия роста пирамид, секторов кристаллов, их участков. Сферокристаллы и причины их образования.
20. Кристаллы - дендриты. механизм их образования.
21. Скрученные кристаллы. Кристаллы - локоны.
22. Метакристаллы и порфиробласты. Отличия метакристаллов синтетических и послетектонических.
23. Формирование состава кристаллов.
24. Типы дефектов в кристаллах. Дефекты нестехиометрии. Отжиг и закалка дефектов. Дислокации – векторы роста кристаллов.
25. Механические деформации кристаллов. Спайность. Кинкбэнды. Механическая дифференциация вещества.
26. Явления растворения кристаллов. Ямки, конусы, вицинали травления.
27. Регенерация кристаллов.
28. Псевдоморфозы, их типы. Фитоморфозы, зооморфозы.
29. Друзы. Ортотропизм роста кристаллов в агрегатах. Его причины.
30. Явление геометрического отбора.
31. Параллельно-шестоватые агрегаты кристаллов 1 и 2 типа по Д.П. Григорьеву.
32. Типы минеральных агрегатов.
33. Агрегаты нитевидных кристаллов. Антолиты. Геликтиты. Мембраны.
34. Первичные поверхности роста кристаллов в их агрегатах.
35. Индукционные (компромиссные) поверхности кристаллов в их агрегатах.
36. Индукционные поверхности роста кристалл – сферолит и сферолит – сферолит.
37. Текстуры и структуры минеральных агрегатов.
38. Эвтектические структуры. Разделённые эвтектики.

39. Сферолиты и сфероидолиты. Кораллиты.